



Politechnika Wrocławska

DZIEDZINA: nauk inżynieryjno-technicznych

DYSCYPLINA: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne

Rozprawa doktorska

**WIELOKANAŁOWY SYSTEM POMIARU
ŁADUNKÓW W ZAKRESIE FEMTOKULOMBÓW
DO ZASTOSOWAŃ W DETEKTORACH
PROMIENIOWANIA RENTGENOWSKIEGO**

Mgr inż. Michał Babij

Promotor:

prof. dr hab. inż. Karol Malecha

Słowa kluczowe: ceramika LTCC, detektor GEM, płyta odczytu, elektroniczny układ pomiarowy, promieniowanie rentgenowskie, detektor promieniowania rentgenowskiego

Wrocław 2024

Chciałbym serdecznie podziękować:
Mojej żonie oraz rodzicom
za cierpliwość oraz wsparcie

Streszczenie

Gazowe detektory cząstek elementarnych (*MPGD, ang. Micro-Pattern Gaseous Detectors*) a w szczególności te oparte na strukturach gazowych powielaczy elektronów (*GEM, ang. Gas Electron Multiplier*) są obecnie jednym z najczęściej stosowanych typów detektorów w wielkich eksperymentach z dziedziny fizyki wysokich energii (*HEP, ang. High Energy Physics*). Urządzenia te po miniaturyzacji i uproszczeniu mogą być także zastosowane w dużo mniejszych instalacjach naukowych i przemysłowych. Pierwsze miniaturowe detektory oparte o technologie GEM zaczynają być stosowane także w aplikacjach kosmicznych.

Pierwszym zagadnieniem szczegółowo opisanym w rozprawie jest miniaturyzacja elektronicznego układu pomiaru ładunków, do zastosowania w detektorach MPGD w szczególności GEM. W przeprowadzonych pracach wykorzystane zostały także dedykowane podzespoły wykonane z niktotemperaturowej ceramiki współwypalanej (*LTCC, ang. Low Temperature Cofired Ceramics*), które umożliwiły znaczną redukcję rozmiarów urządzenia. Cechą charakterystyczną opracowanego rozwiązania było zastosowanie komercyjnie dostępnych elementów elektronicznych w tym układów scalonych, co zwiększa dostępność rozwiązania i obniża koszty.

Aby potwierdzić możliwość zastosowania ceramiki LTCC w układach wejściowych z ładunkami rzędu femtokulombów, opracowano oraz przetestowano dedykowane struktury. Zawierają one matrycę rezystorów stanowiących układ wejściowy konieczny dla poprawnej pracy zastosowanych układów przetwarzających ładunek na wartość cyfrową. Ze względu na brak na rynku past o dużej rezystywności (powyżej $1\text{ M}\Omega/\square$) zgodnych z systemem ceramicznym *DuPont* DP951 i umożliwiających wykonywanie rezystorów zagrzebanych, wykorzystane zostały pasty do rezystorów powierzchniowych. Wymagało to przeprowadzenia ich charakteryzacji oraz walidacji możliwości ich zastosowania.

W wyniku przeprowadzonych prac, opracowano i wytworzono struktury LTCC o zakładanych parametrach. Struktury te zostały zintegrowane z dedykowanym elektronicznym układem pomiaru ładunków w ramach funkcjonalnego detektora GEM. Wykonano serie pomiarów za pomocą opracowanego urządzenia i określono jego parametry takie jak poziom szumu, wzmocnienie i rozdzielczość. Są one porównywalne z innymi rozwiązaniami i potwierdzają zasadność opracowanej konstrukcji w tym zastosowania elementów z ceramiki LTCC.

Drugim zagadnieniem badawczym było opracowanie, wykonanie testów i porównanie parametrów płyt odczytu wykonywanych w różnych technologiach. W ramach doktoratu porównywane były struktury wykonane z: kompozytu warstw poliimidowych z laminatem FR4, ceramiki LTCC oraz laminatu FR4 w klasycznej technologii obwodów drukowanych (*PCB, ang. Printed Circuit Board*). Na podstawie uzyskanych wyników, określono parametry poszczególnych rozwiązań, ograniczenia danych

technologii, oraz potencjalne aplikacje i zastosowania dla różnych typów płyt odczytu.

Badania potwierdziły możliwość wykorzystania opracowanych struktur zbierających ładunki (*CCS, ang. Charge Collection Structure*) w miniaturowych detektorach GEM, także do zastosowań kosmicznych.

Abstract

Micro-Pattern Gaseous Detectors (*MPGD*), especially those based on Gas Electron Multiplier (*GEM*) structures, are currently one of the most commonly used types of detectors in large-scale High Energy Physics (*HEP*) experiments. These devices, after miniaturization and simplification, can also be used in much smaller scientific and industrial installations. The first miniature detectors based on GEM technology are beginning to be used also in space applications.

The first issue described in detail in the thesis is the miniaturization of the electronic charge measurement system for use in MPGD detectors, especially GEM. In the work carried out, dedicated components made out of Low Temperature Co-fired Ceramics (*LTCC*) were also used, which allowed for a significant reduction in the size of the device. The characteristic feature of the developed solution was the use of commercially available electronic components, including integrated circuits, which increases the availability of the solution and reduces costs.

To confirm the possibility of using LTCC ceramics in input systems with femtocoulomb charges, dedicated structures were developed and tested. They contain a matrix of resistors constituting the input system necessary for the correct operation of the systems used to convert the charge into a digital value. Due to the lack of high-resistivity pastes (over $1 \text{ M}\Omega/\square$) on the market compatible with the *DuPont* DP951 system and enabling the production of buried resistors, pastes for surface resistors were used. This required their characterization and validation of the possibility of their use.

As a result of the work carried out, LTCC structures with assumed parameters were developed and manufactured. These structures were integrated with a dedicated electronic charge measurement system within the functional GEM detector. A series of measurements were performed using the developed device and its parameters such as noise level, gain, and resolution were determined. They are comparable to other solutions and confirm the validity of the developed design, including the use of LTCC ceramic components.

The second research issue was to develop, test, and compare the parameters of readout boards made in different technologies. As part of the doctoral thesis, structures made of a composite of polyimide layers with FR4 laminate, LTCC ceramics, and FR4 laminate in classic Printed Circuit board (*PCB*) technology were compared. Based on the obtained results, the parameters of individual solutions, limitations of individual technologies, and potential applications and uses for a given type of reading plate were determined.

The research confirmed the possibility of using the developed charge collection structures (*CCS*) in miniature GEM detectors, also for space applications.

Spis treści

Spis rysunków	XI
Spis tabel	XVII
Spis akronimów	XIX
Rozdział 1. Cel i zakres pracy	1
Rozdział 2. Gazowe detektory cząstek elementarnych oparte o mikrostruktury	5
2.1. Przegląd technologii detektorów MPGD	6
2.2. Elektroniczne układy pomiaru ładunku w detektorach GEM	14
2.2.1. Zalety i wady poszczególnych rozwiązań	19
2.3. Struktury zbierające ładunki - płyty odczytu	21
2.3.1. Budowa i geometria wybranych dwuwymiarowych układów CCS	21
2.3.2. Podłoża i technologie stosowane do wytwarzania płyt odczytu	30
Rozdział 3. Miniaturowy elektroniczny układ pomiaru ładunków dla detektorów GEM	33
3.1. Koncepcja układu elektronicznego	33
3.2. Charakteryzacja past rezystywnych	36
3.3. Układy wejściowe wykonane w technologii LTCC	41
3.4. Opracowanie elektronicznego układu pomiarowego i integracja detektora GEM	50
3.5. Pomiary	54
3.6. Wnioski	60
Rozdział 4. Opracowanie i porównanie struktur odczytu wykonanych w wybranych technologiach	63
4.1. Płyty odczytu wykonane z ceramiki LTCC	63
4.1.1. Projekt	64
4.1.2. Pomiary	67
4.2. Płyty odczytu wykonane na podłożach FR4 w klasycznej technologii PCB	74
4.2.1. Projekt	75
4.2.2. Pomiary	78
4.3. Wnioski i porównanie parametrów opracowanych struktur CCS	80
Rozdział 5. Podsumowanie	83
Bibliografia	87
Opublikowane prace	97

Oświadczenia współautorów	171
--	------------

Spis rysunków

1.1.	Liczba nanosatelit wynoszonych w kosmos z podziałem na lata	1
2.1.	Główne typy mikro-strukturyzowanych gazowych detektorów promieniowania (MPGD)	6
2.2.	Detektor typu Micromegas: a) schemat detektora wraz z zobrażowaną ideą działania, b) zdjęcie fragmentu mikrosiatki umieszczonej na wsporniku	7
2.3.	Detektor typu Bulk Micromegas: a) schemat procesu produkcyjnego, b) zdjęcie przedstawiające siatkę wraz ze słupkami podtrzymującym	7
2.4.	Struktura detektora typu InGrid: a) obraz z mikroskopu elektronowego przedstawiający strukturę detektora, b) zdjęcie powierzchni siatki	8
2.5.	Folia GEM: a) obraz folii GEM wykonany za pomocą mikroskopu elektronowego, b) Schemat działania folii GEM - tworzenie się lawiny w pojedynczym otworze	9
2.6.	Detektor GEM: a) Zdjęcie przykładowej folii GEM 100 x 100 mm ² na ramce, b) Przekrój przykładowego detektora GEM z zobrażowanym mechanizmem detekcji i wzmacniania ładunku	9
2.7.	Struktury wzmacniające typu THGEM: a) obraz mikroskopowy fragmentu wzoru struktury THGEM wraz z wymiarami, b) zdjęcie struktury THGEM o wymiarach 32 x 32 mm ² (w tle płyta odczytu)	10
2.8.	Struktura wzmacniająca typu G-GEM: a) zdjęcie szklanej struktury GEM o wymiarach 100 x 100 mm ² , b) obraz mikroskopowy fragmentu struktury C-GEM	11
2.9.	Struktura wzmacniająca typu Ceramic GEM: a) zdjęcie ceramicznej folii GEM o wymiarach 100 x 100 mm ² , b) Obraz mikroskopowy powierzchni struktury z widocznymi otworami, c) obraz mikroskopowy przekroju struktury	12
2.10.	Struktura wzmacniająca typu μ RWell: a) schemat budowy struktury, b) zasada działania na przykładzie pojedynczej studni	13
2.11.	Zdjęcia płyty odczytu z paskami zigzag: a) obraz mikroskopowy fragmentu wzoru struktury zigzag, b) zdjęcie płyty odczytu zigzag 100 x 100 mm ²	14
2.12.	Układ scalony APV25: a) obraz mikroskopowy struktury układu, b) zdjęcie obwodów drukowanych zawierających struktury APV25	15
2.13.	Układ scalony VMM3: a) obraz mikroskopowy struktury układu, b) zdjęcie obwodu drukowanego zawierającego struktury VMM3	16
2.14.	Układ scalony TIGER: a) obraz mikroskopowy struktury układu, b) zdjęcie struktury TIGER z połączeniami drutowymi	16
2.15.	Układ scalony GEMROC: a) wizualizacja układu w obudowie TQFP160, b) zdjęcie obwodu drukowanego zawierającego struktury GEMROC	17

2.16. Minimalna konfiguracja systemu SRS: a) schemat przedstawiający wykorzystane moduły i ich połączenie, b) zdjęcie detektora GEM 100 x 1000 mm^2 wraz z systemem SRS	18
2.17. Zdjęcie opracowanego w AGH układu pomiarowego bazującego na strukturach GEMROC, wraz z detektorem GEM o wymiarach 100 x 100 mm^2	19
2.18. Płyty odczytu typu zigzag: a) rysunek przedstawiający mechanizm rozplywu ładunku, b) wykres rozdzielczości płyt odczytu zigzag w porównaniu do paskowych płyt odczytu dla różnych rastrów wzoru	22
2.19. Zdjęcia płyty odczytu z paskami zigzag: a) obraz mikroskopowy fragmentu wzoru struktury zigzag, b) zdjęcie płyty odczytu zigzag 100 x 100 mm^2	22
2.20. Płyty odczytu typu zigzag: a) rysunek przedstawiający mechanizm rozplywu ładunku, b) wykres rozdzielczości płyt odczytu zigzag w porównaniu do paskowych płyt odczytu dla różnych rastrów wzoru	23
2.21. Płyta odczytu 2D z paskami XY: a) schemat struktury odczytu XY, b) mikroskopowy obraz płyty odczytu 2D XY	24
2.22. Fragment projektu płyty odczytu 2D z układem pasków i pikseli (warstwa górna jest koloru niebieskiego, zaś warstwa wewnętrzna koloru różowego)	25
2.23. Płyta odczytu 2D z paskami i pikselami: a) mikroskopowy obraz struktury, b) kompletna płyta odczytu 100 x 100 mm^2	25
2.24. Detektor z odczytem pikselowym (padowym) dla eksperymentu ALICE: a) schemat detektora z płytą zawierającą prostokątne piksele, b) zdjęcie płyty odczytu wraz z diagramem przedstawiającym wymiary pikseli	26
2.25. Pikselowa płyta odczytu XY: a) schemat detektora GEM, b) schemat układu połączeń pikselowej płyty XY	27
2.26. Płyta odczytu XYU: a) projekt płyty o wymiarach 100 x 100 mm^2 , b) przekrój obwodu, oraz zdjęcie mikroskopowe wykonanej struktury	28
2.27. Zdjęcie mikroskopowe struktury płyty odczytu UVW	28
2.28. Płyta odczytu XYU z warstwami rozprzewadzającymi ładunek: a) projekt płyty o wymiarach 100 x 100 mm^2 , b) przybliżenie fragmentu projektu struktury, uwidaczniające linie XYU	29
2.29. Płyta odczytu typu rezystancyjnego: a) struktura elementarnej komórki odczytu z zobrazowanym mechanizmem rozchodzenia się ładunku, b) Zdjęcie płyty odczytu o wymiarach 88 x 88 mm^2	30
3.1. Schemat blokowy detektora SGEM	35
3.2. Szczegółowy schemat blokowy opracowanych modułów detektora SGEM	36
3.3. Zdjęcia próbek do charakteryzacji past rezystancyjnych: a) niewypalone podłoże LTCC z nadrukowaną metalizacją oraz rezystorami, b) wypalony układ LTCC	37
3.4. Wyniki tomografii rentgenowskiej wytworzonych próbek: a) prześwietlenie ukazujące defekty w rezystorach, b) rekonstrukcja 3D rezystorów grubowarstwowych	38

3.5. Profile temperaturowe zastosowane podczas wypalania próbek: a) rekomendowany przez producenta ceramiki DP951, b) dwuetapowy proces wypalania	39
3.6. Wyniki pomiarów rezystorów o szerokości 0,3 mm i 0,6 mm na próbkach kalibracyjnych wykonanych z past: a) DuPont 2061, b) DuPont 2071	41
3.7. Schemat: a) ceramicznego układu wejściowego, b) przetwornika ładunku na napięcie, będącego częścią układu DDC264	42
3.8. Poszczególne warstwy układu po nadrukowaniu połączeń metalicznych i rezystorów	44
3.9. Ceramiczny układ wejściowy: a) formatka zawierająca 4 struktury, b) wymiary ceramicznego układu wejściowego	47
3.10. Gotowy, ceramiczny układ wejściowy: a) góra strona układu - widoczne złącze do płyty odczytu, b) dolna strona struktury - widoczna jest matryca kulek BGA umożliwiających montaż do modułu przetwarzającego ładunki	48
3.11. Rozwarstwienia i delaminacje w ceramicznych układach wejściowych: a) delaminacja powodująca odseparowanie fragmentu struktury, b) przykładowe przekroje ukazujące pęknięcia układu ceramicznego uwidocznione na linii rezystorów (zaznaczone czerwoną strzałką)	49
3.12. Moduł przekształcający ładunek na wartość cyfrową: a) projekt PCB, b) wizualizacja	51
3.13. Moduł zasilania i BIAS: a) projekt PCB, b) wizualizacja	52
3.14. Zdjęcia zmontowanych urządzeń elektronicznych: a) Moduł przetwarzający ładunki, b) Moduł zasilania i BIAS	53
3.15. Detektor GEM podczas integracji, a) płyta bazowa z elementami detektora, b) moduł z płytą odczytu i elektronicznym układem pomiarowym	54
3.16. Niemal kompletny detektor GEM (bez górnej pokrywy) - widoczne są ramki komory gazowej i stos GEM	54
3.17. Poziom szumu systemu mierzącego ładunki bez podłączonej płyty odczytu, osobno dla każdego kanału: a) amplituda szumu, b) wartość RMS	55
3.18. Poziom szumu detektora z płytą odczytu, osobno dla każdego kanału: a) amplituda szumu, b) wartość RMS	56
3.19. Wykres odchylenia wartości BIAS dla każdego kanału z osobna, względem średniej wartości BIAS	57
3.20. Testy X-Ray opracowanego detektora GEM: a) zrekonstruowany radiogram, b) prześwietlane elementy	59
3.21. Przykładowe widmo energetyczne zarejestrowane przez detektor	60
4.1. Projekt układu elektrod płyt odczytu LTCC o wymiarach 20,3 x 20,2 mm ² : a) wymiary zewnętrzne struktury oraz wymiary obszaru aktywnego, b) wymiary elektrod i odstępów pomiędzy nimi	65

4.2. Schemat przekroju poprzecznego dwóch wariantów strukturalnych płyt odczytu LTCC: a) z warstwą dielektryczną nadrukowaną sitodrukiem na której nadrukowane są linie X (SS, ang. Single Substrate), b) z elektrodami nadrukowanymi na oddzielnych podłożach LTCC ułożonych w stos (MS, ang. Multi Substrate)	65
4.3. Projekt płyty odczytu LTCC o wymiarach 70 x 70 mm ² : a) wymiary struktury, b) przybliżenie obrazujące kluczowe elementy struktury (wartości w mm)	66
4.4. Płyta bazowa PCB do testowania ceramicznych struktur odczytu, a) płyta bazowa ze złączami, b) płyta bazowa z podłączoną płytą odczytu LTCC (w adapterze)	67
4.5. Układ do testowania ceramicznych płyt odczytu: a) płyta bazowa z płytą odczytu LTCC 70 x 70 mm ² i ramkami do stosu GEM, b) płyta bazowa z płytą odczytu, stosem GEM oraz z ramką komory gazowej detektora	68
4.6. Obrazy struktur wykonanych dwiema metodami: a) z warstwą dielektryczną naniesioną metodą sitodruku (SS-GD), b) z izolacją wykonaną z folii LTCC (MS)	68
4.7. Obrazy struktur po współwypalaniu: a) płyta MS o wymiarach 20 × 20 mm ² z drobnym odstępem 300 μm, b) płyta odczytu MS o wymiarach 70 × 70 mm ² odstępem 500 μm	69
4.8. Obrazy rentgenowskie wykonane przy użyciu badanych płyt odczytu: a) radiogram zmierzony na płycie MS 20 × 20 mm ² , b) przedmioty umieszczone na detektorze do testów płyty 20 × 20 mm ² , c) radiogram zmierzony na płycie MS 70 × 70 mm ² , d) przedmioty umieszczone na detektorze do testów płyty 70 × 70 mm ² , e) radiogram zmierzony na płycie CERN 100 × 100 mm ² , f) przedmioty umieszczone na detektorze do testów płyty CERN 100 × 100 mm ²	71
4.9. Aproksymacja funkcją Gaussa ładunku zdarzeń płyty odczytu LTCC MS o wymiarach 70 × 70 mm ² : a) paski górne (oś X), b) paski dolne (oś Y)	73
4.10. Projekt płyty odczytu (czerwony oznacza warstwę górną, a żółty oznacza warstwę wewnętrzną: a) linie osi X i pady osi Y z połączeniami między pikselami wykonanymi na warstwie wewnętrznej nr 1, (b) wymiary poszczególnych elementów wzoru	75
4.11. Zdjęcia płyty odczytu o wymiarach 70 × 70 mm ² wykonanej w technologii PCB: a) strona górna zawierająca elektrody odczytu, b) strona dolna zawierająca złącza do modułu przetwarzającego ładunki	77
4.12. Łączenie segmentowych płyt odczytu: a) wizualizacja tworzenia płyty odczytu z wykorzystaniem 4 segmentów, b) obwody służące do połączenia 4 segmentów	77
4.13. Zdjęcia płyty odczytu o wymiarach 70 × 70 mm ² wykonanej w technologii PCB: a) strona górna zawierająca elektrody odczytu, b) strona dolna zawierająca złącza do modułu przetwarzającego ładunki	78

4.14. Porównanie radiogramów zmierzonych przy użyciu różnych płyt odczytu: a)	
radiogram zmierzony na płycie PCB $70 \times 70 \text{ mm}^2$ (128 $\times$ 127 kanałów), b)	
radiogram zmierzony na płycie PCB $70 \times 70 \text{ mm}^2$ (używając tylko 64 $\times$	
63 kanałów), c) radiogram zmierzony na płycie CERN $100 \times 100 \text{ mm}^2$, d)	
obiekty umieszczone na detektorze do testów płyt odczytu	79

Spis tabel

2.1. Porównanie parametrów wybranych układów scalonych do detektorów GEM	20
2.2. Porównanie parametrów najpopularniejszych typów płyt odczytu	31
3.1. Pasty rezystywne kompatybilne z podłożami DP951 wraz z parametrami	37
3.2. Wyniki pomiarów rezystorów o szerokości 0,3 mm na próbkach kalibracyjnych wykonanych z past: Herause 9181, DuPont 2061 oraz DuPont 2071	40
3.3. Statystyczny opis wartości rezystancji na podstawie pomiarów wykonanych dla przykładowej struktury wejściowej LTCC	50
3.4. Wartości rezystancji poszczególnych wyprowadzeń dzielnika HV oraz wartości napięć i natężeń pól elektrycznych poszczególnych obszarów detektora GEM	57
4.1. Charakterystyki szumowe detektora z badanymi płytami odczytu	70
4.2. Rozkład ładunku pomiędzy górnymi i dolnymi elektrodami opracowanych płyt odczytu LTCC w porównaniu z płytą CERN	73
4.3. Rozkład ładunku pomiędzy górnymi i dolnymi elektrodami płyty odczytu PCB w porównaniu z płytą CERN	80

Spis akronimów

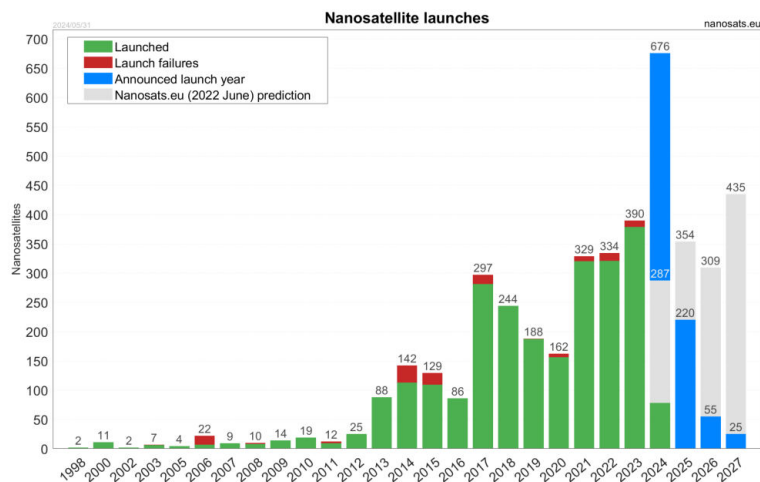
Akronim	Nazwa angielska	Nazwa polska
2D	Two Dimensional	dwuwymiarowy
ADC	Analog to Digital Converter	przetwornik analogowo-cyfrowy
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit	specjalizowany układ scalony
BGA	Ball Grid Array	obudowa z wyprowadzeniami sferycznymi w siatce rastrowej
CERN	European Organization for Nuclear Research	Europejska Organizacja Badań Jądrowych
CCS	Charge Collection Structure	struktura zbierająca ładunki
CT	Computed Tomography	tomografia komputerowa
CTE	coefficient of thermal expansion	współczynnik rozszerzalności cieplnej
DAC	Digital-to-Analog Converter	przetwornik cyfrowo-analogowy
DC	Direct Current	prąd stały
DLC	Diamond-like Carbon	węgiel diamentopodobny
DP	DuPont™	folia ceramiczna firmy DuPont™
FR4	glass-reinforced epoxy laminate	laminat szklano-epoksydowy
FPGA	field-programmable gate array	Bezpośrednio programowalna macierz bramek
GEM	Gas Electron Multiplier	gazowy powielacz elektronów
GEMS	Gravity and Extreme Magnetism Small Explorer	obserwatorium GEMS
HEP	High Energy Physics	fizyka wysokich energii
HTCC	High Temperature Cofired Ceramics	wysokotemperaturowa ceramika współwypalana
HV	High Voltage	wysokie napięcie

Akronim	Nazwa angielska	Nazwa polska
IC	Integrated Circuit	układ scalony
ITO	Indium Tin Oxide	tlenek indowo-cynkowy
IXPE	Imaging X-ray Polarimetry Explorer	obserwatorium IXPE
LDO	Low-dropout regulator	stabilizator o niskim spadku napięcia
LTCC	Low Temperature Cofired Ceramics	niskotemperaturowa ceramika współwypalana
MCV	Micro-Chemical-Vias	mikrootwory trawione chemicznie
MPGD	Micro-Pattern Gaseous Detectors	gazowe detektory promieniowania oparte o mikrostruktury
MSGC	Micro-Strip Gas Chamber	mikropaskowa komora gazowa
MWPC	Multiwire Proportional Chamber	wielodrutowa komora proporcjonalna
PCB	Printed Circuit Board	obwód drukowany
PI	polyimide	poliimid
SMT	Surface Mount Technology	technologia montażu powierzchniowego
SMU	Source Measure Unit	źródło mierzące
THGEM	Thick Gas Electron Multiplier	Gruba struktura GEM
TPC	Time Projection Chamber	komora projekcji czasowej
X-Ray	X-Ray	promieniowanie rentgenowskie, promieniownie X
XRF	X-ray fluorescence	fluorescencja rentgenowska
μ RWELL	micro-Resistive WELL	rezystancyjne mikrostruktury studniowe

Rozdział 1

Cel i zakres pracy

Miniaturyzacja jest zjawiskiem powszechnym w wielu dziedzinach nauki i wysoce pożądanym. Ma zastosowanie w szeroko rozumianej elektronice, urządzeniach pomiarowych, badawczych, medycynie itp. Miniaturyzacja, dzięki obniżeniu rozmiarów i wagi komponentów w tym m.in. czujników umożliwia zastosowanie ich w nowych aplikacjach, w tym ich integrację z innymi urządzeniami. Prawdopodobnie najpopularniejszym przykładem tego zjawiska są telefony komórkowe. Urządzenia te wykorzystują wiele zminiaturyzowanych technologii w tym np. mikromechaniczne akceleratory. Innym przykładem są nanosatellity typu CubeSat [1]. Satelity te mają ustandaryzowane wymiary, które są wielokrotnością wymiarów komórki podstawowej 1 U (*ang. Unit*) - $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$. Waga w przeliczeniu na 1U nie może przekraczać 1,33 kg. Opracowanie miniaturowej platformy satelitarnej oraz urządzeń pokładowych w tym czujników umożliwiło znaczną redukcję kosztów misji kosmicznych, oraz spowodowało popularyzację tej technologii. Wykres przedstawiający liczbę nanosatellit wynoszonych w kosmos w poszczególnych latach został przedstawiony na rysunku 1.1 [2].



Rysunek 1.1. Liczba nanosatellit wynoszonych w kosmos z podziałem na lata [2]

Śledząc rozwój sektora kosmicznych zauważono, że pomimo stosowania coraz większej ilości czujników na mikrosatelitach, gazowe detektory promieniowania są nadal sporadycznie stosowane w misjach kosmicznych.

Ze względu na tematykę doktoratu wdrożeniowego oraz realizowanych przez doktoranta projektów skupiono się na miniaturyzacji gazowych detektorów promieniowania jonizującego opartych o technologię gazowych powielaczy elektronów (*GEM*, ang. *Gas Electron Multiplier*). Dotychczas powstało jedynie kilka wysoce wyspecjalizowanych, miniaturowych detektorów ze strukturami GEM, które zostały wykorzystane w misjach kosmicznych. Najświeższym przykładem jest misja IXPE (ang. *Imaging X-ray Polarimetry Explorer*) [3, 4]. Satelita zawiera detektor do pomiaru polaryzacji, oparty na strukturze GEM i dedykowanym układzie scalonym w systemie pomiarowym. Układ ten został opracowany specjalnie na potrzeby tego przyrządu. Drugim przykładem jest misja kosmiczna GEMS (ang. *Gravity and Extreme Magnetism Small Explorer*) [5, 6]. Satelita ten wyposażony jest w detektor zawierający 4 folie GEM oraz ceramiczną płytę odczytu. Zastosowano w nim układ scalony APV25 opracowany m.in. na potrzeby CERN. Układ ten jest układem podwójnego zastosowania, przez co jego dostępność jest wysoce ograniczona. Na rynku naukowym oraz w komercyjnym sektorze kosmicznym brakuje tanich, uniwersalnych i miniaturowych detektorów promieniowania, zawierających komercyjnie dostępne elementy.

Celem badań realizowanych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej było **opracowanie konstrukcji i technologii wytwarzania miniaturowego i wielokanałowego systemu pomiaru ładunków oraz miniaturowych płyt odczytu** do zastosowań w detektorach promieniowania rentgenowskiego.

Jednym z kluczowych elementów detektora GEM jest płyta odczytu. Odpowiada ona za zbieranie ładunków z elementu wzmacniającego detektora, w taki sposób aby możliwe było wyznaczenie położenia poszczególnych zdarzeń. Typowo płyty odczytu wykonuje się w technologii obwodów drukowanych (*PCB*, ang. *Printed Circuit Board*) z laminatu FR4 i folii polimidowych, jednak rozwiązanie to posiada pewne wady - płyty te nie są odporne na wysoką temperaturę, materiał bazowy uwalnia cząstki gazu, co utrudnia wykonanie hermetycznego detektora, a sama metoda produkcji jest chroniona poprzez patent. Dlatego zdecydowano się na opracowanie technologii płyt odczytu z zastosowaniem niskotemperaturowej ceramiki współwypalanej (*LTCC*, ang. *Low Temperature Co-fired Ceramics*)

Niskotemperaturowa ceramika współwypalana (*LTCC*), ze względu na wysoką rezystywność powierzchniową i objętościową jest materiałem bardzo dobrze nadającym się do wykonywania płyt odczytu oraz układów wejściowych do detektorów GEM. Możliwość wytwarzania wielowarstwowych struktur z rezystorami o rezystan-

cji rzędu dziesiątek megaomów pozwala na osiągnięcie dużego stopnia miniaturyzacji tego typu układów. Opracowanie technologii produkcji struktur z ceramiki LTCC wiązało się także z koniecznością eliminacji lub niwelacji niepożądanych zjawisk takich jak: nierównomierny skurcz ceramiki, delaminacje, duży rozrzut parametrów rezystorów, pofalowanie powierzchni ceramiki itp. Ze względu na wielowarstwową i gęstą strukturę niemożliwe było korygowanie rezystorów do zadanych wartości przy użyciu lasera lub podobnych technik.

Prace badawcze przedstawione w niniejszej rozprawie skupiały się na:

1. Opracowaniu technologii wykonywania wielowarstwowych układów wejściowych zawierających 128 rezystorów o wartości rzędu 30 M Ω i 128 rezystorów o wartości rzędu 0,5 M Ω mieszczących się na podłożu o wymiarach: 52 x 11 mm².
2. Rozwinięciu technologii oraz konstrukcji miniaturowego układu pomiarowego dla detektorów GEM. Głównym celem była miniaturyzacja całego detektora GEM, tak by mógłby być zastosowany w aplikacjach wymagających detektora o małych rozmiarach.
3. Opracowaniu technologii ceramicznych płyt odczytu oraz ich dokładnej charakteryzacji. Głównym założeniem było wykorzystanie materiałów kompatybilnych próżniowo i odpowiednich do zastosowań kosmicznych. Jednym z celów było opracowanie elementu detektora który mogłyby być zintegrowany z nanosatelitami typu CubeSat.
4. Zaprojektowaniu i charakteryzacji uproszczonej płyty odczytu na podłożu FR4, która może być wykonana w klasycznym procesie produkcji obwodów drukowanych. Założeniem projektowym było osiągnięcie jak największej rozdzielczości przy stosunkowo niskim koszcie produkcji.

Rozdział drugi rozpoczyna się od przeglądu najpopularniejszych typów gazowych detektorów cząstek bazujących na mikrostrukturach. Zawiera on także opis zagadnień związanych z budową i działaniem detektorów GEM, a w szczególności, elektronicznych układów pomiaru ładunków i struktur zbierających ładunki (płyt odczytu). Omówiona została budowa i parametry wybranych scalonych przetworników ładunków na wartości cyfrowe używane w detektorach GEM. Na końcu rozdziału przedstawiono materiały oraz geometrie dwuwymiarowych układów zbierających ładunki (płyty odczytu).

W rozdziale trzecim zaprezentowano i opisano badania mające na celu opracowanie miniaturowego układu pomiaru ładunków w zakresie femtokulombów, dedykowanego do detektorów GEM. Omówiono schemat blokowy, koncepcję urządzenia oraz wytypowano elementy składowe. Integralną częścią prac było zaprojektowanie i wykonanie ceramicznych układów wejściowych. Opracowanie tych struktur umożliwiło osiągnięcie zakładanego poziomu miniaturyzacji całego urządzenia. W roz-

dziale tym opisano proces opracowywania tych układów, wraz z opisem technologii ich wytwarzania. Przedstawiono także metodę charakteryzacji past rezystancyjnych. Omówiony został proces opracowywania układu elektronicznego oraz jego integracja z detektorem GEM. Zaprezentowane zostały także wyniki pomiarów wraz z opisem metod pomiarowych.

Rozdział czwarty dotyczy technologii wytwarzania miniaturowych płyt odczytu. W ramach prac przetestowane zostały dwie mocno różniące się technologie wielowarstwowych układów zbierających ładunki: technologia LTCC oraz klasyczny proces wytwarzania obwodów drukowanych. Pierwsza metoda pozwala na wykonywanie płyt odczytu o bardzo stabilnych parametrach, druga zaś na szybką produkcję tańszych płyt odczytu do mniej wymagających aplikacji. W rozdziale tym opisano proces projektowania struktur oraz ich charakteryzacji. Na końcu rozdziału znajduje się porównanie parametrów osiągniętych przez poszczególne technologie płyt odczytu oraz wnioski.

Całość rozprawy została podsumowana w rozdziale piątym. Bibliografia zawiera materiały źródłowe wykorzystane we współautorskich publikacjach, a także dodatkowe pozycje literaturowe ściśle związane z przedmiotem badań i tematyką niniejszej pracy. Bibliografia zawiera łącznie 96 pozycji.

Rozprawa stanowi przewodnik i uzupełnienie informacji zawartych w **sześciu** publikacjach, których współautorem jest autor niniejszej rozprawy.

Rozdział 2

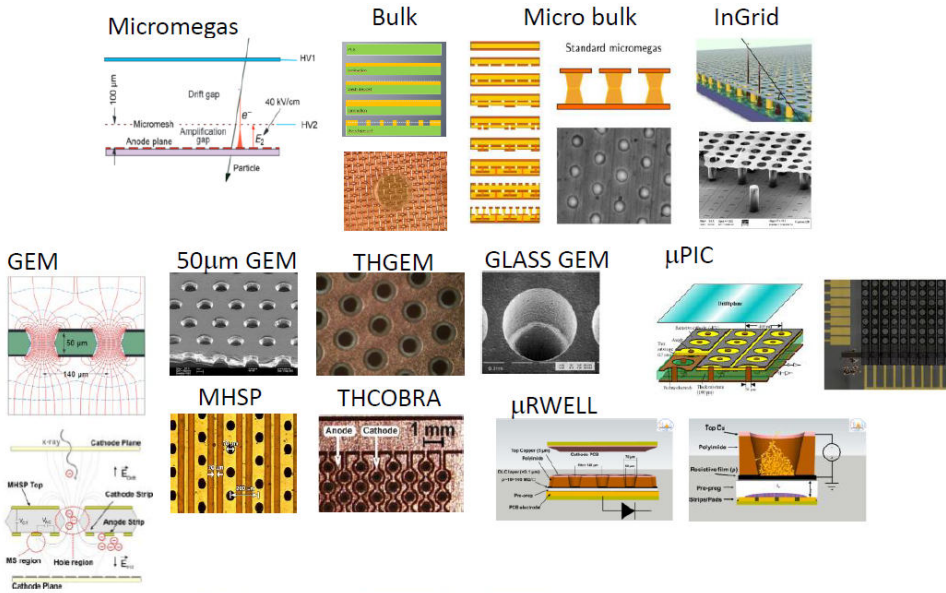
Gazowe detektory cząstek elementarnych oparte o mikrostruktury

W 1968 roku Georges Sharpak (fizyk polskiego pochodzenia) z Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych (*CERN*, ang. *European Organization for Nuclear Research*) wynalazł a następnie rozwinął wielodrutową komorę proporcjonalną (*MWPC*, ang. *Multiwire Proportional Chamber*). Wynalazek ten zrewolucjonizował urządzenia badawcze stosowane w laboratoriach fizyki wysokiej energii (*HEP*, ang. *High Energy Physics*), ze względu na możliwość szybkiej detekcji i lokalizacji bardzo małych chmur ładunków wytworzonych w gazie przez promieniowanie jonizujące [7]. Za wynalazek ten, w 1992 roku otrzymał nagrodę Nobla. Technologia ta pomimo ciągłego rozwoju miała ograniczenia konstrukcyjne związane z uginaniem się długich i cienkich drutów.

Pomysł George Sharpaka twórczo rozwinął Anton Oed. Opracował on nowy typ detektora - mikropaskową komorę gazową (*MSGC*, ang. *Micro-Strip Gas Chamber*) [8]. Koncepcja ta została przedstawiona w 1988 roku. Był to pierwszy detektor z rodziny mikro-strukturyzowanych detektorów gazowych (*MPGD*). Koncept ten zakładał wykorzystanie dobrze znanych technik mikroelektronicznych, co pozwoliło na uproszczenie technologii produkcji tych urządzeń oraz na ograniczenie kosztów produkcji [9]. Zmniejszenie odstępów pomiędzy elektrodami pozytywnie wpłynęło na rozdzielczość przestrzenną, oraz zwiększyło szybkość detekcji.

W kolejnych latach powstawały nowe typy detektorów wykorzystujące mikro-struktury. W 1997 roku Fabio Sauli opracował koncepcję detektora opartego na gazowych powielaczach elektronów (GEM) [10]. Powstały też kolejne podtypy takie jak grube struktury GEM (*THGEM*, ang. *Thick Gas Electron Multiplier*), szklane struktury GEM (ang. *Glass GEM*), ceramiczne struktury GEM (ang. *Ceramic GEM*) oraz rezystancyjne mikrostruktury studniowe (μ RWell, ang. *micro-Resistive WELL*). W 1996 roku Y. Giomataris przedstawił koncepcję detektora MICROME-GAS [11], zawierające mikrosiatkę (ang. *micromesh*) jako stopień wzmacniający. Na jego podstawie powstały podtypy takie jak Bulk, Micro Bulk oraz InGrid. Rodzina detektorów MPGD jest jednak znacznie obszerniejsza. Najpopularniejsze z nich zostały opisane w następnym rozdziale. Diagram zawierający główne typy

mikro-strukturyzowanych gazowych detektorów promieniowania (MPGD) przedstawiono na rysunku 2.1 [12].



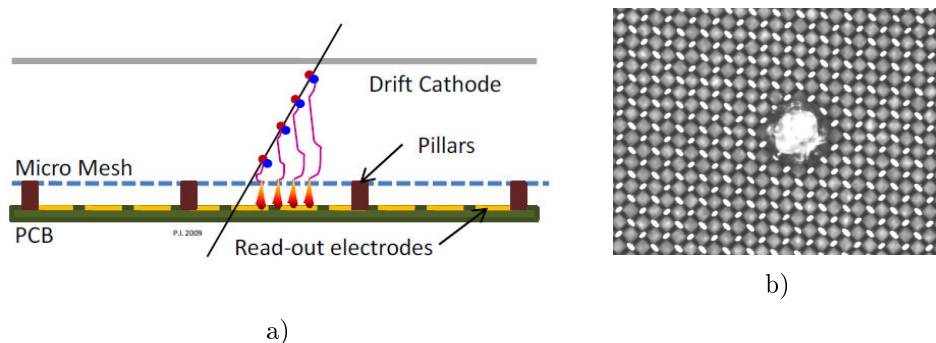
Rysunek 2.1. Głównie typy mikro-strukturyzowanych gazowych detektorów promieniowania (MPGD) [12]

2.1. Przegląd technologii detektorów MPGD

W tym podrozdziale opisane zostały najpopularniejsze typy detektorów MPGD. Największy nacisk został położony na detektory typu GEM, ponieważ ta technologia została wykorzystana do przetestowania elektronicznego systemu pomiarowego opracowanego w ramach rozprawy.

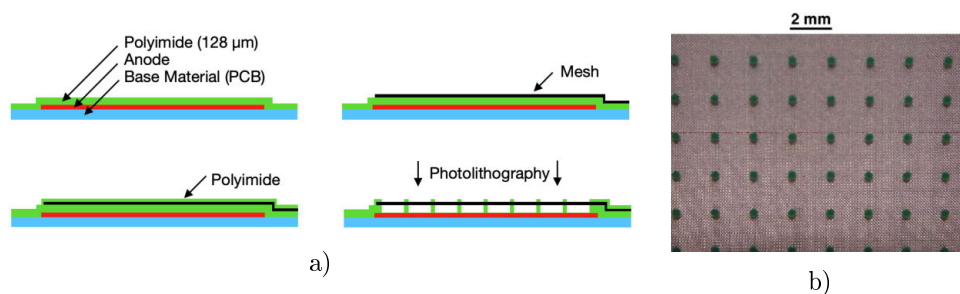
Pierwszym opisywanym typem detektora jest **Micromegas** znany także jako gazowa struktura mikrosiatkowa. Detektor ten składa się z dwóch obszarów wypełnionych gazem i przedzielonych mikroskopijną siatką. Obszar nad siatką to komora dryftowa w której następuje jonizacja gazu przez promieniowanie jonizacyjne. Obszar pod siatką to region wzmacniający. Pierwotnie używana była siatka pleciona z drutów o średnicy $30\ \mu\text{m}$ z rozstawem drutów równym $30\ \mu\text{m}$. W nowszych rozwiązaniach struktura ta jest trawiona w cienkiej folii. Siatka jest zawieszona w odległości $120\ \mu\text{m}$ od struktury odczytu, tworząc komorę wzmacniającą. Siatka ta jest mocowana i podpierana przy użyciu matrycy słupków wykonanych z fotopolimeru. Budowa oraz schemat działania detektora Micromesh przedstawiona została

na rysunku 2.2 a) [13]. Zdjęcie mikroskopowe fragmentu siatki wraz ze słupkiem podtrzymującym przedstawiono na rysunku 2.2 b) [14]. Struktura wzmacniająca polaryzowana jest napięciem rzędu 580 V. Detektory te osiągają rozdzielczość lepszą niż $100 \mu m$.



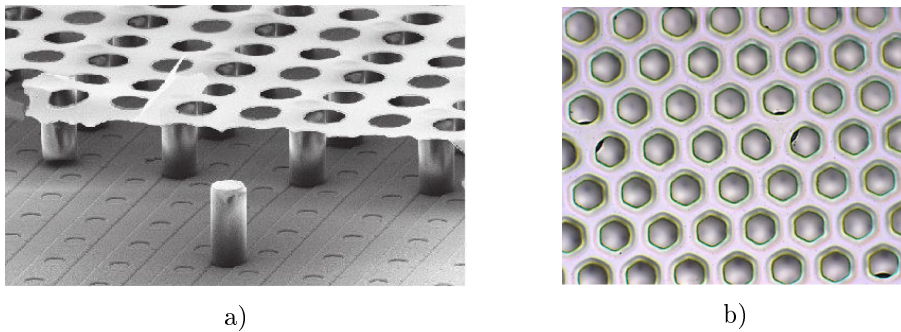
Rysunek 2.2. Detektor typu Micromegas: a) schemat detektora wraz z zobrazowaną ideą działania [13], b) zdjęcie fragmentu mikrosiatki umieszczonej na wsporniku [14]

Kolejnym opisywanym typem detektora jest urządzenie typu **Micromegas Bulk**. Detektor ten jest rozwinięciem koncepcji Micromegas, o tożsamym działaniu, lecz wykorzystujący alternatywną metodę produkcji. W procesie tym na podłoże zawierające elektrody odczytu nakładana jest warstwa fotopolimeru. Następnie przyklejana jest do niej siatka a na siatkę ponownie nanoszony jest fotopolimer. Proces ten skutkuje trwałym umocowaniem siatki do struktury detektora. Następnie metodami fotolitograficznymi usuwana jest większość fotopolimeru, a pozostawiane są bardzo małe słupki. Proces ten zobrazowany jest na rysunku 2.3 a) [14]. Zdjęcie przedstawiające siatkę wraz ze słupkami podtrzymującymi znajduje się na rysunku 2.3 b) [15]. Proces ten pozwala na produkcję trwałych struktur o dużych wymiarach, i jest to obecnie najpopularniejsza metoda wytwarzania tego typu struktur.



Rysunek 2.3. Detektor typu Bulk Micromegas: a) schemat procesu produkcyjnego [14], b) zdjęcie przedstawiające siatkę wraz ze słupkami podtrzymującymi [15]

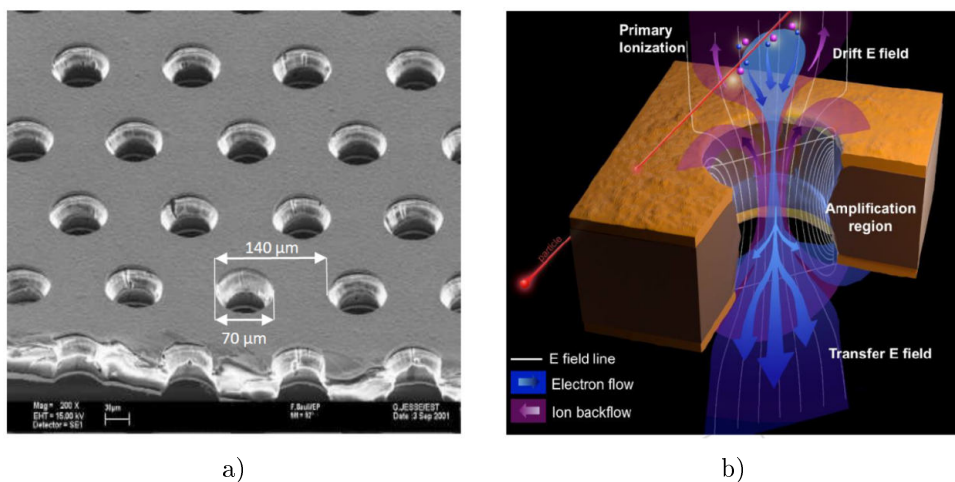
Kolejnym opisywanym detektorem będącym rozwinięciem technologii Micromegas jest detektor z wbudowaną siatką - **InGrid** (ang. Integrated Grid). Detektor ten jest niemalże w całości wykonany w technologii krzemowej, z siatką umieszczoną bezpośrednio na układzie scalonym zawierającym elektrody odczytu i elementy przetwarzające sygnał. Układem scalonym będącym bazą tego detektora jest chip Timepix [16]. Na podłoże naniesiony jest fotorezyst typu SU-8, a następnie naświetlony zostaje w nim wzór słupków. W kolejnym kroku napyłana jest warstwa aluminium o grubości $0,8\ \mu\text{m}$ i trawiony jest w nim wzór siatki. Na końcu następuje wywołanie fotorezystu, co uwalnia siatkę. Odległość pomiędzy siatką a podłożem wynosi $50\ \mu\text{m}$, przez co sygnał nie rozchodzi się na sąsiednie piksele.



Rysunek 2.4. Struktura detektora typu InGrid: a) obraz z mikroskopu elektronowego przedstawiający strukturę detektora [17], b) zdjęcie powierzchni siatki [17]

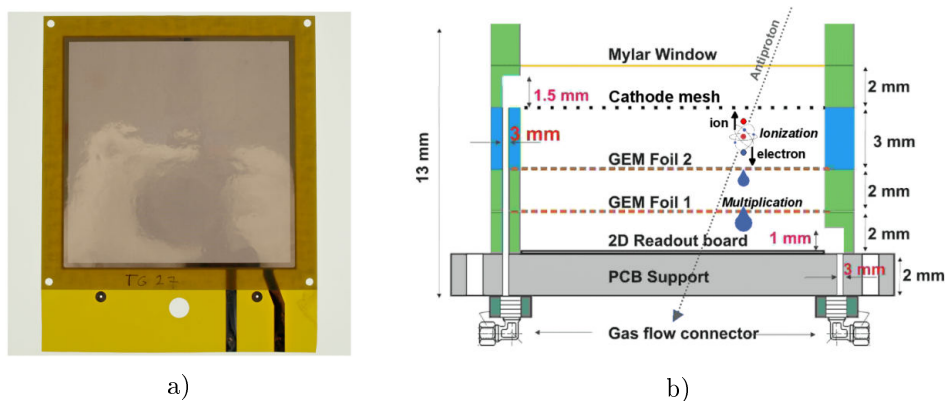
Detektory typu **GEM** są kolejną opisywaną technologią. Obecnie jest to jedna z najpopularniejszych technologii mikro-strukturyzowanych detektorów gazowych. Urządzenia te oparte są o folie GEM. Struktury te wykonane są z folii poliimidowej o grubości $50\ \mu\text{m}$ obustronnie powlekane miedzią o grubości $5\ \mu\text{m}$. Zawierają matryce otworów o dwustronnie stożkowym kształcie - średnica otworu mierzona na środku podłoża wynosi $50\ \mu\text{m}$, natomiast na zewnętrznych płaszczyznach podłoża wynosi ona $70\ \mu\text{m}$. Otwory te są ułożone w rastrze $140\ \mu\text{m}$, a co drugi wiersz jest przesunięty względem poprzedniego o połowę wielkości rastra. Obraz mikroskopowy wycinka folii GEM z widocznym przekrojem została przedstawiona na rysunku 2.5 a) [18]. Rysunek 2.5 b) [18] przedstawia schemat działania folii GEM.

Mechanizm działania struktur GEM został dokładnie opisany w literaturze [19]. Folie GEM polaryzowane są napięciem rzędu $400\text{--}600\ \text{V}$. W otworach powstaje więc silne pole elektryczne rzędu $8\ 000\ \text{V/mm}$. Elektrony dryfujące w stronę otworów folii GEM nabierają odpowiednio dużej energii, by w wyniku zderzeń jonizować atomy gazu znajdujące się wewnątrz mikrostruktury. Większość wytworzonych elektronów opuszcza otwór po przeciwległej stronie w stosunku do elektronu wejściowego i jest transferowane w stronę kolejnej folii GEM lub elektrod odczytu. Pojedyncza folia



Rysunek 2.5. Folia GEM: a) obraz folii GEM wykonany za pomocą mikroskopu elektronowego, b) Schemat działania folii GEM - tworzenie się lawiny w pojedynczym otworze [18]

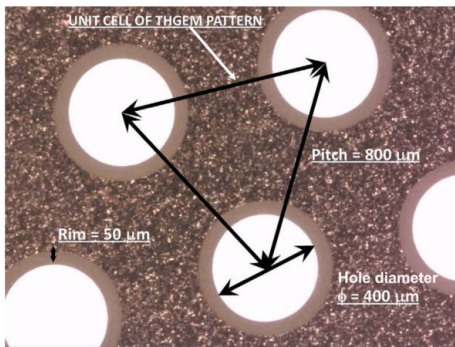
GEM umożliwia wzmocnienie ładunku około 200-300 razy. Detektory GEM składają się z od 1 do 4 folii GEM, w celu dopasowania efektywnego wzmocnienia detektora do energii detekowanego promieniowania oraz do parametrów elektronicznego układu pomiarowego. Odległość pomiędzy poszczególnymi foliami zazwyczaj wynosi 1-2 mm. Standardowo detektory GEM zawierają 3 folie GEM i charakteryzują się wzmocnieniem do około $7 \cdot 10^4$ razy. Przykładowa folia GEM o wymiarach $100 \times 100 \text{ mm}^2$, przyklejona do ramki z laminatu FR4 przedstawiona została na rysunku 2.6 a) [20]. Natomiast przekrój przykładowego detektora GEM został przedstawiony na rysunku 2.6 b) [21].



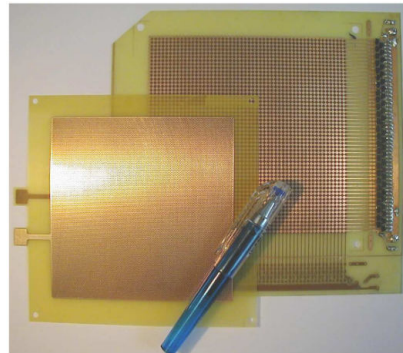
Rysunek 2.6. Detektor GEM: a) Zdjęcie przykładowej folii GEM $100 \times 100 \text{ mm}^2$ na ramce [20], b) Przekrój przykładowego detektora GEM z zobrazowanym mechanizmem detekcji i wzmocniania ładunku [21]

Na rysunku tym zobrazowany został także proces jonizacji gazu w komorze dryftowej w wyniku promieniowania jonizującego, jego wzmocnienie w strukturach GEM oraz transfer w stronę płyty odczytu. Detektory GEM z płytami odczytu w formie serii prostopadłych do siebie linii tworzących współrzędne XY osiągają rozdzielczość rzędu $63\ \mu\text{m}$ [22]. Folie GEM są produkowane jedynie przez kilka podmiotów z całego świata i wykorzystują opatentowaną technologię mikrotrawienia poliimidu - MCV (ang. Micro-Chemical-Vias).

Detektory typu **THGEM** są opracowane na podstawie technologii GEM. Głównym założeniem była możliwość ich wykonywania przy użyciu standardowej technologii PCB i taniego materiału bazowego. Miało to na celu obniżenie kosztu struktur, co umożliwiłoby spopularyzowanie tej technologii. Zgodnie z publikacją [23] detektory typu THGEM, zwane również Thick GEM lub LEM (ang. Large Electron Multiplier) były proponowane równolegle przez kilka zespołów w latach 2001 - 2004. Struktury te podobnie jak folie GEM składają się z matrycy otworów wykonanych w podłożu. W tym przypadku otwory są wiercone a nie trawione, oraz materiałem bazowym jest laminat FR4 o grubości od 400 do $800\ \mu\text{m}$ zamiast poliimidu o grubości $50\ \mu\text{m}$. Otwory mają średnicę rzędu $400\ \mu\text{m}$ w rastrze $800\ \mu\text{m}$. Podobnie jak w przypadku folii GEM, średnice otworów oraz raster mogą być inne od wartości przyjętych za standardowe. Na rysunku 2.7 a) [24] przedstawiono geometrię struktury, zaś na rysunku 2.7 b) [25] przedstawiono zdjęcie folii THGEM o wymiarach $32 \times 32\ \text{mm}^2$ wraz z płytą odczytu. Rozdzielczość przestrzenna tego typu detektorów wynosi około $700\ \mu\text{m}$, co jest wartością o rząd gorszą od klasycznych struktur GEM.



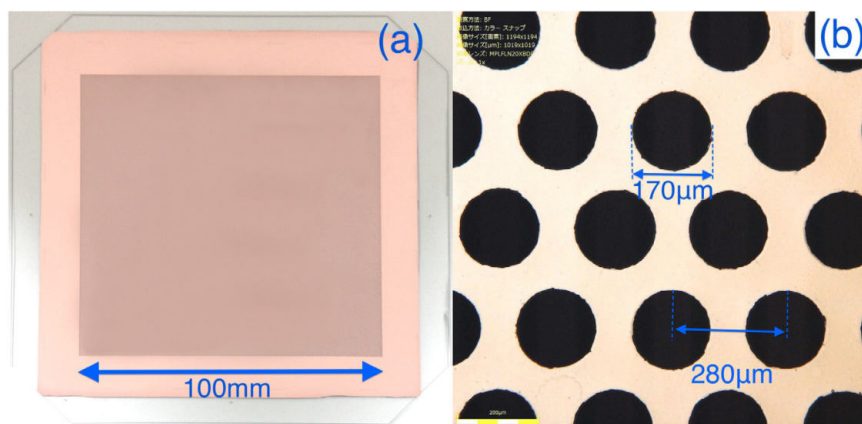
a)



b)

Rysunek 2.7. Struktury wzmacniające typu THGEM: a) obraz mikroskopowy fragmentu wzoru struktury THGEM wraz z wymiarami [24], b) zdjęcie struktury THGEM o wymiarach $32 \times 32\ \text{mm}^2$ (w tle płyta odczytu) [25]

Kolejny opisywany typ detektora oparty jest o struktury GEM wykonane ze szkła o grubości od $200\text{ }\mu\text{m}$ do $1000\text{ }\mu\text{m}$. Struktury te są nazywane w literaturze **Glass GEM**, G-THGEM lub G-GEM. Do ich produkcji mogą być wykorzystywane różne typy szkła. Autorzy publikacji [26] wykorzystali do tego celu fotoczułe szkło PEG3. Struktura wzmacniająca typu G-GEM o wymiarach $100 \times 100\text{ mm}^2$ została przedstawiona na rysunku 2.8 a) [26]. Obraz mikroskopowy fragmentu struktury C-GEM został przedstawiony na rysunku 2.8 b) [26]

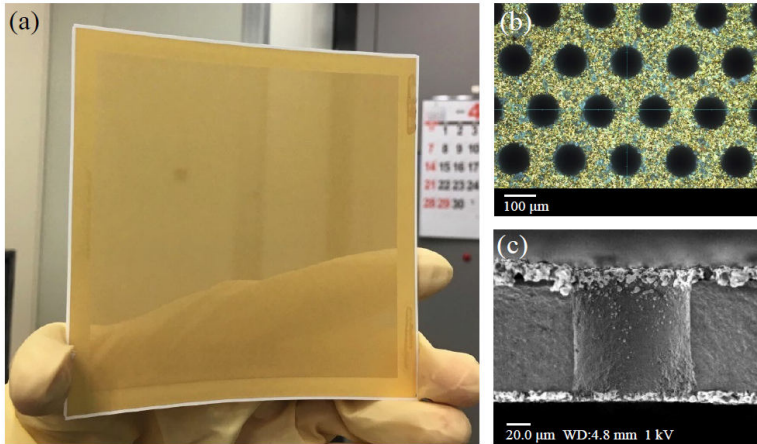


Rysunek 2.8. Struktura wzmacniająca typu G-GEM: a) zdjęcie szklanej struktury GEM o wymiarach $100 \times 100\text{ mm}^2$, b) obraz mikroskopowy fragmentu struktury C-GEM [26]

Struktury te były wykonane metodą naświetlania szkła promieniowaniem UV przez maskę, a następnie chemicznego trawienia naświetlonego materiału. Autorzy wytworzyli strukturę o otworach o średnicy $170\text{ }\mu\text{m}$ w rastrze $280\text{ }\mu\text{m}$. Rozdzielczość detektora z wykorzystaniem struktur C-GEM na szkłe PEG3 wynosi $930\text{ }\mu\text{m}$ (z płytą odczytu zawierającą fotodiody) [27]. Metoda ta pozwala na wykonywanie prostokątnych otworów, podobnie jak przy wierceniu struktur THGEM. Autorzy publikacji [28] przedstawili płyty G-GEM wykonane z kwarcu oraz szkła boro-krzemowego. Elektrody były wykonane z tlenku indowo-cynkowego (*ITO, ang. Indium Tin Oxide*). Struktury były wykonane za pomocą techniki ciśnieniowego ścięcia proszkiem ściernym, co umożliwiło wykonanie podwójnie stożkowego przekroju otworów charakterystycznego dla klasycznych folii GEM.

Kolejnym typem elementów wzmacniających opartych na technologii GEM są ceramiczne folie GEM, nazywane w literaturze jako **Ceramic GEM**. Podobnie jak w przypadku szklanych folii GEM struktury te wywodzą się z technologii GEM, przy czym są wykonane na innym materiale - ceramice. Autorzy publikacji [29] jako materiał bazowy wykorzystali ceramikę LTCC. Elektrody były wykonane z pasty zawierającej złoto nanoszonej metodą sitodruku. Cylindryczne otwory były wykony-

wane za pomocą dedykowanego wykrojnika. Otwory miały średnice $100\ \mu\text{m}$, a raster wynosił $200\ \mu\text{m}$. Grubość podłoża wynosiła $112\ \mu\text{m}$. Zdjęcie ceramicznej folii GEM zostało przedstawione na rysunku 2.9 a) [29]. Obrazy mikroskopowe powierzchni oraz przekroju struktury zostały zaprezentowane na rysunkach 2.9 b) i c) [29].

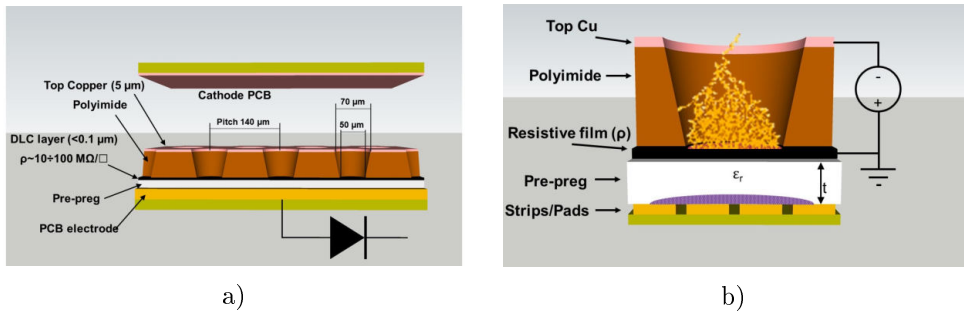


Rysunek 2.9. Struktura wzmacniająca typu Ceramic GEM: a) zdjęcie ceramicznej folii GEM o wymiarach $100 \times 100\ \text{mm}^2$, b) Obraz mikroskopowy powierzchni struktury z widocznymi otworami, c) obraz mikroskopowy przekroju struktury [29]

Prace [30, 31] opisują folie wykonane w podłożu kompozytowym którego 90% stanowi ceramika. Struktury te posiadają otwory o średnicy $200\ \mu\text{m}$ w rastrze $600\ \mu\text{m}$ i są wykonane na podłożach o grubości $200\ \mu\text{m}$. Praca [31] podaje rozdzielczość przestrzenną detektora z ceramiczną folią GEM na poziomie 3 mm. Prace nad ceramiczną folią GEM wykonaną w technice LTCC [32] były także współrealizowane przez autora niniejszej rozprawy.

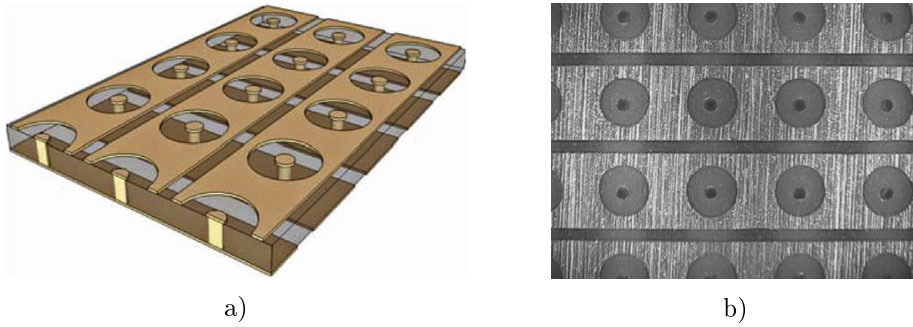
Przedostatnią opisywaną technologią elementów wzmacniających są struktury typu μRWell . Zostały one opracowane przez G. Bencivenni i opisane w publikacji z 2015 roku [33]. Detektor ten bazuje na rozwiązaniu detektora studniowego (*ang. Well*) [34], przy czym dodana została warstwa rezystywna, która znacząco poprawia parametry detektora. Metoda produkcji i użyte materiały są podobne do technologii GEM. Detektor ten zawiera matryce studni o stożkowym kształcie. Podobnie jak folia GEM, po obu stronach struktury znajdują się elektrody spolaryzowane napięciem rzędu 400-600 V. W przeciwieństwie do detektorów GEM i Well, dolna elektroda struktury μRWell wykonana jest z warstwy diamentu-podobnej (DLC, *ang. Diamond-like Carbon*) o rezystancji powierzchniowej rzędu $100\ \text{M}\Omega/\square$. Zastosowanie tej warstwy znacząco ograniczyło powstawanie dużych wyładowań elektrycznych w strukturze, co zwiększa niezawodność detektora oraz umożliwia jego prace z więk-

szym wzmocnieniem. Mechanizm tłumienia wyładowań polega na tym, że w czasie tworzenia się dużego wyładowania, prąd płynący przez elektrodę o dużej rezystancji powoduje powstawanie lokalnego spadku napięcia, tłumiąc mechanizm powielania ładunków w gazie. Dzięki temu pojedynczy stopień może osiągnąć wzmocnienie większe niż 10^4 razy. Schemat budowy struktury wzmacniającej typu μ RWell został przedstawiony na rysunku 2.10 a) [35]. Zasada działania tego typu struktury pokazana na przykładzie pojedynczej studni została przedstawiona na rysunku 2.10 b) [35]. Detektory μ RWell osiągają rozdzielczość przestrzenną rzędu $65\ \mu\text{m}$, co jest wartością porównywalną z rozdzielczością detektorów GEM.



Rysunek 2.10. Struktura wzmacniająca typu μ RWell: a) schemat budowy struktury, b) zasada działania na przykładzie pojedynczej studni [35]

Ostatni opisywany detektor oparty jest na strukturach wzmacniających typu μ PIC. Detektor ten jest wykonany w technologii PCB, na podłożach z laminatu FR4. Struktura ta zawiera na górnej powierzchni serię katod w formie pasków z periodycznie wytrawionymi kołami o średnicy $250\ \mu\text{m}$ w rozstawie $400\ \mu\text{m}$. Na środku każdego wytrawienia w pasku katody znajduje się metalizowany otwór tworzący anodę o średnicy $50\ \mu\text{m}$. Poszczególne anody łączone są za pomocą serii linii prostopadłych do katod. Tworzone więc są osie X (katody) oraz Y (anody). Struktura ta pełni jednocześnie rolę płyty odczytu. Pomiedzy anodę a katodę przykładany jest potencjał rzędu 350 - 500 V. Struktury te charakteryzują się wzmocnieniem rzędu $10^3 - 10^4$ razy. Fragment projektu struktury typu μ PIC przedstawiony został na rysunku 2.11 a) [36]. Zdjęcie fragmentu struktury wzmacniającej przedstawiono na rysunku 2.11 b) [37]. Rozdzielczość przestrzenna tego rozwiązania wynosi około $350\ \mu\text{m}$. W publikacji z 2020 roku [38], autorzy rozwinęli koncepcję detektora μ PIC poprzez wykonanie anody z rezystywnej warstwy diamentopodobnej (DLC), co pozwoliło na poprawę niezawodności detektora. Rozdzielczość opisywanego detektora wyniosła $60-90\ \mu\text{m}$.



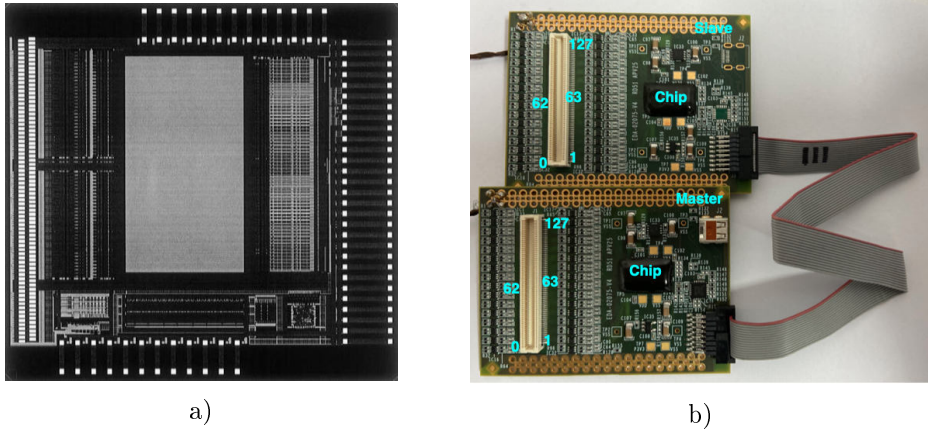
Rysunek 2.11. Struktura wzmacniająca typu μ PIC: a) fragment projektu struktury μ PIC [36], b) zdjęcie fragmentu struktury wzmacniającej μ PIC [37]

2.2. Elektroniczne układy pomiaru ładunku w detektorach GEM

W podrozdziale tym opisany zostanie przegląd literaturowy dotyczący najpopularniejszych układów scalonych do pomiaru ładunków w detektorach GEM a także elektronicznych układów do pomiaru ładunków, które je wykorzystują. Układy pomiarowe zintegrowane z płytą odczytu nie były przedmiotem tego rozeznania. W literaturze dostępne są także informacje o układach scalonych będących kompletnymi detektorami MPGD, lecz nie są to detektory oparte o technologię GEM.

Na początku opisany został układ scalony **APV25**, który jest jednym z pierwszych dedykowanych układów scalonych dla detektorów GEM. Pierwsze znalezione doniesienia literaturowe są z 2001 roku [39, 40]. Układy te są wykonane w technologii CMOS 250 nm i są bondowane bezpośrednio do podłoża PCB za pomocą cienkich złotych drutów. Ich montaż wymaga specjalistycznej aparatury. Pojedyncza struktura zawiera 128 niezależnych kanałów pomiarowych. Układy te można łączyć parami w systemie Master-Slave co zmniejsza ilość połączeń pomiędzy strukturami a elektronicznym systemem kontrolno - pomiarowym. Dla standardowego detektora GEM o wymiarach 100 x 100 mm², który zawiera po 256 kanałów na oś, potrzebne są aż 4 obwody z układami APV25. Poziom szumu wejściowego przy pojemności wejściowej równej 0 pF wynosi od 246 do 396 $e-RMS$ w zależności od trybu pracy. Przy pojemności wejściowej na poziomie 18 pF (standardowej dla małych detektorów) poziom szumu wynosi od 900 do 1500 $e-RMS$. Dane są gromadzone dla każdego kanału w formie analogowej w buforze gromadzącym 192 próbki. Częstotliwość przetwarzania tego układu to 20 lub 40 MHz, co umożliwia pomiar próbek z rozdzielczością czasową 50 lub 25 ns. Układ działa wyłącznie w trybie wyzwalania sygnałem zewnętrznym (trigger). Oznacza to, że by wykonywać pomiary detektorem GEM z użyciem tego układu potrzebne jest albo impulsowe źródło promieniowa-

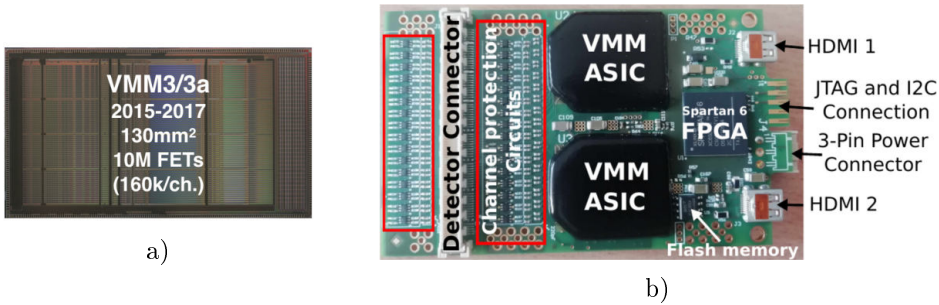
nia, albo konieczna jest detekcja pojawienia się zdarzenia w detektorze GEM, co wymaga zastosowanie dodatkowych urządzeń. Układ ten posiada wyjście danych w formie analogowej (sygnał różnicowy). Sygnał wyjściowy zawiera nagłówek w formie cyfrowej oraz analogowe wartości ze 128 kolejnych kanałów przesyłane co 50 ns. Cały ciąg danych podczas pojedynczego odczytu z układu trwa 7 μ s. Limituje to maksymalną częstotliwość próbkowania do mniej niż 140 kHz. Pobór mocy wynosi 2,31 mW na kanał. Układ ten zawiera zewnętrzną matrycę polaryzującą wejścia. Rysunek 2.12 a) [39] przedstawia obraz mikroskopowy układu APV25. Rysunek 2.12 b) [41] przedstawia zdjęcie obwodów drukowanych zawierających struktury APV25.



Rysunek 2.12. Układ scalony APV25: a) obraz mikroskopowy struktury układu [39], b) zdjęcie obwodów drukowanych zawierających struktury APV25 [41]

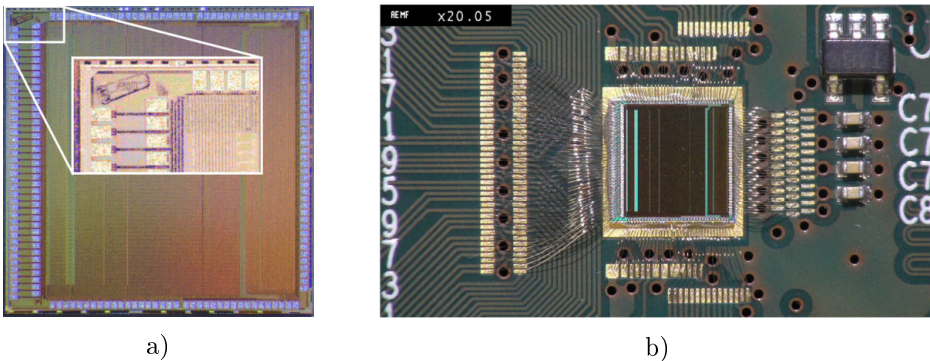
Drugim opisywanym układem scalonym do detektorów GEM jest **VMM3**. Jest on dostępny od 2016 roku w wersji VMM3 i od 2018 w udoskonalonej wersji VMM3a [42]. Wykonany jest w procesie 130 nm i zawiera około 10 milionów tranzystorów. Układ ten zawiera 32 niezależne kanały pomiarowe, każdy z przedwzmacniaczem, detektorem pików oraz kilkoma przetwornikami analogowo-cyfrowymi ADC. Dane są w formie 38 bitowej przekazywane są do koncentratora za pomocą dwóch niezależnych linii, każda o częstotliwości 200 MHz - dane wyjściowe są w formie cyfrowej. Amplituda sygnału jest mierzona przez 10-bitowy przetwornik ADC, czas pomiaru jest zapisany w 8 bitach, zaś pozostałe bity zawierają dodatkowe informacje pomiarowe. Układ mierzy ładunki z zakresami do 0,1 -2 pC z rozdzielczością lepszą niż 1 fC_{RMS} . Szum układu przy pojemności wejściowej 0 pF (z odłączonym detektorem) wynosi 800 $e-RMS$. Układ ten umożliwia automatyczne wyzwalanie pomiaru, gdy sygnał na którymkolwiek z kanałów przekroczy wartość progową. Przesyłane są wtedy dane pomiarowe z wejść o przekroczonym progu oraz jest możliwość pomiaru kanałów sąsiadujących. Proóg wyzwalania ustalany jest przy użyciu 10-bitowego prze-

twornika cyfrowo-analogowego (DAC) wspólnego dla wszystkich kanałów, oraz przy użyciu 5-bitowych przetworników korygujących osobno dla każdego kanału. W pracy ciągłej układ ten umożliwia pomiar z częstotliwością maksymalną do 4 MHz przy pomiarze jednego kanału. Za pomocą tego układu możliwe jest osiągnięcie rozdzielczości czasowej rzędu $0,25\text{ ns}$. Układ ten zawiera zewnętrzną matrycę polaryzującą wejścia. Obraz mikroskopowy struktury VMM3 został przedstawiony na rysunku a) [43], natomiast obwód drukowany zawierający dwa takie układy został przedstawiony na rysunku b) [44].



Rysunek 2.13. Układ scalony VMM3: a) obraz mikroskopowy struktury układu [43], b) zdjęcie obwodu drukowanego zawierającego struktury VMM3 [44]

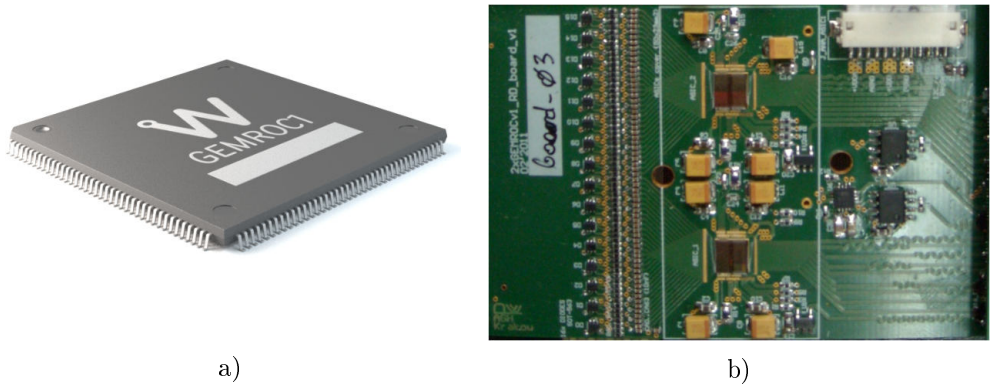
Kolejnym opisywanym typem układu scalonego jest struktura **TIGER**. Struktura ta jest wykonana w procesie CMOS 110 nm. Układ ten umożliwia pomiar 64 niezależnych kanałów pomiarowych. Struktura ta zawiera dla każdego kanału po dwa 10-bitowe przetworniki ADC, jeden mierzący amplitudę sygnału, drugi do wyznaczania czasu zdarzenia. Obraz mikroskopowy struktury układu TIGER została przedstawiona na rysunku 2.14 a) [45]. Zdjęcie obwodu drukowanego z zamontowaną strukturą i połączeniami drutowymi przedstawiono na rysunku 2.14 b) [46].



Rysunek 2.14. Układ scalony TIGER: a) obraz mikroskopowy struktury układu [45], b) zdjęcie struktury TIGER z połączeniami drutowymi [46]

Układ mierzy ładunki w zakresie do 50 fC z rozdzielczością czasową na poziomie 5 ns. Maksymalna prędkość pomiaru wynosi 391 kHz dla wszystkich kanałów. Układ ten jest montowany metoda montażu drutowego. Zużycie mocy wynosi 12 mW na kanał. Szum układu z podłączoną płytą odczytu wynosi mniej niż $1800 e-RMS$.

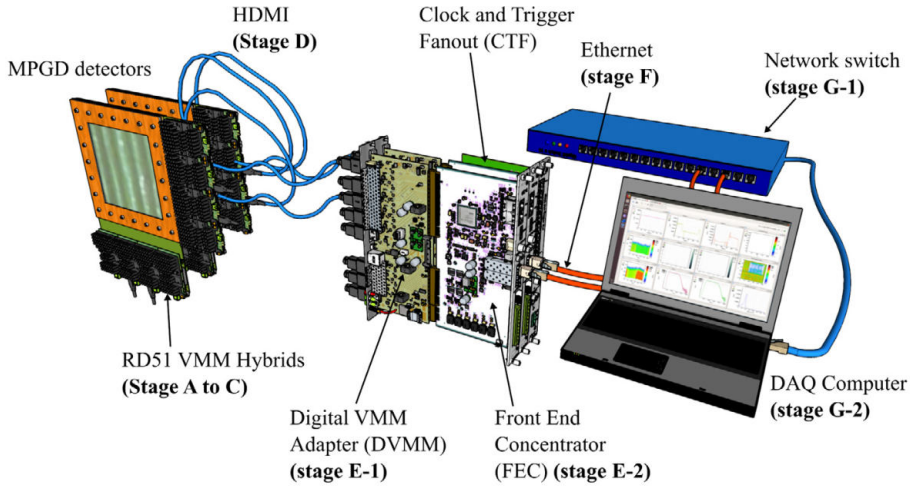
Ostatnim opisywanym układem odczytu do detektorów GEM jest układ **GEM-ROC**. Struktura została wykonana w technologii CMOS w procesie $0,35 \mu m$. Układ posiada 64 niezależne wejścia pomiarowe. Zakres mierzonych ładunków wynosi do 500 fC, a rozdzielczość czasowa jest na poziomie 300 ns. Układ ten posiada wyjście analogowe, którym przesyłane są wartości amplitudy poszczególnych kanałów, oraz wyjście cyfrowe informujące o czasie wystąpienia zdarzenia. Układ działa na zasadzie wyzwalania wewnętrznego - gdy któryś z kanałów przekroczy zadaną wartość progową, wykonywany jest pomiar. Szum układu wynosi $1400 e-RMS$ przy pojemności wejściowej równej $20 pF$. Układ ten wymaga zewnętrznych przetworników ADC. W ostatnim czasie pojawiła się także wersja układu w obudowie TQFP160 do montażu powierzchniowego [47]. Wizualizacja obudowy układu scalonego ze strony sprzedawcy została przedstawiona na rysunku 2.15 a) [47]. Zdjęcie obwodu drukowanego zawierającego dwa układy GEMROC w wersji do montażu drutowego przedstawiono na rysunku 2.15 b) [48]. Pobór mocy wynosi jedynie 1,5 mW na kanał.



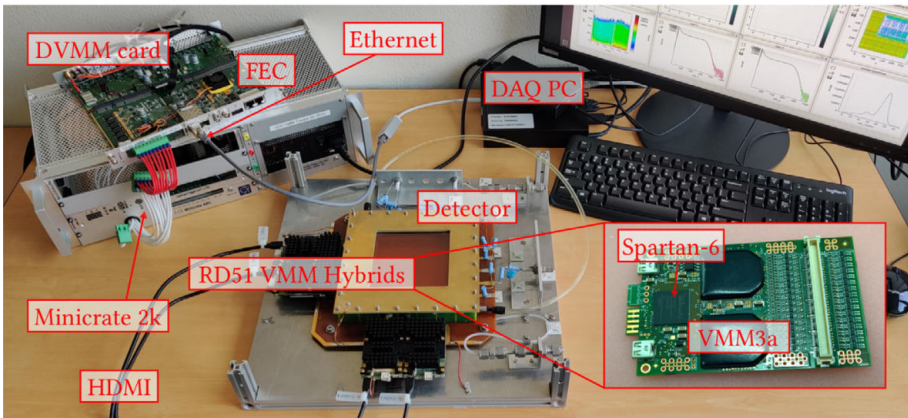
Rysunek 2.15. Układ scalony GEMROC: a) wizualizacja układu w obudowie TQFP160 [47], b) zdjęcie obwodu drukowanego zawierającego struktury GEMROC [48]

Następnie sprawdzono dostępne elektroniczne systemy pomiarowe do detektorów GEM. Najpopularniejszym obecnie systemem jest **SRS** (ang. Scalable Readout System) opracowany na potrzeby projektów CERN. Jego struktura jest zoptymalizowana pod kątem wielkich instalacji zawierających tysiące układów odczytu a nawet więcej. Dla małych detektorów badawczych możliwe jest złożenie minimalnego zestawu SRS, składającego się ze skrzyni RACK wypełnionej co najmniej 3 kartami

(plus obwody drukowane z układami ASIC znajdujące się przy detektorze). System w tej formie może być wykorzystany do pomiarów standardowego detektora GEM o wielkości $100 \times 100 \text{ mm}^2$. Rysunek 2.16 a) [49] przedstawia schemat połączeń i użytych urządzeń koniecznych do uruchomienia minimalnej konfiguracji SRS. Natomiast rysunek 2.16 b) [49] przedstawia zdjęcie detektora GEM wraz z minimalną konfiguracją systemu SRS. System ten ma bardzo duże możliwości pomiarowe, lecz jest skomplikowany i trudny w miniaturyzacji, szczególnie do rozmiaru koniecznego przy misjach kosmicznych CubeSat.



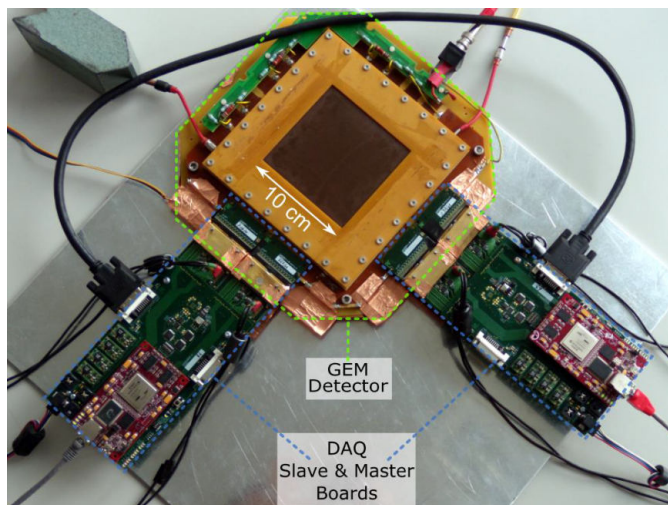
(a) 3D drawing of the VMM3a/SRS stages.



(b) Photograph of an R&D set-up.

Rysunek 2.16. Minimalna konfiguracja systemu SRS: a) schemat przedstawiający wykorzystane moduły i ich połączenie, b) zdjęcie detektora GEM $100 \times 1000 \text{ mm}^2$ wraz z systemem SRS [49]

Drugi opisywany układ pomiarowy jest dedykowany do struktur GEMROC. Został on opracowany na Akademii Górniczo-Hutniczej (AGH). System ten składa się z modułów - w przypadku detektora $100 \times 100 \text{ mm}^2$ wykorzystano 2 moduły. Obwody są łączone ze sobą w celu ujednolicenia zegarów i sygnałów synchronizacyjnych pomiędzy modułami. Pojedynczy moduł składa się z płyty bazowej zawierającej układy ADC i układ zasilania, obwodu zawierającego układ FPGA Virtex 5, oraz płytki zawierającej układy ASIC GEMROC. System ten jest znacznie mniejszy niż minimalna konfiguracja SRS, natomiast nadal jest zbyt duży do zastosowań kosmicznych. Natomiast dużą zaletą tego układu jest możliwość przeprowadzania pomiarów z wysoką częstotliwością zdarzeń (powyżej 1 MHz). Zdjęcie systemu pomiarowego zawierającego dwa moduły po 256 kanałów wraz z detektorem GEM o wymiarach $100 \times 100 \text{ mm}^2$, opracowanego w AGH został przedstawiony na rysunku 2.17 [50].



Rysunek 2.17. Zdjęcie opracowanego w AGH układu pomiarowego bazującego na strukturach GEMROC, wraz z detektorem GEM o wymiarach $100 \times 100 \text{ mm}^2$ [50]

2.2.1. Zalety i wady poszczególnych rozwiązań

Na podstawie rozeznania literaturowego zebrano i porównano parametry wybranych układów (najpopularniejszych). Informacje te zostały przedstawione w tabeli 2.1. Głównym czynnikiem rozważanym w trakcie realizacji tej pracy była komercyjna dostępność. W momencie rozpoczęcia badań, żaden ze specjalizowanych układów scalonych (*ASIC*, ang. *Application-Specific Integrated Circuit*) nie był komercyjnie dostępny. W ostatnim czasie jeden z nich stał się komercyjnie dostępny (GEMROC). Wykonany on jest w stosunkowo dużej obudowie TQFP160 ($24 \times 24 \text{ mm}^2$), i posiada zaledwie 64 kanały, tak więc dla detektora o wymiarach $100 \times$

100 mm^2 konieczne jest wykorzystanie po 4 układy na oś. Dużą zaletą jest jednak zastosowanie obudowy do montażu powierzchniowego, w przeciwieństwie do montażu drutowego w przypadku pozostałych układów (nieopakowanych struktur). Umożliwia to montaż tych struktur bez konieczności posiadania specjalistycznego i drogiego sprzętu. Jedną z niedogodności przy stosowaniu tej struktury jest konieczność stosowania zewnętrznych układów przetwarzających sygnały analogowe na cyfrowe (ADC). Tą samą cechą ma także układ APV25. Układy VMM3 i TIGER posiadają wbudowane przetworniki ADC, co jest dużą zaletą. Poziom szumu wszystkich układów jest bardzo niski, a wartości są zbliżone. Duże różnice są natomiast w maksymalnej rejestrowanej różnicy zdarzeń - od 140 kHz dla APV25 do 4 MHz dla VMM3. Układy VMM3 i TIGER charakteryzują się dużo większym poborem mocy w stosunku do APV25 i GEMROC, co komplikuje układ chłodzenia.

Tabela 2.1. Porównanie parametrów wybranych układów scalonych do detektorów GEM

Parametr	Układ ASIC			
	APV25	VMM3	TIGER	GEMROC
Typ procesu CMOS	250 nm	130 nm	110 nm	300 nm
Liczba kanałów	128	32	64	64
Zakres pomiarowy	-	2 pC	50 fC	500 fC
Max częstotliwość zdarzeń	140 kHz	4 MHz	391 kHz	> 1 MHz
Poziom szumu z płytą odczytu [$e-RMS$]	900 / 1500	> 800	1800	1400
Rozdzielczość czasowa	25 / 50 ns	0,25 ns	5 ns	300 ns
Wyzwalanie	zewnętrzne	wewnętrzne	wewnętrzne	wewnętrzne
Pobór mocy [mW/kanał]	2,31	25	12	1,5
Wbudowany ADC / wyjście cyfrowe	NIE	TAK	TAK	NIE
Sposób montażu	drutowy	drutowy	drutowy	drutowy / SMT
Komercyjna dostępność	NIE	NIE	NIE	TAK

Podsumowując:

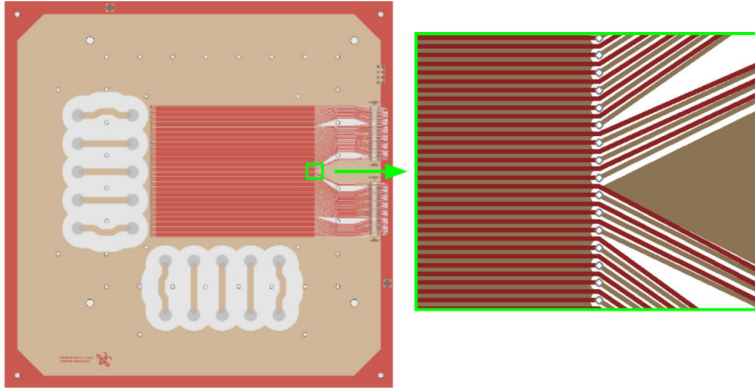
1. W momencie rozpoczęcia doktoratu żaden dedykowany układ scalony do detektorów GEM nie był komercyjnie dostępny.
2. W trakcie jego realizacji pojawił się jeden układ, lecz ma on stosunkowo dużą obudowę, małą ilość kanałów pomiarowych (konieczność stosowania kilku układów)
3. Dla układu GEMROC (także APV25) konieczne jest zastosowanie zewnętrznych układów ADC, co znacząco zwiększa rozmiar układu pomiarowego.
4. Układy VMM3 i TIGER zużywają dużo mocy, co może być kłopotliwe w aplikacjach kosmicznych.
5. Struktury APV25, VMM3 i TIGER wymagają montażu drutowego co wymaga dostępu do specjalistycznej aparatury.
6. Systemy pomiarowe typu SRS mają duże możliwości, jednak są skomplikowane i trudne do miniaturyzacji.

2.3. Struktury zbierające ładunki - płyty odczytu

Struktura zbierająca ładunek (*CCS*, ang. *Charge Collection Structure*) zwana także płytą odczytu lub anodą, jest elementem detektora znajdującym się bezpośrednio pod strukturą wzmacniającą. Płyta ta zbiera ładunki wychodzące z struktury wzmacniającej i przekazuje je do elektronicznego układu pomiarowego, zazwyczaj w taki sposób aby możliwa była rekonstrukcja położenia zdarzenia. Przez lata zostały opracowane różne geometrie wzorów płyt odczytu, dobierane do konkretnej aplikacji i wymagań projektu. Przegląd i opis wzorów oraz geometrii układu odczytu zawarto w podrozdziale 2.3.1. Natomiast w podrozdziale 2.3.2 opisano różne metody wytwarzania i materiały wykorzystane do produkcji układów CCS.

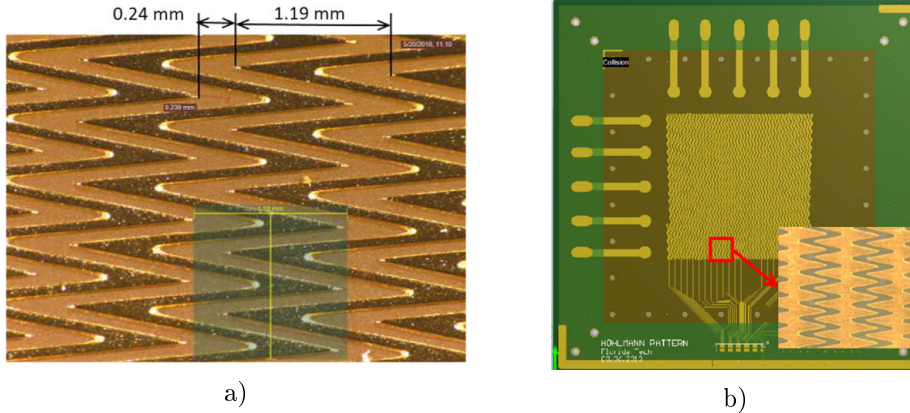
2.3.1. Budowa i geometria wybranych dwuwymiarowych układów CCS

Pierwszym, oraz prawdopodobnie najprostszym układem odczytu do detektorów gazowych jest **układ paskowy jednoosiowy (1D)**. Zawiera on szereg pasków ułożonych równolegle, umieszczonych na pojedynczej warstwie. Przykładowy projekt paskowej płyty odczytu 1D został przedstawiony na rysunku 2.18 [51]. Publikacja [52] opisuje testy rentgenowskie detektora GEM z paskową płytą odczytu. Przy paskach odczytu o rastrze $200\ \mu\text{m}$ uzyskano rozdzielczość rzędu $40\ \mu\text{m}$ (promieniowanie prostopadłe do detektora). Płyty te były wykorzystane m.in. do testów detektorów GEM i parametrów folii GEM [53]. Płyty te zostały szybko zastąpione nowszymi rozwiązaniami, umożliwiającymi obrazowanie w obu osiach (2D).



Rysunek 2.18. Paskowa płyta odczytu 1D: a) projekt obwodu drukowanego, b) szczegół projektu obrazujący paski odczytu oraz ścieżki skierowane w stronę złącza [51]

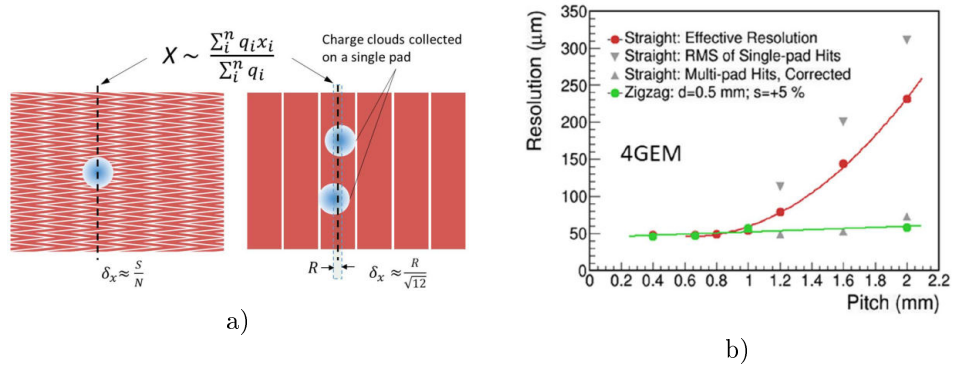
Drugim typem układu odczytu były struktury zawierające równoległe ułożone paski o zygzakowatym kształcie, nazywane **zigzag**. Według źródła [54], struktury typu zigzag zostały po raz pierwszy zaproponowane w latach osiemdziesiątych XX wieku, jako układ odczytu w detektorze gazowym z komorą projekcji czasowej (TPC, ang. Time Projection Chamber) co zostało opisane w publikacji [55]. Rysunek 2.19 [54] przedstawia obraz mikroskopowy fragmentu wzoru struktury zigzag(a) oraz przykładową płytę odczytu(b).



Rysunek 2.19. Zdjęcia płyty odczytu z paskami zigzag: a) obraz mikroskopowy fragmentu wzoru struktury zigzag, b) zdjęcie płyty odczytu zigzag $100 \times 100 \text{ mm}^2$ [54]

Płyty odczytu ze strukturami typu zigzag są rozwinięciem struktur zawierających równoległe paski odczytu, i tak jak one umożliwiają określenie położenia jedynie w jednej osi (1D). Ich główną zaletą w stosunku do płyt paskowych jest

możliwość zastosowania mniejszej ilości linii (i kanałów pomiarowych ADC) bez uszczerbku na rozdzielczości, dzięki mechanizmowi rozplywu ładunku pomiędzy elementy sąsiednich zygzaków. Mechanizm ten przedstawiony został na rysunku 2.20 a) [56].

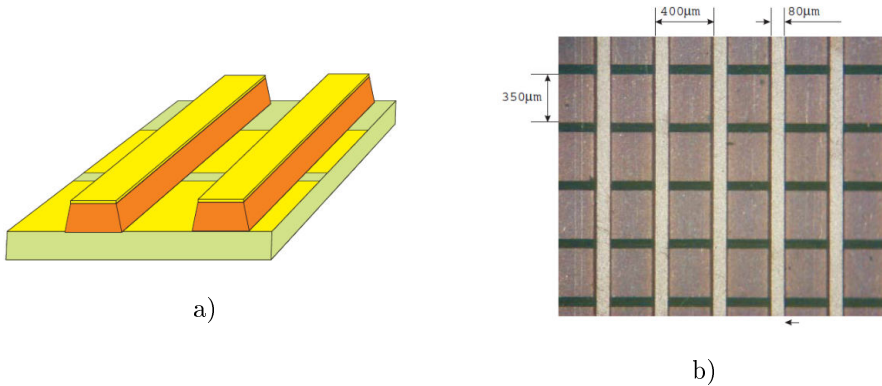


Rysunek 2.20. Płyty odczytu typu zigzag: a) rysunek przedstawiający mechanizm rozplywu ładunku [56], b) wykres rozdzielczości płyt odczytu zigzag w porównaniu do paskowych płyt odczytu dla różnych rastrów wzoru [57]

Po lewej stronie rysunku widać, że chmura ładunku z pojedynczego zdarzenia jest deponowana na kilku zygzakowatych polach odczytu, gdzie dla płyt paskowych deponuje się ona jedynie na pojedynczym pasku odczytu (strona prawa ilustracji). Wykres porównujący rozdzielczość płyt zigzag i płyty z paskami w funkcji rastra przedstawiono na rysunku 2.20 b) [57]. Zgodnie z literaturą, płyty odczytu tego typu osiągają rozdzielczość przestrzenną rzędu 50 - 100 μm [54,56,58], przy rastrze większym niż 1 mm.

Następnym opisywanym typem struktur CCS, są płyty odczytu **2D z paskami XY**. Struktury te zawierają dwie serie równoległych paskowych elektrod odczytu, które są ułożone ortogonalnie względem siebie i są umieszczone na dwóch warstwach obwodu. Tworzą one współrzędne X oraz Y. Pomiedzy liniami osi X znajdującymi się na wierzchniej warstwie trawione są głębokie rowki, odsłaniające fragmenty linii osi Y znajdujące się na drugiej warstwie układu. Grubość izolatora pomiędzy tymi warstwami wynosi zazwyczaj 25 μm lub 50 μm . Rysunek 2.21 przedstawia typową geometrię odczytu XY, wykorzystywaną m.in. w detektorze COMPASS [59]. Rysunek 2.21 a) przedstawia schemat struktury odczytu XY, zaś rysunek b) przedstawia obraz mikroskopowy układu pasków XY. Struktura ta ma raster 400 μm , zarówno pasków X jak i Y. Linie X mają szerokość 80 μm a linie Y aż 350 μm w celu zapewnienia jednorodnego rozkładu ładunku pomiędzy obie osie. Układ tego typu, jest najczęściej wykorzystywaną geometrią w płytach odczytu detektorów GEM,

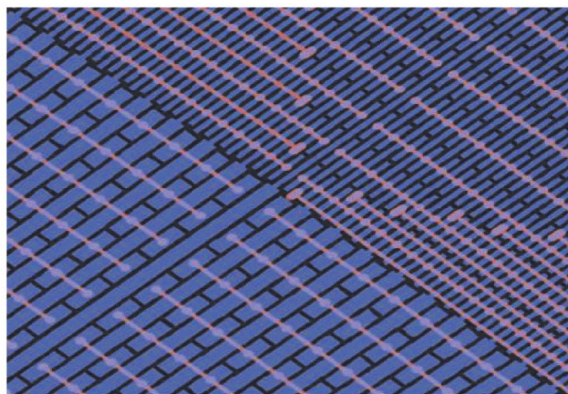
ze względu na bardzo dobrą rozdzielczość przestrzenną, możliwość rekonstrukcji położenia zdarzenia w obu osiach oraz ze względu na dobry stosunek ilości kanałów pomiarowych na powierzchnię detektora. Struktury te były już opisywane w publikacjach z końca lat 90 XX wieku [52, 60].



Rysunek 2.21. Płyta odczytu 2D z paskami XY: a) schemat struktury odczytu, b) mikroskopowy obraz płyty odczytu [59]

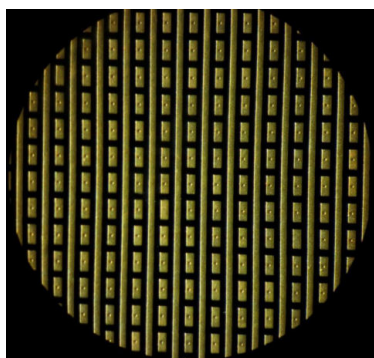
Rozdzielczość planarna masowo produkowanych detektorów z płytą odczytu XY, wynosi $81,3 \mu\text{m}$ [61]. Inna publikacja podaje, że rozdzielczość detektora z użyciem płyt XY wynosi nawet $63 \mu\text{m}$ [22]. Płyty odczytu tego typu wykorzystane zostały w wielkich eksperymentach CERN takich jak COMPASS [59] oraz CMS [61]. Struktury te są wykonywane na podłożu polimidowym przyklejonym do podłoża FR4, oraz wykorzystują opatentowany proces trawienia MCV. Główną wadą tego rozwiązania jest możliwość detekcji tylko jednego zdarzenia w danym okresie całkowania. Gdy w okresie całkowania wystąpią dwa zdarzenia o podobnej energii, nie będzie możliwe określenie ich pozycji.

Kolejnym typem płyt odczytu 2D jest **układ paskowo-pikselowy**. Jest on podobny do płyt odczytu XY, z tym że wszystkie elektrody są wykonane planarnie (na powierzchni układu). Przy produkcji tego typu płyt odczytu nie ma więc konieczności trawienia struktur w materiale izolacyjnym płyty. Struktura ta zawiera serie równoległych linii tworzących oś X. Pomiedzy nimi znajdują się serie pikseli. Piksele te są łączone w linie, za pomocą serii ścieżek znajdujących się na wewnętrznej warstwie układu. Ścieżki te są prostopadłe do linii osi X, tworząc oś Y. Przykładowy projekt tego typu odczytu został przedstawiony na rysunku 2.22 [62]. Niebieskim kolorem zaznaczona jest górna warstwa płyty, na której deponują się ładunki. Połączenia koloru różowego znajdują się na wewnętrznej warstwie układu - głównie są to linie łączące serie pikseli w linii osi Y. Na rysunku tym przedstawione dwa warianty struktury o różnym rastrze.

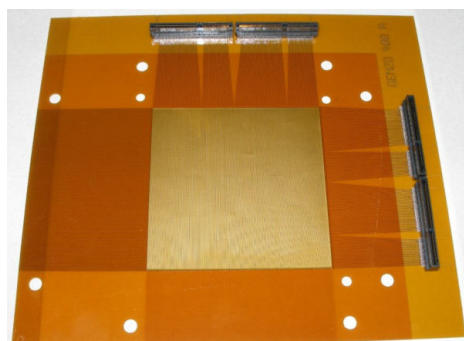


Rysunek 2.22. Fragment projektu płyty odczytu 2D z układem pasków i pikseli (warstwa górna jest koloru niebieskiego, zaś warstwa wewnętrzna koloru różowego) [62]

W literaturze znajduje się mało doniesień opisujących tego typu geometrię odczytu, co sugeruje małą popularność tego typu płyt w detektorach GEM. Zauważalne jest natomiast pojawianie się nowych prac rozważających zastosowanie tej geometrii odczytu w detektorach typu μ RWell [63, 64]. Źródło [65] pokazuje wykonane i częściowo scharakteryzowane płyty tego typu. Rysunek 2.23 a) przedstawia obraz mikroskopowy struktury typu paskowo-pikselowego, natomiast rysunek 2.23 b) przedstawia kompletną płytę odczytu $100 \times 100 \text{ mm}^2$. Płyta ta ma raster wynoszący $600 \mu\text{m}$, szerokość linii $200 \mu\text{m}$, oraz wymiary piksela $200 \times 400 \mu\text{m}^2$. Zmierzona rozdzielczość wahała się pomiędzy $66 \mu\text{m}$ a $72 \mu\text{m}$ [65], co jest wartością podobną do standardowych płyt odczytu XY.



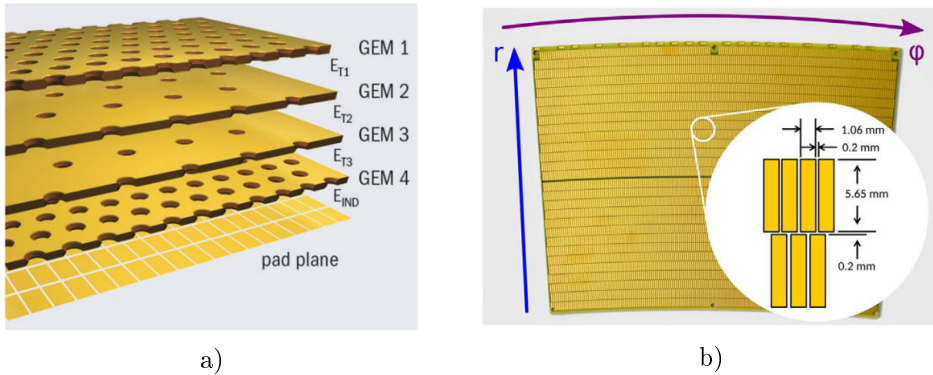
a)



b)

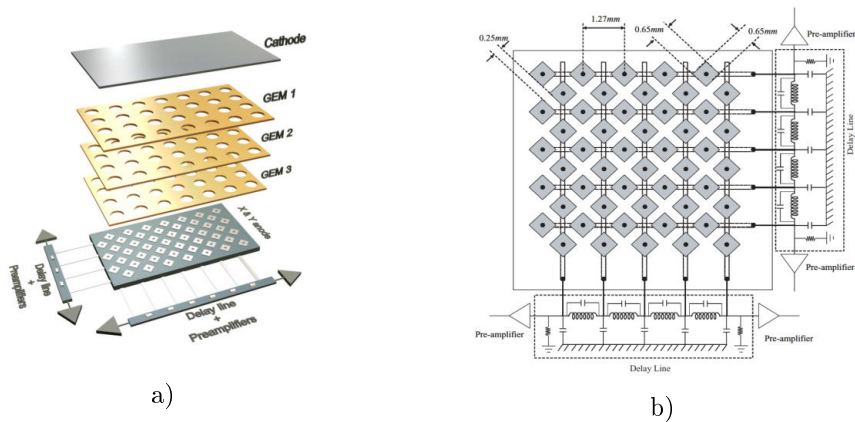
Rysunek 2.23. Płyta odczytu 2D z paskami i pikselami: a) mikroskopowy obraz struktury, b) kompletna płyta odczytu $100 \times 100 \text{ mm}^2$ [65]

Trzecim opisywanym typem struktur CCS umożliwiającym rekonstrukcję położenia w dwóch osiach, są **płyty o odczycie pikselowym**. Płyty te składają się z dwuwymiarowej matrycy pikseli - zazwyczaj o kształcie prostokątnym. Każdy piksel jest połączony do osobnego kanału przetwornika ADC. Główną zaletą tego rozwiązania jest możliwość niezależnego pomiaru ładunku na poszczególnych pikselach. Umożliwia to detekcje wielu zdarzeń równocześnie, co nie jest możliwe przy płytach odczytu typu XY lub paskowo-pikselowych. Dodatkowo płyty te są łatwe do wytwarzania, ponieważ nie zawierają struktur trawionych w materiale izolacyjnym płyty. Wadą jest natomiast bardzo duża ilość kanałów pomiarowych w stosunku do powierzchni - największa spośród wszystkich typów płyt odczytu. Wiąże się to ze znaczącym zwiększeniem kosztu elektronicznego układu pomiarowego, oraz ze stosunkowo trudnym wyprowadzeniem sygnałów do układu ADC. Schemat detektora GEM zawierające płytę z prostokątnymi pikselami został przedstawiony na rysunku 2.24 a) [66, 67]. Zdjęcie pikselowej płyty odczytu zaprojektowanej do eksperymentu ALICE, wraz diagramem przedstawiającym wymiary i geometrię pikseli przedstawiono na rysunku 2.24 b) [68]. Płyta ta ma wymiary $230 \times 170 \text{ mm}^2$ i zawiera 4828 pikseli. Dla porównania płyta odczytu XY o tych wymiarach wymagałaby jedynie 1000 kanałów pomiarowych. Opisywana płyta odczytu ma piksele o wymiarach $5,65 \times 1,06 \text{ mm}^2$. Pikselowe struktury odczytu znalazły zastosowanie w jednym z dużych eksperymentów CERN, mianowicie w eksperymencie ALICE [69]. Zmierzona rozdzielczość przestrzenna detektora z odczytem typu pikselowego wynosi około $100 \mu\text{m}$ [70].



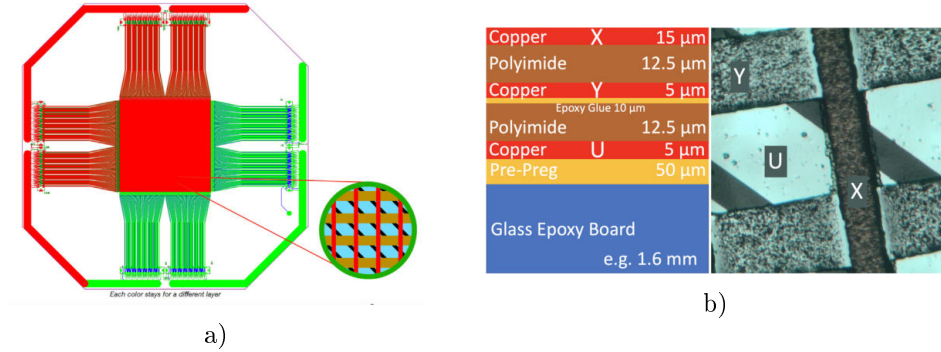
Rysunek 2.24. Detektor z odczytem pikselowym (padowym) dla eksperymentu ALICE: a) schemat detektora z płytą zawierającą prostokątne piksele [66, 67], b) zdjęcie płyty odczytu wraz z diagramem przedstawiającym wymiary pikseli [68]

Czwartym opisywanym typem płyt odczytu 2D jest **pikselowa płyta XY**. Struktura ta łączy zalety płyty XY oraz pikselowej. Umożliwia ona wyznaczanie położenia zdarzeń w dwóch osiach, a jednocześnie jest prosta i tania w produkcji. Płyta ta zawiera matrycę kwadratowych pikseli, połączonych ze sobą w linie X oraz Y, za pomocą ścieżek na wewnętrznych warstwach układu. Rysunek 2.25 a) przedstawia schemat detektora GEM z pikselową płytą XY, zaś rysunek 2.25 b) przedstawia schemat układu połączeń pikselowej płyty XY [71]. Piksele mają wymiary $0,65 \times 0,65 \text{ mm}^2$ i są ułożone w rastrze $1,27 \text{ mm}$. Uzyskiwana rozdzielczość jest na poziomie $225 - 295 \text{ }\mu\text{m}$.



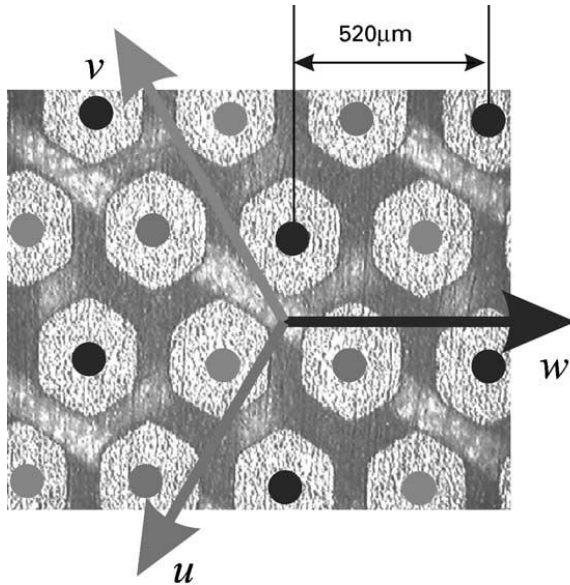
Rysunek 2.25. Pikselowa płyta odczytu XY: a) schemat detektora GEM, b) schemat układu połączeń pikselowej płyty XY [71]

Następnym opisywanym typem płyty odczytu jest **struktura XYU**. Płyty te zawierają trzy osie - X, Y oraz U. Układ linii X oraz Y jest podobny do klasycznej płyty XY, natomiast płyta XYU posiada trzecią oś znajdującą się na kolejnej warstwie. Optymalnym układem są 3 osie ustawione względem siebie pod kątem 60° , natomiast w pracy [72] wykonano płytę z osią Y pod kątem 90° do osi X, oraz osią U pod kątem 45° względem X. Dodatkowo trzeciej osi wpływa pozytywnie na rozdzielczość przestrzenną detektora, oraz powinno umożliwić detekcje wielu jednoczesnych zdarzeń. W opisywanym rozwiązaniu linie osi X mają szerokość $80 \text{ }\mu\text{m}$ i raster $400 \text{ }\mu\text{m}$, linie osi Y mają szerokość $180 \text{ }\mu\text{m}$ i raster $400 \text{ }\mu\text{m}$, zaś linie osi U mają szerokość $220 \text{ }\mu\text{m}$ i raster $283 \text{ }\mu\text{m}$. Rysunek 2.26 a) przedstawia projekt płyty XYU, zaś rysunek 2.26 b) przedstawia przekrój struktury oraz obraz mikroskopowy jej fragmentu [72].



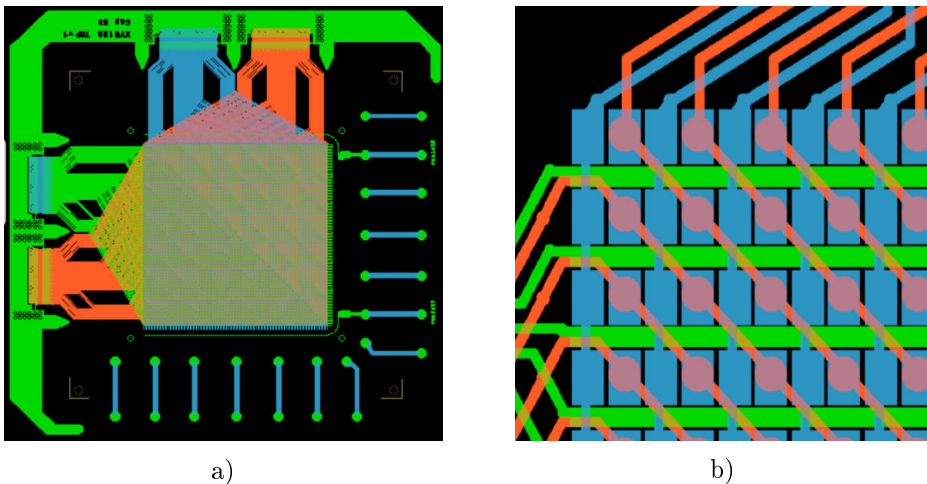
Rysunek 2.26. Płyta odczytu XYU: a) projekt płyty o wymiarach $100 \times 100 \text{ mm}^2$, b) przekrój obwodu, oraz zdjęcie mikroskopowe wykonanej struktury [72]

Publikacja [73] opisuje płytę odczytu o podobnej geometrii (w publikacji nazwana została płytą **UVW**). Płyta ta zawiera matrycę sześciokątnych pikseli połączonych trzema seriami linii rozmieszczonych co 60° i umieszczonych na warstwach wewnętrznych. Piksele są wielkości $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ i są umieszczone w rastrze $520 \mu\text{m}$. Autorzy potwierdzili możliwość detekcji wielu zdarzeń równocześnie, ze skutecznością 66% dla 2 jednoczesnych zdarzeń i 50% dla 3 jednoczesnych zdarzeń. Obraz mikroskopowy struktury płyty odczytu UVW został przedstawiony na rysunku 2.27 [73].



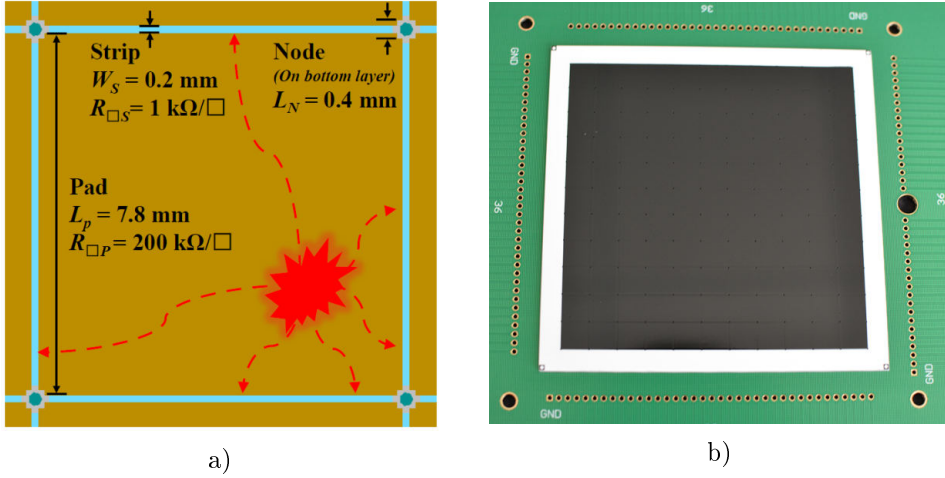
Rysunek 2.27. Zdjęcie mikroskopowe struktury płyty odczytu UVW [73]

Kolejnym przykładem tego typu geometrii jest **plyta XYU** do detektorów GEM prezentowana na rysunku 2.28 [74,75]. Płyty te składają się z 5 warstw- dwie pierwsze zawierają elektrody do pojemnościowego rozprowadzania ładunku, zaś na kolejnych 3 warstwach znajdują się linie osi XYU. Elektrody rozprowadzające ładunek są wykonane z miedzi, w rastrze $400\ \mu\text{m}$ (górną warstwą) i $800\ \mu\text{m}$ (druga warstwa). Trzecia warstwa zawiera linie osi Y w rastrze $800\ \mu\text{m}$. Czwarta warstwa zawiera linie osi X (raster $800\ \mu\text{m}$), a pomiędzy nimi piksele osi U ($330 \times 550\ \mu\text{m}$). Piąta warstwa zawiera połączenia pomiędzy pikselami osi U. Autorzy uzyskali rozdzielczość poniżej $60\ \mu\text{m}$ dla osi Y i około $75\ \mu\text{m}$ dla osi X oraz U, przy rastrze struktury wynoszącym $800\ \mu\text{m}$. Autorzy wykonali także wersję płyty YU dla detektorów μRWell [76].



Rysunek 2.28. Płyta odczytu XYU z warstwami rozprowadzającymi ładunek: a) projekt płyty o wymiarach $100 \times 100\ \text{mm}^2$, b) przybliżenie fragmentu projektu struktury, uwiadczniające linie XYU [74,75]

Ostatnim opisywanym typem struktur odczytu jest **rezystancyjna płyta odczytu**. Struktura ta umożliwia pomiar położenia zdarzeń w dwóch wymiarach (2D). Składa się ona z dwóch serii równoległe ułożonych linii osi X oraz linii osi Y ułożonych prostopadle do linii X. W punktach przecięć tych linii znajdują się otwory przelotowe do warstwy rezystywnej znajdującej się na powierzchni układu. Pojedyncza komórka struktury wyznaczona przez dwie pary przecinających się linii X i Y ma wymiary $7,8 \times 7,8\ \text{mm}^2$. Schemat komórki elementarnej przedstawiony został na rysunku 2.29 a) [77]. Kompletna płyta odczytu o wymiarach $88 \times 88\ \text{mm}^2$ została przedstawiona na rysunku [77] 2.29 b). Rezystancja powierzchniowa górnej warstwy opisywana w literaturze wynosi $100\ \text{k}\Omega/\square$ [78] lub $200\ \text{k}\Omega/\square$ [77]. Rozwiązanie to pozwala na znaczną redukcję ilości kanałów pomiarowych (144 kanałów zamiast 440 dla płyty XY).



Rysunek 2.29. Płyta odczytu typu rezystancyjnego: a) struktura elementarnej komórki odczytu z zobrazowanym mechanizmem rozchodzenia się ładunku, b) Zdjęcie płyty odczytu o wymiarach $88 \times 88 \text{ mm}^2$ [77]

Publikacja [79] opisuje detektor o podobnej budowie, przy czym warstwa rezystancyjna nie jest bezpośrednio łączona z węzłami układu odczytu, lecz jest sprzężona z nią pojemnościowo.

Warto także zaznaczyć, że część układów scalonych używanych w elektronicznych układach pomiarowych detektorów MPGD zawiera w sobie strukturę odczytu. Układy te nie były częścią tego opracowania ze względu na bardzo małe wymiary obszaru aktywnego.

2.3.2. Podłoża i technologie stosowane do wytwarzania płyt odczytu

Na podstawie publikacji wykorzystanych w podrozdziale 2.3.1, sprawdzono z jakich materiałów wykonywane są podłoża do produkcji płyt odczytu. Główne parametry płyt najpopularniejszych płyt odczytu zebrano w tabeli 2.2. Tabela ta zawiera informacje dotyczące ilości osi które są mierzone, uzyskiwanej rozdzielczości oraz użytego materiału podłoża. Materiały te zostały wylistowane osobno dla każdego typu płyty. Pozwoliło to na określenie jakie technologie są używane przy produkcji danego typu płyt odczytu.

Tabela 2.2. Porównanie parametrów najpopularniejszych typów płyt odczytu

Geometria / typ płyty odczytu	Ilość osi	Rozdzielczość	Materiał podłoża / technologia
Paskowa 1D	1D	40 μm	PCB(FR4) [51, 52], Poliimid (Kapton) [53]
Zigzag	1D	50 - 100 μm	PCB(FR4) [54, 56–58]
XY	2D	63 μm	Poliimid (Kapton) [22, 59–61]
Paskowo-pikselowa	2D	66 - 72 μm	PCB(FR4) [65], Poliimid (Kapton) [62–64]
Pikselowa	2D	100 μm	PCB(FR4) [69, 70], Poliimid (Kapton) [66, 68]
Pikselowa XY	2D	225 - 295 μm	PCB(FR4) [71]
XYU	2D	60 μm (Y) / 75 μm (X,U)	Poliimid (Kapton) [74, 76], PCB(FR4) [72, 75], izolujący fotopolimer [73]
Rezystancyjna	2D	-	Mylar + PCB(FR4) [79], Ceramika (prawdopodobnie Al_2O_3) [77, 78]

Na podstawie powyższego rozeznania można stwierdzić, że najpopularniejszymi materiałami/technologiami wykorzystywanymi przy produkcji płyt odczytu są laminat FR4 - technologia PCB, oraz Poliimid (Kapton) - technologia podobna do PCB, lecz z użyciem procesu trawienia MCV. W dwóch pracach opisywana była płyta odczytu wykonana z ceramiki, lecz autorzy nie podali jej typu. Nie znaleziono żadnych doniesień poza pracami własnymi opisujących wykorzystanie ceramiki LTCC lub wysokotemperaturowej ceramiki współwypalanej (HTCC, ang. High Temperature Cofired Ceramic) do produkcji płyt odczytu do detektorów MPGD. Materiały takie jak izolujący fotopolimer lub Mylar, są bardzo mało popularne - znalezione było po jednym doniesieniu literaturowym opisującym ich zastosowanie w płytach odczytu. Najczęściej wykorzystywane płyty typu XY wykonywane są prawdopodobnie jedynie przez CERN, m.in ze względu na opanowanie technologii trawienia poliiimidu (kaptonu) i posiadanie patentu umożliwiającego jej stosowanie (MCV). Na

podstawie przeprowadzonego przeglądu literaturowego można stwierdzić, że baza materiałowa wykorzystana do wytwarzania płyt odczytu jest bardzo wąska.

Rozdział 3

Miniaturowy elektroniczny układ pomiaru ładunków dla detektorów GEM

W rozdziale tym opisany został proces opracowywania miniaturowego układu pomiaru ładunków dla detektorów GEM, jego integracji w funkcjonalny detektor GEM oraz jego charakteryzacja. Układ ten oraz pozostałe elementy detektora zostały zatem przetestowane w warunkach operacyjnych. Wykonano i przeanalizowano pomiary z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego w tym radiogramy. Szczególną uwagę zwrócono na opis ceramicznych układów wejściowych wykonanych w technologii LTCC. Układy te w znacznym stopniu umożliwiły uzyskanie zakładanego poziomu miniaturyzacji. Przy opracowywaniu niniejszego rozwiązania wykorzystano informacje zawarte w przeglądzie literaturowym, opisanym w rozdziale 2.2.

Opracowany w ramach rozprawy i opisywany w tym rozdziale detektor został opisany w czasopiśmie z listy filadelfijskiej [80]. Detektor GEM do zastosowań kosmicznych bazujący na elementach opracowanego układu elektronicznego i ceramicznych układach wejściowych opisany został na łamach czasopisma z listy filadelfijskiej [?].

3.1. Koncepcja układu elektronicznego

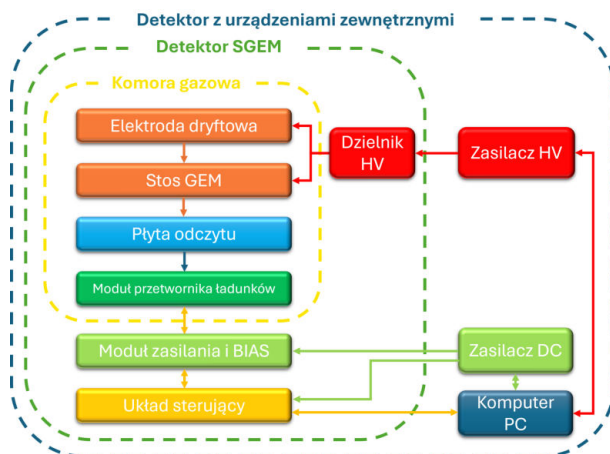
Pierwszym elementem prac nad opracowaniem elektronicznego systemu pomiaru ładunków, było określenie założeń projektowych. Następnie opracowano koncepcję układu elektronicznego oraz elementów mechanicznych detektora. Założenia projektowe przyjęto na podstawie rozeznania literaturowego, dotychczasowego doświadczenia doktoranta w projektowaniu detektorów GEM oraz planowanej aplikacji detektora. W celu zapewnienia jak największej uniwersalności urządzenia postanowiono, że układ elektroniczny wraz z obudową i wszystkimi elementami funkcjonalnymi powinien się zmieścić wewnątrz pojedynczego modułu CubeSat 1U, jednocześnie umożliwiając łączenie poszczególnych segmentów w detektor o większym rozmiarze obszaru aktywnego. Z tego względu przyjęto nazwę detektora "Segmental GEM" (akronim - SGEM), używaną dalej w rozprawie.

Przyjęte założenia projektowe:

1. Wymiary planarne układu elektronicznego mają wynosić $70 \times 70 \text{ mm}^2$.
2. Wymiary planarne płyty odczytu powinny być takie same jak układu pomiarowego.
3. Zastosowanie płyty odczytu z paskami w osiach XY (co najmniej 120 pasków w każdej osi), z możliwością montażu płyty pikselowej.
4. Płyta odczytu ma mieć obszar aktywny o jak największym rozmiarze (jak najwęższe marginesy).
5. Możliwość łączenia kilku płyt odczytu w większą macierz.
6. Układ ma zawierać 256 niezależnych kanałów pomiarowych.
7. Częstotliwość skanowania całej matrycy detektora ma wynosić 17 kHz.
8. Szum poszczególnych kanałów pomiarowych ma być niższy niż 10 fC_{RMS} .
9. Płyta odczytu oraz moduł przetwarzający ładunki mają się znajdować wewnątrz komory gazowej.
10. Urządzenie ma pracować z gazem roboczym będącym mieszaniną Ar:CO₂ (w proporcjach 70:30).
11. Zastosowane zostaną standardowe folie GEM o wymiarach $100 \times 100 \text{ mm}^2$ w celu obniżenia kosztów urządzenia.
12. Zasilanie układu: symetryczne; 2,7-3,0 V DC.
13. Zasilacz wysokonapięciowy będzie się znajdował poza układem. Zastosowany zostanie komercyjny zasilacz HV.
14. Urządzenie ma bazować na komercyjnie dostępnych elementach elektronicznych, za wyjątkiem ceramicznych układów wejściowych

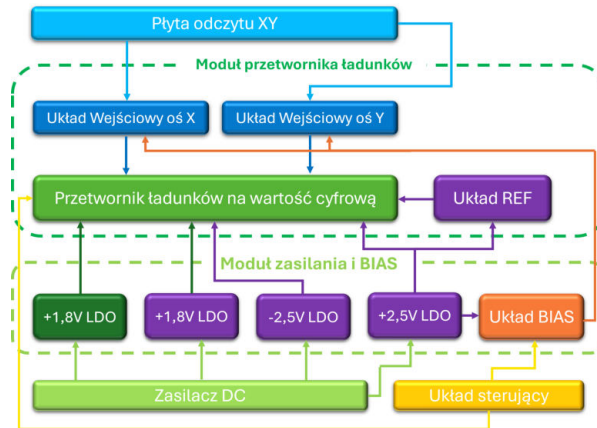
Detektor SGEM został podzielony na kilka bloków funkcyjnych znajdujących się na osobnych obwodach drukowanych: paskowa lub pikselowa płyta odczytu, moduł przetwornika ładunków na wartość cyfrową, moduł zasilania przetworników, płyta bazowa, układ sterujący z interfejsem do komputera PC. Moduł przetwornika ładunków zawierał układy wejściowe, układ przetwarzający ładunki na wartości cyfrowe oraz źródło napięcia referencyjnego. Moduł zasilania zawierał ultra-niskoszumne stabilizatory o niskim spadku napięcia (*LDO*, ang. *Low-dropout regulator*) wytwarzające napięcia wymagane przez przetwornik i układy sąsiadujące, układ polaryzacji wejść pomiarowych (BIAS) składający się ze źródła napięcia referencyjnego i przetwornika cyfrowo-analogowego (*DAC*, ang. *Low-dropout regulator*). Płyta bazowa pełniła funkcję mechaniczną - do niej były przymocowywane wszystkie pozostałe elementy detektora. Zastosowane były komercyjne zasilacze DC i HV oraz komputer PC, które znajdowały się poza układem pomiarowym. Zazwyczaj elementy

te są one dobierane osobno w zależności od zastosowania i wymagań odbiorcy. Wykorzystany został cyfrowy system akwizycji danych oparty o układ FPGA Xilinx Artix 7, będący częścią Detektora V2.0 firmy Techtra [82]. Opracowanie układu sterującego nie było częścią niniejszej rozprawy. Schemat blokowy opracowanego detektora przedstawiono na rysunku 3.1



Rysunek 3.1. Schemat blokowy detektora SGEM

Następnie wybrane zostały kluczowe elementy układu elektronicznego, w tym m.in. przetworniki ładunku na wartość cyfrową, układy zasilające, złącza. Opracowany system pomiaru ładunków w zakresie femtokulombów bazuje na przetwornikach (ładunku na napięcie) z przełączanymi pojemnościami. Na podstawie rozeznania literaturowego (rozdział 2.3), wytypowano układy scalone z serii DDC od Texas Instruments (256 kanałowy DDC2256A). Zastosowanie tego układu pozwala na opracowanie miniaturowego i niskoszumnego systemu pomiarowego, ze względu umieszczenie kluczowych elementów takich jak wzmacniacze operacyjne, kondensatory (w sprzężeniu zwrotnym) i klucze elektronowe wewnątrz pojedynczej struktury. Układy te są przystosowane do pomiaru sygnałów z detektorów bazujących na fotodiodach, umożliwiając pomiar ładunków o polaryzacji dodatniej (zakres pomiaru ujemnych sygnałów jest bardzo wąski), co jest pewną niedogodnością w opisywanej w rozprawie aplikacji. W celu użycia tych układów do detekcji ładunków o polaryzacji ujemnej (elektrony zebrane na elektrodach płyty odczytu) występujących w detektorach GEM, każdy kanał pomiarowy z osobna jest polaryzowany przez opracowywany ceramiczny układ wejściowy (opisany w podrozdziale 3.3). Wybrano 140-pinowe złącza Hirose typu FX10A-168P-SV do połączenia układu mierzącego ładunki z płytą odczytu, ze względu na ich mały rozmiar. Ponadto złącza te zostały sprawdzone w detektorach opracowywanych m.in. przez CERN. Szczegółowy schemat blokowy opracowanych modułów przedstawiono na rysunku 3.2.



Rysunek 3.2. Szczegółowy schemat blokowy opracowanych modułów detektora SGEM

3.2. Charakteryzacja past rezystywnych

Technologia LTCC została wybrana przy realizacji tego projektu ze względu na kilka czynników. Technologia ta pozwala na wykonywanie skomplikowanych, wielowarstwowych układów zawierających ścieżki przewodzące oraz elementy pasywne takie jak rezystory, kondensatory, cewki itp. Elementy z ceramiki LTCC ze względu na swoje parametry znajdują zastosowanie w aplikacjach kosmicznych [83,84]. Parametry te to m.in. wysoka niezawodność, odporność na wysokie i niskie temperatury, duża wytrzymałość dielektryczna oraz stosunkowo małe koszty produkcji.

Do realizacji struktur wybrano proces DP951 i kompatybilne z nim materiały, ze względu na bardzo dobre parametry podłoży, wysoką przewidywalność i powtarzalność procesu oraz na bardzo duże doświadczenie zespołu Katedry Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej w wykorzystaniu tego systemu ceramicznego.

Jednym z pierwszych etapów prac nad strukturami LTCC zawierającymi rezystory jest charakteryzacja past rezystywnych. Proces ten jest wykonywany zawsze gdy wykorzystujemy pastę z innej serii produkcyjnej (parametry potrafią się delikatnie różnić pomiędzy poszczególnymi seriami), gdy pasta była przechowywana przez długi okres, lub gdy występuje konieczność zastosowania pasty w nietypowej dla niej aplikacji.

Zgodnie z opracowanym projektem, ceramiczne układy wejściowe powinny zawierać rezystory o wartościach rzędu 0,25-1 M Ω i 25-100 M Ω . W celu uzyskania struktur o jak najmniejszych wymiarach konieczne było zastosowanie rezystorów zagrzebanych (współwypalanych z podłożem ceramicznym) na kilku warstwach układu. Ze względu na budowę struktury, niemożliwe jest korygowanie wartości poszczególnych rezystorów po procesie wypalania. Pasty rezystywne kompatybilne

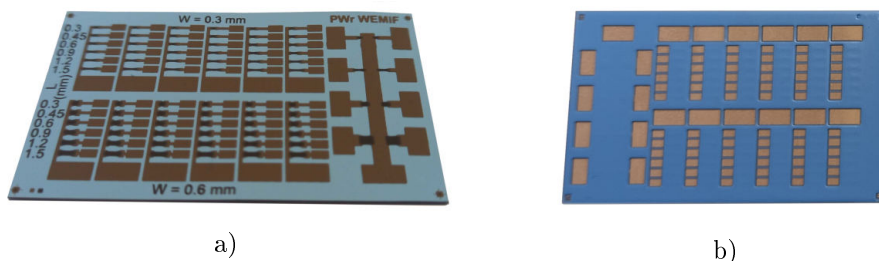
z podłożami LTCC DP951 to pasty DP [85] serii: 1700, 2000, CF000, a także pasty Herause serii 7000 [86]. Parametry tych past zostały przedstawione w tabeli 3.1

Tabela 3.1. Pasty rezystywne kompatybilne z podłożami DP951 wraz z parametrami (na podstawie [85, 86])

Producent	Seria	Zakres $R/\square$	Stosowanie
DuPont/Celanese	1700	10 Ω - 100 k Ω	na wypalone podłoża DP951
DuPont/Celanese	2000	10 Ω - 10 M Ω	na wypalone podłoża DP951
DuPont/Celanese	CF000	10 Ω - 10 k Ω	współwypalanie z DP951
Herause	7000	0,1 Ω - 20 G Ω	na podłoża alundowe

Zgodnie z tabelą 3.1, pasty dedykowane do współwypalania (ang. co-firing), czyli do tworzenia rezystorów zagrzebanych mają opór powierzchniowy w zakresie 10 $\Omega/\square$ - 10 k $\Omega/\square$, co jest wartością zbyt niską by móc wytwarzać małe rezystory o rezystancji rzędu 10 - 100 M Ω . Do dalszych prac wytypowano trzy typy past rezystywnych: Herause 9181 (100 M $\Omega/\square$), DuPont 2061 (1 M $\Omega/\square$) oraz DuPont 2071 (10 M $\Omega/\square$). Pasty te nie są dedykowane do współwypalania, w związku z czym konieczna była charakteryzacja właściwości rezystorów zagrzebanych wykonanych za pomocą wyżej wymienionych past.

Przy charakteryzacji parametrów rezystorów zagrzebanych wykonanych z wybranych past, wykorzystano wzór testowy opracowany w Katedrze Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej, stosowany do różnego typu past. Zawiera on rezystory o dwóch szerokościach: 0,3 mm i 0,6 mm. Dla każdej szerokości wykonane jest 6 identycznych, odseparowanych od siebie serii rezystorów umożliwiając uzyskanie pewnej statystyki. Każda seria zawiera rezystory o długości od 0,3 mm do 1,5 mm, co pozwala określić wpływ długości rezystora na parametr $R/\square$. W wykonywanych próbkach rezystory zostały przykryte warstwą ceramiki, aby przetestować parametry struktur zagrzebanych. Przykładowe struktury wytworzone w ramach niniejszych prac zostały zaprezentowane na rysunku 3.3.



Rysunek 3.3. Zdjęcia próbek do charakteryzacji past rezystancyjnych: a) niewypalone podłoże LTCC z nadrukowaną metalizacją oraz rezystorami, b) wypalony układ LTCC

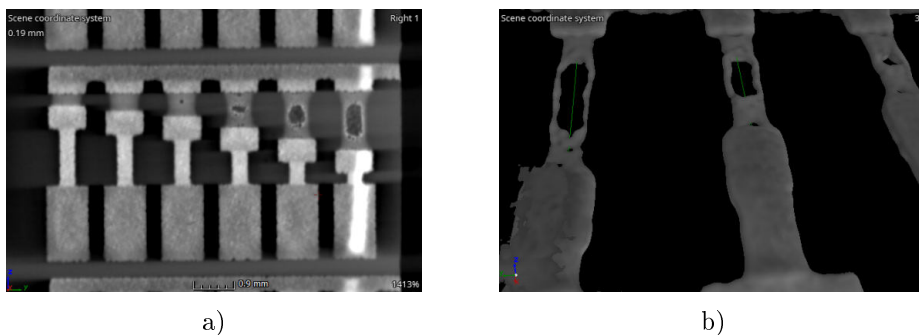
Proces wykonywania próbek wygląda następująco:

1. Wycięcie laserem podłoży z folii DP951 o grubości 254 μm .
2. Laminacja 2 podłoży w prasie izostatycznej.
3. Sitodruk ścieżek metalicznych (pasta PdAg DP6146).
4. Sitodruk rezystorów przy użyciu badanej pasty.
5. Wycięcie laserem warstwy wierzchniej, przykrywającej rezystory i zawierającej okienka odsłaniające pola testowe.
6. Laminacja warstwy wierzchniej z podłożem zawierającym rezystory.
7. Wypalanie struktury ceramicznej.

Szczegółowy opis użytych materiałów, urządzeń i parametrów procesu został przedstawiony w rozdziale 3.3, przy opisie wytwarzania struktur LTCC. Początkowo nadruki były wykonywane na pojedynczym podłożu, lecz struktury te się mocno deformowały w procesie wypalania. Zastosowanie dwóch z laminowanych ze sobą podłoży rozwiązało ten problem i pozwoliło na uzyskanie struktur o odpowiedniej płaskości.

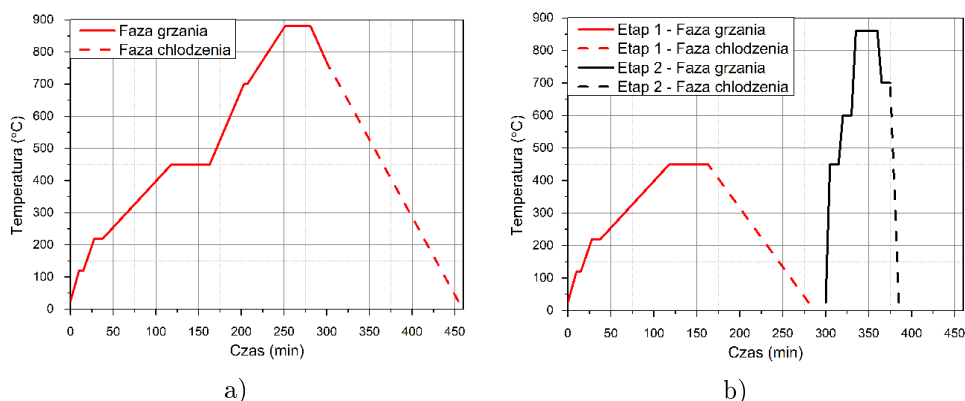
Pierwszą serię próbek wykonano z użyciem pasty Herause 9181, ponieważ nie jest ona dedykowana do podłoży DP951 i istniało duże ryzyko niekompatybilności pasty z wybranym procesem technologicznym. Po wykonaniu próbek przeprowadzone zostały pomiary elektryczne wykonanych rezystorów. Niestety, nie osiągnęły zakładanych parametrów elektrycznych - rezystory o długości 0,3 mm i 0,4 mm miały wartości rezystancji w okolicy 1 M Ω , a rezystory o długości 0,6 mm i większej charakteryzowały się rozwarciem (rezystancja powyżej 10 G Ω). Pomiary były wykonywane przy użyciu precyzyjnego źródła mierzącego SMU Keightley 2450.

W celu zdiagnozowania źródła problemów, próbki zostały zbadane przy użyciu tomografu rentgenowskiego Nikon X TH 225. Wyniki tomografii przedstawiono na rysunku 3.4.



Rysunek 3.4. Wyniki tomografii rentgenowskiej wytworzonych próbek: a) prześwietlenie ukazujące defekty w rezystorach, b) rekonstrukcja 3D rezystorów grubowarstwowych

Na podstawie radiogramów określono przyczynę - w rezystorach tworzą się zamknięte przestrzenie wypełnione prawdopodobnie gazem. Przypuszcza się, że tworzą się one ze względu na niewystarczające odgazowanie produktów rozkładu termicznego lepiszcza organicznego z pasty rezystancyjnej. W celu rozwiązania tego problemu postanowiono, aby wszystkie kolejne próbki wypalać w procesie dwuetapowym. Pierwszy etap miał na celu usunięcie rozpuszczalników i substancji organicznych (lepiszczy) z folii LTCC i z zastosowanych past. Drugi etap miał na celu przetop szkliwa i synteryzację cząstek ceramicznych. Klasycznie układy LTCC wypala się w pojedynczym procesie z wykorzystaniem odpowiedniego profilu czasowo-temperaturowego. Wypalanie wykonuje się zazwyczaj w piecu komorowym. Przy wypalaniu dwuetapowym, próbki były najpierw wygrzewane w piecu komorowym (profil ten, do temperatury 450degC był zgodny z profilem rekomendowanym dla ceramiki DP951), a następnie próbki były przeniesione do pieca tunelowego w celu synteryzacji ceramiki. Pomiedzy piecami próbki są przenoszone na zimno, po wychłodzeniu pieca komorowego. Na tym etapie próbki są bardzo delikatne i kruche. Dwuetapowy proces wypalania pozwala na lepsze usunięcie produktów rozkładu termicznego lepiszcza organicznego, a dodatkowo stosunkowo krótka druga faza ogranicza mieszanie się oraz reakcje szkliwa znajdującego się w podłożu ze szkliwem znajdującym się w pastach. W pierwszym etapie wykorzystano piec komorowy Nabatherm HTC 03, a w drugim piec tunelowy BTU QA 41-6-54. Profile temperaturowe obu procesów zostały przedstawione na rysunku 3.5



Rysunek 3.5. Profile temperaturowe zastosowane podczas wypalania próbek: a) rekomendowany przez producenta ceramiki DP951, b) dwuetapowy proces wypalania

W kolejnym kroku wykonano następną serię próbek kalibracyjnych, tym razem z wykorzystaniem procesu wypalania dwuetapowego. Badane były pasty: Herause 9181, DuPont 2061 oraz DuPont 2071. Następnie wykonano pomiary elektryczne wykonanych próbek. Rezystory zagrzebane wykonane z past DuPont 2061 oraz

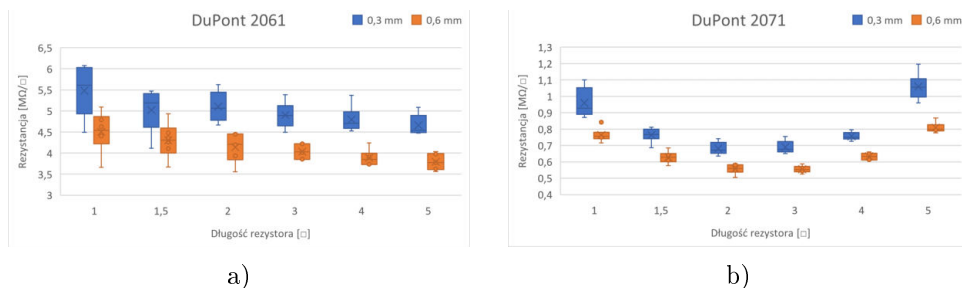
DuPont 2071 uzyskały rezystancje różniące się maksymalnie o około jeden rząd względem parametrów deklarowanych dla rezystorów powierzchniowych. Natomiast większość rezystorów wykonanych z użyciem pasty Herause 9181 ponownie charakteryzowała się rezystancją powyżej $10\text{G}\Omega$. Wyniki pomiarów struktur przedstawiono w tabeli 3.2

Tabela 3.2. Wyniki pomiarów rezystorów o szerokości 0,3 mm na próbkach kalibracyjnych wykonanych z past: Herause 9181, DuPont 2061 oraz DuPont 2071

Pasta	Katalogowa wartość $R/\square$	Ilość kwa- dratów	Zmierzona wartość $R/\square$	Odchylenie standardowe
Herause 9181	$100\text{ M}\Omega/\square$	1 $\square$	$0,751\text{ M}\Omega/\square$	0,157
		1,5 $\square$	$0,677\text{ M}\Omega/\square$	0,092
		2 $\square$	$3,300\text{ M}\Omega/\square$	1,993
		3 $\square$	-	-
		4 $\square$	-	-
		5 $\square$	-	-
DuPont 2061	$1\text{ M}\Omega/\square$	1 $\square$	$5,480\text{ M}\Omega/\square$	0,624
		1,5 $\square$	$5,022\text{ M}\Omega/\square$	0,515
		2 $\square$	$5,105\text{ M}\Omega/\square$	0,356
		3 $\square$	$4,901\text{ M}\Omega/\square$	0,310
		4 $\square$	$4,793\text{ M}\Omega/\square$	0,304
		5 $\square$	$4,660\text{ M}\Omega/\square$	0,247
DuPont 2071	$10\text{ M}\Omega/\square$	1 $\square$	$0,960\text{ M}\Omega/\square$	0,089
		1,5 $\square$	$0,765\text{ M}\Omega/\square$	0,044
		2 $\square$	$0,681\text{ M}\Omega/\square$	0,039
		3 $\square$	$0,690\text{ M}\Omega/\square$	0,038
		4 $\square$	$0,757\text{ M}\Omega/\square$	0,025
		5 $\square$	$1,059\text{ M}\Omega/\square$	0,080

Wykresy przedstawiające średnią wartość rezystancji na kwadrat dla rezystorach o szerokościach 0,3 i 0,6 mm przedstawiono na rysunku 3.6.

Na podstawie uzyskanych wyników ustalono, że rezystory o wartości rzędu $1\text{ M}\Omega$ będą wykonane z pasty DP 2071, natomiast do rezystorów w zakresie 25-100 $\text{M}\Omega$ będzie użyta pasta DP 2061. Pasta Herause 9181, ze względu na duże problemy z odgazowywaniem gdy jest zagrzebana pomiędzy foliami LTCC, uznana została za nieperspektywiczną dla zakładanego zastosowania. Wykonane zostało kilka próbek z różnymi parametrami procesu, w tym wypalane dwuetapowo, lecz efekty za każdym razem były zbliżone. Jedynie rezystory z pasty Herause 9181, wypalane na powierzchni ceramiki charakteryzowały się parametrami zbliżonymi do katalogowych.



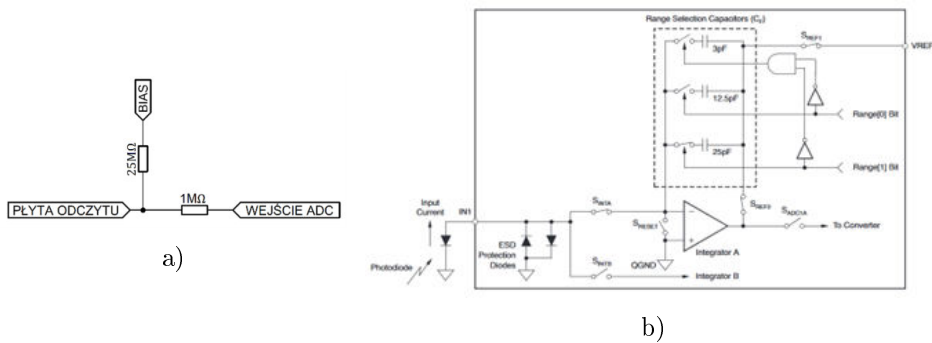
Rysunek 3.6. Wyniki pomiarów rezystorów o szerokości 0,3 mm i 0,6 mm na próbkach kalibracyjnych wykonanych z past: a) DuPont 2061, b) DuPont 2071

3.3. Układy wejściowe wykonane w technologii LTCC

Prace nad ceramicznym układem wejściowym rozpoczęto od określenia założeń projektowych. Układy te mają pełnić dwie funkcje: polaryzować wejścia układu oraz zabezpieczać je przez nadmiernym prądem. Polaryzacja wejść jest konieczna ze względu na zastosowanie układów DDC2256, które są przystosowane do mierzenia ładunków dodatnich. Wstrzykiwanie do wejść układu dodatniego prądu o wielkości bliskiej górnemu zakresowi przetwornika, umożliwia pomiar ładunków lub prądu o polaryzacji ujemnej. Wstrzykiwanie to zrealizowano stosując zewnętrzne rezystory o rezystancji rzędu 25-100 MΩ. Zabezpieczenie wejść układu zrealizowano przez dodanie rezystorów o wartości 0,25-1 MΩ szeregowo z wejściami.

Założenia projektowe dotyczyły także parametrów mechanicznych układu. Zdecydowano, że w celu jak największej miniaturyzacji tego komponentu, będzie miał on formę płytki o wymiarach niewiele większych od złącza do paskowej lub pikselowej płyty odczytu. Zastosowano złącze FX10A-168P-SV stosowane obecnie w detektorach opracowywanych przez CERN i inne ośrodki naukowe. Ma to na celu zapewnienia możliwości przyszłej interoperacyjności elementów detektora opracowywanych w ramach niniejszej rozprawy z elementami opracowywanymi przez inne światowe grupy. Wielkość ceramicznego układu wejściowego została ustalona na $12 \times 52 \text{ mm}^2$. Jako że pojedynczym złączem FX10A-168P-SV przesyłane jest 128 kanałów pomiarowych, to ustalono, że pojedyncza struktura ceramiczna powinna zawierać 128 kompletów rezystorów polaryzujących i zabezpieczających, czyli łącznie 256 sztuk na strukturę. Detektor ma mieć 256 niezależnych kanałów podzielonych na 2 osie, czyli po 128 sygnałów na oś X i Y, tak więc wykorzystana będzie po jednej strukturze na oś detektora. Ponadto sprawdzono, że przy zastosowaniu komercyjnie dostępnych elementów elektronicznych SMD o wielkości 0402, układ zajmowałby około 3-krotnie większą powierzchnię niż opracowana struktura ceramiczna. W celu osiągnięcia zakładanej miniaturyzacji układów, wielo-pinowe złącza łączące układ z płytą odczytu zostały przylutowane bezpośrednio do górnej części struktury. Układ

połączony jest z dalszą częścią układu elektronicznego za pomocą matrycy kulek BGA (0,5 mm średnicy w rastrze 1 mm). Wszystkie rezystory znajdują się wewnątrz struktury, bez możliwości trymowania ich rezystancji. Początkowo projekt zakładał 4 warstwy, z czego 2 zawierały rezystory, lecz przez niemożliwość zastosowania pasty o rezystywności $100 \text{ M}\Omega/\square$ projekt musiał zostać zmodyfikowany. Ostatecznie układ składał się z 5 warstw, w tym 3 warstwy zawierające rezystory. Podyktowane jest to koniecznością wykonania stosunkowo długich rezystorów z pasty o rezystywności około $4,7 \text{ M}\Omega/\square$. Schemat ceramicznego układu wejściowego, oraz części wejściowej układu scalonego DDC264 (bliźniaczo podobna do zastosowanego DDC2256A) zostały przedstawione na rysunku 3.7.



Rysunek 3.7. Schemat: a) ceramicznego układu wejściowego, b) przetwornika ładunku na napięcie, będącego częścią układu DDC264 [87]

Poniżej przedstawiono obliczenia, na podstawie których wyznaczono wartości rezystorów polaryzujących i rezystorów zabezpieczających. Pierwsze obliczenia dotyczą natężenia prądu przepływającego przez rezystory polaryzujące (BIAS).

Natężenie prądu $I[A]$, jako ładunek $q[C]$ przepływający w czasie $t[s]$ można wyznaczyć zależnością:

$$I = \frac{q}{t} \quad (3.1)$$

Jako, że detektor pracuje na zakresie od -0,025 do 6,25 pC, przyjęto, że wejścia powinny być polaryzowane ładunkiem 5 pC. Ujemne ładunki docierające do detektora będą obniżały sumaryczną wartość ładunku na poszczególnych wejściach, przez co możliwy będzie pomiar ładunków ujemnych. Wartość 5 pC pozwoliła pozostawić część zakresu na wypadek wystąpienia ładunków dodatnich na wejściu detektora. W obliczeniach przyjęto najkrótszy możliwy do uzyskania przez układ DDC2256A czas integracji próbek, czyli $58,8 \mu\text{s}$. Napięcie polaryzujące (BIAS) pochodzi ze źródła napięcia odniesienia (2,046 V) połączonego z przetwornikiem cyfrowo analogowym,

co umożliwia jego regulację w zakresie od 0 V do 2,046 V. Wartość rezystancji została tak dobrana, by przy maksymalnej prędkości pomiaru i najwyższej wartości BIAS możliwe było ustawienie polaryzacji na poziomie 5 pC.

Prąd płynący przez rezystory polaryzujące wynosi:

$$I = \frac{5 * 10^{-12} C}{58,8 * 10^{-6} s} = 8,5 * 10^{-8} A = 85 nA \quad (3.2)$$

Wartość rezystorów polaryzujących wyliczona z prawa Ohma:

$$R = \frac{U}{I} \quad (3.3)$$

,gdzie U oznacza napięcie przyłożone do rezystora wyrażone w [V], a I to wartość przepływającego przez niego prądu wyrażona w [A].

Podstawiając posiadane dane:

$$R = \frac{2,046 V}{8,5 * 10^{-8}} = 24,07 * 10^6 \Omega = 24,07 M\Omega \quad (3.4)$$

Następnie wyliczono wartość rezystora zabezpieczającego, połączonego szeregowo z wejściem układu DDC2256A. Rezystor ten wraz z kondensatorem znajdującym się pętli sprzężenia przetwornika tworzą filtr dolnoprzepustowy. Wartość tego rezystora powinna być z jednej strony jak największa, by w razie zwarcia lub iskrzenia pomiędzy dolną folią GEM (spolaryzowaną napięciem rzędu 700 V) ograniczyć prąd wpływający do układu scalonego, a jednocześnie powinna być odpowiednio niska, by nie ograniczać pasma częstotliwościowego układu pomiarowego.

Wzór na częstotliwość graniczną układu całkującego, czyli częstotliwość przy której wzmacnienie spada do 1, przedstawiony został poniżej:

$$f_g = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.5)$$

,gdzie C to pojemność wyrażona w [F].

Przekształcając by wyznaczyć wartość rezystancji:

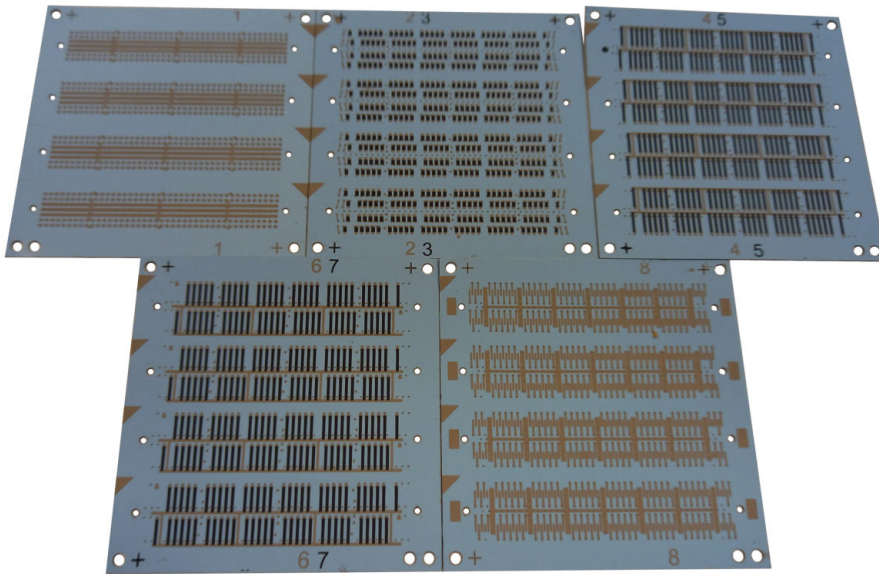
$$R = \frac{1}{2\pi f_g C} \quad (3.6)$$

Podstawiamy do wzoru maksymalną częstotliwość pomiaru - 17 kHz, oraz pojemność pętli sprzężenia wzmacniacza wynoszącą około 1,7 pF:

$$R = \frac{1}{6,4 * 17 * 10^3 * 1,7 * 10^{-12}} = 5,51 * 10^6 \Omega = 5,51 M\Omega \quad (3.7)$$

Z obliczeń tych wynika, że maksymalna wartość rezystorów znajdujących się szeregowo z wejściami układu DDC2256A wynosi 5,51 M Ω . Wartość tych rezystorów została przyjęta o rząd niżej, na poziomie 0,5 - 1 M Ω , by ograniczyć wpływ powstałego filtra dolnoprzepustowego na wyniki pomiarów.

Następnie, na podstawie powyższych obliczeń i wyników charakterystyki past, ustalono wymiary rezystorów a także ich rozmieszczenie. Rezystory polaryzujące o rezystancji 25 M Ω miały szerokość 0,35 mm i długość 3,45 mm. Pomimo rozmieszczenia ich na 2 warstwach, odległości pomiędzy poszczególnymi elementami wzoru (rezystory, metalizacje, przekroje) były bardzo małe. Prowadziło to do sporadycznego występowania defektów w gotowych układach. Układy zawierające zwarcia lub przerwy były poddawane tomografii rentgenowskiej, a następnie wykonywana była analiza defektów. Po iteracyjnym wykonaniu kilku wersji masek i układów, projekt został dopracowany. Rezystory o wartości 0,5 M Ω mają szerokość 0,6 mm i długość 0,3 mm, przez co możliwe było ich ułożenie na pojedynczej warstwie. Zdjęcia poszczególnych warstw układu zawierające nadruki z metalizacjami i rezystorami zostały przedstawione na rysunku 3.8.



Rysunek 3.8. Poszczególne warstwy układu po nadrukowaniu połączeń metalicznych i rezystorów

Każdorazowo, po opracowaniu nowej wersji projektu, konieczne było wykonanie kompletu nowych masek oraz sit. Sita te są wykorzystywane przy nadruku warstw metalicznych i rezystorów. Komplet składał się z 4 sit i 2 laserowo wycinanych

szablonów ze stali nierdzewnej. Szablony były wykorzystywane do nadruków o grubościach powyżej 50 μm .

Proces wytwarzania ceramicznych układów wejściowych wyglądał następująco:

Dzień przed rozpoczęciem prac, w pomieszczeniu była włączana klimatyzacja, w celu ustabilizowania temperatury na poziomie 22 °C. Stabilna temperatura w laboratorium była istotnym czynnikiem pozwalającym na uzyskiwanie powtarzalnych wyników. Na co najmniej godzinę przed rozpoczęciem prac z dygestorium były pobierane odpowiednie pasty celem ujednolicenia ich temperatury. Kontrolowana była czystość sit, a w razie zauważenia zabrudzeń, dane sito było myte acetonem.

Po przygotowaniach, prace rozpoczynane były od pobrania formatek folii LTCC i suszenia ich w temperaturze 120 °C przez 10 min w celu wstępnego odparowania rozpuszczalników. W procesie tym formatki delikatnie się kurczą, natomiast są dużo stabilniejsze wymiarowo przy kolejnych cyklach termicznych. Początkowo metoda ta nie była stosowana, więc po suszeniu pierwszego nadruku formatka kurczyła się, przez co dopasowanie kolejnych nadruków nie było idealne (błąd sięgał kilkudziesięciu μm w skali całej formatki). Zastosowanie wyżej opisanej metody pozwoliło na bardzo dokładne pozycjonowanie kolejnych nadruków.

Następnie formatki były umieszczane na stole próżniowym stacji laserowej LPKF ProtoLaser U. Stacja ta zawiera laser Nd:YAG pracujący na długości fali 355 nm. W projekcie zastosowane były podłoża o grubości 254 μm , oraz 50 μm , przy czym wszystkie nadruki były wykonywane na folii o grubości 254 μm . Podłoża LTCC są produkowane i dostarczane na folii transportowej wykonanej z Mylaru. Jako, że folia ta będzie wykorzystywana w jednym z procesów nie jest ona usuwana przed procesem cięcia laserowego. W celu uzyskania precyzyjnie i w pełni wyciętych otworów, został opracowany dedykowany profil wypalania. Podłoża umieszczane były na stole, tak aby folia mylarowa znajdowała się na wierzchu, a profil cięcia miał dwa etapy. W pierwszym etapie laser wypalał z małą mocą elementy (obrysy, otwory, znaczniki pozycjonujące itp.) w folii mylarowej, tak aby zwęglenia powstające na krawędziach były jak najmniejsze. W drugim etapie moc lasera była zwiększana w celu szybkiego i efektywnego usuwania materiału LTCC. Początkowo, elementy były wycinane w jednoetapowym procesie, co prowadziło do powstawania zwęglenia i lokalnych przetopów folii nośnej, co generowało defekty w elementach wypalanych w folii LTCC.

Po wypaleniu wzorów, formatki były transferowane na stół podciśnieniowy sito-drukarki Aurel VS1520A. Ręcznie za pomocą rakli, otwory (przelotki) były wypełniane pastą DuPont Ag VIA 6141R. Otwory w folii mylarowej służyły za idealnie przylegającą i spozycjonowaną maskę, co znacznie ułatwiało proces i niwelowało

ilość odrzutów. Następnie formatki z wypełnionymi otworami były suszone w temperaturze 120 °C przez 10 min. Następnie jakość wypełnienia otworów była sprawdzana za pomocą mikroskopu optycznego z podświetleniem od spodu próbki. Po tym procesie folia nośna była usuwana.

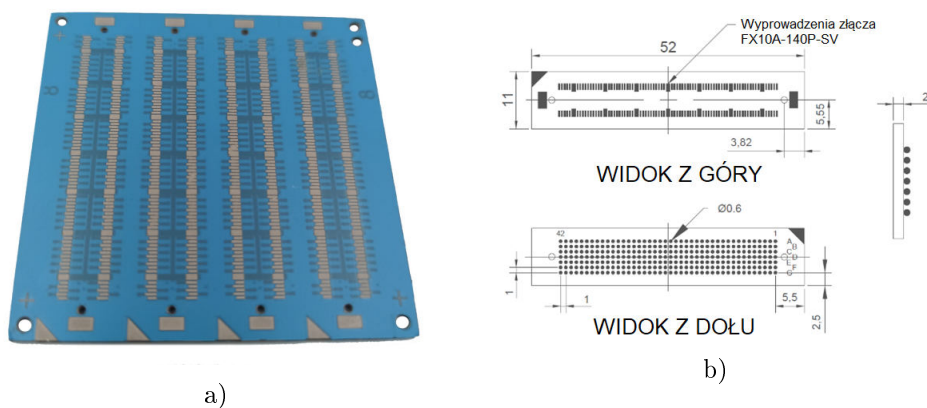
Kolejnym etapem było wykonanie nadruków ścieżek metalicznych i warstw rezystancyjnych. Pierwszą czynnością był montaż i kalibracja wysokości sita oraz rakli. Następnie na sito była nakładana odpowiednia pasta i wykonywany był testowy nadruk na folii umieszczonej na stole. Nadruk testowy pozwalał na kalibrację położenia znaczników bazujących. Następnie na stół umieszczano formatkę z warstwą folii LTCC na której miał być wykonany dany nadruk. Przy użyciu systemu optycznego odszukiwane i zaznaczane było położenie znaczników bazujących. Każdorazowo przed nadrukiem dolna powierzchnia sita oraz górna część folii LTCC były czyszczone za pomocą specjalistycznej suchej ściereczki bezpyłowej. Proces ten umożliwił osiągnięcia odpowiedniej i powtarzalnej jakości nadruków. Po upewnieniu się, że sito i podłoże są czyste oraz nie ma na nich nierówności, następowało drukowanie warstwy. Następnie, podobnie jak przy wypełnianiu otworów, formatki były suszone w temperaturze 120 °C przez 10 min. Parametry takie jak siła nacisku lub wysokość rakli, były empirycznie dobierane osobno do każdego wzoru/sita w celu uzyskania nadruków o jak najlepszej jakości. Nadruki warstw rezystancyjnych były wykonywane po nadruku metalizacji i suszeniu.

Po wykonaniu wszystkich nadruków, przeprowadzana była wizualna kontrola ich jakości. Wykonywana była ona manualnie przy użyciu mikroskopu optycznego Leica DM4500. Następnie komplet warstw nieposiadających widocznych defektów był układany w stos (*ang. Stack*), przy użyciu dedykowanego uchwytu. Uchwyt ten składa się z 2 płytek wykonanych z laminatu FR4 oraz 5 jednorazowych kołków pozycjonujących. Kołki te są ciasno spasowane w otworach pierwszej płytki, a otwory wykonane w drugiej płytce mają pasowanie luźne (kołki mogą się luźno przesuwac). Poszczególne warstwy podłoży ceramicznych były po kolei nakładane na kołki, a następnie przyciskane drugą płytką z FR4. Kołki były przycinane, tak by nie wystawały poza powierzchnie drugiej płytki. Stos był umieszczany w specjalnej metalizowanej torebce do pakowania próżniowego. Powietrze znajdujące się w torebce było odpompowywane a następnie zgrzewana była jej krawędź. Proces ten był wykonywany w pakowarce próżniowej Henkelman.

W celu trwałego połączenia wszystkich warstw układu, stos poddawany był procesowi Laminacji. Proces ten odbywał się w prasie izostatycznej, wypełnionej wodą. Prasa izostatyczna umożliwia równomierne ściskanie stosu z każdej strony, co minimalizuje możliwość powstania defektów laminacji. Proces laminacji trwał 10 min, przy ciśnieniu 20 MPa i temperaturze równej 70 °C. Po zakończeniu procesu, struktury były wyciągane z uchwytu pozycjonującego, i kontrolowane.

Na koniec, z laminowane struktury były poddawane procesowi wypalania dwu-

etapowego opisanego dokładnie w poprzednim podrozdziale. Zdjęcie wypalonej struktury oraz rysunek z wymiarami pojedynczego układu znajdują się na rysunku 3.9.

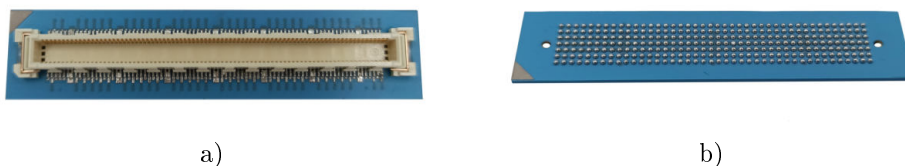


Rysunek 3.9. Ceramiczny układ wejściowy: a) formatka zawierająca 4 struktury, b) wymiary ceramicznego układu wejściowego

Kolejnym etapem był montaż złączy. Złącza były lutowane przy użyciu pasty lutowniczej ALPHA OM-338 CSP. Pasta ta była nakładana na sitodrukarce za pomocą szablonu ze stali nierdzewnej o grubości $60\ \mu\text{m}$. Następnie złącza były umieszczane na formatce zawierającej 4 układy, tak by kołki wystające ze spodniej strony złączy zostały umieszczone w otworach pozycjonujących. Metoda ta zapewnia precyzyjne pozycjonowanie układów, bez możliwości przesunięcia się podczas procesu lutowania. Proces ten wykonywany był na płycie grzejnej ustawionej na temperaturę $260\ ^\circ\text{C}$ i trwał około 10 sekund. Po wizualnym sprawdzeniu, że pasta dokonała rozplwy układy były ściągane z płyty grzejnej w celu ostudzenia. Następnie, z formatek wycinane były pojedyncze struktury. Za pomocą lasera wykonane były nacięcia po obu stronach układów, na około $1/3$ ich grubości. Następnie struktury były łamane wzdłuż nacięć. Ostatnim krokiem było nałożenie kulek BGA i ich rozplw. Kulki były nakładane za pomocą małego sita umieszczonego w dedykowanym przyrządzie. Następnie sito było podnoszone a kulki były wtapiane w układ przy pomocy gorącego powietrza. Gotowy ceramiczny układ wejściowy został zaprezentowany na rysunku 3.10.

Wszystkie wytworzone układy były badane przy użyciu źródła mierzącego. Mierzone były wartości wszystkich rezystorów, ciągłość inii, a także wartość rezystancji pomiędzy sąsiednimi kanałami. Pomiaru te pozwalały na diagnozę uszkodzeń wewnątrz struktury, a także na określenie rozrzutu wartości rezystorów.

Pierwsze kilka serii produkcyjnych miały defekty w postaci zwarć między liniami, lub przerw w miejscach kontaktu ścieżek z przelotkami (metalizowanymi otworami). Źródła defektów były lokalizowane przy użyciu tomografu rentgenowskiego, a na



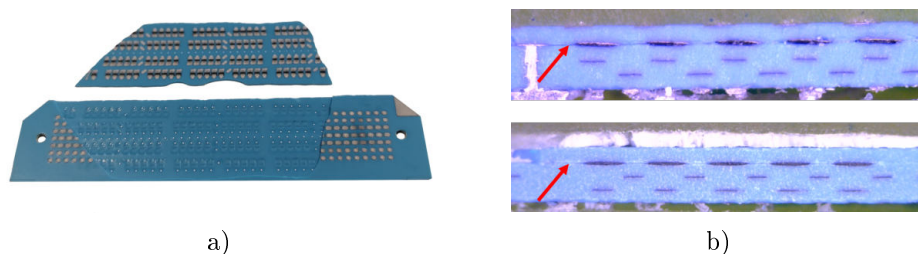
Rysunek 3.10. Gotowy, ceramiczny układ wejściowy: a) góra strona układu - widoczne złącze do płyty odczytu), b) dolna strona struktury - widoczna jest matryca kulek BGA umożliwiających montaż do modułu przetwarzającego ładunki

projekt sukcesywnie nanoszone były poprawki. Dopiero 4 iteracja projektu była na tyle dobra, że defekty funkcjonalne praktycznie przestały występować. Następnie dostrajana była szerokość rezystorów, tak aby osiągnąć zakładaną wartość rezystancji. Wartość rezystancji na kwadrat nie jest stała dla danej pasty i niestety jest zależna od geometrii rezystora. Widoczne to jest na wynikach charakteryzacji past, przedstawionych wcześniej na rysunku 3.6. Po trzykrotnej modyfikacji szerokości rezystorów, w tym wykonaniu nowych masek, sit i nowych serii struktur, osiągnięto zakładaną wartość rezystorów. Natomiast problemem był rozrzut wartości rezystorów na poziomie $\pm 30\%$, przy czym projekt zakładał rozbieżności rzędu $\pm 20\%$.

Przetestowanych zostało kilka sposobów na obniżenie rozrzutu wartości rezystorów. Na podstawie wizualnej kontroli jakości nadrukowanych warstw stwierdzono, że niejednorodność nadruku rezystorów może wynikać z nierówności powierzchni podłoża ceramicznego w czasie sitodruku. Przyczyną mogą być słupki pasty metalicznej, które pozostały po zrywaniu folii nośnej po procesie wypełniania otworów, w miejscach otworów w masce. Ponieważ sito nie przylega płasko do podłoża, lecz miejscami opiera się na wystających słupkach pasty metalicznej, możliwe jest powstawanie defektów sitodruku takich jak nierównomierna grubość warstwy lub delikatne rozlewanie się pasty poza obrys wzoru na sicie. Proces został więc zmodyfikowany tak, żeby nadruki były wykonywane po stronie folii LTCC, po której nie ma tych wypukłości (gładka strona podłoża LTCC, która była przyklejona do folii transportowej była układana od strony stołu sitodrukarki).

Następnie wykonano serie próbek zgodnie ze zmienioną procedurą. Jakość nadruków się poprawiła, lecz przy rozcinaniu wypalonych struktur, niektóre z nich ulegały uszkodzeniu mechanicznemu. Jedna z uszkodzonych struktur została przedstawiona na rysunku 3.11 a). Widoczne jest odspojenie się dużego płatu z warstwą zawierającą znaczną ilość połączeń i rezystorów. Jako, że przyczyna delaminacji nie była jasna, a delaminacje wcześniej nie występowały, to przyjęto, że przyczyną mogło być np. nieintencjonalne zabrudzenie powierzchni folii LTCC. W związku z powyższym problemem wykonano kolejną serię układów z większym naciskiem na zachowanie czystości podczas procesu produkcji. Nowa seria układów pierwotnie zachowywała

się poprawnie i pozytywnie przeszła testy elektryczne. Natomiast po przylutowaniu do obwodu PCB z układem do pomiaru ładunków zauważono, że duża część kanałów jest uszkodzona. Kanały te były losowo rozmieszczone. Stwierdzono, że delaminacja układów z poprzedniej serii oraz uszkodzenia nowych struktur są ze sobą powiązane. W celu znalezienia źródła problemu, wykonano zgłady metalograficzne dwóch układów z ostatniej serii (nie delaminujące się, lecz nie działające po wlutowaniu). Przekroje te przedstawione zostały na rysunku 3.11 b).



Rysunek 3.11. Rozwarstwienia i delaminacje w ceramicznych układach wejściowych: a) delaminacja powodująca odseparowanie fragmentu struktury, b) przykładowe przekroje ukazujące pęknięcia układu ceramicznego uwidocznione na linii rezystorów (zaznaczone czerwoną strzałką)

Dla wszystkich badanych struktur delaminacja występowała zawsze na styku tych samych warstw. Zauważono, że jest to jedyne miejsce, gdzie według nowego procesu łączą się dwie folie LTCC gładkimi stronami do siebie (stary proces nie zawierał takiego połączenia warstw). Gładka strona folii LTCC, do której przyklejona jest folia transportowa może zawierać pozostałości substancji ułatwiających delaminację folii [88]. Przypuszcza się, że prawdopodobną przyczyną delaminacji jest właśnie połączenie dwóch gładkich stron folii z pozostałościami substancji ułatwiających delaminację. Utrudnieniem jest także bardzo duża powierzchnia nadruków znajdujących się na tej warstwie.

Ostatecznie podjęto decyzję polegającą na powrocie do poprzedniego procesu technologicznego, w którym delaminacje nie występowały. By poprawić jakość nadruków, postanowiono nadmiarowe wypełnienie otworów usuwać przez ścieranie na suchu odpowiednią tkaniną – nadruki wykonywane na płaskiej powierzchni charakteryzują się dużo lepszą jakością. Wykonano i przetestowano kolejną serię struktur, wykorzystując wszystkie poprzednie doświadczenia. Parametry elektryczne wytworzonych układów są bliskie zakładanych. Osiągnięto rozbieżność rezystancji w okolicach ± 20 proc, bez procesu korekcji laserowej. Użyty algorytm obróbki danych wyrównuje różnice offsetu poszczególnych kanałów, m.in. ze względu na niejednorodność parametrów układów scalonych, więc wyznaczony poziom rozbieżności rezystancji struktur wejściowych nie powoduje pogorszenia funkcjonalności detektora. Na podstawie pomiarów rezystancji wszystkich rezystorów w danej próbce

wykonano statystyczną analizę rozrzutu rezystancji. Wyniki zostały przedstawione w tabeli 3.3. W badanych strukturach zdarzały się pojedyncze kanały o zawyżonej rezystancji (max 3 na strukturę), które były traktowane jako częściowo sprawne i nie były uwzględniane w obliczeniach.

Tabela 3.3. Statystyczny opis wartości rezystancji na podstawie pomiarów wykonanych dla przykładowej struktury wejściowej LTCC

Rezystory	Rezystancja (projekt)	Średnia wartość rezystancji	Odchylenie std.	max. odchylenie w dół	max. odchylenie w górę
Polaryzujące	25 M Ω	29,23 M Ω	2,506 M Ω	18,24%	18,57%
Zabezpieczające	0,5 M Ω	0,487 M Ω	0,043 M Ω	18,86%	25,91%

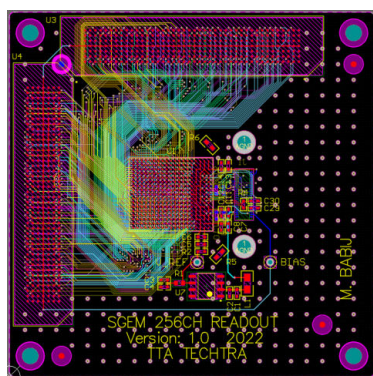
3.4. Opracowanie elektronicznego układu pomiarowego i integracja detektora GEM

Projekt elektronicznego układu pomiarowego oraz konstrukcja mechaniczna detektora były opracowane tak by spełnić wszystkie założenia projektowe opisane w rozdziale 3.1. System pomiarowy został podzielony na dwa moduły znajdujące się na osobnych płytkach PCB: Moduł przetwornika ładunków, oraz układ zasilania i BIAS.

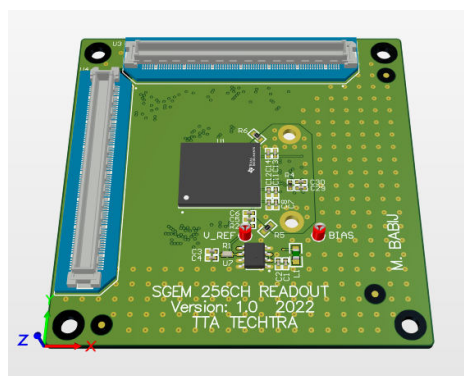
Moduł przetwornika ładunków oparty jest na układzie DDC2256A oraz ceramicznych układach wejściowych. Układ ten zawiera 256 niskoszumnych kanałów pomiarowych, opartych na przetwornikach z przełączaną pojemnością oraz przetworniki analogowo-cyfrowe ADC. Zgodnie z rozeznaniem układ ten ma największą ilość kanałów z komercyjnie dostępnych układów mierzących ładunki- dedykowane układy opracowywane m.in. dla CERN nie były uwzględniane. Realizacja elektronicznego układu pomiaru ładunków o tak dużej ilości kanałów, wykonanego z elementów dyskretnych, na płytce o wymiarach 70 x 70 mm² nie byłoby możliwe. Nawet zastosowanie tego układu było bardzo kłopotliwe ze względu na konieczność dodania dużej ilości zewnętrznych rezystorów o rezystancjach w zakresie megaomów. Początkowo projekt próbowano realizować w oparciu o dyskretnie rezystory do montażu powierzchniowego (SMD), ale nawet zastosowanie rezystorów w obudowach 0402 okazało się niemożliwe do zmieszczenia na założonej przestrzeni. Rozdzielenie tego modułu na dwa obwody drukowane także nie było akceptowalne - powodowałoby znaczne wydłużenie połączeń oraz konieczność zastosowania kolejnych złączy wielopinowych. Długość ścieżek a więc także ich pojemność wpływa na poziom szumów układów z przełączaną pojemnością. Aby osiągnąć jak najniższą wartość szumu

a także ograniczyć sprzężenia pomiędzy kanałami, długość ścieżek, oraz ilość złączy musi być jak najmniejsza.

W celu ominięcia tego problemu opracowane zostały ceramiczne układy wejściowe opisane w rozdziale 3.3. Płytką drukowaną zawiera dwie struktury LTCC, ułożone prostopadłe do siebie. Rozdzielają one kanały osi X oraz Y. Ścieżki łączą kolejno wejścia układu scalonego z kolejno numerowanymi kanałami układów wejściowych. Rozwiązanie to ułatwiło cyfrową obróbkę danych, ale jednocześnie wydłużyło połączenia. Ze względu na wysoką skalę integracji oraz małą powierzchnię zajmowaną przez układ konieczne okazało się zastosowanie 12-warstwowego obwodu drukowanego. Na płytce PCB znajduje się także układ napięcia referencyjnego oraz filtrowanie napięć zasilających - elementy te muszą się znajdować jak najbliżej układu scalonego. Sygnały cyfrowe wyprowadzone są z prawej strony układu DDC2256A, i są jak najbardziej oddalone od połączeń kanałów pomiarowych w celu minimalizacji sprzężeń sygnałów cyfrowych do czułych układów analogowych. Projekt oraz wizualizacja tego modułu została przedstawiona na rysunku 3.12. Zdjęcie gotowego obwodu znajduje się na rysunku 3.14 a).



a)

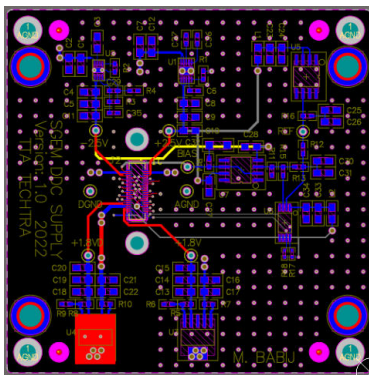


b)

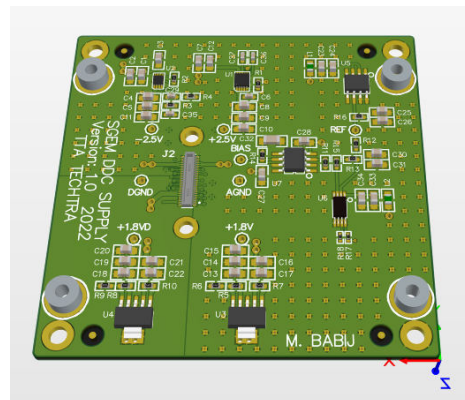
Rysunek 3.12. Moduł przekształcający ładunek na wartość cyfrową: a) projekt PCB, b) wizualizacja

Drugim opracowanym układem elektronicznym jest moduł zasilania i BIAS. Zawiera on cztery ultra-niskoszumne stabilizatory napięcia oraz układ generujący napięcie polaryzujące. Układ BIAS składa się z precyzyjnego źródła napięcia odniesienia LM4140-2.0 (2,048 V, szum: $2,2 \mu V_{PP}$), przetwornika cyfrowo-analogowego DAC MCP47FEB21A0 (12-bit) oraz wzmacniacza operacyjnego OPA350UA. Wzmacniacz pełni rolę bufora zapewniającego niską rezystancję wyjściową układu BIAS. Moduł zawiera stabilizator ADP7156-2.5 ($1,6 \mu V_{RMS}$) wytwarzający napięcie +2,5 V, stabilizator ADP7183-2.5 ($5 \mu V_{RMS}$) wytwarzający napięcie -2,5 V, oraz dwa odseparowane stabilizatory TL1963A ($40 \mu V_{RMS}$) generujące dwa napięcia +1,8V.

Napięcia $\pm 2,5$ V i jedno z napięć $+1,8$ V zasilają część analogową, zaś drugie napięcie $+1,8$ V zasilają część cyfrową układu. Zasilanie części cyfrowej jest odseparowane od napięć analogowych - ma osobną masę, oraz osobne źródło zasilania. Masy te łączą się dopiero zaraz przy układzie DDC2256A. Płytkę zawiera dwa miniaturowe złącza znajdujące się po przeciwnych stronach płytki, w okolicy jej środka. Jedno z nich łączy się z modulem przetwarzającym ładunki, a drugie z modulem zawierającym układ FPGA i wejścia napięć zasilających. Sygnały cyfrowe pomiędzy tymi dwoma modułami są przekazywane bezpośrednio ze złącza do złącza, tylko magistrala I2C jest prowadzona przez moduł zasilania do przetwornika DAC. Moduł ten ze względu na stosunkowo mały stopień skomplikowania możliwy był do zaprojektowania na obwodzie 4-warstwowym. Blok ten będzie się znajdował na zewnątrz komory pomiarowej. Projekt oraz wizualizacja tego modułu została przedstawiona na rysunku 3.13. Zdjęcie gotowego obwodu znajduje się na rysunku 3.14 b).



a)

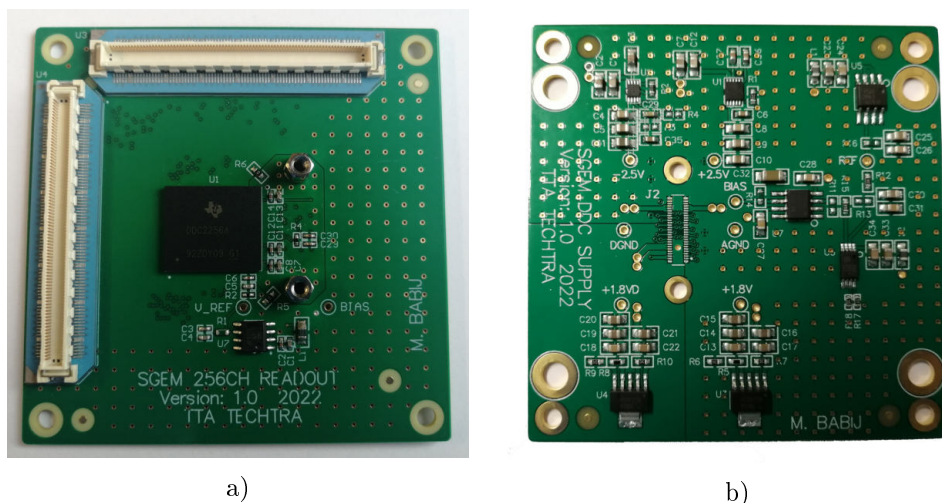


b)

Rysunek 3.13. Moduł zasilania i BIAS: a) projekt PCB, b) wizualizacja

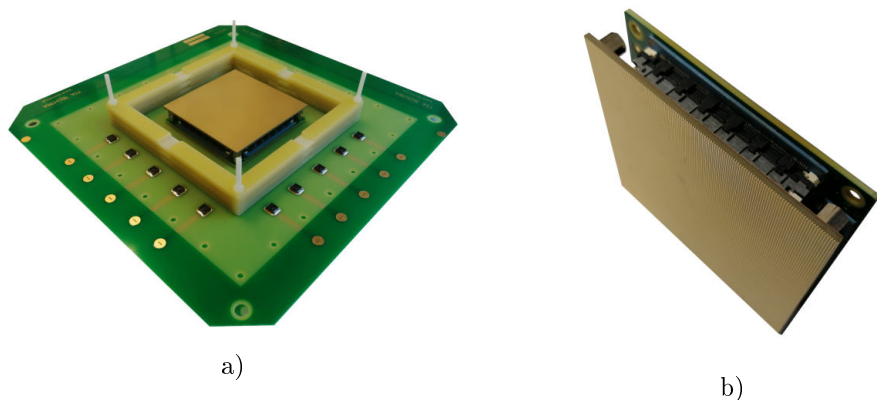
Układy elektroniczne były montowane ręcznie przy użyciu pasty lutowniczej. Pierwszą czynnością było dokładne umycie obwodów w alkoholu izopropylowym. Następnie na obwodach położona i spozycjonowany został szablon do druku pasty. Szablon ten był wykonany ze stali nierdzewnej o grubości $100\ \mu\text{m}$ z laserowo wyciętym wzorem pól lutowniczych. Na szablon nałożono pastę ALPHA OM-338 CSP i rozprowadzono ją za pomocą plastikowej rakli. Następnie szablon uniesiono, tak by nie rozmazać nadrukowanego wzoru. Na niewyschniętej paście po kolei umieszczane były elementy elektroniczne. Dzięki temu po wysuszeniu pasty elementy były związane z podłożem i nie przemieszczały się. Ze względu na dużą ilość warstw a więc i dużą pojemność cieplną, obwody były wstępnie wygrzewane do temperatury $120\ ^\circ\text{C}$. Następnie przy użyciu lutownicy na gorące powietrze, ustawionej na $360\ ^\circ\text{C}$

wykonywano rozplływ pasty lutowniczej. Na koniec, po kontroli wizualnej do obwodów drukowanych lutowane były elementy w obudowach BGA: chipy DDC2256A i ceramiczne układy wejściowe. Elementy te były lutowane na stacji do lutowania BGA WISDOMSHOW WDS-520. Stacja ta posiada od spodu emiterzy podczerwieni oraz dyszę na gorące powietrze, a od góry jedynie dyszę na gorące powietrze. Do-brany został odpowiedni profil temperaturowy zapewniający odpowiedniej jakości połączenie. Zdjęcia polutowanych modułów znajdują się na rysunku 3.14.

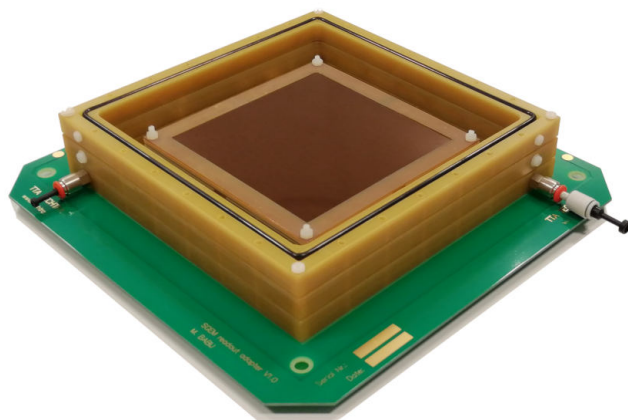


Rysunek 3.14. Zdjęcia zmontowanych urządzeń elektronicznych: a) Moduł przetwarzający ładunki, b) Moduł zasilania i BIAS

Poszczególne elementy detektora były uruchomione i przetestowane przed integracją. Detektor został następnie zmontowany z pominięciem folii GEM. Zdjęcia detektora GEM podczas integracji znajdują się na rysunku 3.15 [80]. Rysunek 3.15 b) przedstawia moduł przetwarzający ładunki połączony z płytą odczytu o tych samych wymiarach. Płyta ta jest opisana szerzej w rozdziale 4.2. Po wstępnym montażu detektor był poddany testom opisanym w następnym podrozdziale. Testy te umożliwiły diagnostykę elektronicznego układu pomiarowego połączonego z płytą odczytu, a więc diagnozę kluczowych elementów detektora przed jego zamknięciem. Po sprawdzeniu parametrów układu elektronicznego, detektor został finalnie zmontowany. Konstrukcja mechaniczna zawiera niektóre komercyjnie dostępne elementy mechaniczne detektora GEM, takie jak folie GEM, ramki dystansowe do stosu, oraz ramki tworzące ścianki komory gazowej. Elementy te są produkowane i sprzedawane przez firmę Techtra. Niemal kompletny detektor GEM (bez górnej pokrywy) został przedstawiony na rysunku 3.16. Zaprezentowano zdjęcie bez pokrywy, w celu zaprezentowania wnętrza detektora, w tym ramek tworzących ściany komory gazowej oraz stos folii GEM.



Rysunek 3.15. Detektor GEM podczas integracji, a) płyta bazowa z elementami detektora, b) moduł z płytą odczytu i elektronicznym układem pomiarowym [80]



Rysunek 3.16. Niemal kompletny detektor GEM (bez górnej pokrywy) - widoczne są ramki komory gazowej i stos GEM

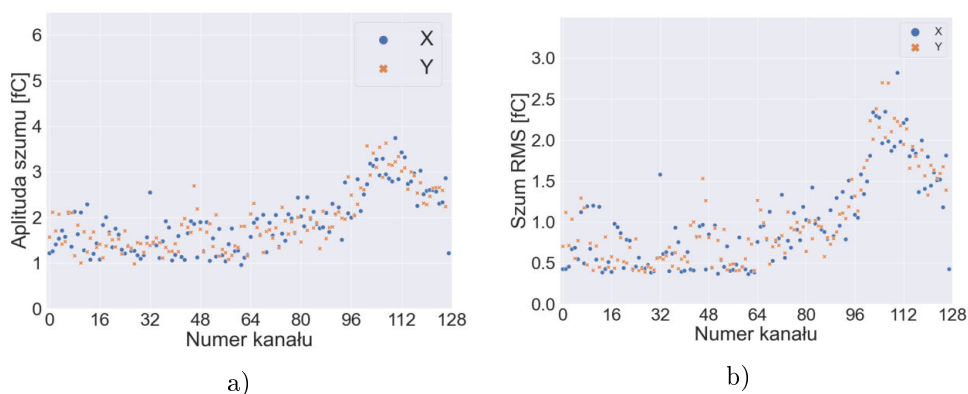
3.5. Pomiary

Opracowany elektroniczny układ pomiaru ładunków w zakresie femtokulombów został dokładnie przetestowany i scharakteryzowany. Wszystkie pomiary były realizowane w metalowej komorze anty-radiacyjnej pełniącej dodatkowo rolę klatki Faradaya, tak aby jak najlepiej odizolować badany wysokoczuły układ elektroniczny od zakłóceń zewnętrznych. Jako, że detektor promieniowania jest zazwyczaj częścią większego układu pomiarowego, nie posiada on własnej obudowy ekranującej zakłócenia.

W pierwszym etapie przetestowany został moduł zasilający. Testowany układ był zasilany przez sterowany cyfrowo zasilacz GW Instek GPD-4303S, który cha-

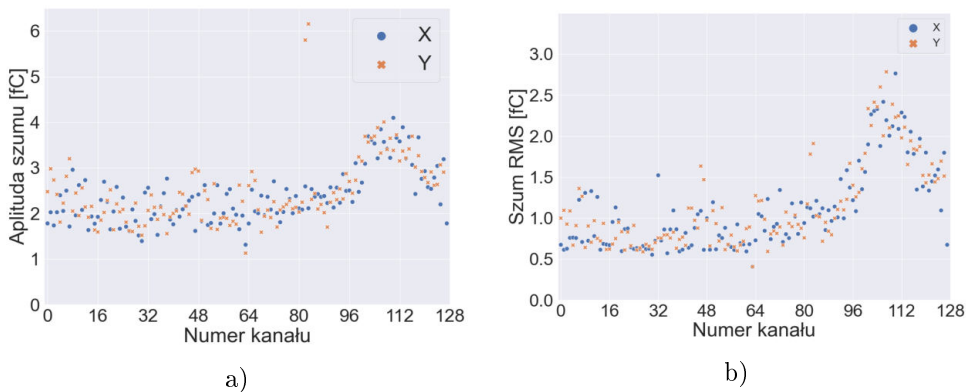
rakteryzuje się niskim poziomem tętnień. W czasie pierwszego testu mierzone były wartości napięć, a także amplituda szumu/tętnień napięć na wyjściu stabilizatorów i układu BIAS (w tym źródła napięcia odniesienia używanego w obwodzie BIAS). Wszystkie wartości napięć oraz ich tętnienia mieściły się w granicach ustalonych w nocie katalogowej układu DDC2256A, który jest najważniejszym elementem przez nie zasilającym. Potwierdza to poprawną pracę modułu zasilania. Wartości napięć oraz ich tętnienia były mierzone za pomocą precyzyjnego multimetru Keysight U3401A oraz oscyloskopu cyfrowego Tektronix MDO3024. Urządzenia te są odpowiednio precyzyjne do wykonywania tego typu pomiarów. Następnie do modułu zasilania podłączono moduł sterujący i moduł przetwarzający ładunki. W drugim teście sprawdzona została poprawność działania przetwornika DAC pracującego w obwodzie BIAS. Na podstawie pomiarów potwierdzono, że możliwa jest regulacja wartości napięcia polaryzującego w zakresie od 0,05 V do 2,046 V. Minimalna wartość napięcia wyjściowego na poziomie poniżej 100 mV jest typowa dla precyzyjnych układów typu rail-to-rail zasilanych pojedynczym napięciem zasilającym.

Kolejnym krokiem było wykonanie pomiarów elektrycznych modułu przetwarzającego ładunki na wartość cyfrową, w tym ceramicznych układów wejściowych. Pomiary wykonywane były bezpośrednio przez opracowany układ. Układ został zasilony oraz podłączony do komputera PC. Następnie za pomocą oprogramowania wykonano serię pomiarów detektorem, bez podłączonej płyty odczytu. Na podstawie 512 kolejnych próbek wyliczone zostały: amplituda oraz wartość RMS szumu. Wykresy przedstawiające wartości szumu poszczególnych kanałów pomiarowych układu elektronicznego z ceramicznymi układami wejściowymi, zostały przedstawione na rysunku 3.17. Średnia amplituda szumu wyniosła 1,89 fC dla osi X i 1,91 fC dla osi Y. Na wykresach nie widać kanałów o bardzo dużej lub zerowej amplitudzie szumu, co oznacza, że wszystkie kanały były sprawne.



Rysunek 3.17. Poziom szumu systemu mierzącego ładunki bez podłączonej płyty odczytu, osobno dla każdego kanału: a) amplituda szumu, b) wartość RMS

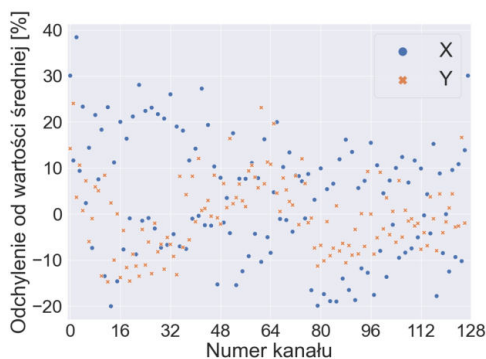
Następnie do mierzonego wcześniej elektronicznego układu pomiaru ładunków podłączona została płyta odczytu wykonana w technologii PCB, i opisana szerzej w rozdziale 4.2. Płyta ta została podłączona bezpośrednio, z użyciem tzw. "Interposera Hirose FX10-168IP-8H(03)". Element ten pośredniczy pomiędzy złączami na dwóch obwodach drukowanych, niwelując naprężenia wynikające z niedoskonałości pozycjonowania złącz. Wyniki pomiarów szumów dla układu elektronicznego z płytą odczytu zaprezentowano na rysunku 3.18. Widoczny jest wzrost średniej amplitudy szumu z 1,89 fC do 2,37 fC dla osi X i z 1,91 fC do 2,47 fC dla osi Y. Związane jest to ze wzrostem pojemności przyłączonej do wejść przetwornika ADC, przy dołączeniu dodatkowych połączeń. Widoczna jest także pewna różnica pomiędzy wartościami szumu dla kanałów X i Y. Wynika to z różnej długości ścieżek osi X oraz osi Y, oraz wynikających z nich pojemności połączeń. Widoczne są także dwa kanały o zwiększonym poziomie szumu - jest to prawdopodobnie para kanałów zwartych ze sobą na płycie odczytu. Kanały te były traktowane jako uszkodzone (w tym przypadku jest to 0,78% wszystkich kanałów), a ich ilość była akceptowalna dla tej technologii (max. wartość to 5%). Wszystkie wyżej wymienione zjawiska są typowe dla detektorów GEM.



Rysunek 3.18. Poziom szumu detektora z płytą odczytu, osobno dla każdego kanału: a) amplituda szumu, b) wartość RMS

Na podstawie poprzednio opisanych pomiarów, wyliczono średnią wartość ładunku na spolaryzowanych kanałach pomiarowych (średnia wartość BIAS), a także indywidualnie dla każdego kanału wyliczony został rozrzut wartości ładunku polaryzującego w odniesieniu do średniej wartości BIAS. Wykres przedstawiający rozrzut wartości BIAS poszczególnych kanałów został zaprezentowany na rysunku 3.19. Poziom rozrzutu dla układu wejściowego numer 2 (oś Y zaznaczona na rysunku na pomarańczowo) jest zbliżony z rozrzutem rezystancji mierzonym bezpośrednio na strukturach, a przedstawionym w podrozdziale 3.3 w tabeli 3.3. Poziom rozrzutu

dla układu numer 1 (oś X zaznaczona na rysunku na niebiesko) jest nieco większy, lecz nadal jest akceptowalny.



Rysunek 3.19. Wykres odchylenia wartości BIAS dla każdego kanału z osobna, względem średniej wartości BIAS

Po wykonaniu pomiarów układu elektronicznego i uzyskaniu zadowalających rezultatów, przeprowadzono ostateczną integrację detektora. Do płyty bazowej z elektronicznym układem pomiarowym zamontowano następnie stos folii GEM, komorę gazową detektora i dzielnik HV. Dzielnik HV zasilany jest z zasilacza HV CAEN DT5470 (-5 kV, 200 μA) i wytwarza 7 napięć potrzebnych do spolaryzowania 3 folii GEM, folii dryftowej oraz do zapewnienia odpowiednich napięć transferowych pomiędzy foliami. Tabela 3.4 zawiera wartości rezystancji poszczególnych wyprowadzeń dzielnika HV oraz wartości napięć i natężeń pól elektrycznych poszczególnych obszarów opracowanego detektora GEM.

Tabela 3.4. Wartości rezystancji poszczególnych wyprowadzeń dzielnika HV oraz wartości napięć i natężeń pól elektrycznych poszczególnych obszarów detektora GEM

Numer rezystora	Wartość rezystora [M Ω]	Nazwa obszaru	Wysokość danego obszaru [mm]	Napięcie polaryzujące [V]	Natężenie pola elektrycznego [kV/mm]
1	0,12	Zabezpieczenie	-	192	-
2	30,4	Dryft	3	486	0,162
3	25,5	GEM 1	0,05	407	8,148
4	25,5	Transfer 1	2	407	0,204
5	25,5	GEM 2	0,05	407	8,148
6	25,5	Transfer 2	2	407	0,204
7	25,5	GEM3	0,05	407	8,148
8	30,4	Transfer 3	1	486	0,486
Suma	200,3	Dzielnik HV	8,15	3200	-

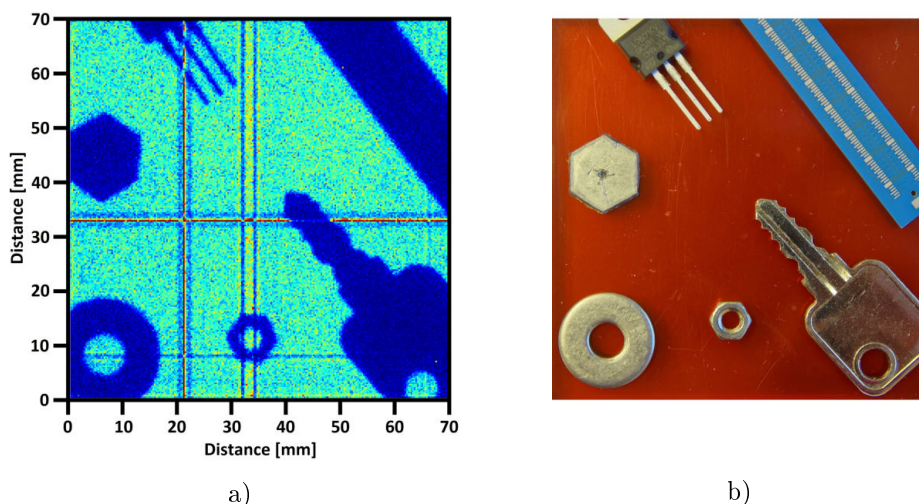
Po integracji całego detektora rozpoczęto jego kondycjonowanie, a następnie testy z udziałem wysokiego napięcia. Kondycjonowanie polega na ciągłym przedmuchiwaniu gazu roboczego (mieszanina $Ar : CO_2$, 70:30) przez detektor. Proces ten powinien trwać przez co najmniej 4 godziny, i ma on na celu usunięcie zanieczyszczeń (np. drobinek kurzu) oraz wilgoci z elementów detektora. Następnie włączone zostało wyjście zasilacza HV, podając napięcie z narostem liniowym o prędkości 100V/s aż do wartości 2900 V. Następnie napięcie było utrzymywane przez 60 minut. W kolejnych krokach napięcie było zwiększane co 50 V aż do napięcia nominalnego (3200 V). W każdym kroku napięcie było utrzymywane przez 30 min.

W czasie testów, przez cały czas mierzony był prąd dzielnika HV a także jego stabilność. Detektory GEM mają delikatną konstrukcję i są wrażliwe na wilgotność i zanieczyszczenia wewnątrz komory urządzenia - mogą one spowodować trwałe uszkodzenie detektora. Analizując wykres prądu HV, możliwe jest zaobserwowanie mikro wyładowań wewnątrz detektora. Gdy wyładowania występują z częstotliwością większą niż 20 razy na minutę, lub mają dużą amplitudę, należy wyłączyć detektor i przedłużyć okres przedmuchu. Monitorowana jest także wartość prądu - jeśli jest większa od wartości wyliczonej dla danego napięcia, może sugerować występowanie zwarcia wewnątrz urządzenia. W skrajnych przypadkach konieczne jest rozmontowanie detektora i wymiana uszkodzonej folii GEM - w przypadku opracowanego urządzenia nie było to konieczne.

Uruchomienie detektora przebiegło poprawnie. Detektor osiągnął napięcie 3200V, z rzadko występującymi spontanicznymi wyładowaniami o małej amplitudzie. Prąd dzielnika HV miał poprawną wartość.

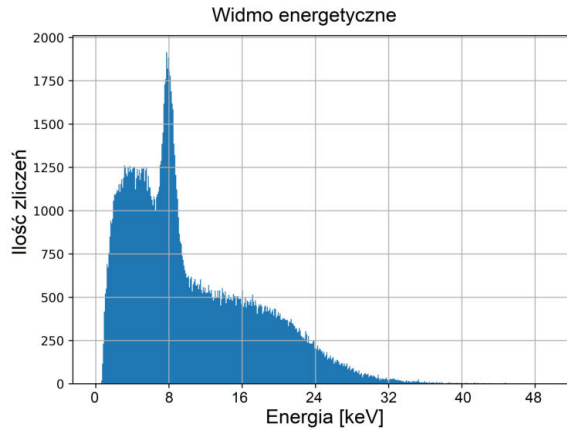
Ostatnim testem mającym na celu określenia możliwości zastosowania opracowanego układu pomiaru ładunków w zakresie femtokulombów w detektorach GEM było użycie go do wykonania prześwietleń (radiogramów). Testy te pozwoliły na sprawdzenie urządzenia w warunkach operacyjnych. Na oknie detektora GEM umieszczono elementy wykonane z metalu lub ceramiki. Przedstawione są one na rysunku 3.20 b). Nad detektorem znajdowała się lampa rentgenowska MOXTEK Magnum TUB00083 (10 - 50kV, 4W), z targetem wykonanym ze srebra (Ag). W czasie testów lampa była ustawiono na 30 kV i 20 μA , czyli pracowała z małą mocą, a co za tym idzie ze stosunkowo małą ilością fotonów na jednostkę czasu. Jest to konieczne, ponieważ tego typu detektory z płytami odczyty XY pracują w trybie multipleksowym, detekując położenie pojedynczych fotonów. Specyfiką tego rozwiązania jest to, że gdy w pojedynczym okresie całkowania do obszaru aktywnego detektora dotrą dwa lub więcej fotonów, to algorytm rekonstrukcji nie będzie w stanie wyliczyć ich położenia i uzna ta próbkę za nieważną. Naświetlanie trwało około 30 min. Wykorzystano aplikację (i algortm) rekonstrukcji obrazów,

przeznaczoną dla detektorów GEM opracowanych przez firmę Techtra i używaną w połączeniu z produkowanymi przez nią detektorami [82]. Zrekonstruowany radiogram przedstawiono na rysunku 3.20 a). **Uzyskany radiogram jest bardzo dobrej jakości. Jakość obrazka jest porównywalna z radiogramami wykonanymi przy użyciu komercyjnego detektora Techtra V2.0 oraz płyty odczytu opracowanej w CERN** - porównanie wyników znajduje się w rozdziale 4.3. Wszystkie testy wykonane były w komorze anty-radiacyjnej wykonanej ze stali i ołowiu, a dodatkowo mierzony był poziom promieniowania na zewnątrz obudowy za pomocą dozymetru.



Rysunek 3.20. Testy X-Ray opracowanego detektora GEM: a) zrekonstruowany radiogram, b) prześwietlane elementy

Jedną z cech detektorów GEM z detekcją pojedynczych fotonów jest możliwość pomiarów wartości ładunku każdego zarejestrowanego zdarzenia. Zbierając dane z wielu zdarzeń i wykonując histogram sumarycznego ładunku otrzymujemy wykresy spektralne rejestrowanego widma. Na podstawie promieniowania charakterystycznego dla danego materiału jesteśmy w stanie wyliczyć wzmocnienie detektora. Przykładowo, w detektorach GEM ze standardowymi foliami pokrywanych miedzią, we wszystkich pomiarach widoczny jest pik fluorescencyjny charakterystyczny dla miedzi [89]. Energia charakterystyczna K_{α} dla miedzi wynosi 8,05 keV. Przykładowe widmo energetyczne uzyskane na opracowanym detektorze oświetlanym lampą rentgenowską o napięciu przyspieszającym 50 kV widoczne jest na rysunku 3.21. Widmo to nie uwzględnia charakterystyki wzmocnienia detektora z gazem roboczym $Ar : CO_2$ (proporcje 70:30) i dryftu o grubości 3 mm (zakres detekcji promieniowania do około 30 keV).



Rysunek 3.21. Przykładowe widmo energetyczne zarejestrowane przez detektor

3.6. Wnioski

W ramach opisanych wyżej prac opracowano w pełni funkcjonalny elektroniczny układ pomiaru ładunków w zakresie femtokulombów do zastosowania w detektorach GEM. Urządzenie spełnia wszystkie założenia projektowe ustalone na początku przewodu doktorskiego. Za pomocą opracowanego detektora możliwe było wykonanie obrazowań z użyciem promieniowania rentgenowskiego (radiogramy), oraz zarejestrować widma energetyczne. W widmach tych widoczny jest pik o energii zgodnej z energią charakterystyczną linii K_{α} dla miedzi (8,05 keV). Uzyskane radiogramy są bardzo dobrej jakości, nie odbiegającej od komercyjnych detektorów GEM, w tym zawierających płyty odczytu wyprodukowane przez CERN. Uzyskane wyniki wskazują jednoznacznie, że detektor ten jest zdolny do detekcji promieniowania rentgenowskiego a także do wykonywania obrazowań z jego użyciem. Możliwe jest także zastosowanie opracowanego rozwiązania do przeprowadzania pomiarów fluorescencji rentgenowskiej (*ang. XRF, X-Ray Fluorescence*), co jest jego dodatkowym atutem.

Duża część prac dotyczyła opracowania ceramicznych układów wejściowych opracowanych w technologii LTCC. Użycie tego typu struktur umożliwiło wykonanie zminiaturyzowanego elektronicznego układu pomiarowego. W ramach doktoratu nie tylko zaprojektowano funkcjonalne struktury a także opracowano cały proces ich wytwarzania. Uzyskano zakładany rozrzut rezystancji rezystorów o wartości 25 $M\Omega$ na poziomie $\pm 20\%$, bez ich trzymowania po wykonaniu struktur.

Uzyskane parametry elektryczne są bardzo dobre - średnia wartość amplitudy szumu wynosi 2,47 fC dla kompletnego detektora. Rozrzut wartości ładunku polaryzującego (BIAS) jest podobny do rozrzutu rezystancji samych struktur i jest zgodny

z oczekiwaniami. W opracowanym rozwiązaniu, poszczególne wejścia układu ADC były łączone kolejno z kanałami na ceramicznych układach wejściowych. Pozwoliło to na uproszczenie obróbki cyfrowej, lecz ze względu na wydłużenie połączeń skutkowało delikatnym wzrostem szumu na najbardziej oddalonych kanałach. W przyszłych rozwiązaniach rozważane będzie łączenie kanałów obu struktur tak, aby minimalizować długość połączeń. Umożliwiłoby to pewne polepszenie parametrów szumowych, kosztem większej ilości obliczeń.

Rozdział 4

Opracowanie i porównanie struktur odczytu wykonanych w wybranych technologiach

W rozdziale tym opisane zostały procesy opracowywania dwóch typów płyt odczytu do detektorów GEM, ich integracje w detektorach GEM oraz testy w warunkach operacyjnych. Badane były płyty CCS wykonane z ceramiki LTCC a także płyty wykonane w technologii PCB. Opisy prac zostały rozdzielone na dwa podrozdziały w celu zapewnienia odpowiedniej czytelności. Podrozdział 4.1 opisuje elementy wykonane z ceramiki LTCC, zaś podrozdział 4.2 opisuje płyty produkowane w technologii PCB.

Płyty odczytu są elementami detektorów GEM, i mają za zadanie zbieranie ładunków wzmocnionych w foliach GEM, w taki sposób aby możliwe było wyznaczenie położenia chmury ładunków. W ramach doktoratu testowane były płyty z ortogonalnymi liniami odczytu (z seriami linii w osiach X oraz Y). Geometria ta jest stosunkowo prosta, zapewnia możliwość dokładnego wyznaczania barycentrum (środką) chmur ładunków, oraz wymaga stosunkowo małej ilości kanałów by zapewnić odpowiednią rozdzielczość. Przy opracowywaniu niniejszego rozwiązania wykorzystano informacje zawarte w przeglądzie literaturowym, opisanym w rozdziale 2.3.

Ceramiczne płyty odczytu do detektorów GEM zostały opisane w dwóch publikacjach z listy filadelfijskiej [90,91]. Płyty CCS wykonane w technologii PCB zostały opisane na łamach czasopisma z listy filadelfijskiej [80].

4.1. Płyty odczytu wykonane z ceramiki LTCC

Prace nad ceramicznymi płytami odczytu były realizowane w ramach projektu "MGEM" przyznanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR), projekt numer POIR.04.01.02-00-0080/17. Projekt ten był współrealizowany przez doktoranta. Płyty odczytu LTCC były wykorzystane w detektorze o innej konstrukcji, przez co wymagania im stawiane były nieco inne. W ramach prowadzonych badań zaplanowano oraz wykonano pomiary płyt LTCC, wykonano stanowisko testowe oraz współuczestniczono w opracowaniu projektu struktur. Urządzenie opracowane

w ramach tego projektu zostało opisane w cytowanej publikacji [81]. Ceramika LTCC została wybrana ze względu na jej parametry i planowane zastosowanie detektora. Detektor był opracowywany z myślą o misjach kosmicznych, więc potrzebny był materiał umożliwiający wykonywanie struktur 3D, stabilny wymiarowo, o dużej niezawodności i przewodności cieplnej oraz wytrzymałości na duże zmiany temperatury.

Przyjęte założenia projektowe:

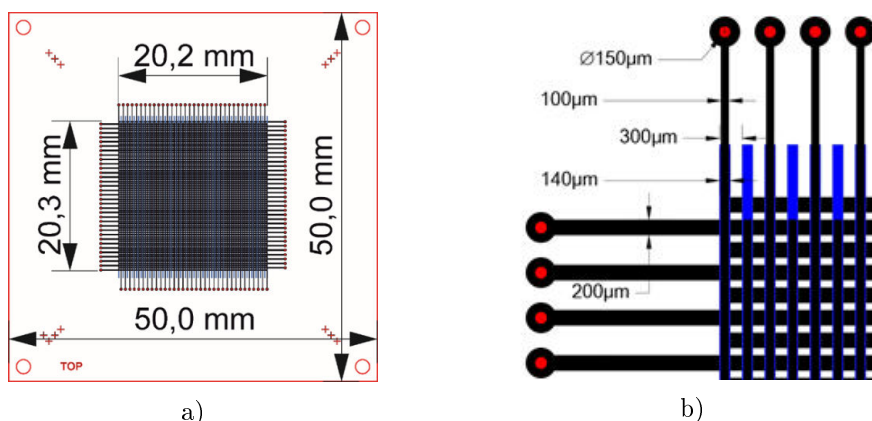
1. Wymiary planarne płyty odczytu mają wynosić $86 \times 80 \text{ mm}^2$.
2. Wymiary pola aktywnego płyty odczytu mają wynosić $70 \times 70 \text{ mm}^2$.
3. Zagęszczenie (raster) pasków odczytu w okolicy $500 \text{ }\mu\text{m}$.
4. Maksymalna liczba warstw: 6.
5. Struktura odczytu typu XY z co najmniej 130 kanałami na oś.
6. Złącza mają się znajdować na spodniej stronie płyty, nie koniecznie pod obszarem aktywnym.
7. Ułożenie złącz ma być zgodne z położeniem złącz układu elektronicznego detektora MGEM.
8. Płyty mają posiadać jedynie złącza do układu elektronicznego, bez możliwości łączenia kilku płyt.

4.1.1. Projekt

Przy opracowywaniu płyty odczytu wykonanej z ceramiki LTCC rozważane było kilka metod wytwarzania. Jako, że w literaturze nie ma informacji na temat płyt odczytu LTCC, postanowiono, że przetestowane będą dwie metody, przy czym jedna w dwóch wariantach. Ze względu na testowy charakter, pierwsze struktury miały wymiary $50 \times 50 \text{ mm}^2$ z obszarem aktywnym o wymiarach $20,3 \times 20,2 \text{ mm}^2$. Struktury o takich wymiarach pozwoliły na wykonanie szybkich testów, oraz na ograniczenie problemów charakterystycznych dla dużych struktur. Struktury te zaprojektowano z bardzo małym rastrem wynoszącym jedynie $300 \text{ }\mu\text{m}$. Raster oznacza odległość między środkami dwóch linii odczytu. Projekt testowych płyt odczytu wraz z kluczowymi wymiarami został przedstawiony na rysunku 4.1.

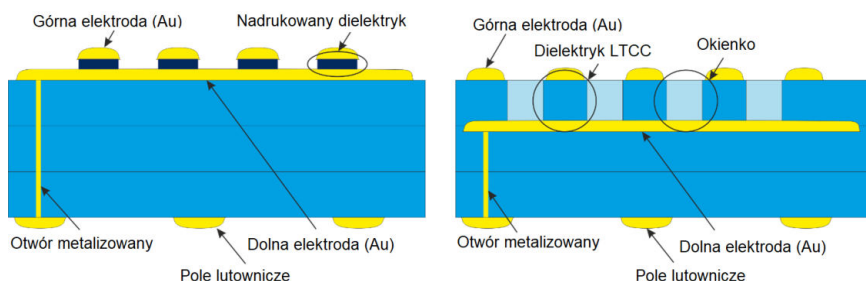
Płyty odczytu z prostopadle ułożonymi liniami XY, w większości wypadków wymagają odsłonięcia linii osi Y znajdujących się na warstwie wewnętrznej, tak by elektrony mogły do nich bezpośrednio docierać. Zazwyczaj realizuje się to poprzez usunięcie materiału izolacyjnego spomiędzy linii osi X znajdującej się na górnej warstwie. Wykonywanie bardzo wąskich a jednocześnie długich i głębokich struktur przestrzennych jest dużym wyzwaniem. W przypadku płyt odczytu CERN, problem ten rozwiązano stosując metodę chemicznego trawienia poliimidu (na bazie opa-

tentowanej technologii MCV), przy czym nawet płyty produkowane przez CERN posiadają defekty.



Rysunek 4.1. Projekt układu elektrod płyt odczytu LTCC o wymiarach $20,3 \times 20,2 \text{ mm}^2$: a) wymiary zewnętrzne struktury oraz wymiary obszaru aktywnego, b) wymiary elektrod i odstępów pomiędzy nimi [90]

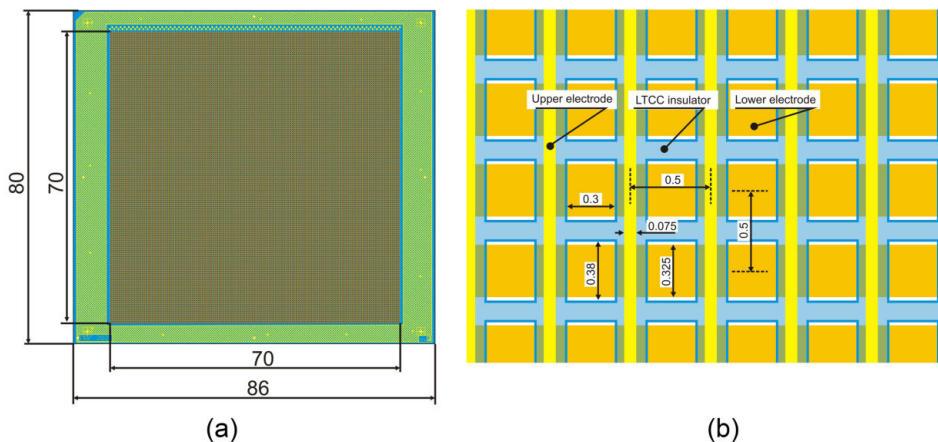
W celu sprawdzenia możliwości wykonania tego typu struktur w ceramice LTCC opracowane oraz przetestowane zostały dwie metody ich wytwarzania. Pierwsza metoda polegała na sitodruku elektrod osi Y, następnie nadrukowaniu pasków izolatora na których drukowane były elektrody osi X (metoda pojedynczego podłoża - SS, ang. Single Substrate). Druga metoda zakładała wykonanie konstrukcji z nadrukami znajdującymi się na poszczególnych warstwach podłoża, z okienkami wyciętymi w górnym podłożu (metoda wielu podłoży - MS, ang. Multi Substrate). Okienka te odsłaniają fragmenty linii osi Y znajdujących się na drugiej warstwie. Schematy przedstawiające obie metody przedstawiono na rysunku 4.2.



Rysunek 4.2. Schemat przekroju poprzecznego dwóch wariantów strukturalnych płyt odczytu LTCC: a) z warstwą dielektryczną nadrukowaną sitodrukiem na której nadrukowane są linie X (SS, ang. Single Substrate), b) z elektrodami nadrukowanymi na oddzielnych podłożach LTCC ułożonych w stos (MS, ang. Multi Substrate) [90]

Struktury typu pojedynczego podłoża (SS) wykonane zostały w dwóch wariantach. W pierwszym wariantcie nazywanym dalej „SS – GD” na linii osi Y nadrukowane były paski grafitu, a następnie pomiędzy nimi drukowane były paski izolatora. W drugim wariantcie „SS – DG” najpierw nadrukowywano paski z materiału dielektrycznego a następnie pomiędzy nimi drukowana była warstwa grafitowa. W obu przypadkach na paskach izolatora były nadrukowywane linie osi X. Grafitowa warstwa poświęcana, była używana w celu niwelowania ryzyka zwarcia pomiędzy liniami i była usuwana podczas procesu wypalania struktur. Dokładny opis procesu wykonywania wyżej wymienionych płyt odczytu wraz z użytymi materiałami znajduje się w publikacji [90].

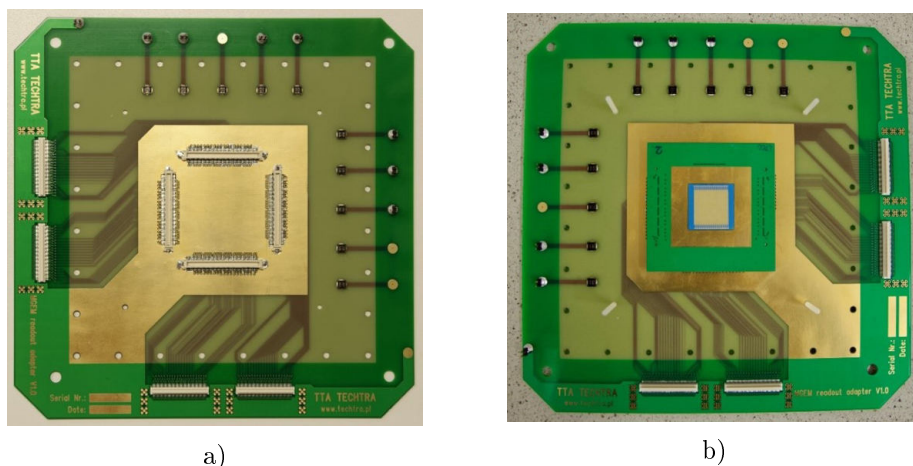
Po wykonaniu testowych płyt odczytu oraz po uwzględnieniu wniosków z pomiarów tych struktur przystąpiono do opracowania finalnego projektu płyt odczytu o docelowych wymiarach. Zgodnie z wytycznymi, wymiary zewnętrzne struktur wynoszą $86 \times 80 \text{ mm}^2$, a obszar aktywny ma wymiary $70 \times 70 \text{ mm}^2$. Raster linii odczytu został zwiększony z $300 \mu\text{m}$ do $500 \mu\text{m}$, a geometria struktur została poprawiona, tak by uzyskać jak najrównomierniejszy rozkład ładunku pomiędzy liniami X i Y. Zwiększenie rastru ułatwiło też produkcję struktur oraz znacznie zmniejszyło liczbę defektów. Dodatkowo, zamiast wycinania bardzo długich przerw pomiędzy liniami, zdecydowano się na wycinanie wielu małych okienek odsłaniających linie Y. Znaczaco ułatwiło to produkcję płyt odczytu i zniwelowało ilość defektów. Projekt płyty odczytu LTCC o wymiarach $70 \times 70 \text{ mm}^2$ przedstawiono na rysunku 4.3 [91]. Proces produkcji, użyte materiały i urządzenia zostały szeroko opisane w publikacji [91].



Rysunek 4.3. Projekt płyty odczytu LTCC o wymiarach $70 \times 70 \text{ mm}^2$: a) wymiary struktury, b) przybliżenie obrazujące kluczowe elementy struktury (wartości w mm) [91]

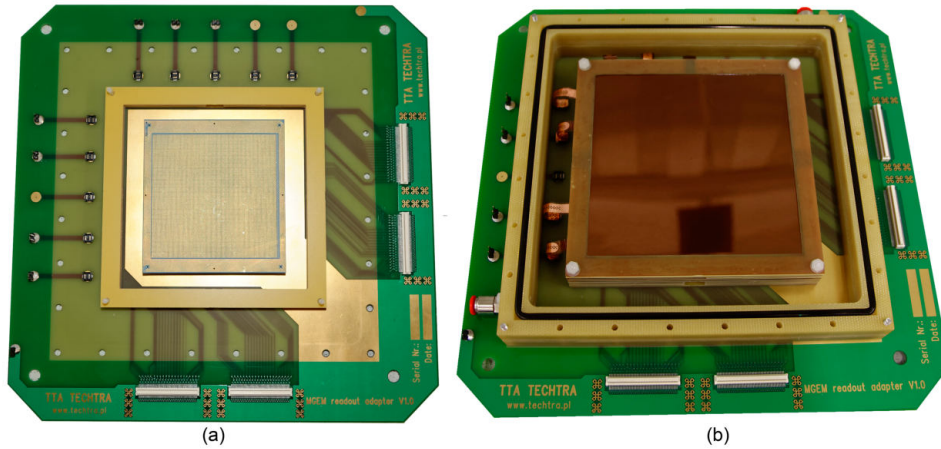
4.1.2. Pomiary

Wszystkie opracowane płyty odczytu były dokładnie testowane. Wykonywane były testy elektryczne struktur, a także były one integrowane w funkcjonalny detektor GEM i wykonywane były za ich pomocą prześwietlenia (radiogramy). W tym celu opracowane i wykonane zostały dedykowane płyty bazowe umożliwiające integrację detektora z badanymi płytami odczytu oraz zapewniające jednakowe warunki podczas pomiarów. Zdjęcie płyty bazowej zostało przedstawione na rysunku 4.4 a) [90]. Wykonywane detektory testowe wykorzystywały standardowe elementy komercyjnego detektora GEM 100 x 100 mm², takie jak folie GEM, folia dryftowa, ramki, obudowa komory gazowej. Płyty bazowe miały układ złącz, przewidziany do pełnowymiarowych płyt LTCC, więc przy badaniach testowych płyt LTCC o wymiarach 20 x 20 mm² zastosowany był dodatkowy adapter w formie płyty PCB. Obwód ten miał wymiary zewnętrzne i rozmieszczenie złącz tak jak finalna płyta odczytu LTCC, a na górnej stronie posiadał miejsce z padami lutowiczymi przeznaczone do wlutowania małych płyt odczytu. Płyta bazowa z podłączonym adapterem zawierającym opracowaną płytę odczytu LTCC 20 x 20 mm² została przedstawiona na rysunku 4.4 b).



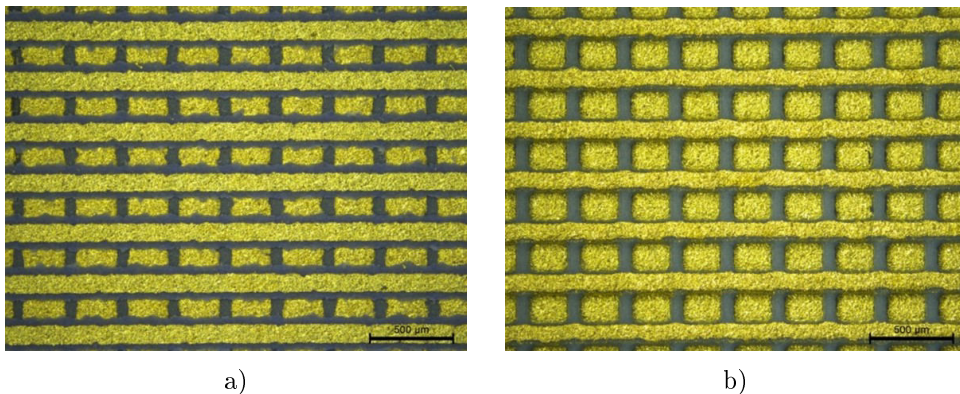
Rysunek 4.4. Płyta bazowa PCB do testowania ceramicznych struktur odczytu, a) płyta bazowa ze złączami, b) płyta bazowa z podłączoną płytą odczytu LTCC (w adapterze) [90]

Pełnowymiarowe ceramiczne płyty odczytu zgodnie z projektem były podłączane bezpośrednio do złącz znajdujących się na płycie bazowej detektora - elementy te zostały pokazane na rysunku 4.5 a). Natomiast prawie kompletny detektor GEM zawierający płytę bazową z płytą odczytu LTCC, stos GEM z folią dryftową i ramkami, oraz ramkę komory gazowej z uszczelnieniami, przedstawione zostały na rysunku 4.5 b).



Rysunek 4.5. Układ do testowania ceramicznych płyt odczytu: a) płyta bazowa z płytą odczytu LTCC $70 \times 70 \text{ mm}^2$ i ramkami do stosu GEM, b) płyta bazowa z płytą odczytu, stosiem GEM oraz z ramką komory gazowej detektora [91]

Pierwszym testem wykonanym po wytworzeniu była wizualna inspekcja płyt odczytu, w tym sprawdzenie wymiarów poszczególnych elementów wzorów. Struktury były obrazowane przy użyciu mikroskopu optycznego Leica DM4500 w trybie ciemnego pola. Obraz mikroskopowy struktury wykonanej w procesie SS-GD został przedstawiony na rysunku 4.6 a) [90], natomiast obraz struktury wykonanej w procesie MS na rysunku 4.6 b) [90].

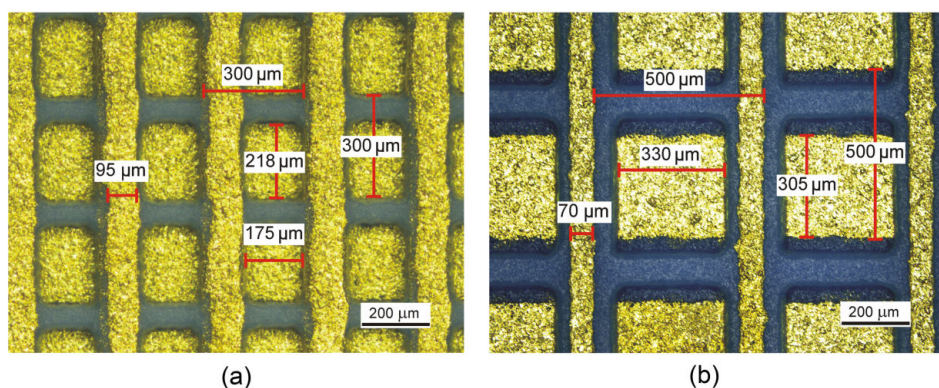


Rysunek 4.6. Obrazy struktur wykonanych dwiema metodami: a) z warstwą dielektryczną naniesioną metodą sitodruku (SS-GD), b) z izolacją wykonaną z folii LTCC (MS) [90]

Wizualne porównanie jakości nadruków pomiędzy procesem sitodruku warstwy dielektrycznej na pojedynczym podłożu (SS) a drukowaniem na wielu podłożach

(MS) opisano poniżej, na podstawie współautorskiej publikacji [90]. Wyniki dwóch procesów produkcyjnych pokazują, że całkowicie sitodrukowana matryca elektrod z warstwą poświęcalną grafitu wydaje się zapewniać lepsze odwzorowanie projektu i powtarzalność górnej elektrody niż sitodruk na oddzielnych podłożach. Kształt naniesionych elektrod jest zbliżony do kształtu zaprojektowanego wzoru. Jest on mniej podatny na błędy pozycjonowania podczas sitodruku i w rezultacie zawiera mniej defektów, głównie zwarć między warstwami elektrod.

W ten sam sposób zbadana była także płyta odczytu LTCC MS o wymiarach $70 \times 70 \text{ mm}^2$. Rysunek 4.7 przedstawia porównanie testowej płyty LTCC o wymiarach $20 \times 20 \text{ mm}^2$, z finalną wersją płyty odczytu LTCC o wymiarach $70 \times 70 \text{ mm}^2$. Na rysunku 4.7 b) dokładnie widać geometrię struktury w tym wycinane laserowo okienka odsłaniające linie Y.



Rysunek 4.7. Obrazy struktur po współwypalaniu: a) płyta MS o wymiarach $20 \times 20 \text{ mm}^2$ z drobnym odstępem 300 µm , b) płyta odczytu MS o wymiarach $70 \times 70 \text{ mm}^2$ odstępem 500 µm [91]

Poniższy opis wyników inspekcji optycznej finalnych struktur LTCC o wymiarach $70 \times 70 \text{ mm}^2$ został opisany na podstawie współautorskiej publikacji [91]. Zmierzona szerokość górnej elektrody jest nieco mniejsza niż zaprojektowana, jednak stosunek powierzchni górnej i dolnej elektrody na pojedynczy okres struktury jest zgodny z oczekiwaniami. Ponadto jakość krawędzi jest lepsza w porównaniu z pierwotnym projektem, ale można zauważyć, że ograniczenia techniczne dla standardowego sitodruku wpłynęły na jakość ścieżek podczas drukowania na ażurowej strukturze taśmy.

Następnym krokiem po inspekcji optycznej było przeprowadzenie pomiarów elektrycznych struktur. Płyty były testowane pod kątem zwarć sąsiednich kanałów oraz zwarć linii X z przechodzącymi pod nimi liniami Y. Pomiary były wykonywane za pomocą źródła mierzącego SMU Keightley 2450. Największą ilością zwartych

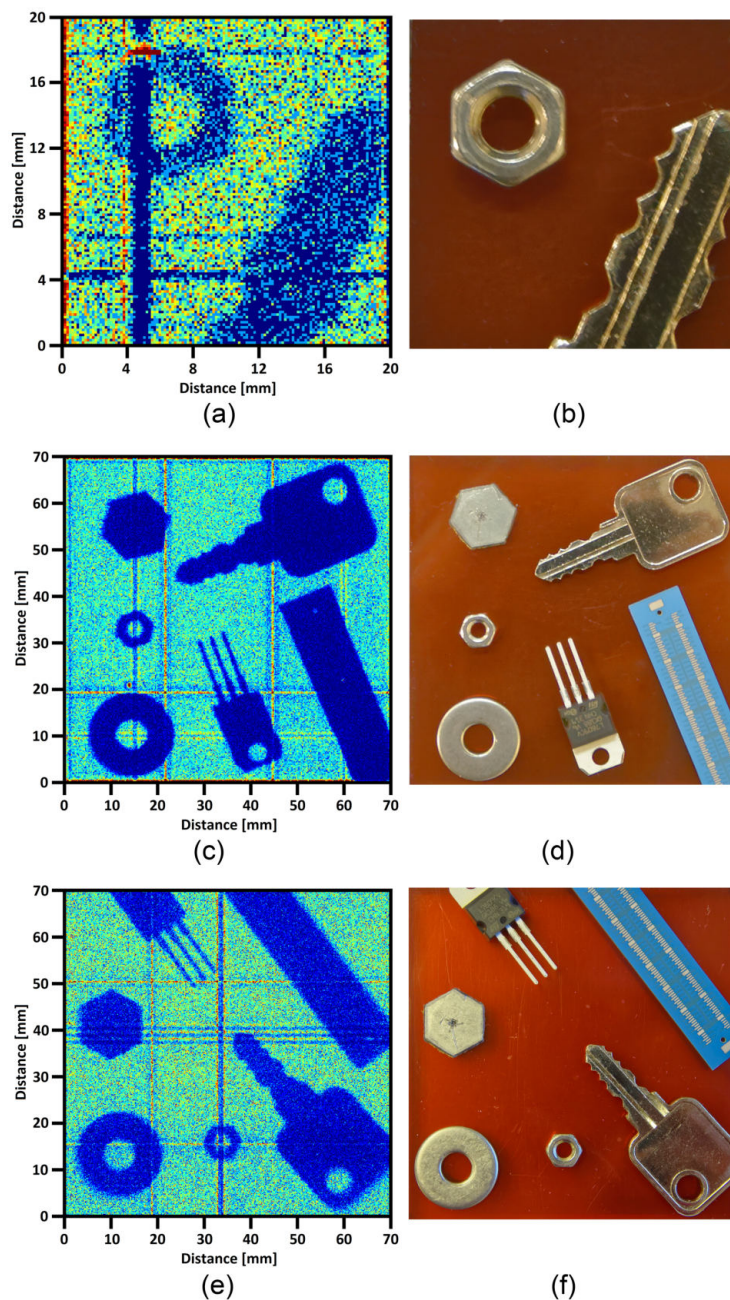
linii charakteryzowała się płyta odczytu SS-DG - zlokalizowano 27 zwartych ze sobą linii. Ze względu na bardzo dużą ilość zwarć płyta ta nie była dalej testowana. Płyta SS-GD miała dwa zwarcia, oba pomiędzy liniami X a Y. Płyta 20 x 20 mm^2 MS charakteryzowała się tylko jednym zwarciem - także pomiędzy linią X a linią Y. Natomiast płyta LTCC 70 x 70 mm^2 MS charakteryzowała się całkowitym brakiem zwarć, podobnie jak referencyjna płyta produkcji CERN. Pomiar ten pokazał, że ocena wizualna pod mikroskopem nie zawsze umożliwia poprawną ocenę jakości płyt odczytu i musi być stosowana w połączeniu z technikami elektrycznymi.

Kolejnym testem płyt odczytu był pomiar szumu elektrycznego detektora zawierającego badane płyty odczytu. W tym celu płyty te były integrowane w kompletny detektor GEM a następnie wykonywane były za jego pomocą pomiary bez użycia promieniowania. Wyniki pomiaru szumów elektrycznych zostały zebrane w tabeli 4.1 [91]. Wszystkie badane płyty charakteryzowały się podobnym poziomem szumu. Poziom szumu we wszystkich przypadkach jest wystarczająco niski, by układ odczytu mógł sprawnie przeprowadzać pomiary promieniowania. Pomiar szumów pomaga także w lokalizacji defektów struktur CCS w tym walidację jakości połączeń.

Tabela 4.1. Charakterystyki szumowe detektora z badanymi płytami odczytu [91]

Typ płyty odczytu	Współrzędna odczytu	Średnia amplituda szumu [fC]	Maksymalna amplituda szumu [fC]	Wartość szumu RMS [fC_{RMS}]
LTCC 20 x 20 mm^2 MS	X (Góra)	7,87	17,85	2,26
	Y (Dół)	10,69	26,71	4,58
LTCC 70 x 70 mm^2 MS	X (Góra)	6,88	13,75	2,60
	Y (Dół)	9,19	12,98	3,31
CERN 100 x 100 mm^2	X (Góra)	4,04	22,27	1,63
	Y (Dół)	5,24	14,25	2,89

Przedostatnim testem płyt odczytu było wykonanie radiogramów przy użyciu detektora z zintegrowanymi testowanymi płytami CCS. Wszystkie pomiary były realizowane przy użyciu komercyjnego elektronicznego układu pomiarowego do detektorów GEM firmy TECHTRA (GEM 256ch Readout V2.0) [82]. Podczas wykonywania zdjęć rentgenowskich, detektor z elementami testowymi ułożonymi na jego okienku, był naświetlany z użyciem promieniowania rentgenowskiego. Wykorzystano piroelektryczne źródło promieniowania COOL-X [92]. Źródło to pracuje impulsowo, generując promieniowanie przez mniej niż 20% czasu pracy. Ze względu na parametry źródła, naświetlanie przy każdym teście trwało aż 3 godziny. Charakterystyczne energie dla tej lampy to 8,05 keV (Cu) i 8,14 keV (Ta). Obrazy rentgenowskie wykonane przy użyciu badanych płyt odczytu zostały przedstawione na rysunku 4.8 [91].



Rysunek 4.8. Obrazy rentgenowskie wykonane przy użyciu badanych płyt odczytu: a) radiogram zmierzony na płycie $MS\ 20 \times 20\ mm^2$, b) przedmioty umieszczone na detektorze do testów płyty $20 \times 20\ mm^2$, c) radiogram zmierzony na płycie $MS\ 70 \times 70\ mm^2$, d) przedmioty umieszczone na detektorze do testów płyty $70 \times 70\ mm^2$, e) radiogram zmierzony na płycie CERN $100 \times 100\ mm^2$ f) przedmioty umieszczone na detektorze do testów płyty CERN $100 \times 100\ mm^2$ [91]

Rysunek 4.8 a) radiogram zmierzony na płycie LTCC MS $20 \times 20 \text{ mm}^2$, a prześwietlany element widoczny jest na rysunku 4.8 b). Obraz uzyskany za pomocą płyty LTCC MS $70 \times 70 \text{ mm}^2$ przedstawiono na rysunku 4.8 c), a prześwietlane elementy na 4.8 d). Obraz rentgenowski zmierzony na płycie CERN $100 \times 100 \text{ mm}^2$ przedstawiono na rysunku 4.8 e), a prześwietlane przedmioty na 4.8 f). Aby uzyskać lepsze porównanie uzyskanych obrazów, podczas testów płyty CERN $100 \times 100 \text{ mm}^2$, obiekty umieszczono na środku obszaru aktywnego, radiogram przycięto do wymiarów $70 \times 70 \text{ mm}^2$.

Płyta odczytu SS-DG miała 27 zwartych linii, co uniemożliwiło rekonstrukcję radiogramu. Za pomocą płyty SS-GD udało się wykonać czytelny obraz rentgenowski, lecz płyta ta zawierała dużą ilość rozwartych linii. Uzyskany obraz z analizą został opisany w artykule [90]. Radiogram wykonany przez detektor z płytą LTCC MS $20 \times 20 \text{ mm}^2$ (rysunek 4.8 a)) jest dosyć czytelny, lecz drobne elementy kluczujące nie są widoczne. **Obrazowanie wykonane z użyciem finalnej płyty LTCC MS o wymiarach $70 \times 70 \text{ mm}^2$ jest bardzo dobrej jakości, a szczegóły są dobrze odwzorowane. Jakość i czytelność zmierzonego radiogramu jest porównywalna z obrazem uzyskanym za pomocą płyty odczytu CERN.**

W celu dalszej analizy danych pomiarowych wyznaczono efektywne wzmocnienie detektora. Zgodnie z literaturą (w tym z pracą własną) [19, 93, 94] efektywne wzmocnienie detektora jest zdefiniowane jako:

$$G_E = \frac{M}{N_p q_e} \quad (4.1)$$

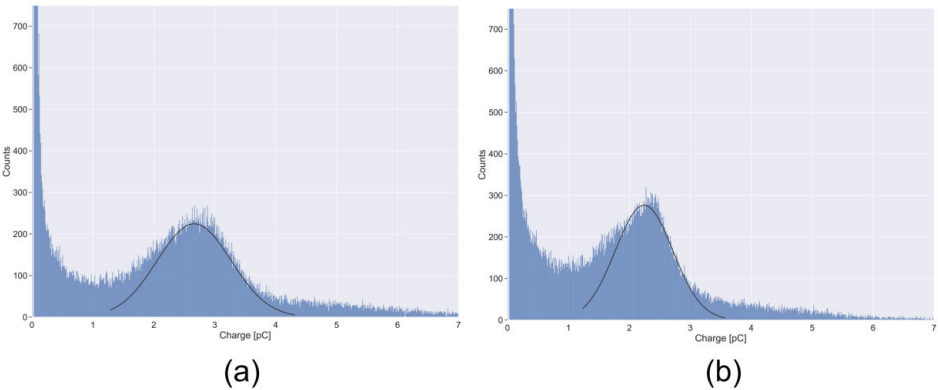
,gdzie M jest średnią wartością ładunku przy ADC wyrażoną w $[C]$, N_p jest liczbą elektronów pierwotnych, a q_e jest ładunkiem elektronu wyrażonym w $[C]$.

Efektywne wzmocnienie detektora wyliczone przy użyciu wyżej opisanego wzoru dla pomiarów płyty odczytu LTCC o wymiarach $70 \times 70 \text{ mm}^2$, wynosiło około 60 000 razy. Wzmocnienie to różniło się dla pomiarów poszczególnych płyt odczytu, ponieważ do budowy testowych detektorów wykorzystywano inne zestawy folii GEM.

Ostatnim elementem badań opracowanych płyt odczytu był pomiar rozkładu ładunku pomiędzy osią X a osią Y.

Poniższy akapit na podstawie pracy własnej [91] zawiera opis metody pomiaru oraz analizę uzyskanych wyników. Wykorzystując surowe dane z pomiarów radiogramów, wyliczony został rozkład ładunku pomiędzy górnymi liniami a dolnymi. Parametr ten jest krytyczny dla skuteczności detektora, ponieważ gdy jest bardzo nierównomierny, zdarzenie o niskiej energii przekroczy próg wykrywania na osi X, ale nie na osi Y, w rezultacie zdarzenie nie zostanie zrekonstruowane. Detektor zlicza każdy foton osobno, więc możliwy jest pomiar ładunku pojedynczego zdarzenia. Histogramy rozkładu energii zdarzeń wykonano oddzielnie dla linii X i Y.

Następnie część histogramu, która zawiera dane ze zdarzeń (prawa część histogramu) została dopasowana za pomocą funkcji Gaussa. Histogramy z przybliżeniem Gaussa są przedstawione na rysunku 4.9. Środek krzywej Gaussa odpowiada średniej wartości ładunku zdarzeń, które zostały zebrane przez paski X lub Y. Na podstawie środkowej wartości krzywych Gaussa, można obliczyć całkowity ładunek zdarzeń i jego rozkład pomiędzy liniami X i Y. Obliczone wartości rozkładu ładunku przedstawiono w Tabeli 4.2. Rozkład ładunku na płycie odczytu LTCC $20 \times 20 \text{ mm}^2$ wynosił $89,4 - 10,6\%$, co nie jest dobrym wynikiem. Ładunek na płycie odczytu $70 \times 70 \text{ mm}^2$ jest prawie równomiernie rozłożony między liniami X i Y. Współczynnik $54,4 - 45,6\%$ jest bardzo bliski optymalnemu, więc nawet zdarzenia o niskiej energii przekroczą granicę wykrywalności na osiach X i Y. Rozkład ładunku mierzony za pomocą odczytu CERN wykazuje prawie takie same wartości, jak w przypadku płyty odczytu LTCC $70 \times 70 \text{ mm}^2$. W porównaniu z pierwszym projektem płyty odczytu zauważyć można znaczną poprawę.



Rysunek 4.9. Aproksymacja funkcją Gaussa ładunku zdarzeń płyty odczytu LTCC MS o wymiarach $70 \times 70 \text{ mm}^2$: a) paski górne (oś X), b) paski dolne (oś Y) [91]

Tabela 4.2. Rozkład ładunku pomiędzy górnymi i dolnymi elektrodami opracowanych płyt odczytu LTCC w porównaniu z płytą CERN [91]

Typ płyty odczytu	Współrzędna odczytu	Położenie środka krzywej Gaussa [fC]	Procent całego ładunku [%]
LTCC $20 \times 20 \text{ mm}^2$ MS	X (Góra)	4,11	89,4
	Y (Dół)	0,49	10,6
LTCC $70 \times 70 \text{ mm}^2$ MS	X (Góra)	2,66	54,4
	Y (Dół)	2,23	45,6
CERN $100 \times 100 \text{ mm}^2$	X (Góra)	1,48	56,3
	Y (Dół)	1,15	43,7

4.2. Płyty odczytu wykonane na podłożach FR4 w klasycznej technologii PCB

Drugą przetestowaną metodą produkcji płyt odczytu była technologia obwodów drukowanych (PCB). Obwody te były wytwarzane w zewnętrznej, europejskiej firmie specjalizującej się w produkcji PCB, dlatego praca ta nie zawiera szczegółowego opisu technologii ich wytwarzania. Opracowane płyty CCS zostały szczegółowo opisane w publikacji [80].

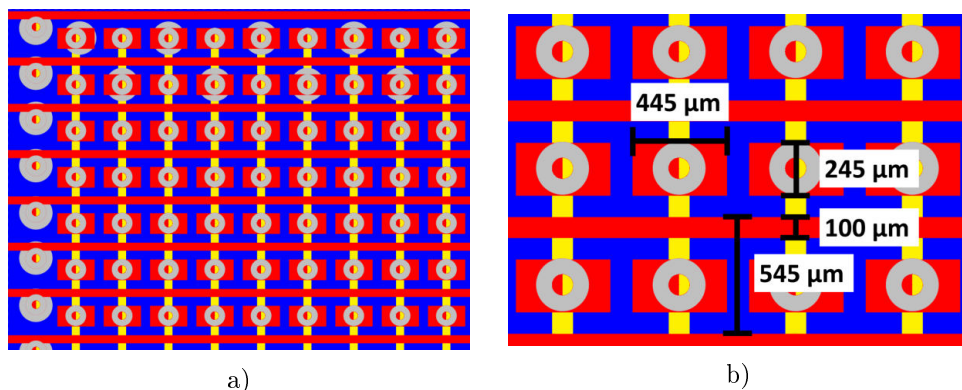
Podobnie jak w poprzednim podrozdziale, pierwszym etapem prac było określenie założeń projektowych. Płyta ta miała być dopasowana do elektronicznego układu odczytu opracowanego w rozdziale 3. Zatem wiele parametrów takich jak wymiary zewnętrzne, typ i rozmieszczenie złącz, oraz układ wyprowadzeń sygnałów musiały być zgodne. Konstrukcja płyty odczytu umożliwia łączenie poszczególnych segmentów w detektor o większym rozmiarze obszaru aktywnego. Opracowane płyty odczytu PCB są częścią detektora SGEM (Segmental GEM).

Przyjęte założenia projektowe:

1. Wymiary planarne płyty odczytu mają być takie same jak układu pomiarowego ($70 \times 70 \text{ mm}^2$).
2. Struktura odczytu typu XY z co najmniej 120 kanałami na oś.
3. Płyta ma mieć konstrukcję planarną, bez wykonywania struktur 3D na powierzchni (tak jak w klasycznych płytach odczytu).
4. Obszar aktywny o jak największym rozmiarze (jak najwęższe marginesy).
5. Możliwość łączenia kilku płyt odczytu w większą macierz.
6. Obwód ma mieć jak najmniej warstw (max 6).
7. Projekt musi mieć parametry możliwe od wykonania przez większość firm produkujących obwody PCB. Parametry te to: minimalna szerokość ścieżki i odstęp pomiędzy ścieżkami to $100 \mu\text{m}$, otwory o średnicy $100 \mu\text{m}$ w warstwach zewnętrznych i $150 \mu\text{m}$ w warstwach wewnętrznych, średnica obwódek wokół otworów na warstwach zewnętrznych to $250 \mu\text{m}$, a na wewnętrznych $400 \mu\text{m}$.
8. Złącza mają się znajdować na spodniej stronie płyty, pod obszarem aktywnym.
9. Ułożenie złącz ma być zgodne z położeniem złącz na module przetwarzającym ładunki.
10. Płyty muszą posiadać złącza na każdej krawędzi obwodu drukowanego, umożliwiając ich łączenie.
11. Układ odczytu ma zawierać mechaniczne elementy montażowe, umożliwiające ich trwały montaż do elektroniki pomiarowej i płyty bazowej.

4.2.1. Projekt

Klasyczne płyty odczytu zawierają strukturę przestrzenną z paskami w osiach X oraz Y, która jest stosunkowo trudna do wykonania i bazuje na opatentowanej technologii głębokiego trawienia kaptonu (*MCV, ang. Micro-Chemical-Vias*). Struktury te zawierają głębokie, chemicznie trawione rowki pomiędzy liniami w osi X (górną warstwę), tak by odsłonić fragmenty linii osi Y znajdujące się na warstwie wewnętrznej obwodu. Proponowane rozwiązanie zawiera planarnie ułożone linie osi X oraz serię prostokątnych pól tworzących oś Y, znajdujących się pomiędzy liniami osi X. Pola te są połączone seriami linii znajdujących się na wewnętrznej warstwie układu, ułożonymi prostopadłe do linii X. Odległość pomiędzy środkami sąsiednich linii danej osi określona jest jako *ang. pitch* i jest to jeden z ważniejszych parametrów płyt odczytu. Projekt płyty odczytu PCB przedstawiono na rysunku 4.10. Rysunek 4.10 a) przedstawia wycinek projektu pokazujący linie X, pola osi Y oraz wewnętrzne linie je łączące. Rysunek 4.10 b) pokazuje kluczowe wymiary wzoru zaprojektowanej struktury. Projekt płyty odczytu był wykonany w oprogramowaniu Altium Designer (wersja 21.9.2), które jest jednym z najlepszych narzędzi do projektowania obwodów drukowanych.



Rysunek 4.10. Projekt płyty odczytu (czerwony oznacza warstwę górną, a żółty oznacza warstwę wewnętrzną: a) linie osi X i pady osi Y z połączeniami między pikselami wykonanymi na warstwie wewnętrznej nr 1, (b) wymiary poszczególnych elementów wzoru [80]

Wymiary geometryczne opracowanej struktury silnie zależały od możliwości technologicznych oferowanych przez europejskich producentów obwodów drukowanych. Wybrano takie parametry graniczne, aby były osiągalne w ramach standardowej oferty przez co najmniej 3 europejskich dostawców. Prawdopodobnie możliwe by było wynegocjowanie lepszych parametrów u jednego z dostawców, ale znacznie zwiększyło by to koszt obwodów oraz ograniczyłoby ilość potencjalnych dostawców.

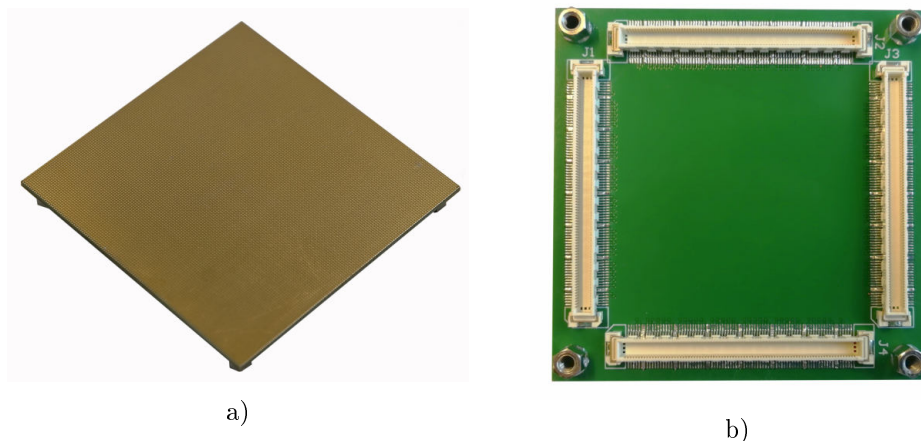
Proces doboru geometrii detali wzoru płyty odczytu został opisany na podstawie informacji zawartych na stronie 3 i 4 źródła własnego [80]. Szerokość padów jest ograniczona przez rozmiar pierścienia wokół otworu przelotowego i wynosi ona $245\text{ }\mu\text{m}$ (średnica otworu wynosi $100\text{ }\mu\text{m}$). Przy szerokości linii osi X i odstępzie między padami i liniami wynoszącym $100\text{ }\mu\text{m}$, minimalny osiągalny raster wynosi $545\text{ }\mu\text{m}$. Standardowe płyty odczytu CERN mają raster $390\text{ }\mu\text{m}$, który jest tylko o 28% mniejszy od proponowanego rozwiązania, więc rozdzielczość przestrzenna odczytu PCB powinna być porównywalna. Rozdzielczość detektorów GEM nie zależy liniowo od rastru płyty odczytu. Zgodnie z symulacjami przeprowadzonymi dla podobnego wzoru odczytu, rozdzielczość wynosi $15,6\text{ }\mu\text{m}$ dla skoku $400\text{ }\mu\text{m}$ i między $18,1\text{ }\mu\text{m}$ (skok $500\text{ }\mu\text{m}$) a $28,9\text{ }\mu\text{m}$ (skok $600\text{ }\mu\text{m}$) dla odczytu o skoku $545\text{ }\mu\text{m}$ [95]. Dane eksperymentalne (Tabela 5, [95]) pokazują niewielką różnicę w rozdzielczości — wraz ze wzrostem skoku z $250\text{ }\mu\text{m}$ do $500\text{ }\mu\text{m}$ rozdzielczość pogarsza się z $31,5\text{ }\mu\text{m}$ do $46,6\text{ }\mu\text{m}$. Dane pokazane w [96] pokazują podobne wartości.

Chmura ładunku rozkłada się na kilka linii odczytu przy płytach o rastrze $600\text{ }\mu\text{m}$ lub mniejszym. Algorytm oblicza barycentrum chmury ładunku i ustala jej położenie. W tym przypadku, dalszy wzrost rastru nie skutkował liniowym wzrostem rozdzielczości. Należy również wspomnieć, że rozdzielczość przestrzenna nie jest najważniejszym parametrem w niektórych zastosowaniach.

Płyty odczytu były wykonane w firmie Multi Circuit Boards Limited. Obwód drukowany miał 4 warstwy, i zawierał 128 linii w osi X i 127 linii w osi Y. Otwory pomiędzy górną warstwą a pierwszą warstwą wewnętrzną były wiercone laserowo i miały średnice $100\text{ }\mu\text{m}$. Pozostałe otwory były wiercone mechanicznie i miały średnice $150\text{ }\mu\text{m}$. Wykonana została partia 15 sztuk, a czas realizacji zlecenia wyniósł 18 dni roboczych. Na płyty odczytu wykonywane przez CERN trzeba czekać co najmniej 30-45 dni. Zdjęcia gotowej płyty odczytu PCB o wymiarach $70 \times 70\text{ mm}^2$ przedstawiono na rysunku 4.11. Rysunek 4.11 b) przedstawia spodnią stronę płyty.

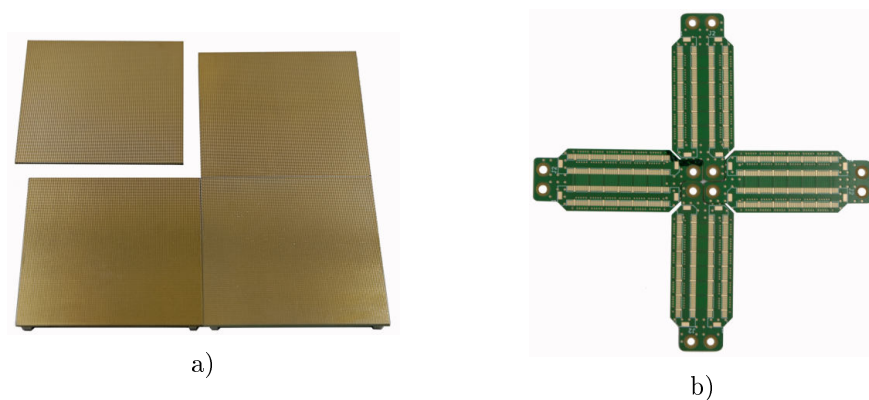
W rogach widoczne są 4 tulejki gwintowane (z gwintem M3), które są przylutowane do warstwy miedzi na spodniej warstwie. Tulejki te umożliwiają przykręcenie płyty odczytu do modułu przetwarzającego ładunki i płyty bazowej, zapewniając trwałe mocowanie mechaniczne. Widoczne są też 4 złącza, umieszczone blisko krawędzi płytki. Układ pomiarowy wykorzystuje 2 złącza, a pozostałe mogą być wykorzystane przy łączeniu kolejnych segmentów płyty odczytu. Złącza umieszczone na przeciwległych krawędziach płytki są elektrycznie połączone ze sobą (układ sygnałów jest jednakowy). Proces lutowania złącz i tulejek montażowych był identyczny z procesem opisanym w podrozdziale 3.3.

Jednym z założeń projektowych było uzyskanie jak najmniejszych marginesów pomiędzy segmentami. Linie osi X i pady osi Y znajdują się około $100\text{ }\mu\text{m}$ od krawędzi obwodów drukowanych. Pomędzy poszczególnymi modułami przewidziano



Rysunek 4.11. Zdjęcia płyty odczytu o wymiarach $70 \times 70 \text{ mm}^2$ wykonanej w technologii PCB: a) strona górna zawierająca elektrody odczytu, b) strona dolna zawierająca złącza do modułu przetwarzającego ładunki [80]

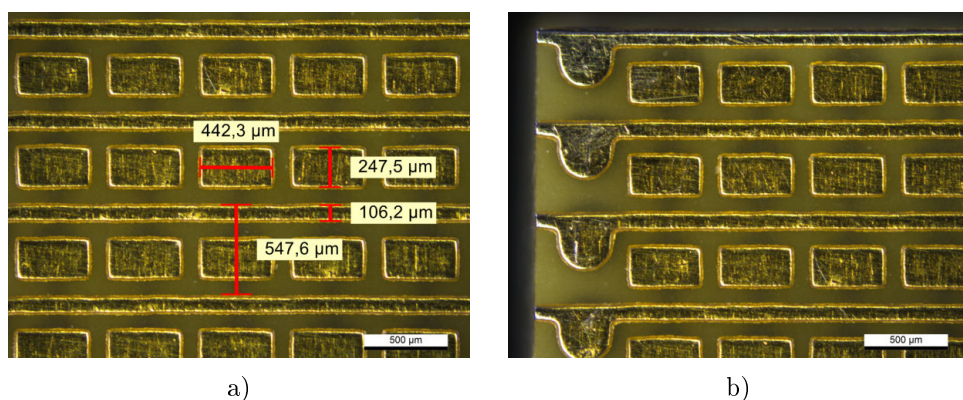
$100 \mu\text{m}$ dodatkowego odstępu. Wielkość obszaru martwego była więc mniejsza niż 1% całej powierzchni płyty odczytu. Wizualizacje sposobu łączenia segmentowych płyt odczytu zaprezentowano na rysunku 4.12. Dedykowane obwody drukowane służące do wykonywania połączeń pomiędzy modułami zostały przedstawione na rysunku 4.12 b).



Rysunek 4.12. Łączenie segmentowych płyt odczytu: a) wizualizacja tworzenia płyty odczytu z wykorzystaniem 4 segmentów, b) obwody służące do połączenia 4 segmentów [80]

4.2.2. Pomiary

Podobnie jak w przypadku płyt odczytu LTCC pierwszym testem była kontrola wizualna z użyciem mikroskopu optycznego Leica DM4500. Obrazowania były wykonywane z powiększeniem 5x w trybie ciemnego pola. Zbadano 10 losowo wybranych płyt odczytu. Sprawdzane było, czy występują jakiekolwiek zwarcia, przerwy lub nierównomierne krawędzie elementów wzoru. Obrazy mikroskopowe badanych płyt odczytu wykonanych w technologii PCB przedstawiono na rysunku 4.13. Jakość odwzorowania kształtów jest bardzo dobra. Przy tak drobnych wzorach widoczne są już ściany trawionych elementów, co utrudniało wykonanie pomiarów geometrycznych. Wszystkie wymiary były zgodne z projektowanymi z rozbieżnością mniejszą niż $7\ \mu\text{m}$.

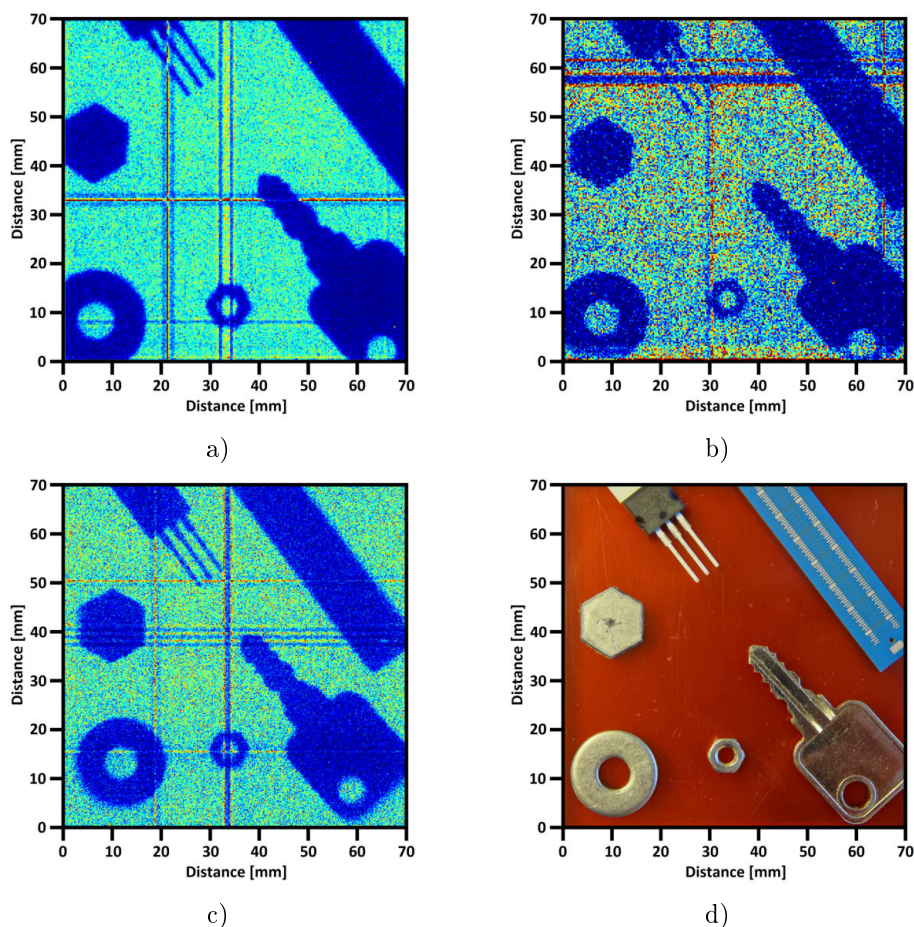


Rysunek 4.13. Zdjęcia płyty odczytu o wymiarach $70 \times 70\ \text{mm}^2$ wykonanej w technologii PCB: a) strona górna zawierająca elektrody odczytu, b) strona dolna zawierająca złącza do modułu przetwarzającego ładunki [80]

Wyniki pomiarów szumu, zwarć pomiędzy liniami oraz ich ciągłości zostały szczegółowo opisane w artykule [80] (praca własna) oraz w niniejszej rozprawie w rozdziale 3.5.

Pomiary z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego były wykonane z użyciem tych samych procedur, urządzeń i parametrów, co pomiary płyt odczytu LTCC opisane z rozdziale 4.1.2. Jedyne radiogram wykorzystujący wszystkie 128×127 kanałów płyty PCB wykonany został przy użyciu dedykowanego układu odczytu opisanego w rozdziale 2.2. Wykonane radiogramy zostały przedstawione na rysunku 4.14 w celu ich porównania. Radiogramy wykonane przy użyciu badanej płyty odczytu PCB o wymiarach $70 \times 70\ \text{mm}^2$ znajdują się na rysunkach 4.14 a) (128×127 kanałów) [80] oraz 4.14 b) (64×63 kanałów) [80]. Radiogram referencyjny, zmierzony na płycie CERN $100 \times 100\ \text{mm}^2$ [80, 91] został przedstawiony na

rysunku 4.14 c). Na rysunku 4.14 d) widoczne są obiekty umieszczone na detektorze do testów płyt odczytu.



Rysunek 4.14. Porównanie radiogramów zmierzonych przy użyciu różnych płyt odczytu: a) radiogram zmierzony na płycie PCB $70 \times 70 \text{ mm}^2$ (128×127 kanałów) [80], b) radiogram zmierzony na płycie PCB $70 \times 70 \text{ mm}^2$ (używając tylko 64×63 kanałów) [80], c) radiogram zmierzony na płycie CERN $100 \times 100 \text{ mm}^2$ [80, 91], d) obiekty umieszczone na detektorze do testów płyt odczytu [80, 91]

Analiza obrazów oraz danych pomiarowych została dokładnie opisana na stronie 9 źródła własnego [80]. Na obrazach widać kilka ciemnych lub jasnych przecinających się linii. Te wady obrazu są związane z tzw. "gorczymi pikselami". Podstawową przyczyną występowania gorących pikseli są niedoskonałości folii GEM lub cząstki kurzu na powierzchni folii GEM. Jakość obrazów i ostrość krawędzi są bardzo podobne pomiędzy pomiarami. Płyty odczytu PCB wydają się być dobrą alternatywą dla płyt odczytu CERN, szczególnie w nisko-kosztowych aplikacjach.

Na podstawie danych odczytanych z detektora, obliczono proporcję podziału ładunku pomiędzy liniami X i Y. Opis kompensacji współdzielenia ładunku w projektach płyt odczytu jest opisana w sekcji 2 niniejszego artykułu. Pomiary opierają się na porównaniu histogramów rozkładu ładunku obliczonych oddzielnie dla każdej osi — metoda ta jest opisana bardziej szczegółowo w [90,91]. Histogramy ładunku sporządzono oddzielnie dla każdej osi z 512 000 kolejnych próbek. Najwyższy szczyt każdego histogramu odpowiadający charakterystycznemu promieniowaniu źródła rentgenowskiego, został zlokalizowany i aproksymowany za pomocą krzywej Gaussa. Obliczono położenia środków krzywej Gaussowskiej i porównano wyniki z poszczególnych osi. Tabela 4.3 przedstawia obliczone dane dotyczące rozkładu ładunku na opracowanej płycie odczytu PCB oraz wyniki uzyskane za pomocą płyty CERN. Jednorodność ładunku w zaprojektowanym odczycie PCB nie była idealna, ale w przypadku wielu zastosowań stosunek 36,9 do 63,1% jest akceptowalny. Wyrównanie rozkładu ładunku dla odczytu PCB wymaga szerszych linii X, co oznacza większy skok lub wymaga zmniejszenia rozmiarów otworów i padów osi Y, co można osiągnąć, ale nie przez dowolnego standardowego producenta PCB.

Tabela 4.3. Rozkład ładunku pomiędzy górnymi i dolnymi elektrodami płyty odczytu PCB w porównaniu z płytą CERN

Typ płyty odczytu	Współrzędna odczytu	Położenie środka krzywej Gaussa [fC]	Procent całego ładunku [%]
PCB 70 x 70 mm ²	X (Góra)	4,12	36,9
	Y (Dół)	7,05	63,1
CERN 100 x 100 mm ²	X (Góra)	1,48	56,3
	Y (Dół)	1,15	43,7

4.3. Wnioski i porównanie parametrów opracowanych struktur CCS

W ramach przeprowadzonych prac przetestowano dwie metody wytwarzania płyt odczytu. Są one alternatywą dla stosowanych obecnie płyt odczytu produkowanych przez CERN, wykorzystujących opatentowany proces trawienia poliimidu. Opracowane oraz scharakteryzowane zostały struktury odczytu wykonane z niskotemperaturowej ceramiki współwypalanej (LTCC), oraz płyty w formie obwodów drukowanych (PCB) wykonanych na podłożach z laminatu FR4.

Przetestowano dwa metody wytwarzania płyt odczytu z ceramiki LTCC - wielowarstwowy druk na pojedynczym podłożu (SS), oraz strukturę wykonaną z wielu

warstw folii LTCC (MS). Układy wytwarzane metodą SS wyglądały lepiej na obrazach mikroskopowych, lecz miały znacznie więcej zwarć oraz przerwanych linii w stosunku do płyt w technologii MS. Ostatecznie wykonana została pełnoformatowa płyta odczytu LTCC o wymiarach $70 \times 70 \text{ mm}^2$ i rastrze $500 \text{ }\mu\text{m}$. Struktura ta charakteryzowała się barkiem zwartych ze sobą lub przerwanych linii. Optycznie struktura ta wyglądała bardzo dobrze, z dokładnym odwzorowaniem wymiarów i kształtów poszczególnych elementów wzorów. Technologia ta została bardzo dobrze dopracowana. Wymiary zewnętrzne struktury to $86 \times 80 \text{ mm}^2$.

Płyta odczytu wykonana w technologii PCB miała obszar aktywny o wymiarach $70 \times 70 \text{ mm}^2$, czyli taki sam jak finalna wersja płyt odczytu LTCC. Natomiast opracowany obwód drukowany charakteryzował się bardzo małymi marginesami - około $100 \text{ }\mu\text{m}$, umożliwiającymi łączenie poszczególnych segmentów w większe struktury odczytu. Płyta odczytu PCB miała raster wynoszący $545 \text{ }\mu\text{m}$ i był on niewiele większy od rastru struktury LTCC. Obwód ten był wykonany w zewnętrznej firmie, a parametry projektu były tak dobrane, by umożliwić ich produkcję przez różnych dostawców. Ocena wizualna tych obwodów wykazała, że struktury były wytrawione bardzo precyzyjnie a wymiary były zgodne z projektowymi z tolerancją poniżej $7 \text{ }\mu\text{m}$.

Pomiary szumów płyt wykonanych w obydwu technologiach dały przybliżone wyniki. Płyty odczytu PCB miały najniższy poziom szumu, niższy nawet od płyty odczytu CERN. Było to spowodowane zastosowaniem dedykowanego układu pomiarowego umieszczonego bezpośrednio za płytą odczytu PCB, w stosunku do względnie długich połączeń z elektronicznym układem pomiarowym w przypadku płyt LTCC i CERN.

Pomiary elektryczne wykazały ponadto, że zarówno finalna płyta odczytu LTCC jak i płyta FR4 nie zawierały zwarć ani uszkodzonych połączeń (płyta odczytu CERN także ich nie zawierała).

Analizując radiogramy uzyskane przez detektory wykorzystujące badane płyty odczytu LTCC i PCB, stwierdzono, że w obu przypadkach jakość uzyskiwanych obrazów jest bardzo dobra i porównywalna z obrazami uzyskiwanymi przy użyciu płyty produkcji CERN. We wszystkich porównywanych radiogramach były dokładnie widoczne szczególnie przeświecanych elementów np. ząbki klucza.

Kolejnym badanym parametrem był rozkład ładunku pomiędzy liniami X oraz Y. Im stosunek ten jest bliższy 50:50%, tym efektywność detekcji detektora jest większa. Jako, że w klasycznych płytach odczytu oraz w płytach LTCC, linie Y są

umieszczone poniżej linii X muszą mieć one większą szerokość w celu skompensowania rozkładu ładunków (by ilość docierających do nich elektronów była podobna do ilości elektronów deponowanych na liniach X). W przypadku Płyty PCB, zamiast linii Y, wykonane są serie prostokątnych pól odczytowych znajdujących się na tej samej płaszczyźnie co linie X, w związku z czym konieczne jest zastosowanie innych proporcji szerokości elektrod. W przypadku płyt odczytu LTCC uzyskano rozkład ładunku o proporcjach 54,4:45,6%, niemal identyczny w stosunku do płyt odczytu CERN (56,3:43,7%). Parametr ten w przypadku płyt odczytu PCB wyglądał nieco gorzej i by na poziomie 36,9:63,1%. Było to związane z ograniczeniami technologii PCB i założeniem projektowym wymagającym możliwości produkowania w standardowym procesie oferowanym przez wielu dostawców.

Na koniec porównano dodatkowe cechy obu rozwiązań. Płyty odczytu wykonane z ceramiki LTCC mają bardzo dobre parametry elektryczne i mechaniczne. Możliwe jest zastosowanie ich w detektorach do zastosowań kosmicznych. Natomiast koszt ich produkcji jest stosunkowo duży, oraz przy każdej zmianie wzoru konieczne jest wykonanie serii nowych sit. Opracowany wzór nie umożliwiał łączenia płyt odczytu w większe matryce, choć technologia to umożliwia. Natomiast płyty odczytu PCB są znacznie tańszą alternatywą. Laminat FR4 ma gorsze parametry i jest mniej stabilny w trudnych warunkach takich jak wysoka lub szybko zmieniająca się temperatura. Układy te mogą być wytwarzane przez wielu dostawców, a czas ich produkcji jest najkrótszy. Także zmiana projektu, lub dopasowanie go do konkretnego zastosowania jest dużo łatwiejsze i szybsze. Płyty odczytu PCB zostały zaprojektowane w taki sposób, by umożliwiać łączenie poszczególnych segmentów w większe matryce.

Rozdział 5

Podsumowanie

Celem rozprawy doktorskiej było opracowanie wielokanałowego systemu pomiaru ładunków w zakresie femtokulombów do zastosowań w detektorach promieniowania rentgenowskiego. Opracowana miała być także dedykowana płyta odczytu. Rozdział 1 opisuje cel i zakres niniejszej pracy. Rozdział 2 zawiera kompleksowy wstęp teoretyczny do przedmiotu badań oparty na przeglądzie literaturowym. Opisane zostały różne technologie gazowych detektorów promieniowania opartych na mikrostrukturach (MPGD). Szczegółowo opisana została technologia GEM, ponieważ do testów opracowanego układu pomiarowego oraz płyt odczytu zbudowano detektor wykorzystujący struktury GEM. W podrozdziale 2.2 opisane zostały różne rozwiązania elektronicznych układów pomiarowych w tym zastosowane układy scalone i metody pomiaru. W podrozdziale 2.3 opisano dokładnie różne typy struktur zbierających ładunki - płyt odczytu. Skupiono się na różnych układach elektrod (m.in. kartezyjański XY, pikselowy, XYU, oraz zigzag). Przeanalizowano także materiały i technologie zastosowane do wytwarzania tego typu struktur.

Rozdział 3 opisuje badania nad opracowaniem miniaturowego układu pomiaru ładunków. Oparty jest on o komercyjne, łatwo dostępne układy scalone. Umożliwi to popularyzację opracowanej technologii. Opracowany elektroniczny układ pomiarowy spełnia wszystkie założone cele oraz wymagania projektowe. Elementem wynikłym w czasie prac była konieczność opracowania ceramicznych układów wejściowych. Dzięki nim możliwe było zminiaturyzowanie układu pomiarowego do zakładanych wymiarów. Jako, że struktura ta zlokalizowana była pomiędzy złączem do płyty odczytu a obwodem drukowanym układu elektronicznego, prawie nie zajmowała dodatkowej przestrzeni płytki drukowanej. W czasie prac, projekt struktur był czterokrotnie modyfikowany oraz wykonanych było co najmniej 8 serii struktur, w celu dopracowania projektu oraz procesu wytwarzania. Pomiarów elektrycznych finalnej serii próbek wykazały rezystancje na zakładanym poziomie oraz rozrzucie. Tolerancja rezystorach polaryzujących ($25\text{ M}\Omega$) wyniosła $\pm 25\%$ tak jak zakładano. Taka tolerancja umożliwiła poprawną pracę detektora, szczególnie, że algorytm obróbki danych cyfrowo wyrównuje różnice polaryzacji poszczególnych kanałów. Po wykonaniu struktur wejściowych LTCC, opracowano oraz wykonano elektroniczny

układ pomiaru ładunków. Układ ten został dokładnie scharakteryzowany elektrycznie a także został przetestowany w warunkach operacyjnych. Zmierzone poziom szumu wejściowego bez płyty odczytu oraz z podłączoną płytą odczytu. Poziom szumu był bardzo niski oraz zgodny z wymaganiami. Przeprowadzono także pomiary wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego. Wykonano testowe obrazowania rentgenowskie (radiogramy) na kompletnym detektorze GEM zawierającym opracowany układ elektroniczny oraz płytę odczytu PCB. **Wykonane radiogramy były bardzo dobrej jakości potwierdzając możliwość obrazowania przy użyciu opracowanego detektora. Ich jakość oraz odwzorowanie szczegółów były na poziomie porównywalnym z radiogramami wykonywanymi za pomocą komercyjnego detektora GEM z płytą odczytu CERN.** Ponadto wykonane zostały histogramy ładunku zdarzeń na podstawie kilkuset tysięcy zaobserwowanych zdarzeń. Pozwalają one na określenie rozkładu energetycznego rejestrowanego promieniowania. Na zarejestrowanych histogramach można było zaobserwować linię charakterystyczną dla miedzi, która jest zawarta w części elementów detektora. Badanie te potwierdzają możliwość zastosowania opracowanego detektora do wykonywania analiz widm fluorescencji rentgenowskiej (XRF). Elektroniczny układ odczytu opracowywany w ramach doktoratu, ma potencjał do komercjalizacji.

Rozdział 4 opisuje proces opracowania dwóch technologii wytwarzania płyt odczytu. Jeden typ płyt CCS był wykonany z ceramiki LTCC, zaś drugi z laminatu FR4. Płyty wykonane w technologii PCB były dedykowane do opisywanego w rozdziale 3 elektronicznego układu odczytu. Płyty odczytu wykonane z ceramiki LTCC były dedykowane do projektu MGEM (realizowany równolegle z doktoratem), tak więc założenia projektowe pomiędzy tymi dwoma typami płyt różnią się. Niemniej jednak wymiary obszaru aktywnego są takie same, a raster jest bardzo podobny ($500\text{ }\mu\text{m}$ dla płyty LTCC i $545\text{ }\mu\text{m}$ dla płyty PCB), co umożliwiło wykonanie rzetelnego porównania uzyskanych wyników. Oba typy struktur CCS miały kartezjański układ odczytu typu XY. W przypadku płyt LTCC najpierw wykonano 3 rodzaje testowych płyt odczytu aby sprawdzić która metoda wytwarzania daje najlepsze rezultaty. Finalna wersja ceramicznej płyty odczytu o wymiarach $70 \times 70\text{ mm}^2$ była wykonana w technice wielu podłoży, gdzie w górnym podłożu na którym znajdowały się linie osi X wycięte laserowo były okienka odsłaniające fragmenty linii Y znajdujące się na drugiej warstwie. Natomiast płyty odczytu PCB miały całkowicie planarną konstrukcję, bez konieczności wykonywania struktur 3D (serii rowków lub okienek) na jej powierzchni, co znacznie ułatwiło proces ich produkcji. Płyty te zawierają linie osi X, a w ramach osi Y wykonano serie prostokątnych pól ustawionych w linii prostopadłą do osi X. Pady te są połączone na wewnętrznej warstwie tworząc os Y. Dzięki temu opracowane płyty odczytu mogą być wykonywane w klasycznym procesie produkcji PCB, oraz dostępnych jest co najmniej kilka firm będących w

stanie je produkować. Pomiary elektryczne struktur wykazały brak zwarć zarówno dla struktury LTCC jak i płyty PCB. Pomiary szumów detektora z podłączoną płytą odczytu był podobny dla wszystkich mierzonych płyt odczytu (w tym referencyjnej płyty CERN). Płyta PCB miała szum na najniższym poziomie w związku z najkrótszymi połączeniami z elektronicznym układem pomiarowym detektora. Wszystkie testowane płyty odczytu były integrowane w kompletny detektor GEM. Następnie wykonane zostały obrazowania rentgenowskie (radiogramy) elementów testowych ułożonych na detektorze. **Obrazy uzyskane przy użyciu płyty LTCC oraz płyty PCB były bardzo dobrej jakości, porównywalnej z płytą odczytu CERN. Na wszystkich obrazowaniach dokładnie widoczne były szczegóły prześwietlanych obiektów, np. ząbki na kluczu.** Mierzony był także rozkład ładunku pomiędzy linie X a Y. Struktura LTCC miała rozkład ładunku niemal identyczny w stosunku do płyty CERN (niemalże 50:50%). Płyta PCB ze względu na ograniczenia technologiczne miała ten stosunek równy 36,9:63,1% co także nie jest złym wynikiem i pozwala na skuteczną detekcję promieniowania. Kolejnym aspektem jest koszt produkcji danego typu struktur. Koszt produkcji płyt PCB jest niewielki w stosunku do płyt LTCC i CERN. Czas realizacji jest krótki w porównaniu do płyt odczytu produkcji CERN. Obecnie najpopularniejsze struktury CCS (te produkowane przez CERN) wykonywane są z kompozytu PI/FR4, który jest trudny w produkcji oraz wymaga stosowania opatentowanej technologii trawienia MCV. Płyty wykonane z ceramiki LTCC mają bardzo dobre parametry mechaniczne i elektryczne, lecz koszt ich produkcji jest stosunkowo wysoki. Ich główną aplikacją są specjalistyczne detektory, np. do zastosowań kosmicznych. Płyty CCS wykonane w technologii PCB ze względu na niski koszt i dość dobre parametry mechaniczne są doskonałą alternatywą możliwą do zastosowania w większości aplikacji. Pozwala ona także na stosunkowo łatwe dopasowanie projektu do wymagań konkretnej aplikacji. Dodatkową funkcjonalnością płyt odczytu PCB była możliwość łączenia kilku segmentów w większą macierz. Segmentowe płyty odczytu pozwalają na budowę detektora z gotowych i tanich modułów, co zmniejsza koszty produkcji i ewentualnej późniejszej rozbudowy detektora. Każdy segment zawiera na dolnej warstwie 4 wielo-pinowe złącza, które umożliwiają połączenie z elektronicznym układem odczytu lub z sąsiednimi segmentami. Opracowane zostały także dedykowane obwody drukowane umożliwiające łączenie poszczególnych płyt.

W ramach pracy doktorskiej opracowano i przetestowano więc kompletny i funkcjonalny detektor GEM umożliwiający wykonywanie pomiarów promieniowania rentgenowskiego. Możliwość obrazowania została także przetestowana i potwierdzona. Oba przetestowane typy płyt odczytu mają bardzo dobre parametry, porównywalne do płyt produkcji CERN.

Podsumowując, uzyskane oraz opisane w niniejszej rozprawie wyniki badań pozwalają stwierdzić, że cel rozprawy został osiągnięty.

Bibliografia

- [1] „What are smallsats and cubesats?”, NASA, <https://www.nasa.gov/what-are-smallsats-and-cubesats/> (24 lipca 2024).
- [2] E. Kulu, „Nanosats database”, <https://www.nanosats.eu/> (24 lipca 2024).
- [3] M. C. Weisskopf *et al.*, „The imaging x-ray polarimetry explorer (ixpe)”, *Results in Physics*, vol. 6, pp. 1179–1180, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2016.10.021>
- [4] L. Baldini *et al.*, „Design, construction, and test of the gas pixel detectors for the ixpe mission”, *Astroparticle Physics*, vol. 133, p. 102628, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2021.102628>
- [5] K. Jahoda, „The Gravity and Extreme Magnetism Small Explorer”, in *Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray*, M. Arnaud, S. S. Murray, T. Takahashi, Eds., vol. 7732, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2010, p. 77320W. <https://doi.org/10.1117/12.857439>
- [6] J. E. Hill *et al.*, „The design and qualification of the GEMS X-ray polarimeters”, in *Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray*, T. Takahashi, S. S. Murray, J.-W. A. den Herder, Eds., vol. 8443, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2012, p. 84431Q. <https://doi.org/10.1117/12.928435>
- [7] F. Sauli A. Sharma, „Micropattern gaseous detectors”, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, vol. 49, no. Volume 49, 1999, pp. 341–388, 1999. <https://doi.org/10.1146/annurev.nucl.49.1.341>
- [8] A. Oed, „Position-sensitive detector with microstrip anode for electron multiplication with gases”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 263, no. 2, pp. 351–359, 1988. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(88\)90970-9](https://doi.org/10.1016/0168-9002(88)90970-9)
- [9] B. Mindur, „Micropattern gaseous detectors : a new developments and applications”, *Acta Physica Polonica. Seria B, High Energy, Scattering of Composite Objects*, vol. 4, no. 2, pp. 287–292, 2016. <https://doi.org/10.5506/APhysPolB.47.287>
- [10] F. Sauli, „Gem: A new concept for electron amplification in gas detectors”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 386, no. 2, pp. 531–534, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)01172-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(96)01172-2)
- [11] Y. Giomataris, P. Rebourgeard, J. Robert, G. Charpak, „Micromegas: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 376, no. 1, pp. 29–35, 1996. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(96\)00175-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(96)00175-1)

- [12] M. Bianco, „Micropattern gaseous detectors technologies”, https://indico.cern.ch/event/1224299/contributions/5259932/attachments/2687061/4667735/MBianco_GasDetector_Lesson4.pdf (5 września 2024).
- [13] F. Dubinin, P. Iengo, G. Sekhniaidze, K. Zhukov, „Gas gain study of a large-size multilayer micromegas”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1690, no. 1, p. 012046, dec 2020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1690/1/012046>
- [14] D. Attié *et al.*, „Current status and future developments of micromegas detectors for physics and applications”, *Applied Sciences*, vol. 11, no. 12, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11125362>
- [15] I. Giomataris *et al.*, „Micromegas in a bulk”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 560, no. 2, pp. 405–408, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.12.222>
- [16] R. Ballabriga, M. Campbell, X. Llopart, „Asic developments for radiation imaging applications: The medipix and timepix family”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 878, pp. 10–23, 2018, radiation Imaging Techniques and Applications. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.07.029>
- [17] M. Chefdeville *et al.*, „An electron-multiplying ‘micromegas’ grid made in silicon wafer post-processing technology”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 556, no. 2, pp. 490–494, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.11.065>
- [18] O. Bouhali, „Development of micro-pattern gas detectors for the upgrade of the muon system of the cms experiment at the large hadron collider”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 869, no. 1, p. 012060, jun 2017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/869/1/012060>
- [19] F. Sauli, „The gas electron multiplier (gem): Operating principles and applications”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 805, pp. 2–24, 2016, special Issue in memory of Glenn F. Knoll. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.07.060>
- [20] T. Hildén, E. Brücken, J. Heino, M. Kalliokoski, A. Karadzhinova, R. Lauhakangas, E. Tuominen, R. Turpeinen, „Optical quality assurance of gem foils”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 770, pp. 113–122, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.10.015>
- [21] F. Arnold, P. Carrière, L. Ropelewski, J. Spanggaard, G. Tranquille, „Gas electron multipliers for low energy beams”, CERN-BE-2010-021, 01/05/2010. <https://cds.cern.ch/record/1272163/files/CERN-BE-2010-021.pdf> (7 września 2024).
- [22] S. Kappler, J. Kaminski, B. Ledermann, T. Muller, L. Ropelewski, F. Sauli, „Design and construction of a gem-tpc prototype for research and development purposes”, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 51, no. 4, pp. 1524–1528, 2004. <https://doi.org/10.1109/TNS.2004.832897>
- [23] S. Bressler, L. Moleri, A. Jash, A. Tesi, D. Zavazieva, „The thick gas

- electron multiplier and its derivatives: Physics, technologies and applications”, *Progress in Particle and Nuclear Physics*, vol. 130, p. 104029, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2023.104029>
- [24] M. Baruzzo *et al.*, „Direct measurements of the properties of thick-gem reflective photocathodes”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 972, p. 164099, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164099>
- [25] M. Cortesi, R. Alon, R. Chechik, A. Breskin, D. Vartsky, V. Dangendorf, „Investigations of a thgem-based imaging detector”, *Journal of Instrumentation*, vol. 2, no. 09, p. P09002, sep 2007. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/2/09/P09002>
- [26] T. Fujiwara, Y. Mitsuya, H. Takahashi, „Radiation imaging with glass gas electron multipliers (g-gems)”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 878, pp. 40–49, 2018, radiation Imaging Techniques and Applications. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.09.010>
- [27] Y. Mitsuya, H. Miyoshi, T. Fujiwara, M. Uesaka, H. Takahashi, „Gaseous flat-panel detector with glass gas electron multiplier coupled with micro-photodiode array”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 873, pp. 56–58, 2017, imaging 2016. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.05.040>
- [28] A. Lowe, K. Majumdar, K. Mavrokoridis, B. Philippou, A. Roberts, C. Touramanis, „A novel manufacturing process for glass thgems and first characterisation in an optical gaseous argon tpc”, *Applied Sciences*, vol. 11, no. 20, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11209450>
- [29] Y. Takeuchi, K. Komiya, T. Tamagawa, Y. Zhou, „Development and properties of 100 mm-square size ltcc-gem”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1498, no. 1, p. 012011, apr 2020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1498/1/012011>
- [30] Z. Hu *et al.*, „Investigation on the performance of a thick ceramic gas electron multiplier”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 1034, p. 166824, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166824>
- [31] J. Zhou *et al.*, „A novel ceramic gem used for neutron detection”, *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 52, no. 6, pp. 1277–1281, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.11.021>
- [32] P. Bielówka, M. Babij, A. Dąbrowski, K. Malecha, „The application of low-temperature cofired ceramics technology in gas electron multiplier microstructures”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 1047, p. 167749, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167749>
- [33] G. Bencivenni, R. D. Oliveira, G. Morello, M. P. Lener, „The micro-resistive well detector: a compact spark-protected single amplification-stage mpgd”, *Journal of Instrumentation*, vol. 10, no. 02, p. P02008, feb 2015. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/02/P02008>

- [34] R. Bellazzini *et al.*, „The well detector”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 423, no. 1, pp. 125–134, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01187-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01187-5)
- [35] G. Bencivenni, R. de Oliveira, G. Felici, M. Gatta, M. Giovannetti, G. Morello, A. Ochi, M. P. Lener, E. Tskhadadze, „The u-rwell layouts for high particle rate”, *Journal of Instrumentation*, vol. 14, no. 05, p. P05014, may 2019. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/05/P05014>
- [36] J. Parker *et al.*, „Neutron imaging detector based on the upic micro-pixel chamber”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 697, pp. 23–31, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.08.036>
- [37] A. Ochi, T. Nagayoshi, S. Koishi, T. Tanimori, T. Nagae, M. Nakamura, „A new design of the gaseous imaging detector: Micro pixel chamber”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 471, no. 1, pp. 264–267, 2001, imaging 2000. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)00996-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)00996-2)
- [38] F. Yamane, A. Ochi, K. Matayoshi, K. Ogawa, Y. Ishitobi, „Development of the micro pixel chamber with dlc cathodes”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 951, p. 162938, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162938>
- [39] M. French *et al.*, „Design and results from the apv25, a deep sub-micron cmos front-end chip for the cms tracker”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 466, no. 2, pp. 359–365, 2001, 4th Int. Symp. on Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)00589-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)00589-7)
- [40] M. Raymond *et al.*, „The apv25 0.25 /spl mu/m cmos readout chip for the cms tracker”, in *2000 IEEE Nuclear Science Symposium. Conference Record (Cat. No.00CH37149)*, vol. 2, 2000, pp. 9/113–9/118 vol.2. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2000.949881>
- [41] M. Gola *et al.*, „A new technique to establish the uniformity of the induction gap in gem based detectors”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 1019, p. 165826, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900221008111>
- [42] M. Lupberger *et al.*, „Implementation of the vmm asic in the scalable readout system”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 903, pp. 91–98, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.06.046>
- [43] G. Iakovidis, „Vmm3a, an asic for tracking detectors”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1498, no. 1, p. 012051, apr 2020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1498/1/012051>
- [44] F. Jaekel, K. Desch, J. Kaminski, M. Lupberger, L. Scharenberg, P. Schwaebig, „An automated testing system for the rd51 vmm hybrid and yield measurement of

- the first production batches”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 1049, p. 168132, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168132>
- [45] M. D. R. Rolo *et al.*, „A custom readout electronics for the besiii cgem detector”, *Journal of Instrumentation*, vol. 12, no. 07, p. C07017, jul 2017. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/07/C07017>
- [46] A. Rivetti *et al.*, „Tiger: A front-end asic for timing and energy measurements with radiation detectors”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 924, pp. 181–186, 2019, 11th International Hiroshima Symposium on Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.09.010>
- [47] “Gemroc 1, micromegas and gems semi digital read out chip”, CAEN. <https://www.caen.it/products/gemroc-1/> (7 września 2024).
- [48] B. Mindur, W. Dąbrowski, T. Fiutowski, P. Wiacek, A. Zielińska, „An fpga based gemroc readout system”, in *2012 18th IEEE-NPSS Real Time Conference*, 2012, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/RTC.2012.6418151>
- [49] D. Pfeiffer *et al.*, „Rate-capability of the vmm3a front-end in the rd51 scalable readout system”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 1031, p. 166548, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166548>
- [50] T. Fiutowski, W. Dąbrowski, B. Mindur, K. Świentek, P. Wiacek, „Gemroc2 – a self-triggered high counting rate readout asic for micro pattern gas detectors with integrated input protection against discharges”, AGH. <https://indico.cern.ch/event/581417/contributions/2556726/attachments/1464505/2263707/GEMROC2.pdf> (7 września 2024).
- [51] T. S. Abelha, G. G. A. de Souza, M. Bregant, „Comparing different methods of position reconstruction considering 1d readout of gem detectors”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2340, no. 1, p. 012049, sep 2022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2340/1/012049>
- [52] A. Bressan, J. Labbé, P. Pagano, L. Ropelewski, F. Sauli, „Beam tests of the gas electron multiplier”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 425, no. 1, pp. 262–276, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01406-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01406-5)
- [53] A. Bressan *et al.*, „High rate behavior and discharge limits in micro-pattern detectors”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 424, no. 2, pp. 321–342, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01317-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01317-5)
- [54] A. Zhang, M. Hohlmann, B. Azmoun, M. L. Purschke, C. Woody, „A gem readout with radial zigzag strips and linear charge-sharing response”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 887, pp. 184–192, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.12.074>

- [55] Takeshi-Miki, R. Itoh, T. Kamae, „Zigzag-shaped pads for cathode readout of a time projection chamber”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 236, no. 1, pp. 64–68, 1985. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(85\)90127-5](https://doi.org/10.1016/0168-9002(85)90127-5)
- [56] B. Azmoun, P. Garg, T. K. Hemmick, M. Hohlmann, A. Kiselev, M. L. Purschke, C. Woody, A. Zhang, „Design studies for a tpc readout plane using zigzag patterns with multistage gem detectors”, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 65, no. 7, pp. 1416–1423, 2018. <https://doi.org/10.1109/TNS.2018.2846403>
- [57] C. Perez-Lara *et al.*, „A comparative study of straight-strip and zigzag-interleaved anode patterns for mpgd readouts”, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 69, no. 1, pp. 50–55, 2022. <https://doi.org/10.1109/TNS.2021.3132946>
- [58] B. Azmoun *et al.*, „Design studies of high-resolution readout planes using zigzags with gem detectors”, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 67, no. 8, pp. 1869–1876, 2020. <https://doi.org/10.1109/TNS.2020.3001847>
- [59] B. Ketzer *et al.*, „Triple gem tracking detectors for compass”, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 49, no. 5, pp. 2403–2410, 2002. <https://doi.org/10.1109/TNS.2002.803891>
- [60] A. Bressan, R. De Oliveira, A. Gandi, J.-C. Labbé, L. Ropelewski, F. Sauli, D. Mörmann, T. Müller, H. Simonis, „Two-dimensional readout of gem detectors”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 425, no. 1, pp. 254–261, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01405-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01405-3)
- [61] A. Pellecchia, P. Verwilligen, A. Stamerra, „Performance of triple-gem detectors for the cms phase-2 upgrade measured in test beam”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 1046, p. 167618, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167618>
- [62] A. Zhang, V. Bhopatkar, M. Hohlmann, X. Bai, K. Gnanvo, N. K. Liyanage, M. Posik, B. Surrow, „Randd on gem detectors for forward tracking at a future electron-ion collider”, in *2015 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)*, 2015, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2015.7581965>
- [63] K. Gnanvo, N. Liyanage, B. Mehl, R. de Oliveira, „Performance of a resistive micro-well detector with capacitive-sharing strip anode readout”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 1047, p. 167782, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167782>
- [64] K. Gnanvo, N. Liyanage, R. de Oliveira, B. Mehl, „Capacitive-sharing readout structures for mpgds”, https://indico.cern.ch/event/1071632/contributions/4606932/attachments/2350217/4008607/20211117_KG_RD51_Coll_Meeting.pdf (29 lipca 2024).
- [65] J. Bessuille, „New approach for 2d readout of gem detectors”, <https://indico.cern.ch/event/179611/contributions/301892/attachments/237395/332380/Bessuille-20120930-rev2.pdf> (29 lipca 2024).

- [66] S. D. Torre, E. Oliveri, L. Ropelewski, M. Titov, „R and d proposal, rd51 extension beyond 2018”, 2018. <https://arxiv.org/abs/1806.09955> (30 Sierpnia 2024).
- [67] “The upgrade of the largest gas detector in the world: the alice gem-tpc project”, Technische Universität München. <https://www.ph.nat.tum.de/denseandstrange/research/current-projects/gem-tpc-upgrade-project-at-alice/> (3 września 2024).
- [68] D. Attié *et al.*, „A time projection chamber with gem-based readout”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 856, pp. 109–118, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.11.002>
- [69] A. T. collaboration *et al.*, „The upgrade of the alice tpc with gems and continuous readout”, *Journal of Instrumentation*, vol. 16, no. 03, p. P03022, mar 2021. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/03/P03022>
- [70] T. Matsuda, „Results of the first beam test of a gem tpc large prototype”, *Journal of Instrumentation*, vol. 5, no. 01, p. P01010, jan 2010. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/5/01/P01010>
- [71] P. Marinho, A. Barbosa, G. Guedes, „Using a multilayer printed circuit board as position sensing electrode in a triple-gem detector”, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 52, no. 6, pp. 2917–2922, 2005. <https://doi.org/10.1109/TNS.2005.862800>
- [72] K. Flöthner *et al.*, „The xyu-gem: Ambiguity-free coordinate readout of the gas electron multiplier”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 1052, p. 168257, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168257>
- [73] S. Bachmann, S. Kappler, B. Ketzer, T. Müller, L. Ropelewski, F. Sauli, E. Schulte, „High rate x-ray imaging using multi-gem detectors with a novel readout design”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 478, no. 1, pp. 104–108, 2002, proceedings of the ninth Int.Conf. on Instrumentation. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)01719-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)01719-3)
- [74] K. Gnanvo, S. J. Lee, B. Mehl, R. de Oliveira, A. Weisenberger, „Performance of a triple-gem detector with capacitive-sharing 3-coordinate (x–y–u)-strip anode readout”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 1066, p. 169654, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169654>
- [75] I. Laktineh, „A new readout scheme for rpc and other gaseous detectors”, <https://indico.cern.ch/event/1040996/contributions/4394657/attachments/2264167/3843884/RD51-WP.pdf> (25 sierpnia 2024).
- [76] K. Gnanvo, N. Liyanage, B. Mehl, R. de Oliveira, „Performance of a resistive micro-well detector with capacitive-sharing strip anode readout”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 1047, p. 167782, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167782>
- [77] X. Ju, M. Dong, Y. Zhao, C. Zhou, J. Dong, Y. Zhao, H. Zhang,

- Q. OuYang, „Two-dimensional imaging triple-gem detector with resistive anode readout”, *Journal of Instrumentation*, vol. 12, no. 10, p. P10008, oct 2017. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/10/P10008>
- [78] X.-D. Ju, M.-Y. Dong, Y.-C. Zhao, C.-X. Zhou, O.-Y. Qun, „Design and optimization of resistive anode for a two-dimensional imaging gem detector*”, *Chinese Physics C*, vol. 40, no. 8, p. 086004, aug 2016. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/40/8/086004>
- [79] M. Dixit, J. Dubeau, J.-P. Martin, K. Sachs, „Position sensing from charge dispersion in micro-pattern gas detectors with a resistive anode”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 518, no. 3, pp. 721–727, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.09.051>
- [80] M. Babij, P. Bielówka, S. Gburek, K. Malecha, „A segmental 2d readout board manufactured in printed circuit board technology for gas electron multiplier detectors”, *Sensors*, vol. 23, no. 19, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23198095>
- [81] S. Gburek *et al.*, „Cubesat compatible modular gem sensors, for space and ground applications with core components made out of ltcc”, *Submitted to Measurements*, 2024.
- [82] “Detektory gem”, TTA TECHTRA. <http://techtra.pl/technologie/detektor-gem/> (26 lipca 2024).
- [83] I. Wolff, C. Günner, J. Kassner, R. Kulke, P. Uhlig, „New heights for satellites: Ltcc multilayer technology for future satellites”, *IEEE Microwave Magazine*, vol. 19, no. 1, pp. 36–47, 2018. <https://doi.org/10.1109/MMM.2017.2759599>
- [84] I. Wolff, R. Kulke, T. Klein, „Ltcc: A space qualified integration and packing technology for millimeter-wave systems wfa: Integration and technologies for mm-wave sub-systems, in proceedings of the workshop presentation of the 2012 ieee/mtt-s international microwave symposium digest, montreal, qc, canada”, 2012. https://www.researchgate.net/publication/320548533_LTCC_A_Space_Qualified_Integration_and_Packing_Technology_for_Millimeter-Wave_Systems_WFA_Integration_and_Technologies_for_mm-Wave_Sub-Systems (19 sierpnia 2024).
- [85] “Micromax™ product selector guide”, Celanese. https://explore.celanese.com/Micromax_ProductSelectorGuide.html/ (26 lipca 2024).
- [86] “9000 series resistors technical data sheet”, Heraeus. https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/thick_film/thick_film_data_sheets/hybrid_electronics/hybrid_ic/Resistors_9000_Series.pdf/ (26 lipca 2024).
- [87] “Ddc264 64-channel, current-input analog-to-digital converter datasheet (rev. d)”, Texas Instruments. <https://www.ti.com/lit/gpn/ddc264/> (5 sierpnia 2024).
- [88] H. BIROL, „fabrication of low temperature co-fired ceramic (ltcc)-based sensor and micro-fluidic structures”, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE. https://infoscience.epfl.ch/record/91137/files/EPFL_TH3696.pdf&ved=2ahUKEwjtpoXqyPSHAxU4JRAIHezWFOE4ChAWegQIFBAB&usg=AOvVaw17sG_yX78ECDg4HkRSYwg1 (14 sierpnia 2024).

- [89] B. Mindur, T. Fiutowski, S. Koperny, P. Wiącek, W. Dąbrowski, „Investigation of copper-less gas electron multiplier detectors responses to soft x-rays”, *Sensors*, vol. 20, no. 10, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20102784>
- [90] A. Dąbrowski, W. Nawrot, M. Czok, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, „Ltcc strip electrode arrays for gas electron multiplier detectors”, *Sensors*, vol. 22, no. 2, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22020623>
- [91] M. Babij, P. Bielówka, A. Dąbrowski, W. Nawrot, M. Czok, K. Malecha, „Manufacturing of a 70 × 70 mm² ltcc strip electrode readout for gas electron multiplier detectors”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 342, p. 113656, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113656>
- [92] “Cool-x documentation”, Amptek. <https://www.amptek.com/-/media/ametekamptek/documents/resources/products/specs/retired/cool-x-pyroelectric-x-ray-generator-specifications.pdf> (25 sierpnia 2024).
- [93] A. Ahmed, A. Kumar, M. Naimuddin, M. Babij, P. Bielówka, „The qualification of gem detector and its application to imaging”, *Journal of Instrumentation*, vol. 17, no. 04, p. P04002, apr 2022. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/04/P04002>
- [94] R. N. Patra, R. N. Singaraju, S. Biswas, Z. Ahammed, T. K. Nayak, Y. P. Viyogi, „Measurement of basic characteristics and gain uniformity of a triple gem detector”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 862, pp. 25–30, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.05.011>
- [95] V. N. Kudryavtsev, T. V. Maltsev, L. I. Shekhtman, „Study of gem-based detectors spatial resolution”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1498, no. 1, p. 012005, apr 2020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1498/1/012005>
- [96] V. Kudryavtsev, T. Maltsev, L. Shekhtman, „Spatial resolution of triple-gem detectors”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 936, pp. 482–484, 2019, frontier Detectors for Frontier Physics: 14th Pisa Meeting on Advanced Detectors. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.140>

Opublikowane prace

CubeSat compatible Modular GEM Sensors, for Space and Ground Applications with core components made out of LTCC

S. Gburek, P. Podgórski, D. Ścisłowski, M. Kowaliński, M. Stęśliński, J. Bąkała, **M. Babij**, P. Bielówka, K. Malecha, M. Czok, A. Dąbrowski, W. Nawrot, J. Głowinkowski, P. Wilk

Zgłoszona do czasopisma Measurements, w trakcie recenzji

Samodzielny wkład autora rozprawy w powstanie tej publikacji polegał na:

- udziale w opracowaniu koncepcji rozwiązania,
- opracowaniu elektronicznego układu przetwarzającego ładunki na wartość cyfrową,
- montażu i uruchomieniu kompletnego detektora GEM zawierającego opracowane elementy,
- przeprowadzeniu pomiarów elektrycznych oraz pomiarów z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego, których wyniki wykorzystano w publikacji,

Łączny udział autora rozprawy wynosi 20%.

Title Page with Author Information

Title Page Template

Title:

(Article title. Article titles should be concise and informative. Please avoid abbreviations and formulae, where possible, unless they are established and widely understood, e.g., DNA).

CubeSat compatible Modular GEM Sensors, for Space and Ground Applications with core components made out of LTCC

Author Information

Author names:

(Provide the given name(s) and family name(s) of each author. The order of authors should match the order in the submission system. Carefully check that all names are accurately spelled. If needed, you can add your name between parentheses in your own script after the English transliteration.)

Szymon Gburek ^{a, *, 1}, Piotr Podgórski ^{a, 2}, Daniel Ścisłowski ^{a, 3}, Mirosław Kowaliński ^{a, 4}, Marek Stęślicki ^{a, 5}, Jarosław Bąkała ^{a, 6}, Michał Babij ^{b, c, 7}, Piotr Bielówka ^{b, c, 8}, Karol Malecha ^{c, 9}, Mateusz Czok ^{c, 10}, Arkadiusz Dąbrowski ^{c, 11}, Witold Nawrot ^{d, 12}, Jacek Głowinkowski ^e, Piotr Wilk ^e

Affiliations:

(Add affiliation addresses, referring to where the work was carried out, below the author names. Indicate affiliations using a lower-case superscript letter immediately after the author's name and in front of the corresponding address. Ensure that you provide the full postal address of each affiliation, including the country name and, if available, the email address of each author.)

^a Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN), Bartycka 18a, 00-716 Warszawa, Polska

^b Technology Transfer Agency TECHTRA Sp. z o.o., (TECHTRA) ul. Duńska 13, 54-427 Wrocław, Poland

^c Department of Microsystems, Faculty of Electronics, Photonics and Microsystems, Wrocław University of Science and Technology (PWr), wyb. S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland

^d XTPL S.A., Stabłowicka 147, 54-006 Wrocław, Poland

^e Wrocław Technology Park SA (WPT), ul. Muchoborska 18, 54-424 Wrocław, Poland

* Corresponding author: Szymon Gburek

Emails of the authors

Szymon Gburek	sg@cbk.pan.wroc.pl
Piotr Podgórski	pp@cbk.pan.wroc.pl
Daniel Ścisłowski	ds@cbk.pan.wroc.pl
Mirosław Kowaliński	mk@cbk.pan.wroc.pl
Marek Stęślicki	sm@cbk.pan.wroc.pl
Jarosław Bąkała	jb@cbk.pan.wroc.pl
Michał Babij	micHAL.babij@techtra.pl
Piotr Bielówka	piotr.bielowka@pwr.edu.pl
Karol Malecha	karol.malecha@pwr.edu.pl
Mateusz Czok	mateusz.czok@pwr.edu.pl
Arkadiusz Dąbrowski	arkadiusz.dabrowski@pwr.edu.pl

Title Page Template

Witold Nawrot	witold.nawrot@pwr.edu.pl
Jacek Głowinkowski	jacek.glowinkowski@technologpark.pl
Piotr Wilk	piotr.wilk@technologpark.pl

Corresponding author:

(Clearly indicate who will handle correspondence for your article at all stages of the refereeing and publication process and post-publication. This responsibility includes answering any future queries about your results, data, methodology and materials. It is important that the email address and contact details of your corresponding author are kept up to date during the submission and publication process).

* Corresponding author: Szymon Gburek PhD,
Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN),
Bartycka 18A, 00-716 Warszawa.
Department: Zakład Fizyki Słońca,
ul. Kopernika 11,
51-622 Wrocław, Poland.
phone: (+48) 71 348 32 38
E-mail addresses: sg@cbk.pan.wroc.pl

For more information, please refer to the relevant sections under submission guidelines for the journal in the Guide for Authors.

CubeSat compatible Modular GEM Sensors, for Space and Ground Applications with core components made out of LTCC

ABSTRACT

In this article, we describe innovative Modular Gas Electron Multiplier (MGEM) sensors for electromagnetic and corpuscular radiation measurements. The device is based on three technologies: Gas Electron Multipliers (GEM), Low Temperature Co-fired Ceramics (LTCC), and CubeSat. The main applications for our sensors are X and gamma-ray imaging, spectrometry, polarimetry and timing. The used materials and technologies allow for operation in a harsh environment or other hi-tech applications like space missions. The sensors have modular construction which allows to assembly a few single sensing units together in order to increase the sensor's effective area.

One of the sensor versions was specifically designed for space experiments on small satellite missions and complies with CubeSat technology requirements. A simplified sensor version for on-ground activities was also designed. The prototype was thoroughly tested to examine its performance and measurement capabilities. As the space version of the sensor will work in orbit some additional tests were performed to validate the robustness of the device.

The GEM based sensors can detect the radiation in the energy range from a few keV up to tens of MeV, which is suitable range for the observation of X and gamma-rays in space.

Cost effectiveness, small size, low mass and power consumption make our sensors interesting alternatives for more technologically advanced experiments.

Keywords:

CubeSat, Gas electron multiplier, GEM, Low Temperature Co-fired Ceramics, LTCC, Space, Satellite, X-ray, gamma-ray, sensors

1. Introduction

GEM sensors were developed at the end of the twentieth century [1]. This article focuses on a novel kind of GEM sensors which were recently developed by the Authors' team. The construction of the sensors is shown and explained. Qualification tests and methods are discussed. The design of the sensors was optimized for measurements in harder X-ray and gamma-ray energy range. These sensors have a gas chamber with GEM foils near the bottom of it. The GEM foils typically have a thin (50 μm) layer of insulator, such as Kapton, covered on both sides by a conductor, such as copper, which is only about 10 μm thick. There are many tiny openings (with diameter $\sim 50\text{--}70$ μm and spacing ~ 150 μm) in GEM foils.

After integration of all detector elements its gas chamber can be filled with gas or a mixture of gases. Pure dimethyl ether (CH_3OCH_3) or pure noble gasses can be utilized. In some applications, mixtures of Ar and CO_2 or Xe and CO_2 are frequently used.

By applying high voltages to the metallization layers of GEM foils and sensor electrodes, a strong electric field is generated in the sensor gas volume. Due to the close proximity of the metallization layers, this field is particularly potent in the GEM foil holes.

When such sensor is exposed to high energy electromagnetic radiation (such as X-rays or gamma rays) an ionization of gas atoms in the chamber may occur. In this process, called photo-electric effect, a high-energy primary electron (photoelectron) is ejected. Photoelectron motion in the gas causes secondary ionizations when it collides with gas atoms. The electric field of the sensor directs secondary ionization electrons toward the GEM foil openings, where they are accelerated and cause avalanche discharges. In this process, one electron can cause an avalanche of even several hundred secondary electrons. Many GEM sensors use additional GEM foils (usually up to three stacked one over another) to boost charge amplification and cascade avalanches. Our detectors has three GEM foils in the present configuration. The amplified charge is then gathered by the readout system which is positioned beneath the last GEM foil. The

sensor electronics converts collected pixel charges into voltage pulses and sends them outside the sensor for further processing.

GEM based instruments allow for detection, imaging, time variability analysis, photometry and spectroscopy of the X/gamma-ray source flux. In addition they also enable polarimetric measurements.

GEM sensors are widely used in on-ground laboratories, mainly in high energy experiments. They also find applications in X-ray astronomy experiments which is a scientific discipline with decades long history.

In the future the Authors also would like to use the sensors in X-ray astronomy satellite missions.

2. Background

The first measurements of extraterrestrial X-rays took place on 29 September 1949 during a rocket experiment performed by Herbert Friedman and his group. In this experiment V-2 rocket, with photon counters onboard, was launched into space from White Sands Missile Range (U.S.A. New Mexico) and detected X-rays from the solar corona [2].

In 1962 Riccardo Giacconi with his group discovered the first X-ray source from beyond the solar system [3]. They also used rocket and photon counters for this experiment. A Nobel Prize was awarded in 2002 to Giacconi for this discovery and his contribution to X-ray astronomy development [4].

Since that times many experiments to observe high energy electromagnetic radiation from high altitude balloons [5], rockets and satellites [6], [7] have been carried out. X and gamma rays in deep space come from various astrophysical sources: stars, white dwarfs, brown dwarfs, neutron stars, supernovas, black holes, galaxies, galaxy clusters, quasars and AGNs, X-ray background, gamma ray bursts to mention a few [8, 9, 10, 11].

In the Solar System the strongest X-ray source is the Sun. Other weaker sources are: planets and moons where surface atmosphere fluorescent scattering occurs due to solar irradiation, auroras, interaction of solar wind with magnetospheres.

Another source of high energy radiation from Earth's atmosphere are Terrestrial Gamma-ray Flashes (TGFs) often associated with occurrence of thunderstorms. The physical processes from which TGFs originate and their properties are still a subject of study using space and ground observations [12, 13].

A valuable addition to timing, spectroscopy and imaging data collected by X-ray experiments are polarimetric measurements. Analysis of polarization measurement may answer many crucial questions in X-ray astronomy and about physical processes occurring in X/gamma-ray emitting objects. However slow progress in this field was achieved in the past due to paucity of polarimetry data [14]. This situation improved over time and many rocket, balloon and satellite missions dedicated to X-ray polarimetry were proposed and some of them were carried out [15].

Strong acceleration of works on X-ray polarimetry have been observed in the past two decades. It was caused by development of new sensors, in particular Gas Pixel Detectors (GPD) [16]. These sensors belong to GEM family but are equipped with pixelated readout. A recent example of a mission that uses GPD sensors in space is The Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE) launched in 2021 [17].

Another factor which facilitates development of X-ray polarimetry experiments is global tendency for miniaturization of spacecrafts. In the past century spacecrafts were quite large, heavy and costly in construction and launch. An alternative to that are small and cost-effective satellites, such as for instance CubeSats [18, 19, 20, 21, 22].

We designed and constructed sensors exactly matching the CubeSat technology requirements. Crucial internal elements in our sensors were made from LTCC what additionally decreases costs of experiments. Our space version of the sensor has pixelated readout. Cartesian XY readout is also an option for both space and ground versions of the sensor.

In the next section we describe our approach to sensor construction and qualification procedures.

3. Materials and components used

We developed two types of GEM X-ray sensors. One for space applications and the second for experimenting on ground. Both sensors have similar construction and identical functionality.

Many different parts, electronic components and solid-state materials with different degree of crystallinity, were used for our sensor assemblies.

The external 3U CubeSat structure (compliant with CubeSat Standard PC104) was purchased at EnduroSat (<https://www.endurosat.com>). These structures are flight-proven. It is lightweight (~340 g), made from durable 6082 aluminum alloy and has hard-anodized surface. The, described below, sensor Measurement Units casing were CNC machined in 6061 alloy. Both these alloys are widely used in the aerospace applications.

Stainless steel Quick Connect Couplings "CUPLA" manufactured by NITTO KOHKI CO., LTD were used for sensor gas input and output.

In addition to integrated circuits the sensors contains plastic materials, such as NBR 70 rubber, Fluorinated ethylene propylene (FEP), Kapton® from DuPont de Nemours, Inc, (DuPont) U.S.A., PA 6, which were used for ensuring tightness and electrical insulations. We also used FR4 boards for integrating electronics. Other metals: silver, gold, copper and soldering alloys were used for sensor electronics in small amount. All the, above mentioned, materials and elements were purchased from external suppliers. Some of the sensor subsystems were not available on the market. These had to be manufactured by the Authors and adapted to the overall sensor design and dimensions. In particular, more advanced material processing methods, using LTCC technology, allowed to manufacture them in the Authors laboratories.

LTCC technology was used because it allows to merge various components and, all necessary, interfaces in functional blocks. The internal structures of these blocks are usually manufactured by screen-printing, machining or laser processing of different materials on ceramic substrates. Then ceramic tapes are aligned and folded together into one block. Next the entire block is laminated in increased temperature of a several tens of °C and under pressure of ~20 MPa. Finally this multilayer block is sintered in a temperature of ~850 °C.

As a substrates for LTCC layers we used GreenTape™ 951 series from DuPont. After laser processing these ceramic tapes were covered with different thick film pastes. Vias were filled with pastes 6141R, TC701, 6161R from DuPont and TC0401 paste from Heraeus Holding GmbH.

Metallization layers, conductive pads and paths were made using pastes 5742, 6145R and 6146R from DuPont. All used materials were selected and processed according to the instructions from providers.

For shaping substrate tapes and making holes/vias in them we applied laser processing using ProtoLaser U system from German LPKF Laser & Electronics AG with a beam wavelength 355 nm. For screen printing of electronic connections, pads and, metallization we used Aurel VS1520A screen printer from Italian AUREL s.p.a. Sintering of LTCC blocks was performed in LT 9/11 furnace produced by Nabertherm GmbH, Germany.

LTCC finds applications in many industrial and scientific projects [23, 24]. The use of LTCC components is suggested for communication applications [25], even in challenging 5G technology, Internet of Things development [26] and avionics [27]. LTCC solutions were also suggested in dual-use and military applications [28, 29]. Several approaches for the use and qualification of LTCC components for space experiments were proposed [30, 31, 32]. LTCC technology already gained space heritage. It was flown on the Low Earth Orbit (LEO) [33, 34]. In addition LTCC is lightweight, robust and relatively not expensive.

Robustness, radiation hardness, flexibility versatility and availability of necessary equipment and materials convinced the Authors for selection of LTCC technology for construction of crucial sensor elements.

4. Approach to sensor construction

Each of our sensors consists of two units shown in block diagram in Fig.1.

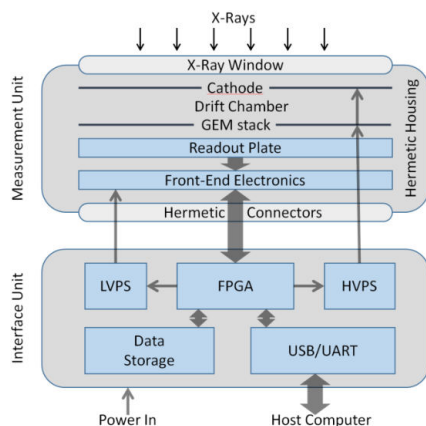


Fig. 1. MGEM sensor block diagram.

Measurement Unit is an aluminum hermetic casing with Kapton entrance window. It contains LTCC stack with three GEM foils and HV divider buried in ceramic.

Production of the GEM foils for the sensors was not a straightforward process. They need to be precisely and densely perforated. Typical GEM foil may have hundreds of thousands microholes. The methods for GEM foils production are similar to these used for manufacturing microvias in printed circuit boards (PCBs) [35].

During this research, we used two methods of GEM production. In the first approach, we used metalized LTCC foils and a femtosecond laser to puncture them. After inspection and revision of parameters, we came to a conclusion that obtained this way foils should work in sensors but still our production technique should be matured [36]. Thus we decided to use standard GEM foils production methods, so called, Micro-Chemical-Vias (MCV) developed and patented at CERN.

Another element which is inside the Measurement Unit is the Readout System placed below the GEM stack. We developed two types of Readout Systems.

Pixelated readout is a structure made of 16 LTCC layers joined together. On the top layer there are 511 hexagonal pixels arranged in a disk-like pattern with an approximate diameter of ~8 mm. The entire pixel arrangement is shown in Fig. 5(a) together with the sensor measurement example.

Inner readout structure layers have silver and bottom layer silver/palladium conductive paths connecting pixels to the inputs of digital, 256 channel, DDC256A charge to digital converter (from now on the Converter). Two such Converters are used to connect all pixels. In this design, each pixel has its own dedicated and electrically separated output.

The hexagonal shape of the pixels was selected because hexagonal plane tessellation outperforms, in many applications [37, 38, 39], other regular plane tiling as triangular or widely used square grids for instance.

Distinguishing feature of hexagonal grid is its symmetry and equidistance of pixel centers what gives more even and efficient image sampling. Hexagonal arrays reduce aliasing effects, are considered better for the purposes of area estimation, objects and edge identification in images, what is important for our applications.

All the symmetries in the pixel lattice allowed also to optimize connecting paths geometry in layers of the readout structure. It also became symmetric and path lengths are more similar what gives increased uniformity in noise pattern of the entire pixel array.

Hexagonal pixels also were used in space instrument sensors on the past mission Polarimeter Light (PolarLight CubeSat mission) [40], presently active IXPE mission [41] and planed for the future The Enhanced X-ray Timing and Polarimetry mission [42].

In our readout, pixel separation (distance between neighboring pixel centers) is $350\text{ }\mu\text{m}$. Single pixel has diagonal of $318\text{ }\mu\text{m}$, distance between opposite edges $275\text{ }\mu\text{m}$, edge length $159\text{ }\mu\text{m}$ and area of 0.07 mm^2 . Because pixels need to be electrically separated there is a gap $75\text{ }\mu\text{m}$ thick between the neighboring pixel edges.

The second readout system is Cartesian XY system described in detail in [43, 44]. Both types of readouts can be used interchangeably in the sensors.

Readout boards were made from LTCC. The XY strip readout has also a version in a standard FR4 PCB technology [45]. LTCC readouts have better thermal, electrical and mechanical properties but PCB readouts still offer good quality measurements and, in addition, are easier and cheaper in the production process. Indeed, any PCB manufacturer can provide such readouts in a short production cycle. PCB technologies also allow for providing more cost-effective readouts without access to specialized laboratory equipment.

The Measurement Unit also has Front-End electronics PCB board. Front-End electronics collects charge from readout boards, transforms it to voltage pulses, digitizes and sends them outside to the Interface Unit through a hermetic micro-D 37 pin connector which is the main electrical interface of the sensors.

The Measurement Unit is also equipped with HV feedthrough and gas valves installed in its bottom. Additionally this Unit is equipped with voltages, currents, temperature, humidity and pressure sensors. Humidity and Temperature is measured by SHT35 (Sensirion) Sensor and absolute pressure MS5803 (TE Connectivity) digital miniaturized sensor.

The second unit of the sensors is the Interface Unit. It is managed by a Field Programmable Gate Array (FPGA). This system is powered using 3.3 V and 12 V inputs and additionally generates all other necessary voltages, stores measurements on SD cards and provides communications with external computers via USB/UART interfaces (Ethernet transmission also is an option for communication).

Dedicated FPGA firmware was written to operate the sensors, collect data and send commands to them. PC computer software for data acquisition processing and visualization was also developed.

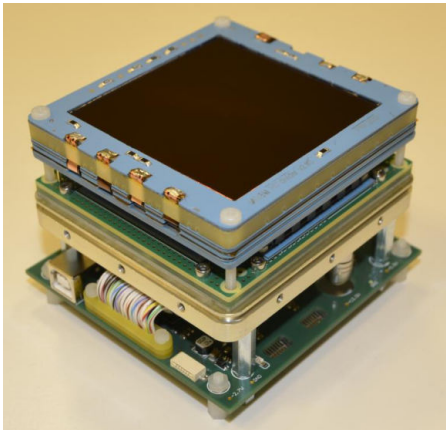


Fig. 2. Sensor during integration in clean room of Wrocław University of Science and Technology. View on the top of the sensor.

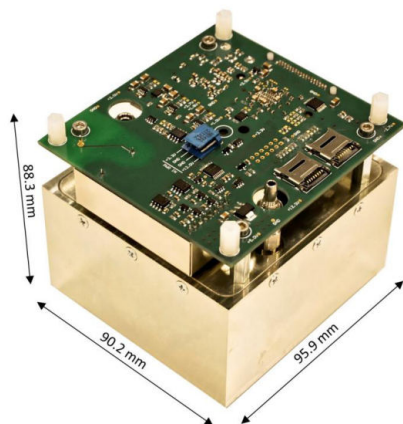


Fig. 3. Fully integrated sensor for space applications on CubeSats. View on the electronic board of the Interface Unit at the bottom of the sensor.

5. Qualification tests

During the development phase, all of the sensors' elements and subsystems underwent intensive testing. After each test series, visual inspections (using optical microscopes) and X-ray tomography of tested components were performed in order to compare initial and final (after the test) components properties and check if any defects occurred.

Radiation hardness tests were made on components and materials in order to check if they can be used for sensors working in enhanced radiation environments. These test were performed with the use of strong Linear Accelerator Lillyput 3 [46] available at WPT. Frequent inspections and tomography showed that tested materials and components are radiation tolerant and thus can be used for sensor construction.

Electrical tests were performed in order to check if there are short circuits in sensor electronics. No single short was detected. HV tests allowed to determine the highest voltage that can be applied to the sensor with no sparks or corona discharges. It appeared that this highest voltage is above the one required to operate the sensors.

Long lasting tightness tests showed that there is no significant leak of gas from the sensor Measurement Units.

Analysis of data from vacuum thermal cycling allowed to conclude that sensor can operate in broad temperature range.

After the tests, the final integration of the sensors took place (see Fig. 2 and Fig. 3). Functional tests of integrated sensors were performed with radioactive sources and X-ray tubes to check the sensors overall performance and take the first measurements.

Then the integrated sensor intended for space applications was irradiated, also using Lillyput 3 accelerator, to the Total Ionizing Dose (TID) ~34 krad. The measurement taken during this test and functional tests performed after, showed that the sensor survived this exposition and is radiation tolerant, more than enough, for a short CubeSat space mission on LEO orbit. The sensor during final radiation hardness tests is shown in Fig. 4.



Fig. 4.. The sensor in front of Lillyput 3 accelerator output during the final radiation hardness test. The white arrow in the picture points to the sensor.

6. Results and discussion

Below we show an example of sensor measurement and focus on its analysis

As it was mentioned in the Introduction section the X/gamma-ray photon interacting with an atom of gas in the sensor ionizes the atom and ejection of high energy electron occurs in so called photoelectric effect. The photoelectron also is ejected, with the highest probability, in the direction of the photon electric field.

Thus for photon sources which emit, even partly, linearly polarized radiation, the angular distribution of photoelectron emission direction in ejection plane is not even. More photoelectrons are ejected in direction of electric field of polarized radiation portion.

During the travel through gas/gas mixture, the photoelectron scatters and causes secondary ionizations. Single primary photoelectron may cause many secondary ionizations in different places of the sensor gas chamber. As a result charge distribution collected on readout is in a form resembling a track. Due to photoelectron scattering, the track left on the readout is often irregular/curved in shape.

Charge distribution in the track pixels is also not uniform. Most of the charge is collected in the end portion of the track in the vicinity of Bragg peak. At the beginning of the track, some additional charge can be collected by readout from emission of Auger electron in gas.

An example of our sensor measurement with a single track is shown in Fig. 5(a). Such images may be used for polarimetric analysis.

The first steps in this analysis are coordinate system selection (in Fig. 5 it is XY Cartesian system) and background subtraction. Next all pixels belonging to the track need to be identified.

The total charge collected in the track pixels gives us information on the energy of the photon incident on the sensor what makes possible to perform photometry and spectroscopy.

Then statistical methods can be used for further analysis. of the track geometric properties in order to determine preferred photoelectron emission direction and angle between this direction and a certain fixed

direction. The approach to determine the above mentioned properties of the track is well described in [47] where mathematical procedures and all necessary equations are given.

In general, the first step is to determine ancillary parameters of the track geometry – its barycenter and its direction of the principal axis Fig. 5(b). The principal axis is not the direction of photoelectron emission due to track shape irregularities (caused by photoelectron scattering processes) but is useful, as well as barycenter, in further statistical analysis aimed at determining the direction of photoelectron ejection and photon absorption place.

Before this step, some pixels closer to the track end, need to be rejected Fig. 5(c). The most useful portion of the track pixels for the purpose of determining direction of photoelectron ejection lies near the track beginning. Finally, an angle between direction of photoelectron ejection and a certain fixed direction is determined. When such angle is determined for many track images one can determine histograms of number of events vs angles.

If the observed radiation is even partly linearly polarized then such histogram has modulations because some ejection directions are preferred. For non-polarized radiation or weakly polarized, the histogram is flat with noises superimposed.

It is possible to measure the degree of polarization of incoming radiation if it is above Minimum Detectable Polarization [47] which depends on sensor efficiency, noises and observation program.

As a result of the above described Project, we obtained fully functional and tested sensors for ground and CubeSat experiments. The sensors underwent rigorous qualification tests. Both versions are fully functional. They can be used in photometry, spectrometry, imaging, polarimetry and timing experiments.

Our sensors differ from others. They are compact occupying a space less than 1U CubeSat module. They are also cost-effective and lightweight due to the use of LTCC technology for their critical components. Their construction is relatively simple as they do not necessitate dedicated ASIC for instance.

6. Conclusions

We developed new types of gaseous sensors. They will be available on the market when their commercialization process is finished.

Both sensors have a high Technology Readiness Level (TRL). The ground version has a very high TRL=9 and it works in laboratories in operational conditions. CubeSat version has TRL = 8. It was not in space yet. A CubeSat mission is planned now to bring its TRL to level 9 and demonstrate this technology in space.

The sensors are lightweight and have low power consumption. In addition, they are radiation tolerant, easy to service, and customizable to the end-user needs. The above mentioned features will accelerate commercialization.

The sensors are modular, scalable, have high efficiency, will work without cooling in harsh environment (in space and on the Earth) can be used for measurements of electromagnetic and corpuscular radiation.

The type of radiation that can be measured by sensor, energy range and resolution substantially depend on the construction of its entrance window and readout systems.

Here, we focused on measurements in hard X and gamma rays. Such radiation can produce tracks long enough for polarimetric data analysis. Future works will focus on decreasing pixel size and pitch in order to obtain better track sampling at lower energies of order of a few keV.

A calibration of each sensor will be necessary before each flight or installing in an external lab. A small calibration facility is under development in Wrocław, Poland. It will allow us to determine sensor responses to polarized and non-polarized radiation and characterize their physical parameters.

The authors are aware that calibration of the sensors can be performed in many laboratories around the World. However, rental of external laboratory facilities increases the price of the sensor and thus decreases its commercialization potential. Besides, transportation of instrumentation between laboratories is quite cumbersome.

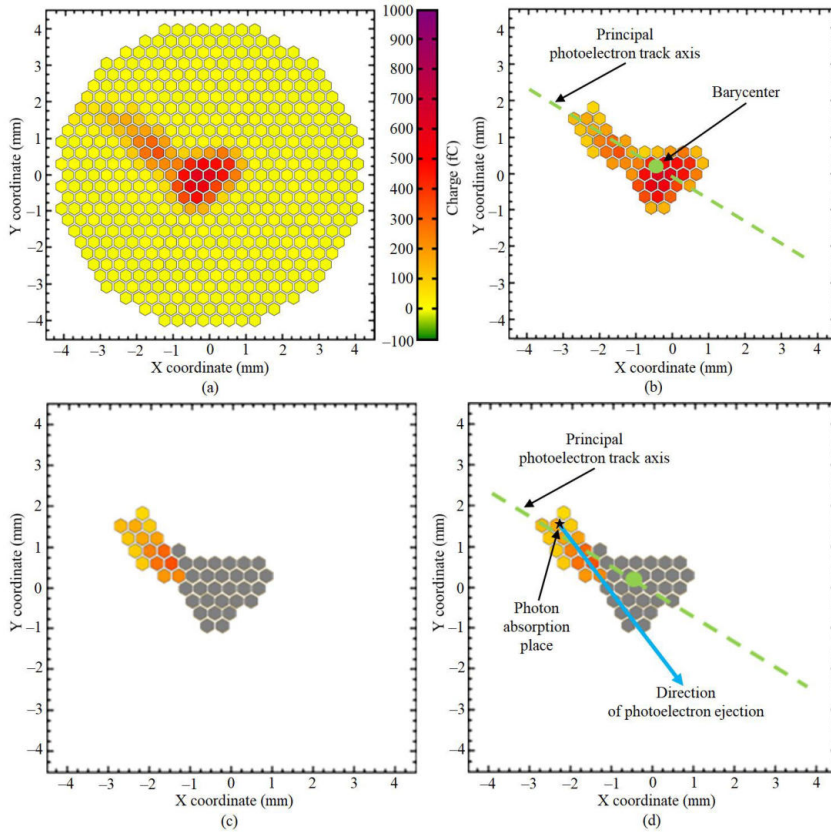


Fig. 5. (a) A track left on the sensor readout system pixels after X-ray photon detection. (b) Background subtracted track from (a) with barycenter and principal axis indicated. (c) Track with pixels (grayed ones) removed from further track geometry analysis. (d) The final result of track geometry analysis with X-ray photon absorption place and direction of photoelectron ejection determined.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

This work (development of MGEM detectors) obtained support from the Polish National Centre for Research and Development, grant no. **(to be given latter)** and financial contributions form involved in the

Project entrepreneurs. This study was also partly supported by the Polish Ministry of Science and Higher Education.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies

Statement: During the preparation of this work the author(s) used Grammarly in order to check the manuscript for similarities. After using this tool/service, the author(s) reviewed and edited the content as needed and take(s) full responsibility for the content of the publication.

References

- [1] F. Sauli, GEM: A new concept for electron amplification in gas sensors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 386, no. 2, pp. 531–534, Feb. 1997, doi:10.1016/S0168-9002(96)01172-2.
- [2] H. Friedman, S. W. Lichtman, and E. T. Byram, Photon Counter Measurements of Solar X-Rays and Extreme Ultraviolet Light, *Physical Review*, vol. 83, no. 5, pp. 1025–1030, Sep. 1951, doi: 10.1103/PhysRev.83.1025.
- [3] R. Giacconi, H. Gursky, F. R. Paolini and B. B. Rossi, Evidence for x Rays From Sources Outside the Solar System, *Physical Review Letters*, vol. 9, no. 11, APS, pp. 439–443, Dec. 1962, doi:10.1103/PhysRevLett.9.439.
- [4] R. Giacconi, Nobel Lecture: The dawn of x-ray astronomy, *Reviews of Modern Physics*, vol. 75, no. 3, APS, pp. 995–1010, Aug. 2003, doi:10.1103/RevModPhys.75.995.
- [5] L. E. Peterson, R. M. Pelling, and J. L. Matteson, Techniques in Balloon X-Ray Astronomy, *Space Science Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 320–336, Jun. 1972, doi:10.1007/BF00175321.
- [6] A. Santangelo, R. Madonia, and S. Piraino, A Chronological History of X-Ray Astronomy Missions, in *Handbook of X-ray and Gamma-ray Astrophysics*. Edited by C. Bambi and A. Santangelo, 2023, doi:10.1007/978-981-16-4544-0_147-1.
- [7] E. Kalemci, Summary of the past, present and future of the X-ray astronomy, *European Physical Journal Plus*, vol. 133, no. 10, Oct. 2018, doi:10.1140/epjp/i2018-12284-6.
- [8] M. C. Weisskopf et al., An Overview of the Performance of the Chandra X-ray Observatory, *Experimental Astronomy*, vol. 16, no. 1, pp. 1–68, Aug. 2003, doi:10.1023/B:EXPA.0000038953.49421.54.
- [9] F. Jansen et al., XMM-Newton observatory. I. The spacecraft and operations, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 365, pp. L1–L6, Jan. 2001, doi:10.1051/0004-6361:20000036.
- [10] N. Rea et al., Chapter 10: Understanding Matter And Radiation Under Extreme Conditions, in *White Paper 9: Understanding The Basic Components Of The Universe, Its Structure & Evolution*, CSIC Scientific Challenges: Towards 2030 Collection, J. M. de Lucas and M. V. Moreno-Arribas Eds., Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2021, ch. 10, pp. 181–198, doi: 10.20350/digitalCSIC/12656.
- [11] C. Jones et al., Division XI: Space and High-Energy Astrophysics, *Transactions IAU, Series A*, vol. XXVIII, pp. 315–324, 2012, I F. Corbett, ed., doi:10.1017/S1743921312003031.
- [12] A. Bhardwaj et al., X-rays from solar system objects, *Planetary and Space Science*, vol. 55, no. 9, pp. 1135–1189, Jun. 2007, doi:10.1016/j.pss.2006.11.009.
- [13] Colalillo, R., The Pierre Auger Observatory: Studying atmospheric electricity with cosmic ray sensors, in *European Physical Journal Web of Conferences*, Apr. 2023, vol. 283, doi:10.1051/epjconf/202328306014.
- [14] Soffitta, P., XIPE: the X-ray imaging polarimetry explorer, *Experimental Astronomy*, vol. 36, no. 3, pp. 523–567, Dec. 2013. doi:10.1007/s10686-013-9344-3.

- [15] T. Chattopadhyay, T., Hard X-ray polarimetry—an overview of the method, science drivers, and recent findings, *Journal of Astrophysics and Astronomy*, vol. 42, no. 2, Oct. 2021, doi:10.1007/s12036-021-09769-5.
- [16] E. Costa, P. Soffitta, R. Bellazzini, A. Brez, N. Lumb, and G. Spandre, An efficient photoelectric X-ray polarimeter for the study of black holes and neutron stars, *Nature*, vol. 411, no. 6838, pp. 662–665, Jun. 2001, doi:10.1038/35079508.
- [17] M. C. Weisskopf et al., The Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE), in: *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray*, Proc. SPIE, vol. 9905, 10 pp. id. 990517, doi: 10.1117/12.2235240.
- [18] E. Douglas, K. L. Cahoy, R. E. Morgan, and M. Knapp, CubeSats for Astronomy and Astrophysics, *Astro2020: Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics*, APC white papers, no. 160; *Bulletin of the American Astronomical Society*, vol. 51, no. 7, Sep. 2019.
- [19] G. Moretini, G. Zucca, C. Braccesi, F. Cianetti, and M. Dionigi, CubeSat Spatial Expedition: An Overview From Design To Experimental Verification, in *Materials Science and Engineering Conference Series*, vol. 1038, no. 1, p. 012026, Feb. 2021, doi:10.1088/1757-899X/1038/1/012026.
- [20] J. P. Mason et al., Miniature X-Ray Solar Spectrometer: A Science-Oriented, University 3U CubeSat, *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 53, no. 2, pp. 328–339, Mar. 2016, doi:10.2514/1.A33351.
- [21] J. P. Mason et al. MinXSS-2 CubeSat mission overview: Improvements from the successful MinXSS-1 mission, *Advances in Space Research*, vol. 66, no. 1, pp. 3–9, Jul. 2020, doi:10.1016/j.asr.2019.02.011.
- [22] A. Caspi et al., Small Satellite Mission Concepts for Space Weather Research and as Pathfinders for Operations, *Space Weather*, vol. 20, no. 2, Feb. 2022, doi:10.1029/2020SW002554.
- [23] L.J. Golonka, Technology and applications of Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC) based sensors and microsystems, *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.* 54 (2) (2006) 221–231.
- [24] Y. Imanaka, *Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) Technology*, Ed. 1, Springer New York, NY, Dec. 2004, <https://doi.org/10.1007/b101196>.
- [25] M. Lahti, K. Kautio, M. Karppinen, K. Keränen, J. Ollila, and P. Karioja, Review of LTCC Technology for Millimeter Waves and Photonics, *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 66, no. 2, pp. 361–367, 2020, doi: 10.24425/ijet.2020.131886.
- [26] P. M. Marley, E. S. Tormey, Y. Yang and C. Gleason, Low-K LTCC Dielectrics: Novel High-Q Materials for 5G Applications, 2019 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), Bochum, Germany, 2019, pp. 88–90, doi: 10.1109/IMWS-AMP.2019.8880070.
- [27] S. H. Mousavi and A. B. Kouki, Highly Compact VHF/UHF Dual-Band/Dual-Function LTCC Circuits: Application to Avionic Systems, in *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 12–22, Jan. 2016, doi: 10.1109/TCPMT.2015.2505320.
- [28] A. N. Prabhu, S. C. Cherukuri, B. J. Thaler and M. J. Mindel, Co-fired ceramic on metal multichip modules for advanced military packaging, *Proceedings of the IEEE 1993 National Aerospace and Electronics Conference-NAECON 1993*, Dayton, OH, USA, 1993, pp. 217–222 vol.1, doi: 10.1109/NAECON.1993.290918.
- [29] D. R. Schroeder and L. J. Rexing, Ltcc Mcm Technology for Military Environments, *Proceedings of the International Conference on Multichip Modules*, Denver, CO, USA, 1994, pp. 612–617, doi: 10.1109/ICMCM.1994.753616.
- [30] I. Wolff, C. Günner, J. Kassner, R. Kulke and P. Uhlig, New Heights for Satellites: LTCC Multilayer Technology for Future Satellites, in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 19, no. 1, pp. 36–47, Jan.-Feb. 2018, doi: 10.1109/MMM.2017.2759599.
- [31] Wolff, R. Kulke and T. Klein, LTCC: A Space Qualified Integration and Packing Technology for Millimeter-Wave Systems, *International Microwave Symposium*, June 17–22, 2012, Montreal, Canada.
- [32] I. Wolff, From antennas to microwave systems - LTCC as an integration technology for space applications -, 2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation, Berlin, Germany, 2009, pp. 3–8.

- [33] R. Kulke, T. Klein, G. Möllenbeck, C. Günner and M. Rittweger, Verification of an LTCC packaging technology on board of the ongoing TET-1 satellite mission, 2013 European Microelectronics Packaging Conference (EMPC), Grenoble, France, 2013, pp. 1-6.
- [34] S. Brosius, C. Friesicke, T. Baras, A. Molke and A. F. Jacob, On-orbit verification of an LTCC double flip-chip packaging concept in an S-/K-band satellite transponder, 2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT), Seattle, WA, USA, 2013, pp. 1-3, doi: 10.1109/MWSYM.2013.6697451.
- [35] J. H. Lau and C. Chang, An overview of microvia technology, *Circuit World*, Vol. 26 No. 2, pp. 22-32, Jun. 2000, doi: <https://doi.org/10.1108/03056120010310891>.
- [36] P. Bielówka, M. Babij, A. Dąbrowski, and K. Malecha, The application of Low-Temperature Cofired Ceramics technology in Gas Electron Multiplier microstructures, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 1047, Feb. 2023. doi:10.1016/j.nima.2022.167749.
- [37] L. Middleton and J. Sivaswamy, Framework for practical hexagonal-image processing, *Journal of Electronic Imaging*, vol. 11, pp. 104–114, Jan. 2002, doi:10.1117/1.1426078.
- [38] L. Middleton and J. Sivaswamy, *Hexagonal Image Processing: A Practical Approach*, 1st ed., ser. *Advances in Computer Vision and Pattern Recognition*. Springer Science & Business, Nov. 2005, doi: <https://doi.org/10.1007/1-84628-203-9>.
- [39] S. A. Dakhore and K. B. Bijwe, Review on Performance Analysis of Square Pixel and Hexagonal Pixel Structure in Image Processing, *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 5(5), pp. 400–403, 2017 doi: 10.17762/ijritcc.v5i5.532.
- [40] H. Feng et al., PolarLight: a CubeSat X-ray polarimeter based on the gas pixel sensor, *Experimental Astronomy*, vol. 47, pp. 225–243, Mar. 2019, doi:10.1007/s10686-019-09625-z.
- [41] O'Dell, S., Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE): Mission Overview and Status, AAS High Energy Astrophysics Division meeting #20, id. 303.02. *Bulletin of the American Astronomical Society*, Vol. 55, Sep. 2023, no. 4 e-id 2023n4i303p02.
- [42] S.N. Zhang, et al. The enhanced X-ray Timing and Polarimetry mission—eXTP, *Science China Physics, Mechanics, and Astronomy*, Vol 62, no. 2, Feb. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11433-018-9309-2>.
- [43] M. Babij, P. Bielówka, A. Dąbrowski, W. Nawrot, M. Czok, and K. Malecha, Manufacturing of a 70×70 mm² LTCC strip electrode readout for Gas Electron Multiplier sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 342, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113656>.
- [44] A. Dąbrowski, W. Nawrot, M. Czok, M. Babij, P. Bielówka, and K. Malecha, LTCC Strip Electrode Arrays for Gas Electron Multiplier Sensors, *Sensors*, vol. 22, no. 2, , Jan. 2022, doi:10.3390/s22020623.
- [45] M. Babij, P. Bielówka, S. Gburek, and K. Malecha, A Segmental 2D Readout Board Manufactured in Printed Circuit Board Technology for Gas Electron Multiplier Sensors, *Sensors*, vol. 23, no. 19, Sept. 2023, doi:10.3390/s23198095.
- [46] P. Adrich, A. Zajac, A., P. Wilk, M. Chorowski, J. Poliński, and P. Bogdan, Development of a Dedicated Beam-forming System for Material and Bioscience Research with High Intensity, Small Field Electron Beam of LILLYPUT 3 Accelerator at Wrocław Technology Park, *Acta Physica Polonica B*, vol. 47, no. 2, p. 267, 2016, doi:10.5506/APhysPolB.47.267.
- [47] R. Bellazzini et al., Novel gaseous X-ray polarimeter: data analysis and simulation, in *Polarimetry in Astronomy*, vol. 4843, pp. 383–393. Feb. 2003, doi:10.1117/12.459381.

A Segmental 2D Readout Board Manufactured in Printed Circuit Board Technology for Gas Electron Multiplier Detectors

M. Babij, P. Bielówka, S. Gburek, K. Malecha

Sensors 23, no. 19: 8095, 2023

Samodzielny wkład autora rozprawy w powstanie tej publikacji polegał na:

- opracowaniu koncepcji rozwiązania,
- zaprojektowaniu i wykonaniu elektronicznego układu detektora oraz płyty odczytu PCB,
- opracowaniu i wykonaniu ceramicznych układów wejściowych LTCC,
- montażu i uruchomieniu kompletnego detektora GEM zawierającego opracowane elementy,
- przeprowadzeniu pomiarów elektrycznych oraz z pomiarów wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego, których wyniki wykorzystano w publikacji,
- analizie wyników pomiarów w tym radiogramów,
- przygotowaniu ilustracji i wykresów,
- redakcji treści publikacji.

Łączny udział autora rozprawy wynosi 80%.



Article

A Segmental 2D Readout Board Manufactured in Printed Circuit Board Technology for Gas Electron Multiplier Detectors

Michał Babij ^{1,2}, Piotr Bielówka ^{1,2}, Szymon Gburek ³ and Karol Malecha ^{1,*}

- ¹ Department of Microsystems, Faculty of Electronics, Photonics and Microsystems, Wrocław University of Science and Technology, Wyb. S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland
² Technology Transfer Agency TECHTRA Sp. z o.o., ul. Duńska 13, 54-427 Wrocław, Poland
³ Centrum Badań Kosmicznych PAN (CBK PAN), ul. Bartycka 18a, 00-716 Warszawa, Poland
 * Correspondence: karol.malecha@pwr.edu.pl

Abstract: The Gas Electron Multiplier (GEM) was introduced by Fabio Sauli in 1997. This technology is broadly used in current and planned High-Energy Physics (HEP) experiments. One of the key components of these detectors is a readout board, which collects charges amplified by GEM foils and transfers them to readout electronics. The commonly used Cartesian XY readout boards are manufactured from the same type of polyamide film used to produce the GEM foils. The manufacturing process utilizes a deep polyimide etching, similar to the Micro Chemical Vias (MCV) etching process, which is protected by patent. The material prepared in this way is glued onto a rigid substrate and mounted in a detector. The production process was developed at CERN, and the technology has been commercialized to a small extent. Consequently, only a few research centers have the ability to make dedicated readout strips readouts. GEM detectors are characterized by a segmented structure that allows the separation of an electron-multiplying structure from a readout. This feature enables the implementation of a new type of charge reading system without the need to interfere with the GEM foil system. A new approach is proposed to simplify production and reduce the costs of GEM detector readout boards. It is based on the concept of segmental readout structures that are manufactured in standard Printed Circuit Board (PCB) technology. The interconnectors and mountings are located on the back of the bottom, so it is possible to place the readout electronics behind the readout plate. The boards are designed in such a way that they can be panelized into a readout with a more extensive active area. The margin between PCBs is minimalized to approximately 200 μm , which is less than 1% of the $70 \times 70 \text{ mm}^2$ board area, so the active area is as big as possible. Therefore, this solution gives us the ability to further increase the size of a readout by adding additional segments, which reduces the cost of scaling up the detector size. A few research groups have suggested similar solutions that utilize PCB technology, but currently, only detectors with 1D zigzag readouts have been validated and used. The measurement results of other 2D (XY) readouts using PCB technology have not been presented. The measurements shown and discussed in this paper validated the proposed technology. X-ray radiographs were obtained, validating the ability to use this technology to manufacture readout boards for GEM detectors. In opposition to state-of-the-art readouts, the proposed solution can be manufactured by any PCB manufacturer without using MCV-patented technology. This gives the users flexibility in designing and ordering low-cost custom readouts.

Keywords: Gas Electron Multiplier (GEM) detector; X-ray; Micro Pattern Gas Detector (MPGD); radiation sensors



Citation: Babij, M.; Bielówka, P.; Gburek, S.; Malecha, K. A Segmental 2D Readout Board Manufactured in Printed Circuit Board Technology for Gas Electron Multiplier Detectors. *Sensors* **2023**, *23*, 8095. <https://doi.org/10.3390/s23198095>

Academic Editor: Iren E. Kuznetsova

Received: 27 July 2023

Revised: 4 September 2023

Accepted: 22 September 2023

Published: 26 September 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Micro Pattern Gaseous Detector (MPGD) devices [1] are built from converters of the incident radiation to primary electrons, multiplying structures (Gas Electron Multipliers [2–4], micro Resistive Well [5–7] and others), readout boards (strip or pixel) and electronic measuring systems. In many cases, multiplying structures and readout boards are fabricated

by dedicated technologies like Micro Chemical Vias (MCV), which has been demonstrated in many experiments. However, the patent-protected MCV technique is complicated and requires dedicated competencies and machines. As a result, it is commercialized to a very small extent, and only a few entities are potentially able to produce such sophisticated structures. Consequently, the production costs and time are non-negligible. In many experiments, even advanced experiments such as the CMS GEM tracker upgrade GE1/1 [8], it is necessary to use readout plates with a surface area exceeding 45 m^2 , with a required measurement precision of $200 \text{ }\mu\text{m}$. The average resolution obtained in mass-produced CMS detector modules was measured and found to be $81.3 \text{ }\mu\text{m}$ [9]. Even in such advanced installations, the manufacturing of sophisticated circuits made in MCV technology is very expensive and time-consuming. Because of these constraints in many applications, PCB readouts can be considered.

Within the conducted research, a fully operational XY 2D readout board dedicated to GEM detectors with significantly reduced production time and costs was designed, built and tested. A 2D readout with electrodes located on a single plane was proposed as early as 1999 [10], but since that time, only a few designs have been proposed, and even fewer tested. The starting point for this research was an idea presented by A. Zhang. In [11], the author presented the concept of using Printed Circuit Board (PCB) technology to manufacture 2D readout plates. According to this idea, the sensing electrodes are located on a single layer. This design and potential application was also presented in [12]; however, neither prototypes nor test results were presented.

The readout boards manufactured in PCB technology can achieve an active area of at least 2500 cm^2 , but this is not enough for some applications. To overcome this problem, the panelization of several readout boards in a bigger unit was proposed [13]. In the mentioned paper, the authors designed, manufactured and tested the 2D PCB readout and the ability to connect multiple readouts together. However, the obtained resolution was limited to a few mm due to the size of the pads.

In another work, a PCB readout with hexagonal pads in a pitch of $520 \text{ }\mu\text{m}$ was proposed [14]. In this case, the resolution was much better than in the previously mentioned solution [13]. Both solutions utilize a UVW readout scheme, instead of XY, in which 50% more ADC channels are needed.

Until now, only one solution to the PCB readout has gained popularity, and this is a ZigZag readout pattern [15]. With this state-of-the-art solution, simple readouts with very dense pitches can be manufactured. The readout works in only one direction (1D), so in 2D imaging, two detectors rotated by 90 degrees are necessary.

The conducted research aimed to optimize and validate the PCB readout geometry using a standard GEM detector. As part of the work, the design assumptions were confirmed, the spatial resolution of the test detector was determined and the possibility of merging a large readout plate from several smaller ones was presented.

Designed PCB readouts were produced within several days by a commercial company. Before the detector assembly, boards were optically inspected and electrically tested. During the checks, no defects were seen, which may indicate that standard PCB shops already have the competencies to produce the proposed structures. Consequently, obtaining more advanced systems directly from industrial partners seems possible. During these tests, the PCB plates were compared with the one made by CERN with MCV technology. The density of the PCB readout strips was about 30% worse than the reference. Nevertheless, the PCB readout boards were fully operational and compatible with GEM detectors. The measurement results are presented in this paper.

Although the measured resolution is slightly lower than that manufactured by MCV technology, it combines the following advantages: the working parameters are sufficient for many applications, the used PCB technology is fast and relatively cheap and it is possible to order readout boards from industrial partners in different sizes and shapes. Finally, it is possible to panelize small boards with a dead area of around $300 \text{ }\mu\text{m}$. The readout active

area can be enlarged by merging several independent modules. Therefore, it is possible to adjust the readout size to the actual needs.

This work aimed to develop a new type of Cartesian reading board compatible with GEM detectors manufactured in industrial conditions. A novel XY strip readout dedicated to GEM detectors was designed, built and tested. The proposed solution's novelty is using standard PCB technology and materials instead of sophisticated and patent-protected MCV techniques. The proposed solution enables the construction of modular, large-area reading boards whose operating parameters do not differ significantly from the most advanced systems. The proposed systems can be produced commercially, significantly reducing production time and costs.

2. Materials and Methods

The XY readout board was designed to achieve the best parameters possible (for example, spatial resolution) using standard PCB processes. The design requires laser via drilling technology, which many PCB manufacturers use. The small size of the vias is critical for the readout board pitch size. The surface of this PCB is flat, and it does not contain 3D structures like on a standard XY readout board, so it can be easily used as a substrate for more advanced detectors.

The active area of the board is $70 \times 70 \text{ mm}^2$. The design consists of X lines (horizontal) and a series of pads between the X lines. These pads are connected by vertically aligned lines located on a second layer, which forms the Y lines (vertical). The idea of a pixel-line readout structure is shown in Figure 1a. The dimensions of the features are shown in Figure 1b.

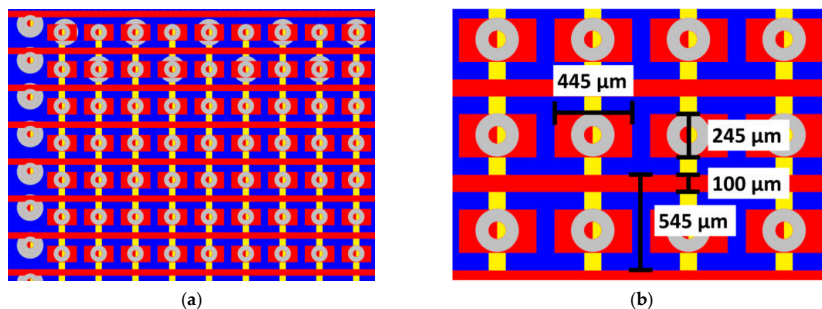


Figure 1. The design of the readout board (the red represents the top layer and the yellow represents the inner layer 1): (a) The part showing the X-axis lines and the Y-axis pads with interconnections between pixels made on inner layer 1; (b) the dimensions of the layout features.

The width of the pads is limited by the vias annular ring size, and it measures $245 \mu\text{m}$ (the hole diameter is $100 \mu\text{m}$). With the X trace width and spacing between pads and lines at $100 \mu\text{m}$, the minimum achievable pitch is $545 \mu\text{m}$. The standard CERN readouts have $390 \mu\text{m}$ pitch, which is only 28% smaller than the proposed design, so the spatial resolution of the PCB readout should be comparable. The resolution of GEM detectors does not depend linearly on the readout pitch. According to simulations performed for a similar readout, the resolution is $15.6 \mu\text{m}$ for a $400 \mu\text{m}$ pitch and between $18.1 \mu\text{m}$ ($500 \mu\text{m}$ pitch) and $28.9 \mu\text{m}$ ($600 \mu\text{m}$ pitch) for a $545 \mu\text{m}$ pitch readout [16]. The experimental data (Table 5, [16]) show a minor difference in resolution—with an increase of pitch from $250 \mu\text{m}$ to $500 \mu\text{m}$, the resolution worsens from $31.5 \mu\text{m}$ to $46.6 \mu\text{m}$. The data shown in [17] show similar values.

The charge cloud is distributed through a few readout lines for readouts with a pitch of $600 \mu\text{m}$ or less. The algorithm computes the barycenter of the charge cloud and resolves

the position. In this case, the further increase in pitch did not linearly result in a resolution increase. Also, it should be mentioned that the spatial resolution is not the most critical parameter for some applications.

The boards were manufactured by Multi Circuit Boards Limited (Poole, G.B.); 15 pcs. were ordered. This supplier's turnaround was around 18 working days, which is fast even for the standard readouts manufactured using MCV technology. The board was manufactured using standard FR4 glass-epoxy laminate. It consists of 4 layers, each one made of 35 μm thick copper. The overall PCB thickness was 1.55 mm. The holes between the top layer and the inner layer 1 had a 100 μm diameter and were manufactured using the laser drilling method. Holes on other layers were classically drilled, and their diameter was 150 μm . The blind vias were used on the outer layers, and the buried vias were used between internal layers. The space between traces was only 75 μm . The copper electrodes on the top and bottom sides were coated with chemical gold for passivation. The connectors and mounting poles are located on the bottom side of the board. The standard readout boards utilize 3D structures, so the areas covered by X and Y lines are different to compensate for the charge sharing. There is no need for charge-sharing compensation for electrodes manufactured on a single plane like in the proposed design, so the areas of X and Y electrodes should be the same. Unfortunately, with 245 μm annular rings and a pitch of 545 μm , the Y strips need to be thinner, so the areas of the X and Y electrodes in this design were 54.5 μm^2 and 109.0 μm^2 , respectively. The photos of the manufactured board are shown in Figure 2. The 70 $\times$ 70 mm² dimensions were chosen to achieve 128 $\times$ 128 lines with the pitch mentioned above. Also, the size of the connectors limits the readout miniaturization—see Figure 2b. The connectors used were Hirose FX10A-168P-SV (Yokohama, Japan) 168-pin high-density connectors. Bigger readouts (single boards) can be manufactured using this technology if needed.

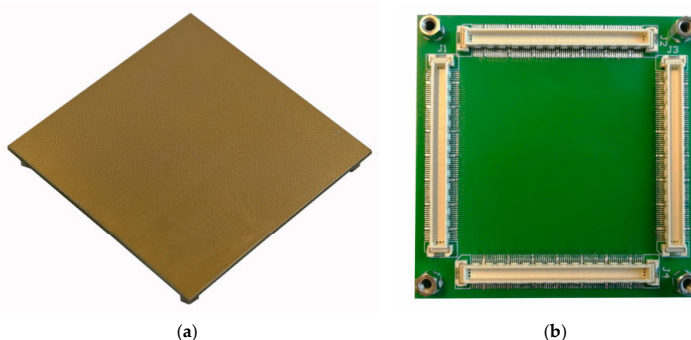


Figure 2. The photos of the 70 $\times$ 70 mm² readout board manufactured using PCB technology: (a) the top side contains readout electrodes; (b) the bottom side contains connectors for the ADC board.

2.1. Panelizing the Readout Boards

The second design assumption was the ability to connect multiple readout boards together to form more extensive panels. The margin between boards should be as small as possible to reduce the dead area of the readout. Therefore, all the connectors are located on the bottom side of the board, behind the readout electrodes on the top layer. Each signal is routed to two connectors on opposite sides of the board. In this way, one connector can be connected with the readout electronic, and the second connector can be connected to the other readout board using a dedicated interconnection board. The idea of connecting the four readout boards is presented in Figure 3. The dedicated interconnectors used to connect the readout boards are visible in Figure 3b. The X-axis lines and the Y-axis pads are

located around 100 μm from the edges of the readout boards, so with 100 μm of additional clearance between boards, the dead area is smaller than 1%. On the bottom side in the corners, there are 4 M3 mounting posts soldered to the PCB. They should be screwed to the backplane through the electronic readout or interconnection boards. This ensures the proper alignment between the modules and the strong mechanical connection between detector elements. To prevent stress buildup in the slightly misaligned connectors, the Hirose FX10-168IP-8 (Yokohama, Japan) interposers were used.

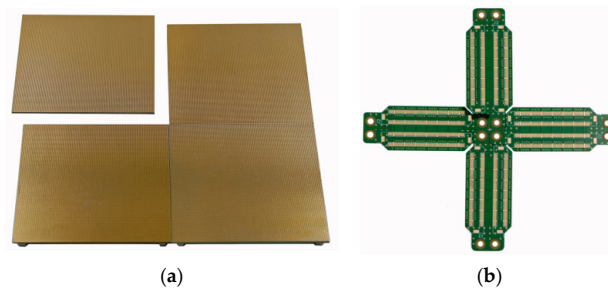


Figure 3. The readout board paneling: (a) visualization of a panel assembly using four readout boards; (b) interconnection boards used for connecting four readouts in a matrix.

2.2. The GEM Detector Assembly

The dedicated test setup was prepared to validate the readout boards and readout electronics in operational conditions. The complete GEM detector was built using a tested readout, a dedicated backplane and standard CERN 10×10 cm detector parts: a set of 3 GEM foils, a drift electrode, spacers for the GEM stack and the gas box. All of these parts were manufactured and assembled by Techtra Sp. z o. o. (Wrocław, Poland). The analogue and ADC parts of the electronic readout coupled with the XY readout board are shown in Figure 4a. The outline of the electronic readout is the same as the readout board, allowing panelization of the detector sectors. The mentioned modules installed on the backplane are presented in Figure 4b. In this image, the frames for the GEM stack and H.V. connectors for the GEM foils can also be seen. The digital part of the readout electronics is located on the outside of the detector gas box and is connected with the ADC module using a 40-pin connector located in the center of a backplane.

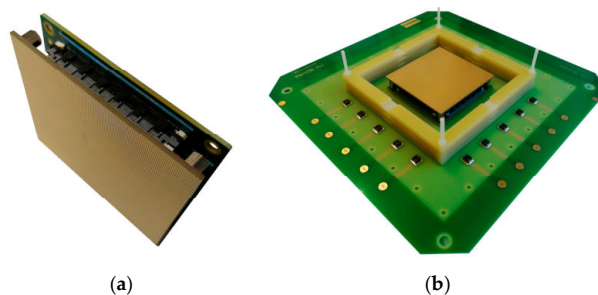


Figure 4. The detector during the assembly: (a) a single readout unit consisting of a 256 Ch. electronic ADC board (back) connected with XY readout PCB (front); (b) the single readout unit assembled on the GEM detector mainboard.

3. Results and Discussion

The developed readout structures were thoroughly tested to validate the ability to use them in GEM detectors. The boards were visually inspected and electrically tested. One of them was characterized in the functional GEM detector using X-rays. Radiograph imaging was conducted to check the quality of images measured using the designed PCB readout board. The noise of the electronic readout with the readout board was measured. Finally, the charge spread between the X and Y lines was calculated from X-ray measurement data.

3.1. Visual Inspection

Ten randomly selected boards were chosen for the visual inspection. The process was carried out using a Leica DM4500 optical microscope (Wetzlar, Germany). The samples were observed in a dark field with $5\times$ magnification to reduce the measurement error. During the inspection, the boards were checked in case of defects: shorts, nonregular pad/trace shape and impurities. The dimensions of the PCB features were also measured. The microscope image of one of the investigated boards is shown in Figure 5a.

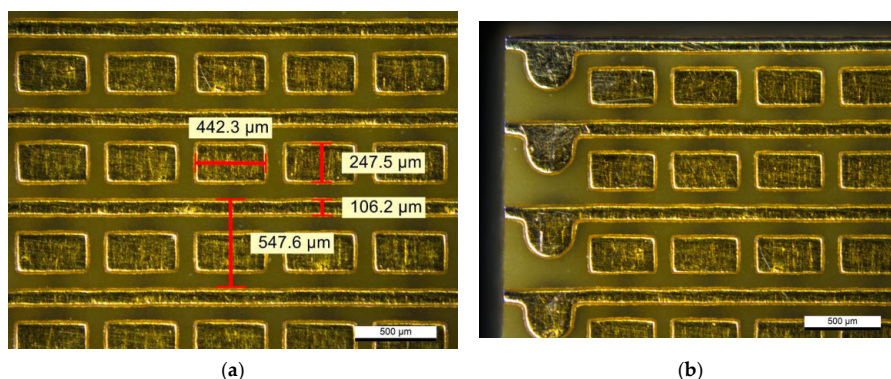


Figure 5. The microscope images of the XY PCB readout board manufactured by one of the PCB manufacturers: (a) the line-pad structure with measured dimensions; (b) the readout structure near the edges of a board—the distances from structures to the edges are visible.

The second issue is the distance between the electrodes and the edges of the PCB. This is very important when the individual segments are connected together in a more extensive matrix. Low and consistent distances to the edges lead to achieving a low dead area of the readout matrix. The microscope image of the edges of the investigated board is shown in Figure 5b. All of the investigated boards were of good quality and very consistent. No significant imperfections were spotted. The measured dimensions were very close to the design.

3.2. The Electrical Measurements of the PCB Readouts

The electrical measurements were conducted on boards from previous tests. These boards consisted of 128 lines in the X direction and 127 series of pads in the Y direction. All of the boards were tested in case of shorts between the lines. A Keysight U3401A (Santa Rosa, CA, USA) digital multimeter in resistance measurement mode was used to perform these tests. A dedicated adapter board was designed to speed up the measurement process by measuring multiple lines simultaneously. As a result, all of the tested boards were shown to be free of shorts. This confirms that the designed layout can be manufactured accurately and accurately.

One randomly chosen board was integrated into a complete GEM detector described in Section 2.2. The noise characteristics of this board were measured using dedicated 128×128 channels readout electronics based on DDC2256A charge to digital converter. The noise was calculated using 512 subsequent samples. From these measurements, the mean noise amplitudes, the maximum noise and the RMS values were calculated individually for each channel. The results are shown in Table 1. Measured values were compared to those obtained on the CERN readout board (based on the MCV technology) and Techtra (Wrocław, Poland) 256×256 Ch. readout electronics V2.0. The disproportion between noise in the X and Y channels is visible in both cases. This is typical, since the layout of the X and Y axis is different, so the capacitance of these traces is different. The switching capacitor converters are sensitive to the input capacitance, and the noise floor increases with capacitance. The smaller noise of PCB readout compared to the CERN one can be seen, resulting from the smaller size of the readout board and shorter connections with readout electronics. The RMS noise values for each channel for both tested boards are presented in Figure 6.

Table 1. Noise characteristics of the detector with PCB readout board compared to CERN readout board manufactured with MCV technology.

Board	Channels	Avg. Noise [fC]	Max Noise [fC]	RMS Noise [fC _{RMS}]
PCB $70 \times 70 \text{ mm}^2$	X (TOP)	2.38	4.10	1.10
	Y (BOT)	2.47	6.15	1.14
CERN $100 \times 100 \text{ mm}^2$	X (TOP)	4.04	22.27	1.63
	Y (BOT)	5.24	14.25	2.89

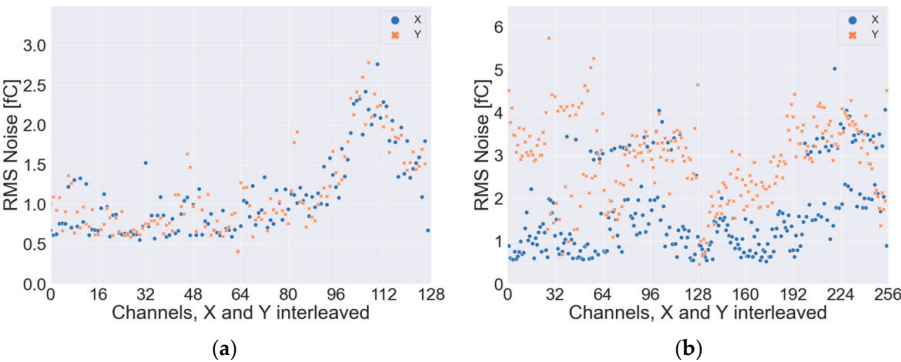


Figure 6. The RMS noise values for each channel of tested readout boards: (a) $70 \times 70 \text{ mm}^2$ PCB; (b) $100 \times 100 \text{ mm}^2$ CERN.

3.3. Performance Measurements of a GEM Detector with PCB Readout Using X-ray Methods

The X-ray measurements of the detector with PCB readout were conducted to validate the imaging quality. The Ar/CO₂ (70:30) gas mixture was used in these tests as a working gas for the GEMs. This is a standard gas mix used in MPGD. The Ametek COOL-X (Berwyn, PA, USA) pyroelectric X-ray source was used to perform the radiographs. The characteristic photon energies of this source were 8.05 keV (Cu) and 8.14 keV (Ta). The High Voltage that polarizes the stack was set to 3200 V, which gave a detector gain value of 60,000. Several metal and ceramic parts were placed on the detector window during tests. The parts are shown in Figure 7d [18]. The detector with samples was irradiated for about 3 h for each

test to obtain enough data. Firstly, the designed PCB readout detector was tested using 128×128 channel readout electronics. The obtained radiograph is shown in Figure 7a. In the second experiment, lines were connected in pairs to reduce the readout electronic channel number and to see how they influenced image quality. The resulting image is shown in Figure 7b. As a control image, the measurement was also performed using classic CERN XY readout manufactured using MCV technology (using 256×256 channel readout electronics)—see Figure 7c [18].

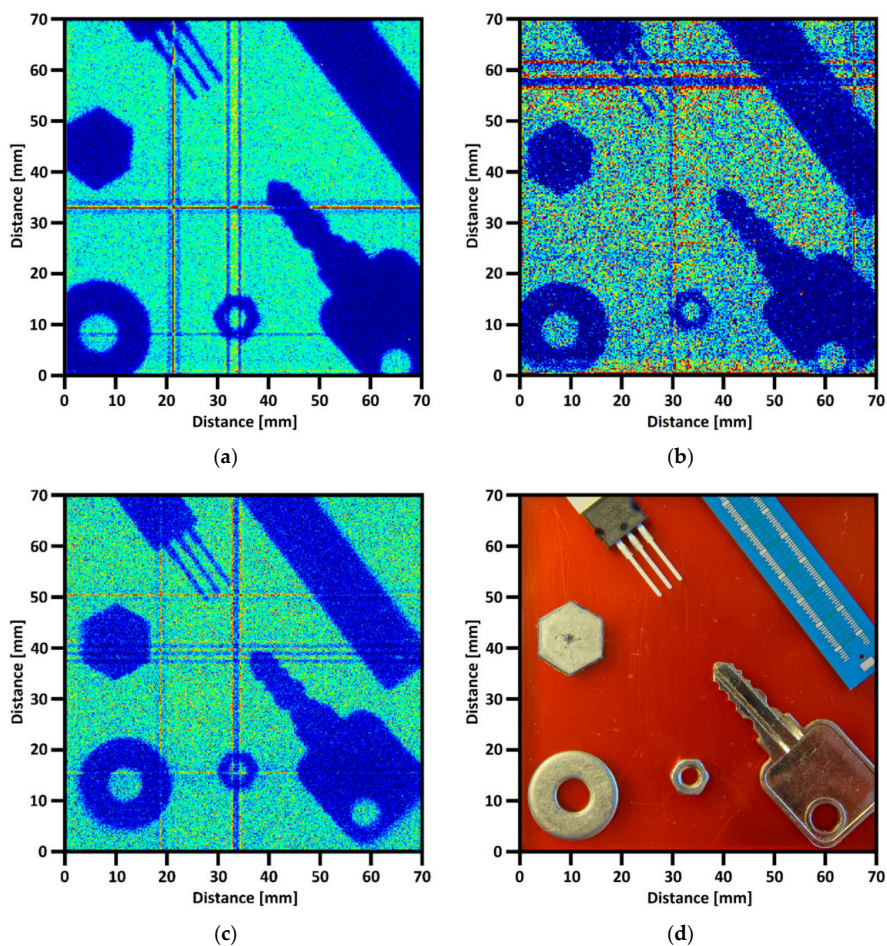


Figure 7. Comparison of the radiographs measured using different readout boards: (a) radiograph measured on $70 \times 70 \text{ mm}^2$ PCB board (128×127 Ch.); (b) radiograph measured on $70 \times 70 \text{ mm}^2$ PCB board (using only 64×63 Ch.); (c) radiograph measured on CERN $100 \times 100 \text{ mm}^2$ M.S. board [18]; (d) objects placed on the detector for the readout board tests [18].

A few dark ovary bright crossing lines are visible in the images. These image defects are related to the hot pixels. The root cause of hot pixels occurring is the imperfections of the GEM foils or dust particles on the GEM foil surface. The images' quality and edges' sharpness are very similar between the measurements. The PCB readout boards seem to be a good alternative to the CERN readout boards, especially in lower-cost applications.

Based on the read data from the detector, the charge-sharing proportion between the X and Y lines was calculated. The charge-sharing compensation in the readout designs is described in Section 2 of this paper. The measurements are based on comparing the charge distribution histograms calculated separately for each axis—this method is described in more detail in [18,19]. The charge histograms were made separately for each axis from 512,000 subsequent samples. Each histogram's highest peak corresponding to the X-ray source characteristic radiation was located and approximated with Gaussian. The Gauss centers were calculated, and results from individual axes were compared. Table 2 presents the calculated charge distribution data on the developed PCB readout board and the results obtained with CERN readout. The uniformity of the charge in the designed PCB readout was not ideal, but for many applications, the 36.9 to 63.1% ratio is acceptable. Equalization of the charge distribution for the PCB readout requires wider X lines, which implies a higher pitch, or requires the reduction of the hole sizes and pads of the Y axis, which could be achieved, but not by any standard PCB manufacturers.

Table 2. Charge distribution between the top and bottom electrodes of the PCB readout board compared to the CERN readout board.

Board	Channels	Gauss Center [fC]	Total Charge [%]
PCB $70 \times 70 \text{ mm}^2$	X (TOP)	4.12	36.9
	Y (BOT)	7.05	63.1
CERN $100 \times 100 \text{ mm}^2$	X (TOP)	1.48	56.3
	Y (BOT)	1.15	43.7

4. Conclusions

The simplified 2D readouts manufactured using standard PCB technology seem to be a suitable solution for the GEM detectors, especially for low-cost solutions or in applications where readout boards without margins are beneficial. A $70 \times 70 \text{ mm}^2$ PCB was designed and manufactured for this test, but much bigger readouts can be easily mass-manufactured using PCB technology. The prototype boards were thoroughly tested using optical and electronic measurements. One of the mentioned readouts was assembled into a test detector and validated using X-rays. The obtained results were compared to ones measured using standard CERN boards manufactured using MCV technology. The noise performance of those XY readouts was very good—the noise level was low, and it was very uniform. The imaging ability of the detector with this board was confirmed, and the obtained spatial resolution and quality of the image were comparable to state-of-the-art solutions. The active area covered almost all of the board, so connecting the single readouts into a bigger matrix was possible with less than 1% dead area. The charge distribution between the X and Y axis was in the proportions of 36.9 to 63.1%, which is acceptable for most applications. It could be equalized using more advanced technology or using designs with bigger pitches.

This work shows that the parameters of the PCB readouts are similar to those achieved using MCV technology, and can be used alternatively in most applications. Utilization of simpler and commercially available methods will reduce costs and lead time and give the user more flexibility in designing custom readout boards. This method also allows easy integration of readout boards with electronic readout on the same PCB, which can reduce the trace lengths and noise level.

Author Contributions: Conceptualization, M.B. and P.B.; methodology, M.B. and P.B.; software, M.B.; validation, M.B., S.G. and P.B.; formal analysis, M.B. and P.B.; investigation, M.B. and P.B.; resources, P.B. and S.G.; data curation, M.B.; writing—original draft preparation, M.B., S.G. and P.B.; writing—review and editing, M.B., S.G., P.B. and K.M.; visualization, M.B.; supervision, K.M. and P.B.; project administration, K.M. and P.B.; funding acquisition, K.M. and P.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education, within the Implementation Doctorate program (Grant no. DWD/4/5/2020; DIR.ZPSW.62.77.2020).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Shekhtman, L. Micro-pattern gaseous detectors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.* **2002**, *494*, 128–141. [\[CrossRef\]](#)
2. Sauli, F. GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.* **1997**, *386*, 531–534. [\[CrossRef\]](#)
3. Sauli, F. The gas electron multiplier (GEM): Operating principles and applications. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.* **2016**, *805*, 2–24. [\[CrossRef\]](#)
4. Benlloch, J.; Bressan, A.; Buttner, C.; Capeans, M.; Gruwe, M.; Hoch, M.; Labbe, J.; Placci, A.; Ropelewski, L.; Sauli, F.; et al. Development of the gas electron multiplier (GEM). *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **1998**, *45*, 234–243. [\[CrossRef\]](#)
5. Bencivenni, G.; De Oliveira, R.; Morello, G.; Lener, M.P. The micro-Resistive WELL detector: A compact spark-protected single amplification-stage MPGD. *J. Instrum.* **2015**, *10*, P02008. [\[CrossRef\]](#)
6. Morello, G.; Bencivenni, G.; De Oliveira, R.; Felici, G.; Gatta, M.; Lener, M.P.; Ochi, A. The micro-Resistive WELL detector for the phase-2 upgrade of the LHCb muon detector. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.* **2018**, *936*, 497–498. [\[CrossRef\]](#)
7. Giovannetti, M.; Balossino, I.; Bencivenni, G.; Cibirnetto, G.; Farinelli, R.; Felici, G.; Garzia, I.; Gatta, M.; Lavezzi, L.; Mezzadri, G.; et al. uRANIA: A micro-Resistive WELL for neutron detection. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.* **2022**, *1042*, 167432. [\[CrossRef\]](#)
8. Abbas, M.; Abbrescia, M.; Abdalla, H.; Abdelalim, A.; AbuZeid, S.; Agapitos, A.; Ahmad, A.; Ahmed, A.; Ahmed, W.; Aimè, C.; et al. Quality control of mass-produced GEM detectors for the CMS GE1/1 muon upgrade. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.* **2022**, *1034*, 166716. [\[CrossRef\]](#)
9. Pellecchia, A.; Verwilligen, P.; Stammer, A. Performance of triple-GEM detectors for the CMS Phase-2 upgrade measured in test beam. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.* **2023**, *1046*, 167618. [\[CrossRef\]](#)
10. Bressan, A.; De Oliveira, R.; Gandi, A.; Labbé, J.-C.; Ropelewski, L.; Sauli, F.; Mörmann, D.; Müller, T.; Simonis, H. Two-dimensional readout of GEM detectors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.* **1999**, *425*, 254–261. [\[CrossRef\]](#)
11. Zhang, A.; Bhopatkar, V.; Hohlmann, M.; Bai, X.; Gnanvo, K.; Liyanage, N.K.; Posik, M.; Surrow, B. R&D on GEM detectors for forward tracking at a future Electron-Ion Collider. In Proceedings of the IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), San Diego, CA, USA, 31 October–7 November 2015; pp. 1–4. [\[CrossRef\]](#)
12. Li, X. The STAR FGT Upgrade Program. 1p+A Physics at RHIC Workshop Xuan Li (Temple University). Available online: https://www.phenix.bnl.gov/phenix/WWW/publish/xjiang/pA_workshop2013/day2/XuanLi.pdf (accessed on 10 July 2023).
13. Imad Laktineh. A New Readout Scheme for RPC and Other Gaseous Detectors. The Fifth Technology and Instrumentation in Particle Physics Conference (TIPP2021). Available online: <https://indico.cern.ch/event/1040996/contributions/4394657/attachments/2264167/3843884/RD51-WP.pdf> (accessed on 10 July 2023).
14. Bachmann, S.; Kappler, S.; Ketzer, B.; Müller, T.; Ropelewski, L.; Sauli, F.; Schulte, E. High rate X-ray imaging using multi-GEM detectors with a novel readout design. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.* **2002**, *478*, 104–108. [\[CrossRef\]](#)
15. Zhang, A.; Hohlmann, M.; Azmoun, B.; Purschke, M.L.; Woody, C. A GEM readout with radial zigzag strips and linear charge-sharing response. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.* **2018**, *887*, 184–192. [\[CrossRef\]](#)
16. Kudryavtsev, V.N.; Maltsev, T.V.; Shekhtman, L.I. Study of GEM-based detectors spatial resolution. *J. Phys. Conf. Ser.* **2020**, *1498*, 012005. [\[CrossRef\]](#)
17. Kudryavtsev, V.; Maltsev, T.; Shekhtman, L. Spatial resolution of triple-GEM detectors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.* **2019**, *936*, 482–484. [\[CrossRef\]](#)

18. Babij, M.; Bielówka, P.; Dąbrowski, A.; Nawrot, W.; Czok, M.; Malecha, K. Manufacturing of a $70 \times 70 \text{ mm}^2$ LTCC strip electrode readout for Gas Electron Multiplier detectors. *Sens. Actuators A Phys.* **2022**, *342*, 113656. [[CrossRef](#)]
19. Dąbrowski, A.; Nawrot, W.; Czok, M.; Babij, M.; Bielówka, P.; Malecha, K. LTCC Strip Electrode Arrays for Gas Electron Multiplier Detectors. *Sensors* **2022**, *22*, 623. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

The application of Low-Temperature Cofired Ceramics technology in Gas Electron Multiplier microstructures

P. Bielówka, **M. Babij**, A. Dąbrowski, K. Malecha

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 1047, 2023, 167749

Samodzielny wkład autora rozprawy w powstanie tej publikacji polegał na:

- udziale w opracowaniu konstrukcji i przygotowaniu próbek,
- przygotowaniu stanowiska do pomiaru prądu upływu i napięcia przebicia struktur,
- udziale w przeprowadzeniu pomiarów, których wyniki wykorzystano w publikacji,
- udziale w redakcji treści publikacji.

Łączny udział autora rozprawy wynosi 25%.



Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nima

The application of Low-Temperature Cofired Ceramics technology in Gas Electron Multiplier microstructures

Piotr Bielówka^{a,b}, Michał Babij^{a,b}, Arkadiusz Dąbrowski^a, Karol Malecha^{a,*}^a Department of Microsystems, Faculty of Electronics, Photonics and Microsystems, Wrocław University of Science and Technology, Wyb. S. Wyspiańskiego 27, 50-370, Wrocław, Poland^b Technology Transfer Agency TECHTRA Sp. z o.o., ul. Dulska 13, 54-427, Wrocław, Poland¹

ARTICLE INFO

Keywords:

Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC)
 Gas Electron Multiplier (GEM) detector
 X-ray
 Micro Pattern Gas Detector (MPGD)
 CubeSat

ABSTRACT

The main goal of the work is to develop a novel technique for the production of improved Gas Electron Multiplier (GEM) microstructures that are critical elements of particle detectors used for High Energy Physics research. Invented at CERN, the Micro-Chemical-Vias (MCV) technology has proven optimal for producing high volumes of large size GEMs elements. We aim to develop a technology for the production of GEMs with higher vias densities, increasing the gain of a single structure and ensuring better system reliability. Additionally, different conductive layers are planned for use. Tests were carried out using Low-Temperature Cofired Ceramics (LTCC) and various types of conductive layers.

1. Introduction

In 1968 Charpak's multiwire proportional chamber revolutionized the particle detection systems in high energy physics. Since then, many improved techniques have been proposed. One of them, the MPGD detectors (Micro-Pattern Gaseous Detectors), could reach better performance with respect to spatial resolution, excellent efficiency and other features.[1]. Furthermore, the MCV technology allows producing sophisticated particle detectors of large active areas under cost-efficient conditions. The production of MPGD detectors is based on technologies used in the industry for producing Printed Circuit Boards (PCBs) and dedicated technologies developed in different laboratories and successfully transferred to commercial manufacturers.

It was noticed that for prototyping and for very demanding purposes, a different approach might be beneficial. The laser drilling was proposed by the Tech-Etch company [2], and the usage of LTCC substrate with punched holes was proposed by prof. Y. Takeuchi [3]. In this work, a third approach is proposed, which is dedicated to applications where a small number of GEMs with unique parameters is needed.

Based on the literature, it was decided to use a LTCC substrate for manufacturing a dedicated GEM microstructure. Ceramics are known as one of the best dielectrics, are radiation hard and can be produced on an industrial scale. The vias have been created with a laser technology that is used in many areas of science and industry, which is important concerning the technology dissemination, improvement of technical parameters and devices price decrease.

It was decided to focus on decreasing the holes diameter below 20 μm , with a pitch below 40 μm to increase spacial resolution performances. Using LTCC ceramic instead of polyimide reduces the out-gassing effect and excludes the risk of GEM structural failure caused by sparking and carbonization of an organic substrate. Proposed GEM structures can be used in space applications, autonomous detectors and the like. As a first step the goal was to obtain GEM structures with parameters similar to films made by the MCV method [4].

2. Fabrication

The GEM foils prototypes were manufactured using a DuPont Green-Tape 951 LTCC substrate. Two approaches for the substrate preparation were tested: conical holes in a single 114 μm LTCC foil and double-conical holes made in two layers of the same LTCC tape. The first step of the manufacturing process was cutting the outline of a LTCC tape with a LPKF ProtoLaser U laser system, operating at a wavelength of 355 nm. The overall dimension of cut GEM foil was 76 x 76 mm². Next, the electrodes were applied on both sides of the substrate using Aurel VS1520 A screen printer, with 325 mesh stainless steel screen. Two types of conductive pastes for GEM electrodes were tested: gold (DuPont 5742) and silver (DuPont 6145R). After that, the samples were dried at 120 °C for 10 min. Next, the matrix of holes was drilled using a laser system. In the first tests, the ProtoLaser U system was used. To improve the quality and repeatability of the holes, the Jasper 20 femtosecond laser (343 nm, 250 fs) was used in further tests.

* Corresponding author.

E-mail address: karol.malecha@pwr.edu.pl (K. Malecha).¹ techtra@techtra.pl<https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167749>

Received 14 June 2022; Received in revised form 26 October 2022; Accepted 31 October 2022

Available online 14 November 2022

0168-9002/© 2022 Elsevier B.V. All rights reserved.

P. Bielówka, M. Babij, A. Dąbrowski et al.

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1047 (2023) 167749

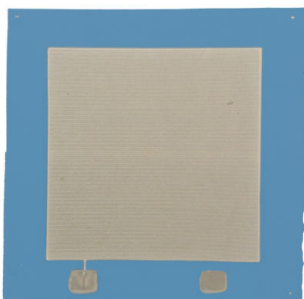


Fig. 1. A 50x50 mm² active area of a LTCC-GEM sample.

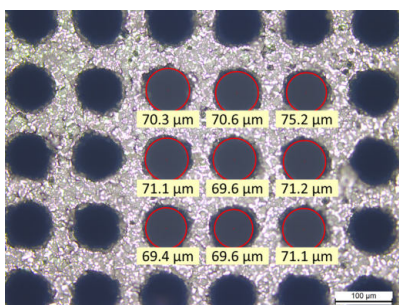


Fig. 2. Holes size measurements of a LTCC-GEM.

In the second approach, two substrates were laser drilled separately and laminated together. Finally, the LTCC-GEM foils were sintered in a Nabertherm LT 9/11 muffle furnace. Standard time-temperature profile (peak temp of 875 °C) has been used. The GEM sample is shown in Fig. 1.

3. Results

At first, samples of GEM foils with a double-conical cross section similar to ones made in the MCV technology were made. The main problem of this approach was the alignment of two separately drilled layers due to the plastic nature of unsintered LTCC substrates. The electrical tests were performed, and the maximum electric field of 74 kV/cm [1220V] at 165 µm thickness was measured (a MCV made GEM withstands up to 120 kV/cm at 50 µm thick polyimide foil).

To overcome this drawback, it was decided to manufacture a single layer conical structure that does not need vias alignment. Samples with a thickness of 92 µm, with 10 µm silver metallizations were manufactured. During the tests, the maximum electric field value of 54 kV/cm [500 V] was obtained. Hole's shape was improved but the obtained electrical parameters were unsatisfactory, therefore, a thorough analysis was carried out. As a result, the presence of metallic

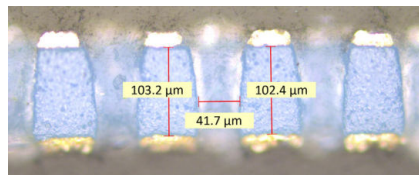


Fig. 3. A crosssection of the LTCC-GEM sample.

impurities was found inside of the vias. Most likely, it was caused by the re-deposition of the electrode material during the drilling of the holes. Burrs were also noticed remaining around the edges of the holes, which became a source of electrical discharges. Both phenomena significantly limited the value of the maximum electric field strength in this structure. Exceeding the operating voltage in each case led to irreversible thermal damage to the conductive layers.

In order to overcome observed problems, it was decided to use a femtosecond laser. The LTCC and the metallic layers were removed by an ablation process to reduce heat affected zone. Samples with a thickness of 100 µm, with 10 µm silver metallization were fabricated and tested. The hole matrix on the LTCC-GEM sample is shown in Fig. 2. Due to the Gaussian power distribution of the laser beam, the holes were conical with 70° angle. However, it should be noted that the diameters and the shapes of the vias are homogeneous on each side. A metallographic section of the sample was made (Fig. 3), showing the shape of the vias. The maximum electric field was 110 kV/cm [1100 V] with a leakage current of 1.2 nA, which is comparable to the GEM structures made with MCV technology (120 kV/cm with leakage current below 10 nA at 50 µm thick polyimide foil).

4. Conclusion

The technology of LTCC substrates merged with femtosecond lasers allows the manufacturing of precise and uniform GEM-like microstructures. The measured values of the leakage current and breakdown voltage show that the manufactured prototypes should be usable in the GEM detectors. Further research needs to be done to improve the parameters of the structures and validation of the whole LTCC-GEM setup.

Acknowledgments

The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education, Poland, within the Implementation Doctorate program (Grant no. DWD/4/5/2020; DIR.ZPSW.62.77.2020).

References

- [1] L. Shekhtman, Micro-pattern gaseous detectors, Nucl. Instrum. Methods A 494 (1) (2002) 128–141, [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01456-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01456-0).
- [2] B. Surrow, et al., Development of tracking detectors with industrially produced GEM foils, Nucl. Instrum. Methods A 572 (1) (2007) 201–202, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2006.10.357>.
- [3] Y. Takeuchi, et al., Development and properties of 100 mm-square size LTCC-GEM, J. Phys. Conf. Ser. 1498 (1) (2020) 012011, <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1498/1/012011>.
- [4] CERN MCV: <https://knowledgetransfer.web.cern.ch/technologies/micro-chemical-vias> [Online; Accessed 8 June 2022].

Manufacturing of a 70×70 mm² LTCC strip electrode readout for Gas Electron Multiplier detectors

M. Babij, P. Bielówka, A. Dąbrowski, W. Nawrot, M. Czok, K. Malecha
Sensors and Actuators A: Physical, Volume 342, 2022, 113656,

Samodzielny wkład autora rozprawy w powstanie tej publikacji polegał na:

- opracowaniu konstrukcji detektora,
- opracowaniu płyty przejściowej, umożliwiającej montaż detektora GEM z ceramiczną płytą odczytu,
- montażu i uruchomieniu kompletnego detektora GEM zawierającego opracowane elementy,
- przeprowadzeniu pomiarów elektrycznych oraz pomiarów z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego, których wyniki wykorzystano w publikacji,
- analizie wyników pomiarów w tym radiogramów,
- przygotowaniu ilustracji i wykresów,
- redakcji treści publikacji.

Łączny udział autora rozprawy wynosi 55%.



Contents lists available at ScienceDirect

Sensors and Actuators: A. Physical

journal homepage: www.journals.elsevier.com/sensors-and-actuators-a-physical

Manufacturing of a $70 \times 70 \text{ mm}^2$ LTCC strip electrode readout for Gas Electron Multiplier detectors

Michał Babij^{a,b,1}, Piotr Bielówka^{a,b,2}, Arkadiusz Dąbrowski^a, Witold Nawrot^{a,3},
Mateusz Czok^a, Karol Malecha^{a,*,4}

^a Department of Microsystems, Faculty of Electronics, Photonics and Microsystems, Wrocław University of Science and Technology, Wyb. S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland

^b Technology Transfer Agency TECHTRA Sp. z o.o., ul. Duńska 13, 54-427 Wrocław, Poland

ARTICLE INFO

Keywords:

Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC)
Gas Electron Multiplier (GEM) detector
X-ray
Micro Pattern Gas Detector (MPGD)
CubeSat
Space sensors

ABSTRACT

Introduced by Fabio Sauli in 1997, the Gas Electron Multiplier (GEM) technology is commonly used in many high energy physics experiments. It has proven unique value in many scientific domains and adaptability to new research tasks. Typically, the GEM detectors are made with polyimide films (GEM foils and readout plate), halogen-free FR4 epoxy resins (supporting and stretching structures), conductive copper layers, etc. Because of outgassing and ageing, those components release in time residues of dust, moisture, and vapors. The residues pollute the gas mixture and consequently degrade the detector's working parameters. To avoid such a problem, devices can be constantly flushed by pure gas from an external source. This solution is not optimal for autonomous space detectors because of volume and weight limitations. The paper describes the successive work to develop an autonomous GEM detector without a gas mixture circulation system. As a solution, the use of Low-Temperature Cofired Ceramics (LTCC) materials was proposed and validated. The dedicated LTCC readout plates were manufactured and tested, and results are presented.

1. Introduction

CubeSat technology has revolutionized the access to the research conducted in space. Many entities offer the launch of CubeSat satellites into the Earth's orbit, which enables conducting research in the cosmos. CubeSat solution is a modular design where a single unit must fulfill requirements applied to volume (one liter) and weight (below two kilograms) [1]. The authors focused on developing an autonomous GEM ionizing radiation detector capable of working in Earth orbit [2]. The aim was for the detector would meet the requirements of a single CubeSat module, where additional communication, control, and power systems would be installed in a second unit. The GEM particle detector operational principle is presented in Fig. 1. As the whole volume of the device is filled with sensitive gas, the pairs of electron-ion are released by the incoming ionizing radiation. The primary electrons are further accelerated by the electrical field created between the drift cathode and

the top side of the first GEM foil. During passing through the GEM foils stack, the electron beam is accelerated and multiplied a few thousand times. The resulting charge is collected by the readout plane, typically conductive strips, and measured by a dedicated electronic circuit.

The requirement of autonomy imposed the necessity of using new materials and new technologies while maintaining their compatibility with the GEM technology. First, the idea of gas conditioning in the GEM chamber was analyzed. Due to the small volume of the target device, both the gas recirculation system and periodic purging of the detector chamber with fresh gas were abandoned. Instead, it was decided that the entire volume of the CubeSat module would be filled with working gas and sealed. The composition and operational pressure of the gas mixture were selected based on literature data [3,4] and will be validated during further tests. As any kinds of impurities or residues of outgassing may affect the amplification or even lead to the detector failure, it was critical to select construction materials for the entire detector.

* Corresponding author.

E-mail addresses: techtra@techtra.pl (M. Babij), karol.malecha@pwr.edu.pl (K. Malecha).

¹ <https://orcid.org/0000-0001-9859-422X>

² <https://orcid.org/0000-0002-5333-1968>

³ <https://orcid.org/0000-0001-8135-5337>

⁴ <https://orcid.org/0000-0002-2240-0326>

<https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113656>

Received 15 March 2022; Received in revised form 25 April 2022; Accepted 30 May 2022

Available online 3 June 2022

0924-6460/© 2022 Published by Elsevier B.V.

M. Babji et al.

Sensors and Actuators: A. Physical 342 (2022) 113656

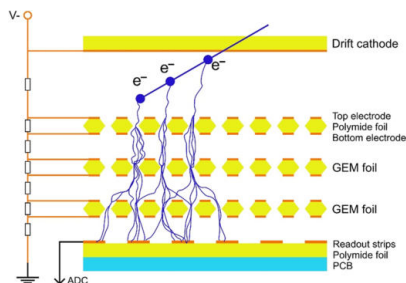


Fig. 1. A diagram of a Gas Electron Multiplier detector.

Typically for GEM technology, halogen-free FR4 epoxy resins are used [5]. However, as their outgassing ratio is relatively high, the use of Low-Temperature Cofired Ceramics (LTCC) was proposed. Additionally, LTCC is superior to Printed Circuit Boards (PCB) with respect to electrical and mechanical properties, high reliability in harsh conditions, good thermal conductivity, and operating temperatures. The radiation resistance of such elements has been confirmed by their application in the field of high energy physics. Due to the high reliability, the LTCC technology is already used for military and space purposes [6,7].

As the LTCC technology for GEM foils has already been evaluated [8], the authors have focused on developing the readout system. Readouts systems used widely in High Energy Physics (HEP) experiments are manufactured with the same base materials as GEM foils, which is polyimide foil covered by a thin copper layer on both sides. Usually, they are built with orthogonal, conductive lines that collect the clouds of electrons multiplied by GEM foils [9]. With the standard photolithography technique, the series of parallel copper strips are chemically fabricated on each foil's side. The differences in width between conductive lines on the foil's sides define the final load distribution along the X and Y axes. The next production step is etching polyimide between copper lines on the top side, which allows the bottom layer to collect part of the signal's charge. Finally, the fragile polyimide foil is fixed to an FR4 supporting plate and mounted below a GEM stack. The whole procedure is time-consuming and requires the use of CERN's patented Micro-chemical-Vias technology [10]. In many scientific experiments, dedicated geometries of readouts are used: pads [11] strips and pads [12] zigzag [13], and others. Nevertheless, the spatial resolution of a GEM detector equipped with readout based on orthogonal series of strips can be as high as 30–50 μm [14].

2. Materials and methods

The LTCC material, due to its superior electric properties, especially low dielectric loss and stability in harsh conditions, is a very prospective material for the fabrication of a detector operating in the ionizing radiation environment, with good long-term stability and repeatability. Preliminary experiments on the strip electrode detector [15] have shown how the limitations of the LTCC and screen-printing process can affect the technology in such a periodic structure of the detector. The LTCC processes and materials were chosen for the fabrication of a bigger detector with improved quality and performance. A bigger pitch was used for higher repeatability of fabrication processes.

2.1. Optimization of the LTCC readout

The preliminary test was conducted with assumption that the width of X and Y readout strips should be equal to get uniform charge distribution between the lines. Consequently, the area of the single readout

cell at X and Y axes was designed as 0.0375 mm^2 and 0.038 mm^2 , respectively. However, because of the small 0.3 mm pitch and technology imperfections, the actual area ratio between electrodes was finally roughly 1:1. During the detector validation, it was observed that the charge distribution between the lines X and Y stripes was approximately 1:10 [15], which consequently has limited the spatial resolution.

The aim of the current experiment is to improve the uniformity of charge distribution between X and Y lines and enlarge the whole readout area up to $70 \times 70 \text{ mm}^2$. To meet the requirements, the upper electrode's width was reduced from 100 μm to 75 μm , and the lower electrode's width was increased from 200 μm to 325 μm . Electrode pitch was increased from 300 to 500 μm to avoid technological errors. The introduced changes are especially important for a matrix of lower electrode windows made in the first layer of the LTCC module, which makes this foil very fragile. The readout geometry and the critical dimensions are shown in Fig. 2. The device consisted of 140×140 strips in total. According to the design, the ratio between X and Y strips area per one period was estimated at 0.0375–0.0975 mm^2 . Because of the implemented change, a better charge balance between axes was expected compared to the preliminary experiment. Further improvements still may be implemented but the limitations of fine structurization of the LTCC tape with openwork shape and the standard screen-printing process were reached in the experiment.

2.2. LTCC readout technology and assembly

The standard LTCC process [16,17] was applied for the readout board manufacturing. For that purpose a GreenTape 951 (DuPont, US) LTCC system was used [18]. The device consists of 5 LTCC tape layers, where 4 of them are GreenTape 951PX with a thickness of 254 μm (before firing and ca. 215 μm as fired) and one layer of GreenTape 951PT with a thickness of 114 μm (before firing and ca. 96 μm as fired). The thinner tape was used as an insulation sheet between upper and lower strip electrodes. It was used for improving device performance due to less shading for electrons and to reduce an insulating surface of ceramics where the charge can be accumulated.

The production's first step was cutting the outline and via holes in each LTCC tape with a laser system ProtoLaser U (LPKF, Garbsen, Germany), operating at a wavelength of 355 nm. All cut sheets of tape had dimensions of $100 \times 92 \text{ mm}^2$ and the electric vias had a diameter of 160 μm . Next, the vias on the layers with gold metallization were filled using TC701 via fill paste (DuPont) intended for mixed-metal LTCC system. The rest of the vias were filled using silver-based paste 6161R (DuPont). The vias were filled through a stencil printing method using Aurel VS1520A screen printer (Aurel, Modigliana, Italy) using a 50 μm thick stainless-steel stencil. The cross-section of the device, including the applied material configuration is presented in Fig. 3. After the vias paste dried, the gold metallization was screen printed using 5742 Au-based paste (DuPont). Internal wiring between top strips and connectors pads on the bottom of the device were screen printed using Ag-based paste 6145R (DuPont). The external soldering pads were made from 6146R (DuPont) AgPd-based paste. The screen-printing processes were carried out using the Aurel VS1520A screen printer with 400 mesh and 325 mesh stainless steel screens for the upper electrode layer and the rest of the layers, respectively. All LTCC layers were aligned, stacked, and isostatically laminated at 20 MPa, 70 $^{\circ}\text{C}$ for 10 min. Then the module was fired in the standard for GreenTape 951 LTCC system time-temperature profile with a 30-min hold at 875 $^{\circ}\text{C}$ in a muffle furnace LT 9/11 (Nabertherm, Lilienthal, Germany). Finally, the electric connectors FX10A-140P/14-SV (Hirose Electric Co., Ltd, US) [19] were reflow soldered using SAC (96.5%Sn/3%Ag/0.5%Cu) solder alloy at a temperature of 260 $^{\circ}\text{C}$. The fired detector with electrical connections is shown in Fig. 4. Finally, the readout board was electrically tested, and no defects were found.

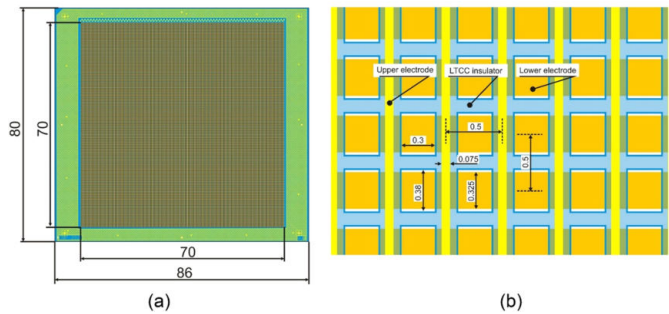


Fig. 2. Key dimensions of designed detector module (a) and its detailed components as zoomed (b) (all values in mm).

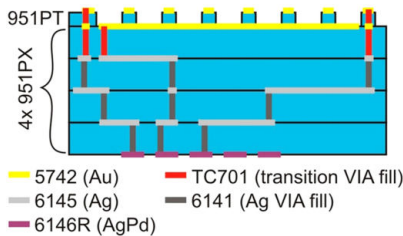


Fig. 3. Visualization of material configuration applied in LTCC process.

2.3. The test GEM detector assembly

The LTCC readout boards were tested in an operational environment in a fully functional GEM detector. To reduce the number of dedicated parts, the setup utilizes standard $10 \times 10 \text{ cm}^2$ GEM detector [5,20] components including $10 \times 10 \text{ cm}^2$ GEM foils, GEM support frames, gas-box frame, cover, and polyimide window. The custom mainboard Printed Circuit Board (PCB) was designed and used instead of a classical polyimide XY strip readout board. This PCB serves two functions: it provides electrical connections between ceramic readout and the data acquisition (DAQ) system and serves as a mechanical support for the

detector components (more description in [15]). The mainboard with the $70 \times 70 \text{ mm}^2$ LTCC readout board and GEM support frames is presented in Fig. 5(a). The full GEM stack and a gas frame mounted on the mainboard are shown in Fig. 5(b). The distances between GEM's electrodes are 3-2-2-1 mm, from top to the bottom of the detector. The two 256-channel electronic DAQ boards manufactured by TECHTRA were used for measurements (GEM 256ch Readout V2.0) [21]. As all connectors were soldered directly to the ceramic readout board, the very high precision in the alignment of the receptacles with headers located on the mainboard PCB was critical. The correction of actual shrinkage of the LTCC foils was applied, to ensure those dimensions were as precise as possible, and holes for connectors guideposts were manufactured. To guarantee that no additional mechanical stress is introduced to the ceramic board, FX10-168IP-8PH interposers were used. These floating interposers tolerate the mating tolerances up to $\pm 0.15 \text{ mm}$ in X and Y direction, between receptacles on LTCC board and sockets on the PCB.

3. Results and discussion

The designed and manufactured $70 \times 70 \text{ mm}^2$ LTCC readout board was thoroughly characterized by visual inspection, electrical measurements, and the X-ray method. All the results were compared with data obtained from our $20 \times 20 \text{ mm}^2$ LTCC readout prototypes [15] and $100 \times 100 \text{ mm}^2$ polyimide readout board manufactured by CERN. The measurements were conducted to validate the performance and quality gain of the newest ceramic readout board and to compare these parameters with the state-of-the-art solution.

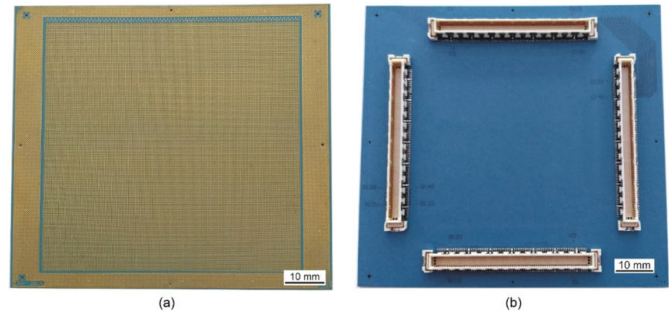


Fig. 4. The $70 \times 70 \text{ mm}^2$ MS LTCC readout board: a) top side with readout strips; b) bottom side with connectors.

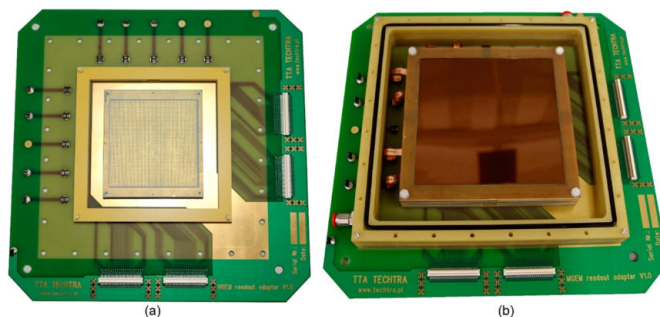


Fig. 5. The detector assembly for ceramic readouts testing: (a) mainboard with LTCC readout; (b) full-stack with GEM foils and gas-box frame.

3.1. Visual inspection

Optical inspection during the manufacturing process as well as after final assembly was carried out using a DM4500 optical microscope (Leica, Germany). During the process each screen-printed layer was optically examined to detect short circuits between tracks and their discontinuity. After sintering the module, key dimensions of electrodes were verified to be consistent with the design. The results of measurements are shown in Fig. 6, where the improved version of the readout microstructure (Fig. 6b) is compared to the initial one (Fig. 6a). The measured width of the upper electrode is slightly lower than the designed, however, the ratio between the upper and the lower electrode areas per single period of the structure is as desired. Additionally, the edge quality is better compared to the initial design, but it is noticeable that technical limitations for standard screen printing have affected the quality of the paths during printing on the openwork structure of the tape.

3.2. Electrical characterization of LTCC readout boards

Two types of electrical measurements of the LTCC readout boards were performed. At first, readouts were checked for short-circuits between the strips in X and Y planes. Then the noise characterization with electronic DAQ was performed. In order to detect the short-circuits, a Keysight U3401A digital multimeter in resistance measurement mode was used. To speed up the process, custom adapters were designed to simultaneously measure multiple lines. The short-circuit test result of the $70 \times 70 \text{ mm}^2$ LTCC readout, CERN $100 \times 100 \text{ mm}^2$, and

$20 \times 20 \text{ mm}^2$ early prototype are presented in Table 1. The optimized board consists of no shorts between lines, despite a large number of lines – 280 strips. The CERN readout board is also free of short-circuits. Fabrication of the readouts with no defects is critical to achieve good detector parameters such as image quality.

After the short-circuit tests, the two Techtra 256ch readout boards V2.0, High Voltage divider, and power supply, were connected to the GEM detector. Noise characteristics were measured on a fully assembled and operational GEM detector without an X-ray source. During the test gas mixture of Ar:CO₂ in 70:30 ratio was used. The High Voltage was set to 3200 V. As the width of top lines is smaller than bottom lines and the pitch is the same, the capacitance between lines is lower, which should result in a lower noise level. For that reason, the noise values were measured separately for the X and Y channels and the results are presented in Table 2. The RMS noise values separate for each channel is presented in Fig. 7. The distance between edges of the bottom strips is larger for $70 \times 70 \text{ mm}^2$ MS board compared to $20 \times 20 \text{ mm}^2$ board, hence the noise level for this axis is lower, and the noise level is more consistent between X and Y channels. The noise values for CERN $100 \times 100 \text{ mm}^2$ are slightly smaller than LTCC readouts, but the difference is not significant. LTCC boards are utilizing an additional adapter board by which it is necessary to use longer signal lines and additional line connectors which results in an increased noise level.

3.3. Validation of LTCC readout boards done with the X-ray methods

After the electrical measurements, the validation using X-ray methods was performed. The commercial COOL-X pyroelectric X-ray

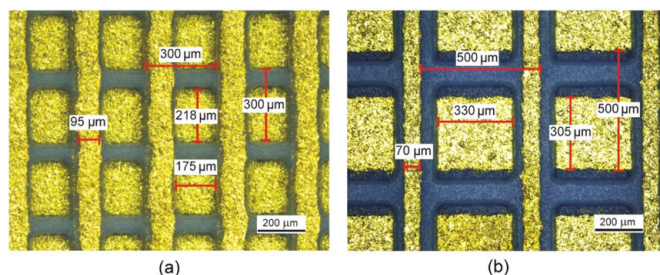


Fig. 6. The image of structures after co-firing: (a) $20 \times 20 \text{ mm}^2$ MS board with fine $300 \mu\text{m}$ pitch and (b) $70 \times 70 \text{ mm}^2$ MS readout board with standard $500 \mu\text{m}$ pitch.

Table 1
Shorts circuit traces in readout boards.

Board	Nr of shorts	Strip number	Short percentage	Short X coordinates	Short Y coordinates
20 × 20 mm ² MS	1	67 × 67	0.746%	22	58
70 × 70 mm ² MS	0	140 × 140	0%	–	–
CERN 100 × 100 mm ²	0	256 × 256	0%	–	–

Table 2
Noise characteristic of the detector with ceramic readout boards.

Board	Channels	Avg. noise [fC]	Max noise [fC]	RMS noise [fC _{RMS}]
20 × 20 mm ² MS	X (TOP)	7.87	17.85	2.26
	Y (BOT)	10.69	26.71	4.58
70 × 70 mm ² MS	X (TOP)	6.88	13.75	2.60
	Y (BOT)	9.19	12.98	3.31
CERN	X (TOP)	4.04	22.27	1.63
	Y (BOT)	5.24	14.25	2.89

source (Ametek, USA) was used for these tests [22]. A few metal and ceramic objects were placed onto the detector's polyimide window, and the X-ray source was mounted above the detector at a 110 mm distance. The gas mixture and High Voltage value were the same as for the electrical measurements. Radiographs were done during the 3 h of X-ray irradiation. Please note that COOL-X emission is pulsed, so only for 20% of the time the X-rays are generated. The characteristic energies for this tube are 8.05 keV (Cu) and 8.14 keV (Ta). The effective gain is defined as $M/(N_p q_e)$, where M is the mean charge value at ADC, N_p is the number of primary electrons, and q_e is an electron charge [23–25]. The calculated effective detector gain was around 60,000 times. Radiographs acquired using the first design of 20 × 20 mm² readout, the new 70 × 70 mm² board, and the CERN 100 × 100 mm² readout are presented in Fig. 8(a), (c), and (e) respectively. Fig. 8(b), (d), and (f) show test objects that were placed onto the detector for each measurement. For a better comparison between images, the objects on 100 × 100 mm² board were placed in the middle of the active area and radiograph edges were cropped to 70 × 70 mm². The same metal key was X-rayed in all measurements. The picture quality of the radiograph measured with an optimized 70 × 70 mm² readout board is clearly superior compared to the 20 × 20 mm² one. The edges of the objects are sharp, and the contrast between the objects and the background is at a good level. The quality and sharpness of the radiographs acquired on the new LTCC board are nearly the same compared to the state-of-the-art CERN

readout. The few dark and very bright lines are visible on all pictures, however, they are related to hot pixels – places where discharges occur spontaneously at a high rate. The two most common causes for that phenomenon are the dust particles on GEM foil and imperfections in GEM foils themselves. Those lines are not related to readout board defects.

Using raw data from the radiographs measurements, the charge distribution between the top and the bottom lines was calculated. This parameter is critical for detector performance because when is very ununiform, the low energy event will pass the detection threshold on X-axis but not on Y, in result the event will not be reconstructed. The detector counts each photon separately, so the charge for each event can be measured. The histograms of the event's energy were done separately for the X and Y lines. Next, the part of the histogram that contains data from events (the right part of the histogram) was fitted with the Gaussian function. The histograms with Gaussian approximation are presented in Fig. 9. The center of the Gaussian function corresponds to the mean charge value of the events that have been collected by X or Y strips. From Gauss centers, the total charge of events and its distribution between X and Y lines can be calculated. The calculated charge distribution values are presented in Table 3. The charge distribution in 20 × 20 mm² LTCC readout was 89.4–10.6%, which is not a good result. The charge in 70 × 70 mm² board is almost evenly distributed between X and Y lines. The 54.4–45.6% ratio is very close to optimal, so even low energy events will pass the detection limit on the X and Y-axis. The charge distribution measured with CERN readout shows almost the same values as for the 70 × 70 mm² LTCC readout board. The major improvement can be seen compared to the first design of the readout board.

4. Conclusions

In this paper, we demonstrated the 2D readout with an active area of 70 × 70 mm², manufactured in LTCC technology, which is suitable for micro-pattern gas detectors (MPGD). The presented results show a big improvement in comparison to previously reported devices [15]. The

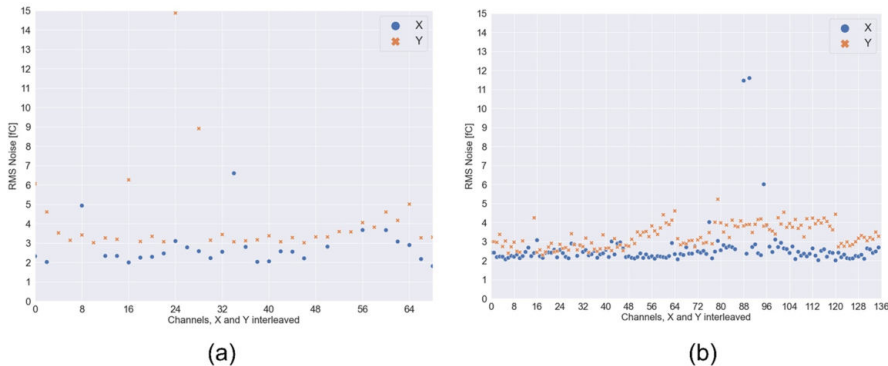


Fig. 7. The RMS noise values for each channel of tested readout boards: (a) 20 × 20 MS; (b) 70 × 70 MS readout board.

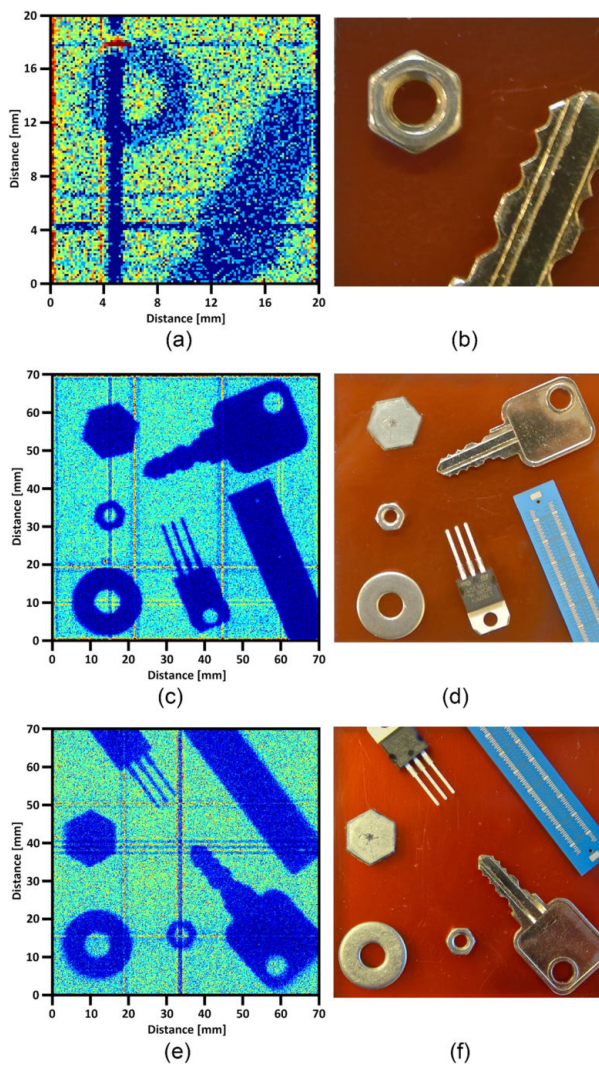


Fig. 8. The test radiographs measured on the LTCC readouts: (a) radiograph measured on $20 \times 20 \text{ mm}^2$ MS board; (b) objects placed on the detector for $20 \times 20 \text{ mm}^2$ board tests; (c) radiograph measured on $70 \times 70 \text{ mm}^2$ MS board; (d) objects placed on the detector for $70 \times 70 \text{ mm}^2$ board tests; (e) radiograph measured on CERN $100 \times 100 \text{ mm}^2$ MS board; (f) objects placed on the detector for CERN $100 \times 100 \text{ mm}^2$ board tests.

new manufacturing process results in no visual defects or short-circuits between lines. The noise level has been significantly lowered and the charge distribution between X and Y lines is equalized. The quality of the reconstructed radiograph is very good and can be compared to the radiographs measured with standard polyimide readout boards. The pictures are very similar, however, small differences can be seen in Fig. 8.

The optimized LTCC readout board has connectors soldered directly to the ceramic substrate, so there is no need to use any PCB adapters. Moreover, using ceramic-based GEM foils [8] on ceramic frames and presented LTCC readouts, there is possible to manufacture the monolithic GEM detector without any polymer materials inside the gas box. Utilization of only the metal and ceramic materials in a GEM detector

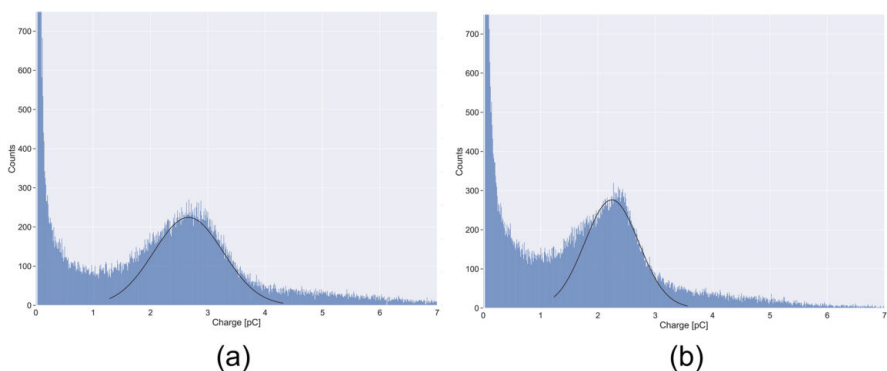


Fig. 9. The Gaussian approximation of events charge distribution for 70 × 70 mm MS board: (a) Top strips; (b) Bottom strips.

Table 3
Charge distribution between the top and bottom electrodes of the ceramic readout boards.

Board	Channels	Gauss center [pC]	Total charge [%]
20 × 20 mm ² MS	X (TOP)	4.11	89.4
	Y (BOT)	0.49	10.6
70 × 70 mm ² MS	X (TOP)	2.66	54.4
	Y (BOT)	2.23	45.6
CERN 100 × 100 mm ²	X (TOP)	1.48	56.3
	Y (BOT)	1.15	43.7

will significantly reduce outgassing, so the gas mixture will remain at a required purity for a longer time. The prolonged lifetime of the hermetically sealed GEM detector is beneficial, especially for space applications, for example, in form of CubeSats.

CRedit authorship contribution statement

Conception and design of study: M. Babij, A. Dąbrowskia, M. Czoka, , W. Nawrota; acquisition of data: M. Babij, P. Bielówkaa, A. Dąbrowskia; analysis and/or interpretation of data: M. Babij, P. Bielówkaa, K. Malechaa; drafting the manuscript: M. Babij, P. Bielówkaa, A. Dąbrowskia; revising the manuscript critically for important intellectual content: W. Nawrota, M. Czoka, K. Malechaa. Approval of the version of the manuscript to be published: M. Babij, P. Bielówkaa, A. Dąbrowskia, W. Nawrota, M. Czoka, K. Malechaa.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education, within the Implementation Doctorate program (grant no. DWD/4/5/2020; DIR.ZPSW.62.77.2020).

References

[1] CubeSat Design Specification Rev. 14, The CubeSat Program, Cal Poly SLO. (<https://www.cubesat.org/cds-announcement>) (accessed on 7 March 2022).

[2] L. Shekhtman, Micro-pattern gaseous detectors, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 494 (2002) 128–141.

[3] M. Titov, L. Ropelewski, Micro-pattern gaseous detector technologies and RD51 collaboration, *Mod. Phys. Lett. A* 28 (2013), 1340022, <https://doi.org/10.1142/S0217732313400221>.

[4] A. Bondar, A. Buzulutskov, F. Sauli, L. Shekhtman, High- and low-pressure operation of the gas electron multiplier, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 419 (1998) 418–422, [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)00817-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)00817-1).

[5] Standard GEM Assembly V2. (https://franchin.web.cern.ch/franchin/MPDG/GEM_assembly_DRAFT.pdf) (accessed on 7 March 2022).

[6] I. Wolff, C. Günner, J. Kassner, R. Kulke, P. Uhlig, New Heights for Satellites: LTCC Multilayer Technology for Future Satellites, *IEEE Microw. Mag.* 19 (2018) 36–47, <https://doi.org/10.1109/MMM.2017.2759599>.

[7] I. Wolff, R. Kulke, T. Klein, LTCC: A Space Qualified Integration and Packing Technology for Millimeter-Wave Systems WFA: Integration and Technologies for mm-Wave Sub-Systems, In *Proceedings of the Workshop Presentation of the 2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Montreal, QC, Canada, 17–22 June 2012.

[8] K. Komiya, Y. Takeuchi, M. Wakabayashi, K. Fujiwara, S. Kono, H. Hamagaki, T. Tanagawa, Development of Gas Electron Multiplier by Applying Technique of Low Temperature Co-Fired Ceramics, *J. Jpn. Soc. Precis. Eng.* 84 (2018) 936–940, <https://doi.org/10.2493/jispe.84.936>.

[9] A. Bressan, R. De Oliveira, A. Gandi, J.-C. Labbé, L. Ropelewski, F. Sauli, D. Mörmann, T. Müller, H.J. Simonis, Two-dimensional readout of GEM detectors, *Nuclear Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* 425 (1–2) (1999) 254–261, [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01405-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01405-3).

[10] CERN patent W003055288 for Micro-Chemical-Vias technology. (<https://kt.cern/technologies/micro-chemical-vias>) (accessed on 7 March 2022).

[11] G. Bencivenni, G. Felici, F. Murtas, P. Valente, W. Bemivento, A. Cardini, A. Lai, D. Pinci, B. Saltta, C. Bosio, A. Triple, GEM detector with pad readout for high rate charged particles triggering, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 488 (2002) 493–502, [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)00515-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)00515-6).

[12] The TOTEM experience with triple GEM Totem T. (<https://indico.cern.ch/event/182546/contributions/316408/attachments/247716/346502/TOTEMExperience.pdf>) (accessed on 7 March 2022).

[13] A. Zhang, M. Hohlmann, B. Azmoun, M.L. Purschke, C. Woody, A GEM readout with radial zigzag strips and linear charge-sharing response, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.* 887 (2018) 184–192, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.12.074>.

[14] V.N. Kudryavtsev, T.V. Maltsev, L.L. Shekhtman, Study of GEM-based detectors spatial resolution, *J. Phys. Conf. Ser.* 1498 (2020), 012005, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1498/1/012005>.

[15] A. Dąbrowski, W. Nawrota, M. Czok, M. Babij, P. Bielówkaa, K. Malecha, LTCC Strip Electrode Arrays for Gas Electron Multiplier Detectors, *Sensors* 22 (2) (2022) 623, <https://doi.org/10.3390/s22020623>.

[16] Y. Imanaka, Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) Technology: Chemistry and Materials Science 2005-2008, Springer Science & Business Media, 2006. ISBN 0387233148, 9780387233147, Springer ebook collection.

[17] L.J. Golonka, Technology and applications of Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC) based sensors and microsystems, *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.* 54 (2) (2006) 221–231.

[18] DuPont GreenTape™ 951 Low Temperature Co-fired Ceramic Material System (<https://www.dupont.com/content/dam/duPont/amer/us/en/transportation-industrial/public/documents/en/GreenTape-951-Product-Selector-Guide.pdf>).

[19] Hirose Global - FX10 Series connector specification (<https://www.hirose.com/en/product/plc0570-0004-3-71#>).

M. Babij et al.

- [20] S. Franchino, GEM and Micromegas standard detectors, In Proceedings of the International Workshop on Advanced Detectors (IWAD) and RD51 Collaboration Meeting, Kolkata, India, 29–31 October 2014.
- [21] GEM-Based Detector (<https://techtra.pl/en/technology/gem-based-detector/>) (accessed on 26 January 2022).
- [22] Amptek COOL-X documentation (<https://www.amptek.com/-/media/ametekamptek/documents/products/specs/retired/cool-x-pyroelectric-x-ray-generator-specifications.pdf?la=en&revision=0c2b8dfb-58e1-42e4-a8f9-48a9c44c2824>).
- [23] R.N. Patra, R.N. Singaraju, S. Biswas, A. Zubayer, T.K. Nayak, Y.P. Viyogi, Measurement of basic characteristics and gain uniformity of a triple GEM detector, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 862 (2017) 25–30.
- [24] F. Sauli, The gas electron multiplier (GEM): Operating principles and applications, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 805 (2016) 2–24.
- [25] A. Ahmed, A. Kumar, Md Naimuddin, M. Babij, P. Bielowska, The qualification of GEM detector and its application to imaging, J. Instrum. 17 (2022), P04002.

Arkadiusz Dąbrowski received PhD and M.Sc in electronics from Faculty of Microsystem, Photonics and Electronics at Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, Poland. Currently, he is a researcher and lecturer at the same Faculty. His research relates to applications of LTCC and thick-film technologies in sensors, high voltage and high

Sensors and Actuators: A. Physical 342 (2022) 113656

power devices as well as investigation of thick-film materials properties in nonstandard conditions.

Mateusz Czok was born in Poland in 1985. He received his MSc degree in electronics and telecommunication from the Wrocław University of Science and Technology, Poland in 2009. He began his PhD studies at the same university in 2010. His research activity is focused on the development of miniature sensors for biological and medical applications utilizing optical detection made of low temperature co-fired ceramics (LTCC). Currently he is employed at the Faculty of Electronics Microsystem and Photonics, Wrocław University of Science and Technology, where he is a specialist in the field of microelectronics, sensors and fluidic microsystems.

Karol Malecha received his MSc degree in material science engineering from the Wrocław University of Science and Technology, Poland in 2005. In 2009 and 2014 at the same University he received a Ph.D. and habilitation degrees in electronics, respectively. Currently, he is employed at the Division of Microsystems, Wrocław University of Science and Technology as a full professor, where he is involved in the modeling and manufacturing of various microsystems made with LTCC technology.

The qualification of GEM detector and its application to imaging

A. Ahmed, A. Kumar, Md. Naimuddin, **M. Babij**, P. Bielówka

Journal of Instrumentation, Volume 17, April 2022,

Samodzielny wkład autora rozprawy w powstanie tej publikacji polegał na:

- wykonaniu elektronicznego układu pomiarowego do detektora GEM,
- konsultacjach dotyczących obsługi detektora,
- udziale w analizie danych pomiarowych, których wyniki wykorzystano w publikacji,
- udziale w redakcji treści publikacji.

Łączny udział autora rozprawy wynosi 20%.



PUBLISHED BY IOP PUBLISHING FOR SISSA MEDIALAB

RECEIVED: December 23, 2021

REVISED: February 16, 2022

ACCEPTED: March 14, 2022

PUBLISHED: April 5, 2022

The qualification of GEM detector and its application to imaging

A. Ahmed,^{a,*} A. Kumar,^a Md. Naimuddin,^a M. Babij^{b,c} and P. Bielowka^{b,c}

^aDepartment of Physics & Astrophysics, University of Delhi,
Delhi, India

^bTTA Techtra Ltd,
Wroclaw, Poland

^cDepartment of Microsystems, Faculty of Electronics, Photonics and Microsystems, Wroclaw University of
Science and Technology,
Wroclaw, Poland

E-mail: asar0786@gmail.com

ABSTRACT: The Gas Electron Multiplier (GEM) is a new age detector, which can handle the high flux of particles. The GEM foil, which is constructed using 50 μm highly insulating foil (Kapton/Apical) coated with 5 μm layers of copper, on both sides, with a network of specifically shaped holes is the major component of these detectors. The European Center for Nuclear Research (CERN) has been the sole supplier of the GEM foils until recently when a few other companies started manufacturing GEM foils under the transfer of technology (TOT) agreement from CERN. Techtra is one such company in Europe which gained a right to use CERN developed technology in order to produce commercially viable GEM foils. Micropack Pvt. Ltd. is another company in India which has successfully manufactured good quality GEM foils. Due to the microscopic structure of holes and dependence on the electric field inside, it becomes essential to study the defect and uniformity of holes along with the electrical property of foils under ambient conditions. In this work we are reporting the tests condition of Techtra GEM foils. We report on the development of a cost effective and efficient technique to study the GEM foils holes geometry, distribution, and defects. We also report on the electrical properties of these foils like leakage current, stability, and discharges. At the detector level, we describe the high voltage (HV) response, gain, uniformity, and stability. The GEMs have been proposed to have a wider applications, so we performed a feasibility study to utilize these for the imaging. We irradiated various objects of varying density with X-rays and reconstructed the images. The reconstructed image shows a good distinction between materials of different densities, which can be very useful in various applications like medical imaging or cargo imaging.

KEYWORDS: Gaseous imaging and tracking detectors; Gaseous detectors; Micropattern gaseous detectors (MSGC, GEM, THGEM, RETHGEM, MHSP, MICROPIC, MICROMEGAS, InGrid, etc)

*Corresponding author.

Contents

1	Introduction	1
2	Optical assessment	2
3	Electrical Assessment	3
4	GEM Detector Performance	6
4.1	Detector characteristics	6
4.1.1	High voltage stress test	7
4.1.2	Gain measurement	7
4.1.3	Gain stability	8
4.1.4	Gain uniformity	10
5	Imaging with GEM	11
5.1	Object identification & measurement	12
6	Conclusions	13

1 Introduction

F. Sauli in 1997 [1] gave the concept of GEM to overcome the high flux rate handling and spatial resolution in other gaseous detectors. GEM foils consist of a 50 μm thin Kapton foil coated with 5 μm thin layer of copper on both sides. Bi-conical holes with 40–60 μm inner and 60–80 μm outer diameters are chemically etched in the foil at a pitch of about 140 μm by using either a double mask [2] technique. GEM foils have attracted significant interest from the nuclear and particle physics communities, as they are excellent candidates to be used in a high flux environment

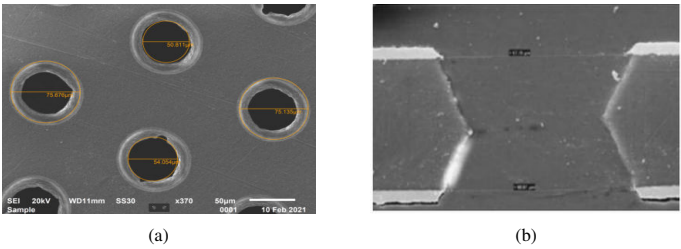


Figure 1. (a) Top view of the GEM foil using SEM, (b) Cross-sectional view of the foil showing the double cone structure of the engraved holes.

as a tracking detectors. This detector technology has been used successfully as a tracking detector in many experiments, such as STAR [3], LHCb [4], TOTEM [5], COMPASS [6], CMS [7] and ALICE [8], and is expected to be used in many future experiments and their upgrades. Until now, CERN was the main producer of small as well as large area GEM foils. Various companies like Micropack (India) [9], Techtra (Poland) [10], Mecaro (South Korea) [11], etc, have also succeeded in producing GEM foils with both double-mask and single-mask technology. Generally, foil production begins with substrate preparation (5 μm copper is coated on either side of 50 μm PI (Apical Type NP/Kapton film), photo-resistive coating (15 μm thick photo-resistive layer is applied on both sides of the substrate), masking (a hole patterned mask is placed on the top or either side of the substrate), UV- light exposure to transform hole pattern to the substrate and several solvents and acid bath ends with the final GEM holes pattern in the foil. Double mask technology has the limitation of mask alignment problem for larger foils but has good control over small size foils, while for larger foils a minor misalignment of the mask can propagate the error to the whole foil. The single-mask technique overcomes the rigorous practice of alignment of two masks and allows the production of foils with a large area. However, the holes obtained with refinements in the single-mask technique are asymmetrically bi-conical [12] in shape, discussed in section 2, compared to symmetrically bi-conical holes from double-mask technology. In order to qualify these GEM foils as commercially and scientifically reliable, several quality control tests needs to be performed. In this paper, we will describe the technique used for foil qualification, details of the quality control tests, and various characterization studies performed on three Techtra GEM foils for them to be used in GEM detectors for various applications such as imaging or scanning for commercial purposes.

2 Optical assessment

The quality of GEM foil, i.e., hole geometry [13], pattern, and flaws, has a significant impact on the performance of GEM detectors. The charge multiplication and charging up phenomenon is influenced considerably more by hole size and pitch [14]. There are roughly 600k holes in a 10 cm $\times$ 10 cm GEM foil with a surface hole diameter of 70 μm and a pitch of 140 μm . Any asymmetry or faults in the hole pattern and its shape can have a direct impact on the foil's performance, and thus the detector's performance. As a result, it's critical to investigate the geometry of holes, imperfections, and contaminants on foils that can lead to foil failure. Although there are many pricey optical microscopes available to see through these minuscule holes, we focused on designing a cost-effective and flexible optical study system. Figure 2 depicts the flow diagram for the optical measurement setup.

We used a 10 cm $\times$ 10 cm GEM foil and protected it from exterior interactions by sandwiching it between two 2 mm glass plates. To take photos, a 100-cell array of 1 cm $\times$ 1 cm was drawn on a glass plate. Each cell was imaged using a digital microscope with magnification ranging from 40X to 1000X. Both sides of the GEM foil were photographed with correct adjustments. To take photos of inner hole geometry, the foil is illuminated from the reverse. All of the photos were then analysed in MATLAB [15], using an algorithm to locate circles and their centres in 2D, as well as determine the diameter and pitch in pixels for each hole in the image. Specifications from SEM pictures were used to calibrate the pixel data and ROOT [16] was used to create histograms using data from all 100 cells in pixels and error of one standard deviation is used to quote the result. As illustrated in figures 3 & 4, the top and bottom hole mean diameters observed on copper estimated using Gaussian

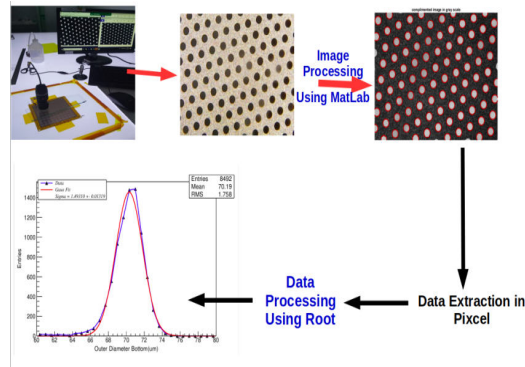


Figure 2. Flow diagram of the setup used for the optical measurements.

fit are $73.98 \pm 2.28 \mu\text{m}$ and $65.42 \pm 2.84 \mu\text{m}$ respectively, whereas the inner diameter in Kapton is $53.37 \pm 1.42 \mu\text{m}$ and $50.78 \pm 0.96 \mu\text{m}$. The optical measurement yielded a pitch of $140.0 \pm 1.4 \mu\text{m}$. These measurements reveal the asymmetrical nature of the bi-conical hole, which is caused by the single mask approach, in which the top layer serves as a mask for the bottom layer and is subjected to chemical etching for a longer period of time than the bottom layer.

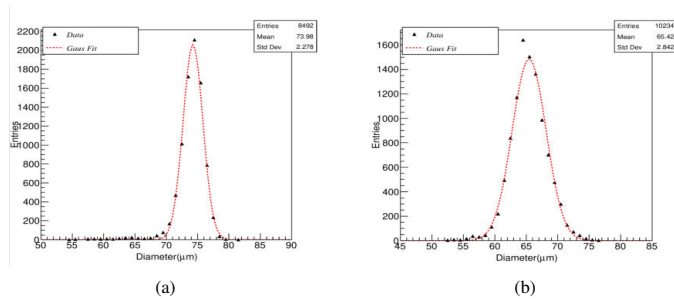


Figure 3. Outer hole diameter distribution in copper (a) top, (b) bottom.

3 Electrical Assessment

The optical test reveals the hole geometry, pitch, and imperfections in the foils, whereas the electrical test reveals leakage current, cleanliness, and the capacity to tolerate high voltage without sparking. The foils were tested in a cleanroom of class 100 [17] for a rapid inspection after being properly cleaned with an adhesive roller and an insulation tester MIT Megger 420 [18], which checks conductivity/impedance. At a potential difference of 550 V, room temperature of 21°C, and relative

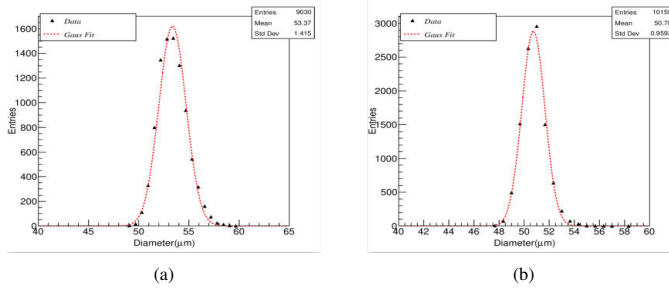


Figure 4. Inner hole diameter distribution in Kapton (a) top, (b) bottom.

humidity of 50%, all three foils required for detector assembly showed impedance of more than 100 GΩ and leakage current less than 1 nA. The current should not fluctuate over time in order for the GEM foils to perform better, as this will impact the potential difference across the foil, and hence the electric field inside the holes. This can only be established by continuously measuring its leakage current in a well-controlled environment for a prolonged period of time. For this test, foils were put in an isolated enclosure with nitrogen flushing to manage humidity and temperature, as well as a temperature and humidity monitoring system. A KANOMAX [19] dust particle counter Model 3887 was used to keep track of the particle count. Keithley 6517B [20] multimeter was utilised for higher precision in current measuring. Keithley software was used to record the measurements, which consisted of a bare GEM foil driven by a Keithley 6517B electrometer connected to the computer through a GPIB interface. With an accuracy of $\pm 0.2\%$, the current measurement range was set from 0 to 20 nA.

Foils were tested at a temperature of 21°C and a relative humidity of 30% while being applied a voltage of 300 V to 600 V in 100 V/h steps. As demonstrated in figure 5, all three foils performed similarly, with leakage currents under 1 nA and no visible discharges. One of the foils was tested for a total of 5 hours at 600 V under the same conditions for the longer duration test. Figure 5(d) demonstrates that leakage current reduces from 1.983 nA to 0.713 nA ($\sim 64\%$ change) in the first half hour, then decreases to 0.694 nA ($\sim 3\%$ change) in the second half hour, and then remains constant for the remaining measurement time. CERN and Micropack foils [21] had similar results.

At a fixed high voltage of 600 V, more tests were conducted to see how leakage current varied with temperature and humidity. Two sets of data were gathered, one with altering temperature and the other with varying humidity while all other parameters were held constant. Figure 6 illustrates how GEM foils are extremely sensitive to humidity and temperature, causing leakage current to grow linearly with temperature and exponentially with relative humidity (RH). Leakage current should be less than 1 nA, which translates to a temperature of roughly 20°C and a relative humidity of around 25% for better performance and stability of the detector.

Avalanche development and signal production are influenced by the capacitance of GEM foils and the overall GEM detector. As a result, a single foil is examined to see how capacitance reacts to changes in the environment. Temperature, humidity, and capacitance of the foil are measured and three sets of data are obtained. The capacitance of GEM foil varies with humidity and temperature,

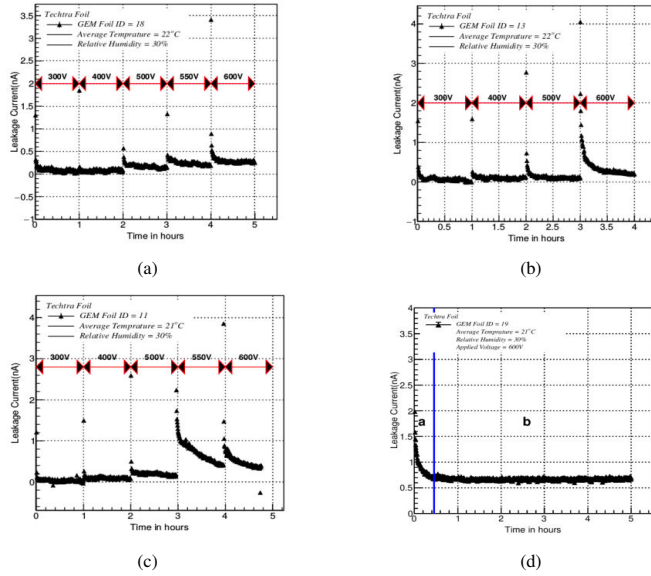


Figure 5. Leakage Current of Techtra GEM. (a) First foil, (b) second foil, (c) third foil, (d) longer duration test at 600 V, at average temperature of $T = 21^\circ\text{C}$ and relative humidity of 30%.

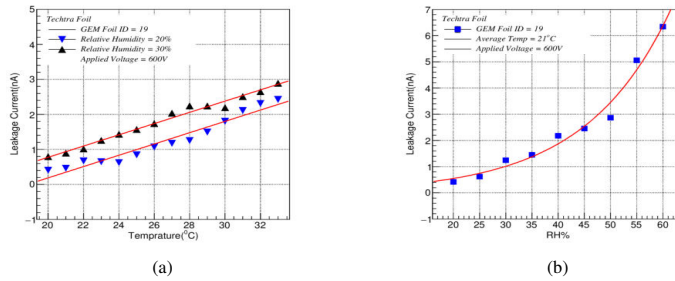


Figure 6. Leakage current in dry nitrogen environment at 600 V: (a) Varying temperature and fixed RH. (b) Varying RH and fixed temperature. The fit shows the linear behavior of leakage current with temperature while exponential behavior with RH.

as seen in figure 7. Table 1 demonstrates that capacitance and relative humidity have a strong positive correlation, while capacitance and temperature have a moderate negative correlation. GEM foil is particularly sensitive to humidity, as the correlation coefficient reveals. This is due to moisture from

the gas mixture accumulating on the foil’s surface and inside the hole, which increases capacitance and leakage current. Any change in the capacitance of the foils causes a change in the electric field inside holes, which might impact the detector’s gain. Temperature, on the other hand, has a modest effect on both capacitance and leakage current.

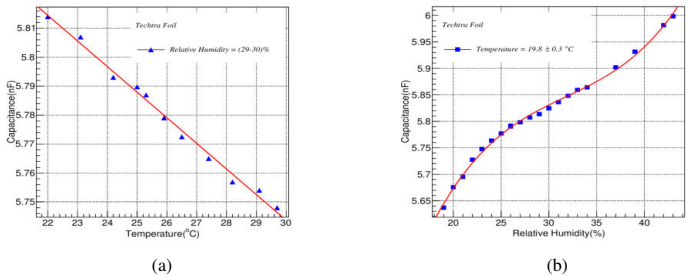


Figure 7. Capacitance variation with: (a) Temperature and fixed RH (29–30)%, (b) RH and fixed temperature ($19.8 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$). It can be seen that capacitance varies linearly with negative slope for temperature, however fit to the other graph shows cubic dependency over RH if other parameters remain fixed.

Table 1. Correlation coefficient.

	Temperature	Relative Humidity	Capacitance
Temperature	1	−0.081	−0.091
Relative Humidity	−0.081	1	0.877
Capacitance	−0.091	0.877	1

4 GEM Detector Performance

The prototype GEM detector with 3/1/2/1 (mm) gas gap [12] is assembled using three fully tested 10 cm × 10 cm GEM foils, a drift foil (only one side copper plated), and a two-dimensional (2D) readout (RO) board. The 3 mm gap between the drift foil and the first GEM foil, 1 mm gap between the first and second GEM foils, 2 mm gap between the second and third foils, and 1 mm gap between the third foil and the readout board are all part of this gap

A voltage divider [22] network is used to power up the GEM foils and drift foils through a single high voltage (HV) power supply. Each foil is protected using 10 MΩ resistors against excess current during possible discharges or sparks produced during the operation.

4.1 Detector characteristics

The type of gases utilised and the voltage difference across the electrodes have a big impact on how a gas detector behaves. The performance of the detector is also affected by the humidity, temperature, and impurity in the flushing gas. The first test as explained in section 4.1.1 was performed to see the

2022 JINST 17 P04002

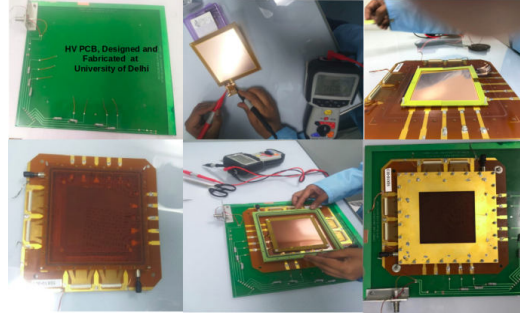


Figure 8. Detector components and assembly procedure for 10 cm $\times$ 10 cm GEM detector.

detector response towards high voltage and fake signal (signal not coming from primary ionization). The gain calibration is explained in section 4.1.2, in section 4.1.3 we explained stability while the uniformity of the detector is discussed in section 4.1.4.

4.1.1 High voltage stress test

Using a 4.7 M Ω HV divider and 0.3 M Ω HV filter, high voltage was applied to the detector to power it. The CMS-GEM community [7] uses a 4.7 M Ω HV divider for a 3/1/2/1 (mm) gap configuration for a triple-layered GEM detector. The detector was flushed with non-amplifying gas, such as CO₂, at a flow rate of 3.0 ℓ/h before powering up, and the detector's total impedance was measured to be 5.01 M Ω . After minimising electrical noise and stabilising gas flow, the detector was powered up in steps of 100 V to 5000 V using a CAEN-N1471 [23] power supply, and the corresponding divider current was recorded together with a fake signal count from the bottom of the last GEM foil towards readout. The spurious signal rate, which is defined as the rate of signals that do not originate from the ionisation of the gas, is computed from these counts. These spurious signals are caused by fluctuations in the HV power line or the GEM foil surfaces. The detector exhibits ohmic behaviour during operation, as shown in figure 9(a). The rate of the spurious signal grows as the voltage across the detector is increased, as shown in figure 9(b), with the maximum spurious signal rate measured about 2.8 Hz at a divider current of $\sim 1000 \mu A$ or 5000 V.

4.1.2 Gain measurement

The gain of a gaseous detector is defined as the ratio of the final number of electrons produced in the avalanche to the number of primary electrons n_0 produced in the drift gap when photon or any charged particle passes through it. This formulation expresses an absolute gain that is difficult to quantify in an actual detector such as the GEM. Indeed, in the case of the Triple-GEM detectors, a number of mechanisms can result in electron loss. Electrons can be collected on copper or Kapton in GEM foils. The so-called transparency [24] is a term for these losses. The likelihood that an electron will enter and exit a GEM hole is defined as the transparency of the GEM foil. The degree of transparency is determined by a number of factors, including the hole distribution in the foil, the

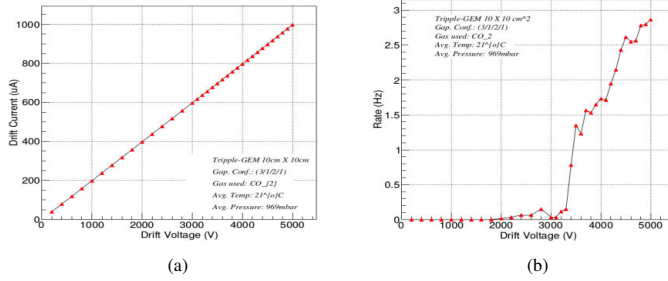


Figure 9. (a) The I-V characteristics of the detector, and (b) shows the variation of spurious signal rate obtained from GEM3 bottom as a function of the divider voltage

gas mixture, the voltage across the drift gap, and the voltage across the GEM foils, etc. Because of this, we only assess the effective gain of a Triple-GEM detector, which is defined as G_{eff} :

$$G_{\text{eff}} = \frac{n_{\text{eff}}}{n_0} = \frac{I_{\text{eff}}}{I_0} = \frac{I_{\text{eff}}}{e \cdot n_0 \cdot R} \quad (4.1)$$

where n_{eff} (I_{eff}) is the number of electrons (effective current) inducing a signal on the anode plane, e is the charge on the electron and R is the rate measured for the incoming particles (photons). To estimate the gain, n_{eff} or I_{eff} must be measured and n_0 estimated. The n_0 is known since the gain measurement relies on the source used. We used the AMPTEK Mini-X Silver target [25] as a source with a well-known energy spectrum. The main emission of the Ag target at 40 kV is 22.8 keV [25]. The number of primary electrons created in the drift region for Ar-CO₂ (70:30) mixture is ~ 346 while operating X-rays at a voltage of 40 kV and current of 5 μA which is nicely quoted in [22]. The output current (I_{eff}) is measured using Keithley Electrometer Model 6517B. For rate (R) measurement detector output is read out using a charge sensitive pre-amplifier (ORTEC 142IH) [26] whose output is sent to an amplifier plus shaper (ORTEC 474) [27] unit followed by a discriminator. The resulting digital pulses from the discriminator (CFD-ORTEC 935) [28] are fed to a scaler unit, and the rate plateau is obtained by ramping up the detector slowly using HV source. Before performing the actual measurement, the detector is flushed with Ar-CO₂ gas mixtures in a 70:30 ratio at 3.0 ℓ/h and left to flush for at least 2 hours. Figure 10(a) red curve shows the rate R measured as a function of the divider current at 100 mV of discriminator threshold, while the blue marker along with the error bar shows the effective gain measured on a logarithmic scale as a function of divider current. Figure 10(b) shows the comparison plot of effective gain in Ar-CO₂ ratio of 80:20, 70:30, and 60:40.

4.1.3 Gain stability

Gain stability is an extremely important parameter for the successful performance of GEM detectors over a long period of time, since time resolution, spatial resolution and efficiency are heavily reliant on the gain [1]. Even small fluctuations in gain can have a significant impact on these parameters. While keeping the detector at a constant 700 μA of divider current and X-ray flux constant over the period of time we observed variations in gain and stability over the course of 30 hours. In

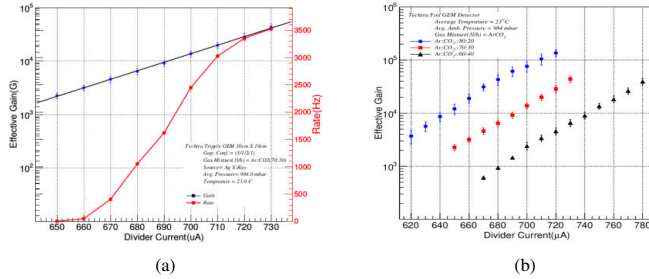


Figure 10. (a) Shows the gain of the detector with rate, and (b) shows the gain variation with three different Ar and CO₂ mixture, as a function of the divider current.

previous study we have seen the flux has almost no impact on the gain of the detector [12, 29] when it becomes stable after few hours. Figure 11 illustrates the changes in gain over time. After an

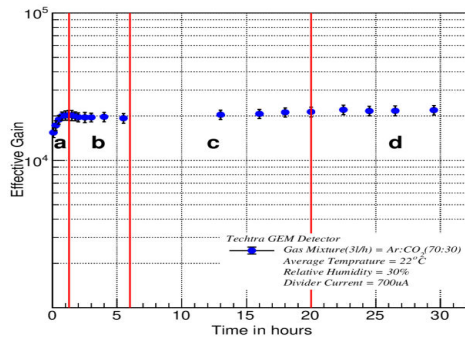


Figure 11. Effective gain stability curve with time. Plot is divided in four regions to compare the change in gain with time where it shows significant rise of 30% in first one hour.

hour, the gain increases by 30%, and in the subsequent 17 hours, it increases by 2.6% with small variations, and the gain remains stable for the last 12 hours. Variations in gain for the first hour can be linked to charging up phenomena caused by avalanche charge deposition on the GEM foils [30] this charging up is also seen in the foil's leakage current test. Gain during the next 17 hours, on the other hand, is linked to the GEM foil's polarisation phenomenon, which is well understood and can be found elsewhere [31]. For constant incoming photon flux, a similar trend in rate (7.5 kHz to 9.4 kHz) and detector current (6.4 nA to 10.5 nA) is seen over first one and half hour of time, leading to the conclusion that the detector is less efficient in the early hours and reaches its maximum and stable plateau after a few hours or complete charging of foils.

4.1.4 Gain uniformity

The usage of the GEM detector for imaging is one of the significant studies presented in this work. The detector's response must be uniform within an acceptable uncertainty to meet this criteria. A non-uniformity test was carried out in order to determine the detector's response independently. As illustrated in figure 12(a), the detector was split into 100 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ sectors in the XY plane. The X-ray source was then focussed at the centre of each cell using a suitable collimator. To radiate a single sector, a 6 mm thick copper shield with a single hole is utilised to cover the whole detector, as illustrated in figure 12(b), preventing radiation from reaching other areas. Figure 13(a) illustrates the

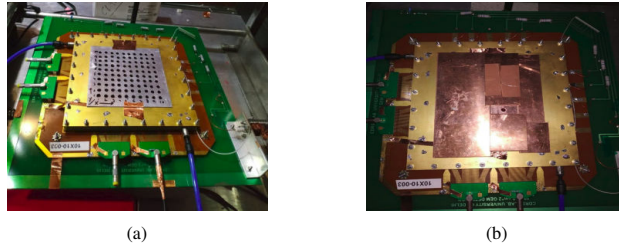


Figure 12. (a) Shows the setup for detector uniformity measurements, and (b) shows the single cell exposer using 6mm thick copper shielding.

effective gain map for each sector of the GEM detector at the divider current of $710\text{ }\mu\text{A}$. The effective gain is observed to be higher at the corners of the detector while slightly lower in the middle. The histogram shown in figure 15 is filled with the mean effective gain value from each sector and fitted with Gaussian function. The mean and sigma from the fit is found to be 1.598×10^4 and 0.092×10^4 respectively. These values are used to calculate the non-uniformity of the detector using σ/μ which came out to be 5.76% which is within an acceptable range for our requirements. The non-uniformity of gain throughout the whole surface of the GEM detectors is due to a number of reasons. This

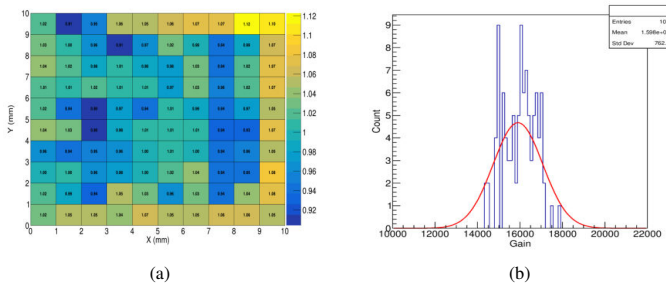


Figure 13. (a) Gain uniformity map of the detector using 2D histogram, and (b) shows the 1D histogram of 100 cells fitted using Gauss function.

includes variations in gas gaps caused by inaccuracy in stretching, GEM foil quality, non-uniformity or imperfections in holes over the foil region, and so on. Similar behavior of gain uniformity have been observed with the detector using CERN and Micropack GEM foils [22].

5 Imaging with GEM

The spatial and time resolutions of GEM detectors are well-known. These characteristics, together with their high flux handling capability, make them ideal candidates for imaging detector applications. Several attempts to evaluate the imaging capabilities of these detectors have been performed in the past [32, 33]. We did a detailed investigation for imaging utilising our built-in GEM detector using Tectra and Micropack foils to better evaluate its imaging capabilities. A completely tested GEM detector with all known parameters was employed for this purpose. As illustrated in figure 8, the 2D readout board contains 256 strips with a 0.39 mm pitch along the X and Y axes. To readout the signals, the RO board is attached to four Panasonic male connectors with 128 channels. To gather the charge from the readout at 6k samples/s, a 256 channel Tectra GEM board [34] is utilised, with two successive strips packaged together to make it compatible with the readout circuits. Four DDC24 [35] 20 bit 64 channels current input analogue to digital converter (ADC) make up the GEM readout electronics board. It has a Xilinx Spartan-3 FPGA for controlling the numerous components, as well as a communication module that allows it to connect with the computer at 100 Mbps.

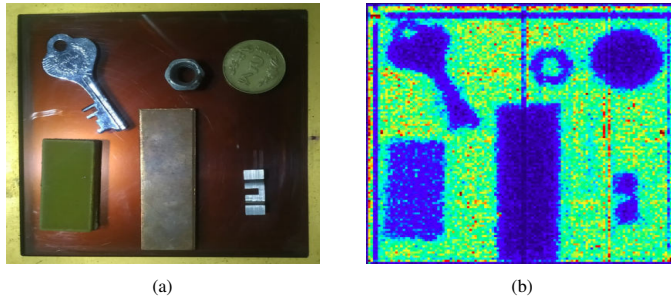


Figure 14. (a) Objects of different materials under scan and (b) reconstructed image of the scanned objects.

The detector was flushed with Ar-CO₂ (70:30) gas mixture at 2ℓ/h, and powered up to set the gain of $\sim 10k$. X-ray source was tuned to operate at 5.0 kHz. The detector hardware is provided with dedicated software for detector control and data acquisition. The amplifier settings such as integration time were set to 200 μs and charge range up to 1.25 pC. The data is recorded in raw format, which means that picture reconstruction will require additional data processing. To improve image quality, basic cuts were made across the energy spectrum and over time. We were able to reconstruct the image as shown in figure 14(b) without any offline modifications for various objects such as copper, steel, alloys, and FR4 [36] as displayed in figure 14(a). The gain of the detector and the number of events gathered have a significant impact on the reconstructed image quality. With 20

thousand events or 10.24 million subevents,¹ Figure 14(b) has been reconstructed. The limited data is due to the problem in the X-ray, which heats up after few minutes of operation and needs to be switched off. This limitations will be sorted out with a better X-ray machine. The other limitation in data taking is coming from the slow readout electronics. This can also be easily taken care of by utilizing a fast readout system in future attempts.

5.1 Object identification & measurement

Materials can be easily identified based on mass attenuation coefficient (μ/ρ) which fits in the formula $I/I_o = e^{-(\mu/\rho)x}$ [37], where x is the mass thickness and ρ is the density of the material. I/I_o have been calculated from the reconstructed image of each object for 22.8 keV of X-ray. The last column in table. 2 shows the measured values of the hit density² information (I) underneath each object. This hit is created by penetrating photons that reaches the detector volume. Figure 15(a) shows the I/I_o verses mass thickness of the material. The result displays the expected trend and classifies the difference between metallic and nonmetallic objects clearly. The object having larger thickness throws up larger uncertainty in hit information. This is due to larger scattering (coherent or Compton scattering) [38] probabilities which leads to large statistical fluctuations. Due to small size, sharp curvature, and larger thickness alongwith multiple scattering issue, the hit reconstruction with very fewer events is poor. This affects the hit density in case of Nut and Pullout which is visible in figure 15(a).

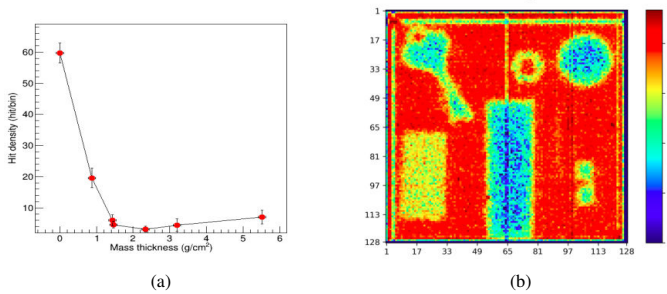


Figure 15. (a) Hit density vs mass thickness. (b) Reconstructed image on logarithmic scale.

The reconstructed image was also casted on the density scale with least to maximum density. The color of the objects provides a fair distinction between the objects of varying densities in figure 15(b). The estimation of the size of objects is obtained by measuring the object dimension in the number of bins where hit density is low. Bin size is calculated by dividing the size of RO pad (100 mm) by total number of readout channels along one axis (128), as $\text{Bin size} = 100/128 = 0.78125$ mm. This factor of 0.78125 is used to calculate the dimension of each reconstructed image. The table 3 shows the size of the reconstructed images obtained from the data and their comparison with the size measured with an electronics vernier caliper. The change in the length or diameter between the actual

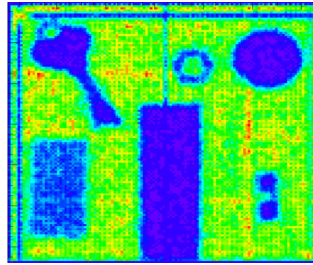
¹Here one subevents corresponds to hit on each channel of readout: 20000 events $\times$ 512 channels = 10240000 subevents.

²The number of hits per bin, this has been calculated by taking the sufficient number of bins below objects and averaging over it.

Table 2. Experimental intensity ratio table for materials used.

Material	Density (gcm^{-3})	Thick. (cm)	Mass Thickness (g/cm^2)	Hit density I (hit/bin)	I/I_o
Kapton (I_o)	1.42	0.005	0.007	59.70	1.000
FR4	1.84	0.48	0.88	19.59	0.328
Key (316)	8.00	0.18	1.44	6.03	0.101
Coin (FSS)	7.70	0.19	1.46	4.57	0.077
Copper	8.96	0.26	2.33	3.16	0.053
Pullout (316)	8.00	0.40	3.20	4.45	0.075
Nut (Iron)	7.87	0.70	5.51	7.10	0.119

dimension and the one obtained from imaging is provided in the last column. A direct correlation between the mass thickness of the object and uncertainty in its measured dimensions have been observed. The objects having larger mass thickness have a larger uncertainty as expected. This is due to the larger scattering (coherent or Compton scattering) probabilities from objects having a higher mass thickness and lateral surface exposure. Since these known effects can be easily fixed offline,

**Figure 16.** Image after bin fitting and corrections made.

therefore, an algorithm has been developed to take care of this. In this algorithm a bin wise fitting was performed to correct the sharp edge boundaries which leads to the enhancement of the quality of the image. The final image after correction obtained is shown in figure 16 and the corresponding measurement of the dimensions of the image/objects is shown in table 3. The detector constructed with Micropack or Techtra foils gives similar image reconstruction and dimension measurements.

6 Conclusions

GEM foils of $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ have been tested both optically and electrically to use them in our future experiments for imaging. The optical test reveals the uniformity in the hole pattern and found no significant defects. The mean hole diameter measured to be $73.98\text{ }\mu\text{m}$ (top) and $65.42\text{ }\mu\text{m}$ (bottom) in copper while $53.37\text{ }\mu\text{m}$ (top) and $50.78\text{ }\mu\text{m}$ (bottom) in Kapton. This asymmetry in hole diameter

Table 3. Objects size measurements and percentage change from actual values. Where abbreviations used are, A.D.: actual dimension in mm, M.T.: massthickness in g/cm^2 , B.C.: before corrections, A.C.: after corrections.

Material	A.D.	M.T.	Meaured Dimension		Change (%)	
			B.C.	A.C.	B.C.	A.C.
FR4 (L)	38.63	0.88	38.81	38.28	1.42	0.91
FR4 (W)	20.49		20.32	20.31	0.83	0.88
Key (L)	47.50	1.44	47.97	47.47	0.99	0.06
Key (W)	22.04		22.31	22.15	1.23	0.49
Coin (dia.)	23.05	1.46	23.45	23.44	1.79	1.69
Copper (L)	61.41		61.53	61.49	0.20	0.13
Copper (W)	20.1	2.33	20.61	20.09	2.53	0.05
Pullout (L)	19.03		19.49	19.14	2.42	0.58
Pullout (W)	7.15	3.20	7.41	7.23	3.63	1.11
Nut (Outer dia.)	13.16		14.82	13.28	12.61	0.91
Nut (Inner dia.)	6.50	5.51	4.80	6.25	26.15	3.85

is due to the single mask etching process. The leakage current is less than 1 nA for all the foils at the applied voltage of 600 V at 21°C, and RH of 30%. In the longer duration test, the leakage current have been found to decrease exponentially for the first hour and becomes stable afterwards. The leakage current is highly dependent upon ambient conditions; it increases linearly with temperature and exponentially with the relative humidity. The HV stress test of the GEM detector shows a good performance with a very low spurious rate. The measured effective gain and stability study shows the expected behavior. The gain uniformity of the detector is quite good with only 5.7% non-uniformity across the total area of the detector. An effort has been made to image various objects with the GEM detector. The initial results from the imaging is encouraging. All the objects of varying densities can be clearly distinguished with contrast. The dimensions of reconstructed images shows a good agreement with actual dimensions within 1% of variation for most of the objects. The studies performed in this paper is a proof of principle of successfully using GEMs for imaging objects of varying densities. In the next iteration of the study, we plan to improve the X-ray setup, the readout system, and the reconstruction algorithm to achieve a sub-millimeter resolution of the image.

Acknowledgments

We would like to acknowledge the funding agency, Department of Science and Technology (DST), New Delhi for providing generous financial support. We would also like to thank the Delhi University — Institution of Eminence (grant no. IoE/2021/12/FRP to support this work. Asar Ahmed would like to express gratitude to University Grant Commission for providing fellowship during the course of Ph.D. work, including this one.

References

- [1] F. Sauli, *GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **386** (1997) 531.
- [2] S. Duarte Pinto, M. Villa, M. Alfonsi, I. Brock, G. Croci, E. David et al., *Progress on large area GEMs*, 2009 *JINST* **4** P12009 [[arXiv:0909.5039](#)].
- [3] B. Surrow, *The STAR forward GEM tracker*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **617** (2010) 196.
- [4] M. Alfonsi, G. Bencivenni, P. De Simone, F. Murtas, M. Poli-Lener, W. Bonivento et al., *High-rate particle triggering with triple-GEM detector*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **518** (2004) 106.
- [5] S. Lami, G. Latino, E. Oliveri, L. Ropelewski and N. Turini, *A triple-GEM telescope for the TOTEM experiment*, *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **172** (2007) 231 [[physics/0611178](#)].
- [6] B. Ketzer, M. Altunbas, K. Dehmelt, J. Ehlers, J. Friedrich, B. Grube et al., *Triple GEM tracking detectors for COMPASS*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** (2002) 2403.
- [7] A. Colaleo, A. Safonov, A. Sharma and M. Tytgat, *CMS Technical Design Report for the Muon Endcap GEM Upgrade*, Tech. Rep., CERN, Geneva (2015), CERN-LHCC-2015-012, CMS-TDR-013.
- [8] ALICE TPC collaboration, *Development of GEM-based Read-Out Chambers for the upgrade of the ALICE TPC*, 2014 *JINST* **9** C04035.
- [9] Micropack Limited, Jigani Industrial Area, Anekal Taluk, Bangalore-560105, <http://www.micro-pack.com>.
- [10] Techtra, *Techtra technology transfer agency*, <http://www.techtra.pl/technology/gem-based-detector/>.
- [11] Mecaro Co. Ltd., <http://www.mecaro.com/2015/business-lab.html>.
- [12] CMS-MUON GROUP collaboration, *Impact of Single-Mask Hole Asymmetry on the Properties of GEM Detectors*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **936** (2019) 459 [[arXiv:1811.04439](#)].
- [13] H. Keller, T. Hebbeker, K. Hoepfner, G. Mocellin and S. Zaleski, *Influence of hole geometry on gas gain in GEM detectors*, 2020 *JINST* **15** C06004.
- [14] V. Aulchenko, A. Bondar, A. Buzulutskov, L.I. Shekhtman, R. Snopkov and Y. Tikhonov, *Further studies of GEM performance in dense noble gases*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **513** (2003) 256 [[physics/0211101](#)].
- [15] The MathWorks, Inc., *MATLAB Toolkit*, <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [16] *Data Analysis Framework*, <https://root.cern/>.
- [17] *Clean laboratories and clean rooms for analysis of radionuclides and trace elements*, Tech. Rep., IAEA (2003), IAEA TECDOC 1339 [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1339_web.pdf].
- [18] MIT400/2, Cat IV Insulation Testers For Electrical And Industrial Maintenance Engineers, <https://megger.com/cat-iv-insulation-testers-mit400/2-series>.
- [19] Handheld particle counters — Models 3888 and 3889, <https://kanomax-usa.com/products/handheld-particle-counters-models-3888-3889/>.
- [20] Model 6517b, Keithley High Resistance/Low Current Electrometers Series 6500, <https://www.tek.com/en/products/keithley/low-level-sensitive-and-specialty-instruments/electrometers/>.
- [21] A. Shah, A. Ahmed, M. Gola, R.K. Sharma, S. Malhotra, A. Kumar et al., *Development, characterization and qualification of first GEM foils produced in India*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **892** (2018) 10 [[arXiv:1803.03260](#)].

- [22] M. Gola, A. Shah, A. Ahmed, S. Malhotra, A. Kumar and M. Naimuddin, *Performance of the triple GEM detector built using commercially manufactured GEM foils in India*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **951** (2020) 162967 [arXiv:1806.05016].
- [23] Model N1471, 4 Ch Reversible 5.5 kV/20 μ A NIM HV Power Supply High Accuracy Module (USB), <https://www.caen.it/products/n1471h/>.
- [24] F. Sauli, S. Kappler and L. Ropelewski, *Electron collection and ion feedback in GEM-based detectors*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** (2003) 803.
- [25] Mini-X2 X-Ray Tube, AMETEK Mini-X X-Ray Tube, <https://www.amptek.com/products/mini-x2-x-ray-tube>.
- [26] 142IH Preamplifier, ORTEC Charge-Sensitive Preamplifier, <https://www.ortec-online.com/products/electronics/preamplifiers/142ih>.
- [27] 474 Timing Filter Amplifier, ORTEC Timing Filter Amplifier, <https://www.ortec-online.com/products/electronics/amplifiers/474>.
- [28] <https://www.ortec-online.com/products/electronics/fast-timing-discriminators/935>.
- [29] A. Ahmed, M. Gola, A. Kumar and M. Naimuddin, *Development and qualification of triple-GEM detector built with large size mask foils produced in India*, *2020 JINST* **15** P02003.
- [30] M. Alfonsi, G. Croci, S. Duarte Pinto, E. Rocco, L. Ropelewski, F. Sauli et al., *Simulation of the dielectric charging-up effect in a GEM detector*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **671** (2012) 6.
- [31] M. Gola, S. Malhotra, A. Kumar and M. Naimuddin, *Stability tests performed on the triple GEM detector built using commercially manufactured GEM foils in India*, *2019 JINST* **14** P08004 [arXiv:1907.09322].
- [32] F. Sauli, *Imaging with the gas electron multiplier*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **580** (2007) 971.
- [33] M. Naimuddin et al., *Development of a proton Computed Tomography Detector System*, *2016 JINST* **11** C02012.
- [34] Techtra GEM board, Techtra technology transfer agency, http://techtra.pl/wp-content/uploads/Manual_GEM_Detector_256ch.pdf.
- [35] Y. Li, C. Jin, X. Chen, F. Gao and Y. Shi, *A new detection circuit design based on DDC264*, in *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, Harbin, China, 12–14 August 2011, pp. 1294–1296.
- [36] A. Rudajevová and K. Dušek, *Influence of manufacturing mechanical and thermal histories on dimensional stabilities of FR4 laminate and FR4/cu-plated holes*, *Materials* **11** (2018) 2114.
- [37] J.H. Hubbell and S.M. Seltzer, *X-Ray Mass Attenuation Coefficients*, *NIST Standard Reference Database* 126.
- [38] A. Khorshidi, A. Rezaei, M. Ashoor and A. Asgari, *Evaluation of compton attenuation and photoelectric absorption coefficients by convolution of scattering and primary functions and counts ratio on energy spectra*, *Indian J. Nucl. Med.* **30** (2015) 239.

2022 JINST 17 P04002

LTCC Strip Electrode Arrays for Gas Electron Multiplier Detectors

A. Dąbrowski, W. Nawrot, M. Czok, **M. Babij**, P. Bielówka, K. Malecha
Sensors 22, no. 2: 623.

Samodzielny wkład autora rozprawy w powstanie tej publikacji polegał na:

- opracowaniu płyty przejściowej, umożliwiającej montaż detektora GEM z ceramiczną płytą odczytu,
- montażu i uruchomieniu kompletnego detektora GEM zawierającego opracowane elementy,
- przeprowadzeniu pomiarów elektrycznych oraz pomiarów z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego, których wyniki wykorzystano w publikacji,
- analizie wyników pomiarów w tym radiogramów,
- przygotowaniu ilustracji i wykresów,
- udziale w redakcji treści publikacji.

Łączny udział autora rozprawy wynosi 40%.



Article

LTCC Strip Electrode Arrays for Gas Electron Multiplier Detectors

Arkadiusz Dąbrowski ¹, Witold Nawrot ¹ , Mateusz Czok ¹ , Michał Babij ^{1,2}, Piotr Bielówka ^{1,2} and Karol Malecha ^{1,*}

- ¹ Department of Microsystems, Faculty of Electronics, Photonics and Microsystems, Wrocław University of Science and Technology, Wyb. S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland; arkadiusz.dabrowski@pwr.edu.pl (A.D.); witold.nawrot@pwr.edu.pl (W.N.); mateusz.czok@pwr.edu.pl (M.C.); michal.babij@techtra.pl (M.B.); piotr.bielowka@techtra.pl (P.B.)
² Technology Transfer Agency TECHTRA Sp. z o.o., ul. Duńska 13, 54-427 Wrocław, Poland
 * Correspondence: karol.malecha@pwr.edu.pl

Abstract: The Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC) technology has proven to be highly suitable for 3D microstructures manufacturing in electronic devices due to its excellent electrical and mechanical properties. In this paper, a novel idea of implementing the LTCC structures into high-energy particle detectors technology is proposed. It can be applied in High Energy Physics (HEP) laboratories, where such sophisticated sensors are constantly exposed to particles of the TeV energy range for many years. The most advanced applications of the concept are based on dedicated gas amplifier systems coupled with readout microstructures. Typically, the readout microstructures are made in the Printed Circuit Boards (PCB) technology and processed in a sophisticated and patent-protected way. This article presents the manufacturing process and parameters of the novel microstructures made in the LTCC technology. The structures were implemented into the high-energy particle detector, and the first results are presented.

Keywords: Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC); Gas Electron Multiplier (GEM) detector; X-ray; Micro Pattern Gas Detector (MPGD); solar radiation; space sensors



Citation: Dąbrowski, A.; Nawrot, W.; Czok, M.; Babij, M.; Bielówka, P.; Malecha, K. LTCC Strip Electrode Arrays for Gas Electron Multiplier Detectors. *Sensors* **2022**, *22*, 623. <https://doi.org/10.3390/s22020623>

Academic Editor:
José Manuel Díaz-Cruz

Received: 13 December 2021
Accepted: 12 January 2022
Published: 14 January 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Introduced in 1968 by Charpak at the European Organization for Nuclear Research (CERN), multiwire proportional chamber revolutionized the particle detection systems in high-energy physics [1]. Over time, new generations of the invention had been implemented for fast detection and localization of charged particles. Solid-state solutions such as silicon, germanium, or scintillation detectors offer the best time and spatial resolution; however, their high costs and limited operation areas are often a drawback, limiting their application in High Energy Physics (HEP) experiments [2].

An alternative for solid-state technology is the gaseous ionization detector technique. It is robust, resistant to high-energy radiation, and last but not least, cost-effective. However, the spatial resolution offered by gaseous technology is lower than that offered by its solid-state counterpart. Over time, that was improved by the implementation of specialized amplifying microstructures. The group of devices that consist of such reliable systems is called the Micro Pattern Gaseous Detectors (MPGD), and the most advanced application, invented at CERN, is the Gas Electron Multipliers (GEM) detector [3]. The principle of GEM detector operation is shown in Figure 1. Ionizing radiation, traversing the thin layer of sensitive gas, releasing electron-ion pairs. Released primary electrons are accelerated in the electric field created between the drift electrode and the top side of the first GEM foil. During the drift through the GEM foil cascade, the electron beam is amplified a few thousand times. The resulting current signal is picked up by a readout plane (typically two layers of perpendicular strips) and measured by a dedicated electronic circuit.

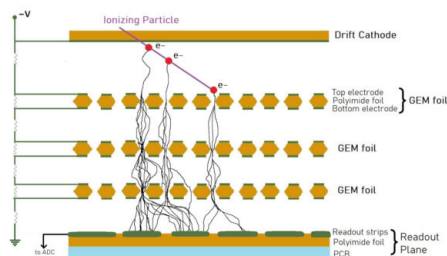


Figure 1. A diagram of a particle detector based on GEM foils.

State-of-the-art GEMs are made with 50 μm thick polyimide foil coated on both sides with 5 μm copper layers. The hexagonal pattern of double-conically shaped holes with a diameter of 60–70 μm is typically etched with a pitch of 140 μm into this sandwich-like structure. With suitable potentials applied, it acts as a powerful preamplifier for electrons released by ionizing radiation in the gas, transferring most of the multiplied electron charge to a pickup electrode or another amplifying device [4]. Measured and amplified signals are collected by a readout system. Typically, in the case of GEM, it consists of a matrix of orthogonal conductive lines [5]. The collected charge can be further processed by front-end electronic systems. Such a detector combines the wide dynamic range, good spatial resolution, high gain, and radiation hardness. They have also proved to be robust, light, and offer excellent performance and reliability suited for use in harsh environments.

The goal of the wider project, which this research is a part of, is to design and build a fully operational detector suitable for space applications in the form of a CubeSat module ($100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$). Multiple modules, along with necessary power and communication components, could then be formed into a larger system. In this type of mission, the lifetime of a detector is critical, due to the hermetically sealed construction of the gas box. Working gas cannot be exchanged, so outgassing the components reduces gas purity. The application of low outgassing components increases the lifetime of the sealed detector [6]. Moreover, materials should have as low a coefficient of thermal expansion (CTE) as possible due to the wide range of temperatures occurring during space missions. To meet these unique requirements, a novel readout system was developed. Instead of standard PCB materials, a custom structure made in the Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) is proposed in this research. The LTCC ceramics have significantly lower CTE than FR4 laminates, exhibits very good electrical and mechanical properties, high reliability in harsh environments, good thermal conductivity, and very high operating temperature. Furthermore, it can be brazed, eliminating the need for gluing and resulting outgassing issues. Advanced structuring capabilities and multilayer approach allow for high packaging density, reducing the volume and weight of the device, both of which are very valuable in space missions. This technology is proven through a wide variety of sensors and microsystems [7], including pressure sensors [8], accelerometers [9], magnetic sensors [10], and biosensing microsystems with optical [11] and microwave detection [12]. Due to its robustness and reliability, the LTCC technology is well known in military and space applications [13,14]. The application of ceramic technology in GEM foils had been considered previously [15]. In this work, we focus on the development of the sensing electrode array in the LTCC technology. Such a complete device could be a breakthrough not only in space missions but also in nuclear physics research, such as the NUMEN project, which requires fine resolution but also radiation hardness, to withstand the high rate of impinging particles [16,17].

2. Materials and Methods

The schematic of the readout structure is presented in Figure 2. The readout electrode arrays were developed at the Wrocław University of Science and Technology. The design

consists of two layers, separated by a dielectric. On each, there are parallel conductive strips that cover an area of $20 \times 20 \text{ mm}^2$. The layers are rotated by 90 degrees, making the lines from each layer orthogonal. The bottom strips were partially obscured by the top ones. Therefore, to maintain a balance between the amount of charge collected by each layer, the widths of the top and bottom lines are different: 100 and 200 μm , respectively. The pitch of the strips remained constant at 300 μm .

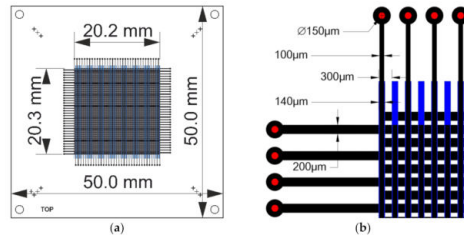


Figure 2. The design of electrode array: (a) outer dimensions of active sensing area and substrate; (b) dimensions of electrodes and spacing between them.

The readout test structures were manufactured using DuPont 951 Low Temperature Cofired Ceramic (DuPont, Wilmington, DE, USA) green tapes, 254 μm thick. Their shape, basing, and via holes were cut in one step with a ProtoLaser U (LPKF, Garbsen, Germany) Nd:YAG laser, operating at a wavelength of 355 nm. Each structure had been designed to achieve the dimensions of $50 \times 50 \text{ mm}^2$ after the firing process. The vias were filled with the TC0401 Ag/Pd transition paste (Heraeus, Hanau, Germany) by stencil printing and then dried at 100 $^{\circ}\text{C}$ for 10 min. Solder pads were screen printed on the bottom of the substrate, using first the 9145R silver paste (DuPont, USA) and subsequently the 963 silver-palladium paste (Electroscience Laboratory, Columbus, OH, USA). The bottom readout electrodes were then screen-printed with the 5742 gold thick film paste (DuPont, USA). All thick films were deposited using the Aurel VS1520A screen printer (Aurel, Modigliana, Italy) and a 325 mesh steel screen. To provide electrical insulation between the top and bottom conductive layers, a dielectric separation layer was needed. In order to obtain the best results, two different approaches were evaluated (Figure 3). The first approach consisted of multiple screen-printed layers on a single substrate (SS). In the second, each layer of electrodes was printed on separate substrates—Multi Substrate (MS) approach.

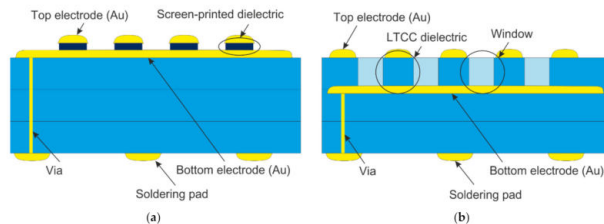


Figure 3. The cross-section schematic for two structural variants of the sensor: (a) with screen-printed dielectric layer separating electrodes (Single Substrate, SS); (b) with electrodes printed on separate LTCC substrates and stacked together (Multi Substrate, MS).

2.1. Single Substrate (SS) Approach

In the first approach, all layers were screen printed on an LTCC substrate with vias connecting electrodes to the soldering pads on the bottom. The structure consisted of lower

electrodes, then a screen-printed dielectric layer, and on the top perpendicular array of electrodes (Figure 4). To protect the bottom electrodes against contamination from the dielectric paste and to prevent shorts with the top electrode, a sacrificial layer of graphite was introduced. The 4440 (Electro-Science Laboratories Inc., King of Prussia, PA, USA) graphite paste was screen-printed to form strips perpendicular to the bottom layer and form a uniform surface together with the dielectric layer. Two manufacturing processes were tested: the sacrificial layer was printed either before the dielectric (SS-GD) or afterward (SS-DG). The dielectric layer should have low permittivity and similar mechanical properties and sintering behavior as the LTCC substrate. Therefore, a custom glass-ceramic thick film paste was prepared, using a 502K08 LTCC powder (Heraeus, Hanau, Germany), 10 wt.% of an organic binder—ethyl cellulose (Sigma Aldrich, Saint Louis, MO, USA), and the 9180 thinner (DuPont, USA). To ensure mechanical stability during printing and sintering of the top layer, the insulator needs to be sufficiently wider. In this case, a distance of 40 μm was used. Before printing the top electrodes, all ceramic layers were stacked together and laminated. This step was introduced in order to reduce the material waviness of the screen-printed layers. Such non-planarity would otherwise result in poor quality of the top layer. The lamination process was carried out under standard conditions recommended by the tape manufacturer—temperature of 70 $^{\circ}\text{C}$, pressure 20 MPa for 5 min. Finally, the top conductive layer was screen-printed onto the prepared laminate.

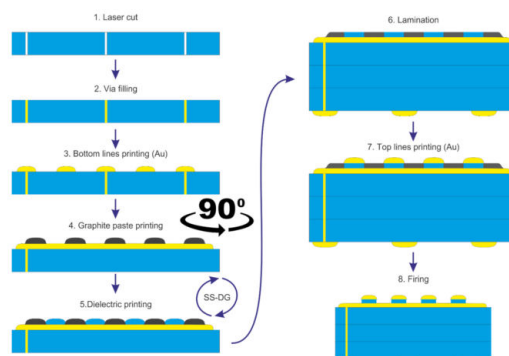


Figure 4. The manufacturing process using a screen-printed insulation layer.

2.2. Multi Substrate (MS) Approach

The schematic diagram of the second process is presented in Figure 5. At first, the via holes were developed to connect the top electrodes with the rest of the system. They were filled with the same conductive paste as in the SS approach. Subsequently, the top stripe electrodes were screen-printed. Effectively, the bottom and the top electrodes were deposited on separate substrates. To expose the bottom electrodes, an array of openings, 150 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ each, was laser-cut in the dielectric layer (114 μm thick). Subsequently, the structure was stacked and laminated under standard conditions.

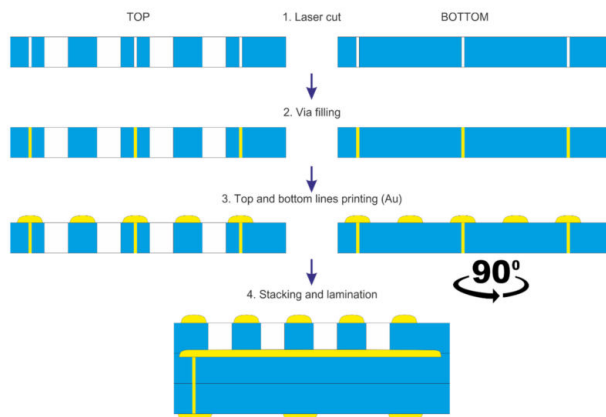


Figure 5. The manufacturing process using an LTCC insulation layer (Multi Substrate, MS).

2.3. Sintering and Assembly

In both cases, the device was fired at the typical time-temperature profile with a 30-min hold at 875 °C in a box furnace LT 9/11 (Nabertherm, Lilienthal, Germany). In the case of the single substrate (SS) approach, the sample was additionally held for 1h at a temperature of 700 °C during firing to complete the removal of graphite from the surface. After sintering the LTCC module, an overglaze layer was applied on the bottom surface, using the QQ550 paste (DuPont) and fired at 550 °C/10 min hold in a belt furnace QA 41-6-54 (BTU, North Billerica, MA, USA). After firing, the ceramic part was cut into the desired shape. The complete LTCC readout board was soldered to an adapter printed circuit board (PCB), with OM-520 bismuth-silver-tin solder paste (Alpha Assembly Solutions, Somerset, NJ, USA). The adapter boards were equipped with Hirose FX10A-140P/14-SV connectors.

2.4. The GEM Detector Assembly

Parallel to the development of the LTCC readout board, the test stand was prepared. To validate the readouts in an operational environment, the tests of a complete GEM detector were performed. For compliance, the framework of a standard CERN $10 \times 10 \text{ cm}^2$ detector was used [18,19]. GEM foils, drift electrode, spacers, gas-box frame, and cover with polyimide window. All of these parts were manufactured and assembled by Techtra Sp. z o. o. The typical GEM readout boards serve two functions: electrical (collects the charge on readout strips) and mechanical (the board is a detector base and part of a gas box). The developed 2D LTCC readout modules are soldered on small adapter boards that need to be connected to a mounting PCB. For that purpose, the dedicated PCB was designed—the board is based on a standard CERN readout board, but instead of the readout strips, this board has connectors in the active area. The connectors merge the adapter board containing the LTCC readout module with a mounting PCB. The mounting PCB without (a), and with the LTCC readout module (b), is shown in Figure 6. This GEM detector base contains 4 pcs. of 130-pin Panasonic® connectors and can be connected to any standard readout electronics designed for MPGD detectors. In our research, we used our own electronic system—the Techtra GEM 256ch Readout V2.0 [20]. The measurement setup includes a GEM detector with two 256ch electronic readout boards and metal samples placed on the active area of the detector are presented in Figure 7. The X-ray tube and radiation shield are not shown in the picture.

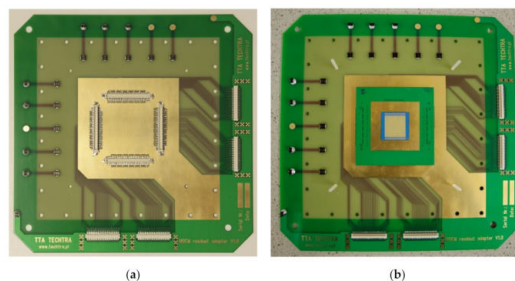


Figure 6. The PCB setup for ceramic readouts testing, (a) board with connectors; (b) board with connected LTCC readout module.

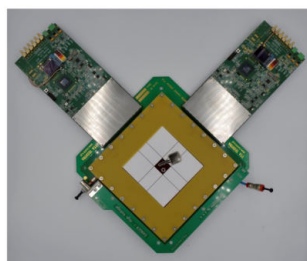


Figure 7. The Measurement setup—GEM detector with two Techtra 256ch electronic Readout V2.0 boards and metal samples placed on the active area of the detector.

3. Results

Developed structures were thoroughly analyzed, initially through visual inspection and then characterized in the GEM detector by X-rays. Two samples were chosen for further analysis, one with the glass-ceramic dielectric layer (Single Substrate, SS) and one with the LTCC insulation layer (Multi Substrate, MS). The work described in this paper was the preliminary tests of the LTCC based readout boards for GEM detectors, so only one of each board type was measured. No statistical measurements on a larger readout boards group were performed.

3.1. Visual Inspection

The visual inspection was carried out using a DM4500 optical microscope (Leica, Germany), using $5\times$ and $10\times$ magnification with observation in the dark field to eliminate measurement error caused by light reflection. This step was carried out after each print in order to validate the processing path and detect faults. The most important task was to determine the influence of the graphite sacrificial layer on surface quality in the single substrate (SS) approach. Printing the top electrodes on an uneven surface due to the perpendicularly printed lower electrodes causes a decrease in resolution. Filling the gaps between the bottom strips with a graphite paste provides a flat surface and thus better screen-printing quality, while the sacrificial layer is burnt out during the firing process. Two screen printing sequences of the dielectric and graphite layer were tested; both are shown in Figure 8. Printing the graphite layer first (SS-GD) proved a better solution. Additionally, the graphite layer minimized the risk of short circuit occurrence and improved the visibility of the lower electrodes.

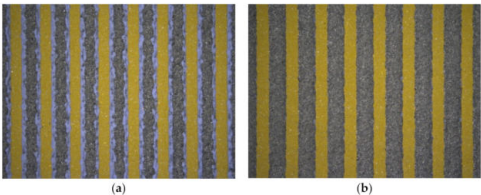


Figure 8. Analysis of the influence of graphite layer on electrode shape and surface quality, in dependence of printing sequence: (a) dielectric layer (blue) printed in between of graphite strips (SS-GD); (b) graphite layer (gray) printed after the dielectric layer (SS-DG).

The comparison between the process with screen-printed dielectric on a single substrate (SS) and printing on multiple substrates (MS) was also performed visually. Results of the two manufacturing processes show that the fully screen-printed electrode array with the graphite sacrificial layer seems to provide better replication of the design and reproducibility of the upper electrode than screen printing on separate substrates. The shape of the deposited electrodes is close to the shape of the designed pattern. It is less susceptible to positioning errors during screen-printing and, as a result, contains fewer defects, primarily short circuits between electrode layers. Pictures of the readout area after co-firing are presented below in Figure 9.

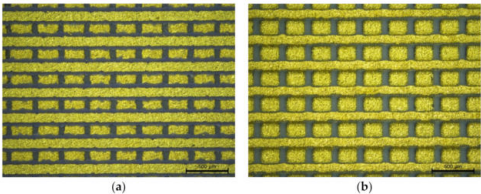


Figure 9. The image of the structure after co-firing utilizing two methods, (a) with a screen-printed dielectric layer (SS) and (b) with insulation made of LTCC tape (MS).

The surface profiles of both structures are presented in Figure 10. They were obtained through software analysis (Leica Application Suite) of focal points on a series of images, taken using a small depth of field lens. As can be observed, the distance between the top and bottom electrodes is more than two times lower for the first method than for the second one. Therefore, the lower electrode is less shaded, and more electrons can reach there.

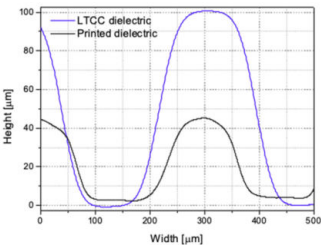


Figure 10. Surface topography profiles of LTCC readout boards manufactured with two methods.

3.2. Analysis of LTCC Readout Boards Done with the Electrical and X-ray Methods

The electrical and X-ray characterization of three LTCC readout boards described in the previous section were conducted. Each board consists of 136 separate signals (68 X lines and 68 Y lines). The readouts can be electrically characterized by measuring: the shorts between lines, leakage current between lines, the conductivity of the lines from connector to end of a readout, the capacitance between lines, etc. Manual measurements or building a dedicated stand for automated tests is time-consuming. Alternatively, the operational parameters of the readout boards can be obtained by X-ray and noise measurements. Shorted lines (especially between the X and Y lines) significantly reduce the image quality of the radiographs, so the short-circuits number should be as small as possible. The shorts can be clearly visible in the channel noise level, so this method was chosen to investigate all readout boards concerning shorted lines. The detected shorts were additionally checked with resistance measurements. The results are presented in Table 1. These results show that the order of application of the dielectric and graphite layer makes a significant difference. The sacrificial layer is very important to prevent cross-pollution of the materials.

Table 1. Shorts circuit traces in readout boards.

Board	Nr of Shorts	X Coordinates	Y Coordinates
SS-DG	27 (2 blocks)	23, 29, 47–49, 51, 53, 55, 58 60, 61, 63, 65–69	2, 4–10, 20, 24
SS-GD	2	36 59	47 32
MS	1	22	58

After the electrical measurements, the GEM detector was assembled using the LTCC readout boards, which were to be tested. The COOL-X pyroelectric X-ray source (Ametek, USA) was used during the tests. The energy of photons was mainly 8.05 keV (Cu) and 8.14 keV (Ta). The calculated detector gain for such photons was around 60,000. The standard Ar/CO₂ (70:30) gas mixture for the MPGD was used. For the tests, a metal key and an M6 nut were placed on the detector and irradiated by the mentioned X-ray source for 3 h each. The radiographs obtained in these measurements are presented in Figure 11. The SS-DG board had too many short lines to reconstruct the radiograph properly.

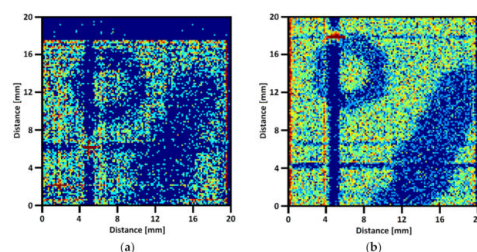


Figure 11. The radiographs of a key and an M6 nut (arrangement shown in Figure 7), measured on the (a) SS-GD; (b) MS readout board.

The single shorted lines on other boards are clearly visible in the pictures as dark lines with red points at their intersection. Figure 11b looks better than Figure 11a because more events were detected. The measurement time and the X-ray lamp setup were the same for both experiments. Probably, the reason is that the dielectric used in the SS-GD method covers edges of the bottom lines (can be seen in Figure 9a), so some of the charges distributed on the bottom lines were smaller than the detection threshold. Using purpose-

developed data processing algorithms, the resolution (pixel number) of the reconstructed images is two times greater than the number of XY electrodes. The algorithm calculates the event coordinates using the Gaussian approximation of the charges deposited on 10 neighboring lines—the center of a Gauss is the X or Y coordinate. The wide dark region on the top side of Figure 11a was caused by cracks in solder joints, while some of the strips were not connected with the electronic board. That was only the soldering defect, and it is not related to the technology of manufacturing readouts with a glass-ceramic insulation layer.

The data measured on the described detector was further processed to obtain the readout board’s performance. The electronic readout uses a switched-capacitor charge-to-digital converter. This type of ADC is sensitive to the capacitance of the input circuit—the noise level depends on readout strips capacitance. To equalize charge distribution between the top and bottom lines, the width of the top and bottom lines are different, where the pitch is the same. Hence, the distance between edges of adjacent strips on the top layer is larger than for the lines on the bottom side, and the capacitance and noise will also be different. In this way, the noise characteristics were calculated separately for the X and Y channels—the results are shown in Table 2. The RMS noise values for each channel are presented in Figure 12. Measurements were made on a fully assembled and working detector, with an ArCO₂ gas mixture in a gas chamber and with high voltage enabled. We can see that the noise level on the Y-axis (bottom strips) is higher than on the X-axis. In addition, we can see that the noise levels are similar on MS and SS-GD boards.

Table 2. Noise characteristic of the detector with ceramic readout boards.

Board	Channels	Avg. Noise [fC]	Max Noise [fC]	RMS Noise [fC _{RMS}]
MS	X (TOP)	7.87	17.85	2.26
	Y (BOT)	10.69	26.71	4.58
SS-GD	X (TOP)	7.77	18.25	2.86
	Y (BOT)	9.81	29.98	3.86

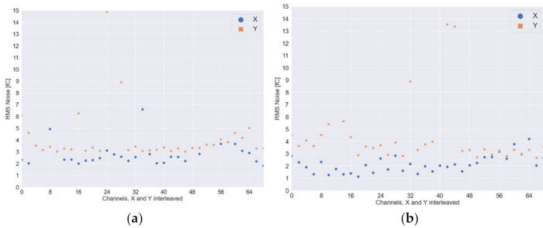


Figure 12. The RMS noise values for each channel of tested readout boards: (a) MS; (b) SS-GD readout board.

The bottom electrodes of readout boards are further from the lowest GEM foil than the top strips, so the probability that electron reaches the bottom electrode is lower than that for the top electrode. The energy distribution of charges that reach a readout board was drawn on histograms separately for the X and Y lines. Then data containing signals from events were fitted with Gaussian function. The centers of the fitted curves represent the average value of the charges deposited on the selected lines. The percentage of charge deposition between the X and Y lines was calculated. Optimally, the charge should be equally distributed between X and Y lines. Unfortunately, the SS-GD was damaged during tests, and the charge distribution tests could not be performed. Table 3 presents calculated data for charge distribution on the developed multi-substrate (MS) readout board.

Table 3. Charge distribution between the top and bottom electrodes of the ceramic readout board.

Board	Channels	Gauss Center [pC]	Total Charge [%]
MS	X (TOP)	4.11	89.4
	Y (BOT)	0.49	10.6

4. Discussion

The presented work shows that 2D readout boards for MPGD detectors with an active area of $20 \times 20 \text{ mm}^2$ can be successfully manufactured using LTCC technology. The readouts were tested in a working GEM detector—the technology was demonstrated in an operational environment. The two different methods were tested, and both readout boards can detect the X-rays. The fully screen-printed version of the detector, based on a single substrate (SS), can be simpler to manufacture, especially in high volumes. It can be adapted for other ceramic substrates, such as aluminum oxide (Al_2O_3) or nitride (AlN). Therefore, it was optimized for the best performance using a graphite sacrificial layer. However, it is the second method, which utilizes LTCC tape as a separator between the layers with electrodes (multi-substrate, MS), that gives better results with fewer defects and better uniformity. This confirms that LTCC-based readout boards are valid technology that should be further developed.

We suggest that the next stage of development should involve a larger readout board, developed using the MS method. The readouts with an active area of at least $70 \times 70 \text{ mm}^2$ could fit into the CubeSat module to investigate cosmic rays. Even larger boards could be manufactured for other applications; however, modular design would be a more flexible and cheaper solution. Several elements could be mounted very closely, without any frames around the active area, using BGA connections, to form a bigger panel. The second parameter that can be improved in further studies is the charge distribution uniformity between the top and bottom readout lines. Existing solutions achieve uniformity close to 50/50% by applying different widths of top and bottom strips for charge equalization. The same technique can be applied to ceramic-based readouts.

Most importantly, the research shows that the LTCC-based GEM detectors are a viable solution worth pursuing. The performance and lifetime of a hermetically sealed GEM detector, used in space, for example, strongly depends on gas purity. Therefore utilization of the materials with a very low outgassing ratio is critical for the application. The state-of-the-art GEM foils and readouts are made from polymer or epoxy-based materials, which outgassing ratio is higher than in metals or ceramics. The presented readout, in combination with already described LTCC GEM foils [15], can form a complete solution that is robust, precise, and can significantly reduce the outgassing problem. Therefore, further work will focus on the development and optimization of a fully ceramic solution.

Author Contributions: Conceptualization, K.M., P.B., A.D., W.N., M.B. and M.C.; methodology, A.D., W.N., M.B. and M.C.; software, M.B.; validation, A.D., M.C. and M.B.; formal analysis, M.B. and P.B.; investigation, A.D., M.C., W.N. and M.B.; resources, A.D.; data curation, M.B.; writing—original draft preparation, W.N., A.D. and M.B.; writing—review and editing, W.N., M.B., M.C., P.B. and K.M.; visualization, W.N. and A.D.; supervision, K.M. and P.B.; project administration, K.M. and P.B.; funding acquisition, K.M. and P.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Polish National Centre for Research and Development, grant no. POIR.04.01.02-00-0080/17-00.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Charpak, G.; Bouclier, R.; Bressani, T.; Favier, J.; Zupančič, Č. The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles. *Nucl. Instrum. Methods* **1968**, *62*, 262–268. [\[CrossRef\]](#)
- Lindström, G.; Ahmed, M.; Albergo, S.; Allport, P.; Anderson, D.; Andricek, L.; Angarano, M.M.; Augelli, V.; Bacchetta, N.; Bartalini, P.; et al. Developments for radiation hard silicon detectors by defect engineering—Results by the CERN RD48 (ROSE) Collaboration. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.* **2001**, *465*, 60–69. [\[CrossRef\]](#)
- Titov, M.; Ropelewski, L. Micro-Pattern Gaseous Detector Technologies And RD51 Collaboration. *Mod. Phys. Lett. A* **2013**, *28*, 1340022. [\[CrossRef\]](#)
- Shekhtman, L. Micro-pattern gaseous detectors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.* **2002**, *494*, 128–141. [\[CrossRef\]](#)
- Bressan, A.; De Oliveira, R.; Gandi, A.; Labbé, J.-C.; Ropelewski, L.; Sauli, F.; Mörmann, D.; Müller, T.; Simonis, H.J. Two-dimensional readout of GEM detectors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.* **1999**, *425*, 254–261. [\[CrossRef\]](#)
- Hill, J.E.; Black, J.K.; Brieda, L.; Dickens, P.L.; de Garcia, K.M.; Hawk, D.L.; Hayato, A.; Jahoda, K.; Mohammed, J. Lifetime estimation of a time projection chamber X-ray polarimeter. In Proceedings of the UV, X-ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XVIII, San Diego, CA, USA, 25–29 August 2013; Volume 8859.
- Jurków, D.; Maeder, T.; Dąbrowski, A.; Zarnik, M.S.; Belavič, D.; Bartsch, H.; Müller, J. Overview on low temperature co-fired ceramic sensors. *Sens. Actuators A Phys.* **2015**, *233*, 125–146. [\[CrossRef\]](#)
- Dąbrowski, A.P.; Golonka, L.J. High Pressure Sensor with PZT Transducer in LTCC Package. *Procedia Eng.* **2014**, *87*, 1099–1102. [\[CrossRef\]](#)
- Dąbrowski, A.; Elkjaer, K.; Borregaard, L.; Zawada, T.; Golonka, L. LTCC/PZT accelerometer in SMD package. *Microelectron. Int.* **2014**, *31*, 186–192. [\[CrossRef\]](#)
- Testa, D.; Corne, A.; Jacq, C.; Maeder, T.; Toussaint, M.; Antonioni, S.; Chavan, R.; Couturier, S.; Dolizy, F.; Lavanchy, P.; et al. LTCC magnetic sensors at EPFL and TCV: Lessons learnt for ITER. *Fusion Eng. Des.* **2019**, *146*, 1553–1558. [\[CrossRef\]](#)
- Nawrot, W.; Drzozga, K.; Baluta, S.; Cabaj, J.; Malecha, K. A Fluorescent Biosensors for Detection Vital Body Fluids' Agents. *Sensors* **2018**, *18*, 2357. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Slobodzian, P.; Szostak, K.; Skowronek, K.; Jasińska, L.; Malecha, K. An Ultrahigh Sensitive Microwave Microfluidic System for Fast and Continuous Measurements of Liquid Solution Concentrations. *Sensors* **2021**, *21*, 5816. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Wolff, I.; Günner, C.; Kassner, J.; Kulke, R.; Uhlig, P. New Heights for Satellites: LTCC Multilayer Technology for Future Satellites. *IEEE Microw. Mag.* **2018**, *19*, 36–47. [\[CrossRef\]](#)
- Wolff, I.; Kulke, R.; Klein, T. LTCC: A Space Qualified Integration and Packing Technology for Millimeter-Wave Systems WFA: Integration and Technologies for mm-Wave Sub-Systems. In Proceedings of the Workshop Presentation of the 2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest, Montreal, QC, Canada, 17–22 June 2012.
- Komiya, K.; Takeuchi, Y.; Wakabayashi, M.; Fujiwara, K.; Kono, S.; Hamagaki, H.; Tamagawa, T. Development of Gas Electron Multiplier by Applying Technique of Low Temperature Co-Fired Ceramics. *J. Jpn. Soc. Precis. Eng.* **2018**, *84*, 936–940. [\[CrossRef\]](#)
- Cappuzzello, F.; Acosta, L.; Agodi, C.; Boztosun, I.; Brischetto, G.A.; Calabrese, S.; Calabretta, L.; Calvo, D.; Campajola, L.; Capirossi, V.; et al. The NUMEN Project: An Update of the Facility Toward the Future Experimental Campaigns. *Front. Astron. Space Sci.* **2021**, *8*, 52. [\[CrossRef\]](#)
- Finocchiaro, P.; Acosta, L.; Agodi, C.; Altana, C.; Amador-Valenzuela, P.; Boztosun, I.; Brasolin, S.; Brischetto, G.A.; Brunasso, O.; Calabrese, S.; et al. The NUMEN Heavy Ion Multidetector for a Complementary Approach to the Neutrinoless Double Beta Decay. *Universe* **2020**, *6*, 129. [\[CrossRef\]](#)
- Standard GEM Assembly V2. Available online: https://franchin.web.cern.ch/franchin/MPDG/GEM_assembly_DRAFT.pdf (accessed on 12 December 2021).
- Franchino, S. GEM and Micromegas standard detectors. In Proceedings of the International Workshop on Advanced Detectors (IWAD) and RD51 Collaboration Meeting, Kolkata, India, 29–31 October 2014.
- GEM-Based Detector. Available online: <https://techtra.pl/en/technology/gem-based-detector/> (accessed on 12 December 2021).

Oświadczenia współautorów

OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORA

Wrocław, dnia 01.09.2024

prof. dr hab. inż. Karol Malecha
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska
Wyb. Wyspiańskiego 27
50-372 Wrocław

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracach:

1. S. Gburek, P. Podgórski, D. Ścisłowski, M. Kowaliński, M. Stęśliński, J. Bąkała, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, M. Czok, A. Dąbrowski, W. Nawrot, J. Głowinkowski, P. Wilk, „CubeSat compatible Modular GEM Sensors, for Space and Ground Applications with core components made out of LTCC”, zgłoszona do czasopisma *Measurements*, w trakcie recenzji
2. M. Babij, P. Bielówka, S. Gburek, K. Malecha, "A Segmental 2D Readout Board Manufactured in Printed Circuit Board Technology for Gas Electron Multiplier Detectors" *Sensors* 23, no. 19: 8095, 2023, <https://doi.org/10.3390/s23198095>
3. P. Bielówka, M. Babij, A. Dąbrowski, K. Malecha, "The application of Low-Temperature Cofired Ceramics technology in Gas Electron Multiplier microstructures", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 1047, 2023, 167749, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167749>
4. M. Babij, P. Bielówka, A. Dąbrowski, W. Nawrot, M. Czok, K. Malecha, "Manufacturing of a 70 × 70 mm² LTCC strip electrode readout for Gas Electron Multiplier detectors", *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 342, 2022, 113656, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113656>
5. A. Ahmed, A. Kumar, Md. Naimuddin, M. Babij, P. Bielówka, "The qualification of GEM detector and its application to imaging", *Journal of Instrumentation*, Volume 17, April 2022, <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/17/04/P04002>
6. A. Dąbrowski, W. Nawrot, M. Czok, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, "LTCC Strip Electrode Arrays for Gas Electron Multiplier Detectors" *Sensors* 22, no. 2: 623, <https://doi.org/10.3390/s22020623>

mój wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:

udział w opracowaniu konstrukcji, omówienie wyników oraz merytoryczna korekta tekstu.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w prac przez mgr. inż. Michała Babija jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych.



.....

Podpis

OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORA

Wrocław, dnia 01.09.2024

mgr inż. Piotr Bielówka
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska
Wyb. Wyspiańskiego 27
50-372 Wrocław

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracach:

1. S. Gburek, P. Podgórski, D. Ścisłowski, M. Kowaliński, M. Stęśliński, J. Bąkała, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, M. Czok, A. Dąbrowski, W. Nawrot, J. Głowinkowski, P. Wilk, „CubeSat compatible Modular GEM Sensors, for Space and Ground Applications with core components made out of LTCC”, zgłoszona do czasopisma *Measurements*, w trakcie recenzji
2. M. Babij, P. Bielówka, S. Gburek, K. Malecha, "A Segmental 2D Readout Board Manufactured in Printed Circuit Board Technology for Gas Electron Multiplier Detectors" *Sensors* 23, no. 19: 8095, 2023, <https://doi.org/10.3390/s23198095>
3. M. Babij, P. Bielówka, A. Dąbrowski, W. Nawrot, M. Czok, K. Malecha, "Manufacturing of a 70×70 mm² LTCC strip electrode readout for Gas Electron Multiplier detectors", *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 342, 2022, 113656, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113656>
4. A. Ahmed, A. Kumar, Md. Naimuddin, M. Babij, P. Bielówka, "The qualification of GEM detector and its application to imaging", *Journal of Instrumentation*, Volume 17, April 2022, <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/17/04/P04002>
5. A. Dąbrowski, W. Nawrot, M. Czok, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, "LTCC Strip Electrode Arrays for Gas Electron Multiplier Detectors" *Sensors* 22, no. 2: 623. <https://doi.org/10.3390/s22020623>

mój wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:

udział w opracowaniu konstrukcji, udział w planowaniu badań, omówienie wyników oraz merytoryczna korekta tekstu.

Oświadczam, że w pracy:

1. P. Bielówka, M. Babij, A. Dąbrowski, K. Malecha, "The application of Low-Temperature Cofired Ceramics technology in Gas Electron Multiplier microstructures", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 1047, 2023, 167749, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167749>

mój wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:

opracowanie konstrukcji, wykonanie próbek ceramicznych struktur GEM, przeprowadzenie testów wykonanych struktur oraz przygotowanie tekstu publikacji.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w prac przez mgr. inż. Michała Babija jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych.



Podpis

OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORA

Wrocław, dnia 01.09.2024

dr inż. Witold Nawrot
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska
Wyb. Wyspiańskiego 27
50-372 Wrocław

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracach:

1. S. Gburek, P. Podgórski, D. Ścisłowski, M. Kowaliński, M. Stęśliński, J. Bąkała, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, M. Czok, A. Dąbrowski, W. Nawrot, J. Głowinkowski, P. Wilk, „CubeSat compatible Modular GEM Sensors, for Space and Ground Applications with core components made out of LTCC”, zgłoszona do czasopisma *Measurements*, w trakcie recenzji
2. M. Babij, P. Bielówka, A. Dąbrowski, W. Nawrot, M. Czok, K. Malecha, “Manufacturing of a 70×70 mm² LTCC strip electrode readout for Gas Electron Multiplier detectors”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 342, 2022, 113656, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113656>
3. A. Dąbrowski, W. Nawrot, M. Czok, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, "LTCC Strip Electrode Arrays for Gas Electron Multiplier Detectors" *Sensors* 22, no. 2: 623. <https://doi.org/10.3390/s22020623>

mój wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:

udział w opracowaniu konstrukcji, udział w wykonaniu elementów z ceramiki LTCC, udział w przygotowaniu manuskryptu.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w prac przez mgr. inż. Michała Babija jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych.

Podpis

OŚWIADCZENIA WSPÓLAUTORA

Wrocław, dnia 01.09.2024

dr inż. Mateusz Czok
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska
Wyb. Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracach:

1. S. Gburek, P. Podgórski, D. Ścisłowski, M. Kowaliński, M. Stęśliński, J. Bąkała, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, M. Czok, A. Dąbrowski, W. Nawrot, J. Głowinkowski, P. Wilk, „CubeSat compatible Modular GEM Sensors, for Space and Ground Applications with core components made out of LTCC”, zgłoszona do czasopisma *Measurements*, w trakcie recenzji
2. M. Babij, P. Bielówka, A. Dąbrowski, W. Nawrot, M. Czok, K. Malecha, “Manufacturing of a 70×70 mm² LTCC strip electrode readout for Gas Electron Multiplier detectors”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 342, 2022, 113656, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113656>
3. A. Dąbrowski, W. Nawrot, M. Czok, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, "LTCC Strip Electrode Arrays for Gas Electron Multiplier Detectors" *Sensors* 22, no. 2: 623. <https://doi.org/10.3390/s22020623>

mój wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:

udział w opracowaniu konstrukcji i wykonaniu elementów z ceramiki LTCC.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w prac przez mgr. inż. Michała Babija jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopiśmie naukowych.



Podpis

OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORA

Wrocław, dnia 01.09.2024

dr inż. Arkadiusz Dąbrowski
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska
Wyb. Wyspiańskiego 27
50-372 Wrocław

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracach:

1. S. Gburek, P. Podgórski, D. Ściśłowski, M. Kowaliński, M. Stęśliński, J. Bąkała, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, M. Czok, A. Dąbrowski, W. Nawrot, J. Głowinkowski, P. Wilk, „CubeSat compatible Modular GEM Sensors, for Space and Ground Applications with core components made out of LTCC”, zgłoszona do czasopisma *Measurements*, w trakcie recenzji
2. P. Bielówka, M. Babij, A. Dąbrowski, K. Malecha, “The application of Low-Temperature Cofired Ceramics technology in Gas Electron Multiplier microstructures”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 1047, 2023, 167749, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167749>
3. M. Babij, P. Bielówka, A. Dąbrowski, W. Nawrot, M. Czok, K. Malecha, “Manufacturing of a 70 × 70 mm² LTCC strip electrode readout for Gas Electron Multiplier detectors”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 342, 2022, 113656, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113656>

mój wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:
udział w opracowaniu konstrukcji i projektu warstw, udział w wykonaniu elementów z ceramiki LTCC oraz merytoryczna korekta tekstu.

Oświadczam, że w pracy:

1. A. Dąbrowski, W. Nawrot, M. Czok, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, "LTCC Strip Electrode Arrays for Gas Electron Multiplier Detectors" *Sensors* 22, no. 2: 623. <https://doi.org/10.3390/s22020623>

mój wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:
udział w opracowaniu konstrukcji i projektu warstw, udział w wykonaniu elementów z ceramiki LTCC oraz przygotowanie tekstu publikacji.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w prac przez mgr. inż. Michała Babija jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych.

A. Dąbrowski

Podpis

OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORA

Wrocław, dnia 23.08.2024

Piotr Podgórski
Zakład Fizyki Słońca
Centrum Badań Kosmicznych PAN
ul. Bartycka 18a
00-716 Warszawa

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

1. S. Gburek, P. Podgórski, D. Ścisłowski, M. Kowaliński, M. Stęśliński, J. Bąkała, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, M. Czok, A. Dąbrowski, W. Nawrot, J. Głowinkowski, P. Wilk, „CubeSat compatible Modular GEM Sensors, for Space and Ground Applications with core components made out of LTCC”, zgłoszona do czasopisma *Measurements*, w trakcie recenzji

mój wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:

udział w planowaniu eksperymentu, udział w opracowaniu części elektronicznej projektu, udział w przeprowadzaniu pomiarów oraz udział w obróbce danych pomiarowych.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w prac przez mgr. inż. Michała Babija jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopiśmie naukowych.

Piotr Podgórski

Podpis

OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORA

Wrocław, dnia 28.08.2024

mgr inż. Daniel Ścisłowski
Zakład Fizyki Słońca
Centrum Badań Kosmicznych PAN
ul. Bartycka 18a
00-716 Warszawa

OŚWIADCZENIE

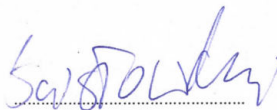
Oświadczam, że w pracy:

1. S. Gburek, P. Podgórski, D. Ścisłowski, M. Kowaliński, M. Stęśliński, J. Bąkała, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, M. Czok, A. Dąbrowski, W. Nawrot, J. Głowinkowski, P. Wilk, „CubeSat compatible Modular GEM Sensors, for Space and Ground Applications with core components made out of LTCC”, zgłoszona do czasopisma *Measurements*, w trakcie recenzji

mój wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:

udział w planowaniu eksperymentu, udział w opracowaniu oprogramowania, oraz udział w obróbce danych pomiarowych.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w prac przez mgr. inż. Michała Babija jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopiśmie naukowych.



Podpis

OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORA

Wrocław, dnia 01.09.2024

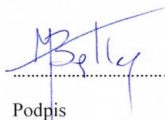
Jarosław Bąkała
Zakład Fizyki Słońca
Centrum Badań Kosmicznych PAN
ul. Bartycka 18a
00-716 Warszawa

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

1. S. Gburek, P. Podgórski, D. Ścisłowski, M. Kowaliński, M. Stęśliński, J. Bąkała, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, M. Czok, A. Dąbrowski, W. Nawrot, J. Głowinkowski, P. Wilk, „CubeSat compatible Modular GEM Sensors, for Space and Ground Applications with core components made out of LTCC”, zgłoszona do czasopisma *Measurements*, w trakcie recenzji mój wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:
udział w opracowaniu konstrukcji mechanicznej, oraz udział w przygotowaniu tekstu publikacji.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w prac przez mgr. inż. Michała Babija jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych.


.....
Podpis

OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORA

Wrocław, dnia 01.09.2024

Dr inż. Mirosław Kowaliński
Zakład Fizyki Słońca
Centrum Badań Kosmicznych PAN
ul. Bartycka 18a
00-716 Warszawa

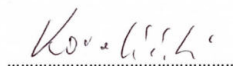
OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

1. S. Gburek, P. Podgórski, D. Ścisłowski, M. Kowaliński, M. Stęśliński, J. Bąkała, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, M. Czok, A. Dąbrowski, W. Nawrot, J. Głowinkowski, P. Wilk, „CubeSat compatible Modular GEM Sensors, for Space and Ground Applications with core components made out of LTCC”, zgłoszona do czasopisma *Measurements*, w trakcie recenzji

mój wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:
udział w planowaniu badań, oraz udział w przygotowaniu tekstu publikacji.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w prac przez mgr. inż. Michała Babija jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych.



Podpis

OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORA

Wrocław, dnia 10.09.2024

Dr Szymon Gburek
Zakład Fizyki Słońca
Centrum Badań Kosmicznych PAN
ul. Bartycza 18a
00-716 Warszawa

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

1. S. Gburek, P. Podgórski, D. Ścisłowski, M. Kowaliński, M. Stęśliński, J. Bąkała, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, M. Czok, A. Dąbrowski, W. Nawrot, J. Głowinkowski, P. Wilk, „CubeSat compatible Modular GEM Sensors, for Space and Ground Applications with core components made out of LTCC”, zgłoszona do czasopisma *Measurement*, w trakcie recenzji

mój wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:

udział w opracowaniu konstrukcji, udział w planowaniu badań, omówienie wyników oraz przygotowanie tekstu publikacji.

Oświadczam, że w pracy:

1. M. Babij, P. Bielówka, S. Gburek, K. Malecha, "A Segmental 2D Readout Board Manufactured in Printed Circuit Board Technology for Gas Electron Multiplier Detectors" *Sensors* 23, no. 19: 8095, 2023, <https://doi.org/10.3390/s23198095>

mój wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:

udział w opracowaniu konstrukcji oraz merytoryczna korekta tekstu.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w prac przez mgr. inż. Michała Babija jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych.

Szymon Gburek

Podpis

OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORA

Wrocław, dnia 01.09.2024

Dr Marek Stęślicki
Zakład Fizyki Słońca
Centrum Badań Kosmicznych PAN
ul. Bartycka 18a
00-716 Warszawa

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

1. S. Gburek, P. Podgórski, D. Ścisłowski, M. Kowaliński, M. Stęślicki, J. Bąkała, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, M. Czok, A. Dąbrowski, W. Nawrot, J. Głowinkowski, P. Wilk, „CubeSat compatible Modular GEM Sensors, for Space and Ground Applications with core components made out of LTCC”, zgłoszona do czasopisma *Measurements*, w trakcie recenzji

mój wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:
udział w planowaniu eksperymentu oraz udział w obróbce danych pomiarowych.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w prac przez mgr. inż. Michała Babija jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych.



Podpis

OŚWIADCZENIA WSPÓLAUTORA

Wrocław, dnia 29.08.2024

Dr Piotr Wilk
Wrocławski Park Technologiczny
ul. Klecińska 125
54-413 Wrocław

OŚWIADCZENIE

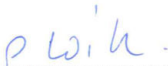
Oświadczam, że w pracy:

1. S. Gburek, P. Podgórski, D. Ścisłowski, M. Kowaliński, M. Stęśliński, J. Bąkała, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, M. Czok, A. Dąbrowski, W. Nawrot, J. Głowinkowski, P. Wilk, „CubeSat compatible Modular GEM Sensors, for Space and Ground Applications with core components made out of LTCC”, zgłoszona do czasopisma *Measurements*, w trakcie recenzji

mój wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:

udział w planowaniu pomiarów, wykonanie badań tomograficznych, wykonanie naświetleń akceleratorem cząstek.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w prac przez mgr. inż. Michała Babija jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych.


.....

Podpis

OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORA

Wrocław, dnia 28/08/2024r.

mgr inż. Jacek Głowinkowski
Wrocławski Park Technologiczny SA
Muchoborska 18, 54-424 Wrocław
koresp.: Klecińska 125, 54-413 Wrocław

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy:

1. S. Gburek, P. Podgórski, D. Ścisłowski, M. Kowaliński, M. Stęślicki, J. Bąkała, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, M. Czok, A. Dąbrowski, W. Nawrot, J. Głowinkowski, P. Wilk, „CubeSat compatible Modular GEM Sensors, for Space and Ground Applications with core components made out of LTCC”, zgłoszona do czasopisma *Measurements*, w trakcie recenzji

mój wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:

udział w planowaniu badań, udział w naświetlaniu akceleratomem cząstek.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przedłożenie w/w prac przez mgr. inż. Michała Babija jako część rozprawy doktorskiej w formie spójnego tematycznie zbioru artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych.



Podpis

CO-AUTHOR STATEMENTS

Delhi, 15.07.2024

dr Md Naimuddin
Department of Physics & Astrophysics
University of Delhi
Delhi, India

STATEMENT

I declare that in the work:

1. A. Ahmed, A. Kumar, Md. Naimuddin, M. Babij, P. Bielowska, "The qualification of GEM detector and its application to imaging", *Journal of Instrumentation*, Volume 17, April 2022, <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/17/04/P04002>,
my substantive contribution to the preparation, conduct, and development of the research and presentation of the work in the form of a publication is: participation in research planning, discussion of the results, and substantive proofreading of the text.

At the same time, I consent to the submission of the above-mentioned works by mgr inż. Michał Babij as part of a doctoral dissertation in the form of a thematically coherent collection of scientific articles published in scientific journals.

.....
Signature

CO-AUTHOR STATEMENTS

Delhi, 15.07.2024

Ahmed Asar
Department of Physics & Astrophysics
University of Delhi
Delhi, India

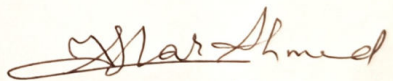
STATEMENT

I declare that in the work:

1. A. Ahmed, A. Kumar, Md. Naimuddin, M. Babij, P. Bielowska, "The qualification of GEM detector and its application to imaging", *Journal of Instrumentation*, Volume 17, April 2022, <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/17/04/P04002>, my substantive contribution to the preparation, conduct, and development of the research and presentation of the work in the form of a publication is: participation in research planning, participation in performing the tests, participation in the analysis of the results, and preparation of the publication text.

At the same time, I consent to the submission of the above-mentioned works by mgr inż. Michał Babij as part of a doctoral dissertation in the form of a thematically coherent collection of scientific articles published in scientific journals.

ASAR AHMED


Signature 19.07.2024

CO-AUTHOR STATEMENT

Delhi, 23.07.2024

Dr Ashok Kumar
Department of Physics & Astrophysics
University of Delhi
Delhi, India

STATEMENT

I declare that in the work:

1. A. Ahmed, A. Kumar, Md. Naimuddin, M. Babij, P. Bielowka, "The qualification of GEM detector and its application to imaging", *Journal of Instrumentation*, Volume 17, April 2022, <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/17/04/P04002>, my substantive contribution to the preparation, conduct, and development of the research and presentation of the work in the form of a publication is: participation in tests and analysis, and help in proofreading of the text.

At the same time, I consent to the submission of the above-mentioned works by Mr. Michał Babij as part of a doctoral dissertation in the form of a thematically coherent collection of scientific articles published in scientific journals.

.....
Signature

