

Prof. dr hab. Tadeusz PISARKIEWICZ
Instytut Elektroniki
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Kraków 22.07.2023

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA,
ELEKTROTECHNIKA i TECHNOLOGIE KOSMICZNE
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy:

***Technologia i właściwości mikrosystemów wytwarzanych
technikami druku 3D i 4D***

Autor rozprawy:

mgr inż. Bartosz Kawa

1. Analiza stanu wiedzy związanej z przedmiotem rozprawy

Mikrosystemy (MEMS) to miniaturowe zintegrowane urządzenia, których przynajmniej jeden z wymiarów charakterystycznych mieści się w zakresie mikrometrów. Małe wymiary, mała masa, niski pobór energii oraz możliwość masowej produkcji powodują, że średnia ich cena systematycznie maleje. Korzystne właściwości tych miniaturowych struktur spowodowały, że mikrosystemy wchodzi w skład większości obecnie wytwarzanych urządzeń elektronicznych, wykorzystywanych w takich obszarach jak motoryzacja, elektronika użytkowa, medycyna, przemysł wytwórczy, lotnictwo. Ogólnie mówi się o tzw. falach aplikacji mikrosystemów. Obecna fala, trzecia, związana jest z potrzebą gromadzenia jak największej ilości danych dotyczących całego obszaru przemysłu oraz naszego życia (Internet Rzeczy, IoT). Badania związane z techniką mikrosystemów są nieprzerwanie prowadzone w wielu ośrodkach naukowych na świecie. Odzwierciedleniem tego jest rosnąca liczba publikacji naukowych. Wg. bazy Science Direct liczba publikacji naukowych zawierających kluczowe słowo „MEMS” wynosiła ok. 10000 w roku 2022.

Jako materiały w produkcji mikrosystemów stosuje się krzem, szkło, ceramikę, metale lub polimery. Metody wytwarzania można natomiast pogrupować jako addytywne, transformacyjne lub subtraktywne. W procesie addytywnym warstwy materiału nanosi się na warstwy uprzednio naniesione. W metodach transformacyjnych zmienia się właściwości materiału lub podłoża. Metody subtraktywne polegają na precyzyjnym usuwaniu materiału. Struktury 3D wytwarzane są w procesie addytywnym. Korzystając z komputerowego modelu obiektu 3D przeprowadza się wieloetapowo wydruk i w końcowym etapie dokonuje się tzw.

RD N AEETK/134/2023

post processingu. Zalety druku 3D to elastyczność w projektowaniu, oszczędność w zużyciu materiału, dostosowanie wydruku do potrzeb aplikacji. Wymiary charakterystyczne struktur 3D mogą się mieścić w zakresie setek mikrometrów, zatem ten typ druku można nazwać precyzyjnym. Stosowany przez autora rozprawy druk strumieniowy (InkJet) jest jednym z rodzajów precyzyjnego druku 3D.

Jeżeli struktura wydruku jest nie tylko statycznym obiektem ale może reagować na bodźce zewnętrzne, to nazywamy ją strukturą 4D. Czwartym wymiarem jest tu czas. W badaniach autora rozprawy wykorzystane zostały materiały o znanych właściwościach, które umożliwiały zmianę kształtu mikrostruktury w wyniku oddziaływania zewnętrznego bodźca. Ponadto przedstawiony w pracy mikrosystem 4D jakim jest mikrodoniczka do badania wzrostu nasion został zaprojektowany pod kątem wykorzystania go również w warunkach mikrogravitacji.

2. Cel rozprawy

Wg. doktoranta głównym celem badawczym rozprawy było przeprowadzenie kompleksowych badań związanych z technologią drukowanych strumieniowo mikrosystemów 3D zawierających struktury mikromechaniczne i wykazanie przydatności tej techniki do wytwarzania i badania właściwości przykładowych mikrosystemów wykonanych techniką strumieniowego druku 3D/4D. Szczegółowe cele badawcze obejmowały:

- a) optymalizację parametrów strumieniowego druku 3D elementów mikromechanicznych jako składowych mikrosystemów,
- b) określenie właściwości mechanicznych drukowanych mikrostruktur w różnych warunkach środowiskowych, aby było możliwe wykorzystanie tej wiedzy w opracowywaniu struktur 4D,
- c) opracowanie i badania metodologii projektowania mikrosystemów z uwzględnieniem cech charakterystycznych techniki druku 3D i właściwości drukowanych mikrostruktur,
- d) opracowanie i badania modelowych mikrosystemów wykonanych technikami druku 3D/4D oraz specjalistycznych układów elektronicznych, optoelektronicznych i narzędzi informatycznych współpracujących z opracowanymi drukowanymi mikrosystemami.

3. Wprowadzenie do techniki druku 3D/4D

Istotne informacje związane z drukiem 3D/4D zostały zawarte w tekście rozprawy w rozbudowanym **wstępie** liczącym 40 stron. Omówiona jest tu historia druku 3D ze wskazaniem głównych kamieni milowych i obszarów zastosowań tego druku. Wyszczególnione zostały wymagania jakie musi spełniać technika druku 3D aby formowanie struktur było precyzyjne. W szczególności zapewniona musi być odpowiednia rozdzielczość co najmniej 250 dpi, dokładność odwzorowania wirtualnego modelu sięgająca 100 μm , powtarzalność zapewniająca jak najmniejszy rozrzut wymiarów tego samego detalu pomiędzy seriami, zapewniona automatyzacja procesu wytwarzania, nieniszczący post processing po wydruku.

W dalszej części wstępu omówione zostały bardziej szczegółowo wybrane techniki

precyzyjnego druku 3D: osadzanie stopionego filamentu (ang. *Fused Filament Fabrication FFF*), bezpośrednie drukowanie tuszem (ang. *Direct Ink Writing DIW*), stereolitografia laserowa (ang. *Stereolithography, SLA*), fotoutwardzanie żywic z cyfrowym sterowaniem światłem (ang. *Digital Light Processing, DLP*), drukowanie strumieniowe (ang. *InkJet*), polimeryzacja dwufotonowa (ang. *Two Photon Polymerization TPP*).

Drukowanie strumieniowe InkJet to metoda, którą stosował doktorant. Fotoutwardzalne polimery nanoszone są na platformę budulcową przy użyciu mikrodysz. Naniesioną kolejną warstwę utwardza się lampą UV. Podczas jednego procesu druku można stosować wiele materiałów. Stosowany materiał podporowy pozwala na wytwarzanie mikrokanalów oraz formowanie delikatnych szczegółów modelu. Ze względu na dużą wydajność technika ta jest najszerzej stosowana w przemyśle. Rozdzielczość wydruku określona średnicą dyszy głowicy drukującej jest zazwyczaj na poziomie kilkudziesięciu μm .

Kolejnym zagadnieniem przedstawionym w części wstępnej rozprawy są wybrane przykłady drukowanych 3D mikrosystemów takich jak czujniki, układy mikrofluidyczne, aktuatory oraz mikromechanizmy i mikroroboty. Przykładem mikroczujnika wytworzonego techniką druku strumieniowego jest czujnik nacisku o grubości warstwy aktywnej 500 μm . Z kolei w laboratorium badawczym doktoranta wytworzono układ mikrofluidyczny typu lab-on-chip do elektroforezy żelowej. Dzięki istnieniu drożnych kanałów o średnicy 500 μm i przezroczystego materiału budulcowego możliwe było wykorzystanie optycznej detekcji fluorescencji łańcuchów DNA. Jako przykładowy aktuator został opisany mikrozawór zwrotny z elementem aktywnym w postaci belki o grubości 200 μm , który umożliwia przepływ cieczy lub gazu przy ciśnieniu przepływu powyżej 50 kPa (również wytworzony w lab. badawczym doktoranta). Zastosowanie techniki polimeryzacji dwufotonowej pozwoliło z kolei wytworzyć aktuatory z dokładnością nanometryczną. Przykładem takiego aktuatora jest struktura, która zmienia swój kształt pod wpływem zmiany pH otoczenia. Polimeryzacja dwufotonowa znalazła również zastosowanie w konstruowaniu mikrorobotów i mikromechanizmów o wymiarach poniżej 100 μm . Przykładem może być mikrosilnik o średnicy 40 μm napędzany ruchem bakterii *E.coli*, wytworzony na uniwersytecie rzymskim. Technika tą wykonywano również mikrotransportery śrubowe zawierające superparamagnetyczne nanocząstki tlenku żelaza sterowane zewnętrznym polem elektromagnetycznym. Wg. autora rozprawy brak jest jednak mikromechanizmów lub mikrorobotów wytworzonych techniką druku strumieniowego. Trudności w tym przypadku mogą wynikać z konieczności usuwania materiału podporowego ze struktury wielowarstwowej. Wstępne badania w tym zakresie autor jednak przeprowadził wytwarzając w technologii strumieniowego druku 3D miniaturowe przekładnie zębate.

Opisane powyżej techniki druku 3D umożliwiają wprawdzie wytwarzanie mikrostruktur takich jak czujniki, układy mikrofluidyczne, aktuatory czy mikroroboty, brak jest jednak jednej uniwersalnej techniki druku 3D dla mikrosystemów. Dodatkowo pojawiły się mikrosystemy ruchome z wykorzystaniem różnych metod akwacji i detekcji. W ten sposób powstał druk 4D. Przez wybór odpowiedniego materiału funkcyjnego możliwe jest uzyskanie zmiany kształtu obiektu połączone często z jego przemieszczeniem w funkcji czasu. W przypadku druku strumieniowego 4D głównymi stymulantami odpowiedzialnymi za zmianę kształtu obiektu są temperatura oraz woda. Jako przykłady rozwiązań mikrosystemów

wytworzonych z użyciem techniki druku 4D można wymienić: strukturę wielozawiasową, gdzie każdy zawias ma inną temperaturę aktywacji, zmieniające się kształty hydrożeli pod wpływem temperatury, chwytaki z pamięcią kształtu, struktury sprężyn ze zmienną geometrią. Ogólnie proces projektowania urządzeń 4D jest skomplikowany, druk wielomateriałowy przysparza wiele problemów, wykorzystywane materiały muszą być precyzyjnie scharakteryzowane również w skali mikro. Niemniej jednak obserwuje się począwszy od lat 2018 wyraźny wzrost liczby publikacji z frazą „4D printed microsystems”, jakkolwiek jest on dwa rzędy wielkości mniejszy niż w przypadku publikacji związanych z drukiem 3D.

4. Badania struktur 3D/4D

Badania autora rozprawy związane były z możliwością wykorzystania techniki strumieniowego druku 3D i 4D do wytworzenia dwu typów drukowanych mikrosystemów wraz z niezbędnymi do ich pracy urządzeniami elektronicznymi. Mikrosystemy te to miniaturowy przetwornik energii mechanicznej na elektryczną (energy harvester) oraz mikrodoniczka do badania wzrostu nasion w warunkach grawitacji ziemskiej i mikrogravitacji.

Pierwszy mikrosystem jest przykładem przetwornika z grupy urządzeń tzw. „zero-energetycznych”, które pobierają bardzo małą energię ze swojego bezpośredniego otoczenia, w tym przypadku wibracji i zamieniają ją na energię elektryczną. Dokładny opis urządzenia i jego działanie zostały zamieszczone w publikacji B. Kawa, K. Śliwa, V.C. Lee, Q. Shi, R. Walczak, *Inkjet 3D Printed MEMS Vibrational Electromagnetic Energy Harvester*, *Energies*, 13, 2800, 2020 (punktacja MEiN 140). Urządzenie to składało się z wydrukowanej w 3D struktury mikromechanicznej-sprężyny połączonej z miniaturowym magnesem stałym oraz cewki mikroelektronicznej. Charakterystyczne wymiary sprężyn zawierały się w przedziale od 200 μm do 400 μm a łączna objętość urządzenia nie przekraczała 1 cm^3 . Maksymalna moc wyjściowa wynosiła ok. 24 μW .

Odmianą urządzenia opisanego powyżej jest wieloczęstotliwościowy przetwornik energii elektromagnetycznej, składający się ze sprężyn o stałej grubości 300 μm i szerokościach zmieniających się w przedziale od 220 μm do 500 μm . Dzięki temu możliwe było wytworzenie mikrosystemu o co najmniej dwu częstotliwościach pracy w ramach jednej struktury, w wielu możliwych konfiguracjach dwuczęstotliwościowych. Struktury pracowały w zakresie częstotliwości 85-185 Hz z maksymalną mocą wyjściową 32 μW . Urządzenie opisane zostało w publikacji B. Kawa, V. Ch. Lee, R. Walczak, *Inkjet 3D Printed MEMS Electromagnetic Multi-Frequency Energy Harvester*, *Energies* 15, 4468, 2022.

W ramach drugiego tematu badawczego wytworzone zostało w pierwszej kolejności za pomocą strumieniowego druku 3D urządzenie mikrofluidyczne do badań wzrostu korzenia i łodygi nasiona w warunkach ziemskiej grawitacji. Zintegrowane czujniki siły służyły do monitorowania osiowych sił wzrostu korzenia i łodygi kiełkującego nasiona. Określanie sił wzrostu wymagało uprzedniego wyznaczenia mechanicznych zależności ugięcia względem siły dla zintegrowanych microbelek. Urządzenie i wyniki w/w badań opublikowano w pracy:

R. Walczak, B. Kawa, K. Adamski, *Inkjet 3D printed microfluidic device for growing seed root and stalk mechanical characterization*, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 297, 2019 (punktacja MEiN 100).

W kolejnym artykule w ramach drugiego tematu badawczego przedstawiono propozycję autonomicznego laboratorium do misji nanosatelitarnej umożliwiającej uprawę zbóż w kosmosie. Zaprojektowana mikrodoniczka wykonana w technice druku 3D była częścią kompletnego systemu z dozowaniem pożywki i obserwacją wzrostu pojedynczego ziarna (objętość systemu nie przekraczała $70 \times 50 \times 40 \text{ mm}^3$). Uprawa nasion rzeżuchy (*Lepidium sativum*) była prowadzona w warunkach ziemskich oraz w warunkach symulowanej mikrogravitacji z wykorzystaniem urządzenia zwanego Random Position Machine. W efekcie opracowana została koncepcja ładunku dla satelity 3U CubeSat do badań rozwoju roślin w kosmosie. Omówione badania zostały opublikowane w artykule: Kawa, B.; Śniadek, P.; Walczak, R.; Dziuban, J. *Nanosatellite Payload for Research on Seed Germination in a 3D Printed Micropot*. *Sensors*, 23, 1974, 2023 (punktacja MEiN 100).

5. Najważniejsze osiągnięcia autora rozprawy

- Opracowanie i wykonanie jedno- i wieloczęstotliwościowego wibracyjnego przetwornika energii mechanicznej na elektryczną (harwestera) w technologii strumieniowego druku 3D.
- Opracowanie stanowiska pomiarowego do badań harwesterów wraz z towarzyszącym zestawem elektronicznym i oprogramowaniem informatycznym.
- Optymalizacja konstrukcji przetwornika energii pod kątem uzyskania maksymalnej siły elektromotorycznej generowanej w cewce.
- Opracowanie i wykonanie mikrosystemu do badań wzrostu nasion w warunkach mikrogravitacji.
- Przeprowadzenie badań własności mechanicznych mikrobelek jako czujników siły.
- Opracowanie zintegrowanego systemu dozowania medium zasilającego mikrodoniczkę.
- Przeprowadzenie badań wzrostu rzeżuchy w warunkach mikrogravitacji na zaprojektowanym i wytworzonym urządzeniu Random Position Machine.
- Wstępne badania wytworzonego mikrosystemu z drukowaną doniczką na pokładzie nanosatelity Lab Sat wystrzelonego w przestrzeń kosmiczną w styczniu 2022 roku.

6. Uwagi krytyczne

W pracy nie dostrzeżono błędów merytorycznych związanych z tematyką rozprawy. Używany język jest poprawny, występuje niewiele drobnych pomyłek językowych i zwykłych przeoczeń. Przykładowo:

- na str.12 brak odwołania do zamieszczonej tabeli 2,
- na str. 21 błędne odwołanie do Rys. 12C i Rys. 12D, podczas gdy dotyczy to Rys. 11,
- na str. 26 odwołanie do Rys. 10b powinno być zmienione na Rys. 13b,
- na str. 47 używany jest termin „satelit” zamiast „satelitów”.

Pewną niedogodnością jest konieczność ciągłego odwoływania się do wykazu skrótów i oznaczeń, który zamieszczony we wstępnej części pracy. Przykładowo zamiast użycia rzadko stosowanego zwrotu „technika 2PP” użycie zwrotu „technika polimeryzacji dwufotonowej 2PP” nie powodowałoby konieczności wyszukiwania tego oznaczenia w spisie.

Wskazanim byłoby również bliższe objaśnienie w tekście pracy działania maszyny do losowego pozycjonowania RPM i dlatego należy oczekiwać, że mikrogravitacja będzie miała wpływ na wzrost rośliny.

7. Ocena końcowa

Wymienione uwagi krytyczne nie wpływają na jakość rozprawy doktorskiej, którą oceniam wysoko. Nie zauważono błędów merytorycznych, które wymagałyby przedyskutowania.

Doktorant w swoich badaniach wykazał, że techniki strumieniowego druku 3D i 4D umożliwiają wytwarzanie drukowanych mikrosystemów jakimi były miniaturowy przetwornik energii mechanicznej na elektryczną (energy harvester) oraz mikrodoniczka do badania wzrostu nasion w warunkach grawitacji ziemskiej i mikrogravitacji. Jednocześnie zaprojektowane zostały oraz poddane badaniom specjalistyczne układy elektroniczne, optoelektroniczne i narzędzia informatyczne współpracujące z opracowanymi drukowanymi mikrosystemami. Wymienione badania świadczą o wysokim poziomie naukowym rozprawy doktorskiej.

Zrealizowane prace zostały opublikowane w 4 specjalistycznych czasopismach o obiegu międzynarodowy z punktacją MEiN: 2 publikacje po 140 pkt oraz 2 po 100 pkt, co świadczy b. pozytywnie o dorobku naukowym doktoranta.

Reasumując stwierdzam, że cel pracy został osiągnięty i recenzowana rozprawa doktorska **w pełni spełnia wymagania** wynikające z Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w zakresie Sztuki z 14 marca 2003 r (Dz. U. Nr 65, poz. 95 z późniejszymi zmianami). Praca zdaniem recenzenta jest wybitnie dobra i zasługuje na **wyróżnienie**. Wnioskuje zatem o dopuszczenie **mgr inż. Bartosza Kawy** do publicznej obrony.



Prof. dr hab. Tadeusz Pisarkiewicz