

Warszawa, dnia 9 sierpnia 2023 r

Dr hab. inż. Ryszard KISIEL, prof. PW
Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki
Wydział Elektroniki Technik Informatycznych, Politechnika Warszawska

**Recenzja rozprawy doktorskiej dla Rady Dyscypliny Naukowej
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
Politechniki Wrocławskiej**

Tytuł rozprawy:

”Połączenia o dużej efektywności przewodzenia ciepła w montażu elektronicznym z wykorzystaniem procesu spiekania nanocząstek srebra”

Autor rozprawy:

Mgr inż. Krzysztof Stojek

Od lat poszukuje się nowych rozwiązań materiałowo-technologicznych związanych z montażem elektronicznym z uwagi na nowe oczekiwania i zmieniające się potrzeby rynku. Kilka nurtów poszukiwań jest wyraźnych: ekologia, tendencja do miniaturyzacji sprzętu, a także poszukiwanie efektywnych rozwiązań dla elektroniki mocy oraz dla zastosowań wysokotemperaturowych. Tematyka doktoratu wpisuje się w ten ciąg poszukiwań. Technologia LTJT oparta o nano- lub mikro- proszki Ag jest ekologiczna i umożliwia ciągłą pracę układów elektronicznych w temperaturach sięgających 300°C i wyższych. Dzieje się to przy niezmiennych, względem technologii lutowania, temperaturach montażu (~250°C).

Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrywane w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny) ?

Niniejsza Rozprawa dotyczy montażu w elektronice, zatem wpisuje się w zakres dyscypliny naukowej „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne”. Uszczegółowiony zakres to poszukiwanie ekologicznych, efektywnych pod względem chłodzenia technik montażu metalizowanych (Ag,Au,Cu) i niemetalizowanych („goły” Si) chipów do metalizowanych podłoży w oparciu o nanopasty Ag.

Po wprowadzeniu i uzasadnieniu tematyki sformułowano dwie tezy Rozprawy:

Teza nr 1 : „Możliwy jest dokładny pomiar rezystancji termicznej złącza wykonanego niskotemperaturową techniką łączenia z wykorzystaniem procesu spiekania nanocząstek Ag”

Dokładne wyznaczenie rezystancji termicznej złącza ma bardzo istotny aspekt praktyczny. Rezystancja złącza obejmuje nie tylko rezystancję materiału łączącego (warstwy nano Ag), ale także obie rezystancje interfejsów (z metalizacją Si i z metalizacją podłoża). Znajomość tej rezystancji pozwala na jednoznaczną ocenę proponowanego rozwiązania konstrukcyjnego złącza pod względem możliwości chłodzenia.

Teza nr 2: „Możliwe jest takie skomponowanie pasty do procesu LTJT, aby utworzone zostały złącza z powierzchniami niemetalizowanymi”

Przeprowadzone badania mają potwierdzić, że przez niewielki dodatek żywicy epoksydowej do nanopasty Ag jest możliwe otrzymywanie złączy o akceptowalnej wytrzymałości mechanicznej. Potwierdzenie tej tezy ma istotny aspekt praktyczny, np. w przypadku struktur GaN-on-Si eliminacja spodniej metalizacji upraszcza i potania rozwiązanie.

Rozprawa ma charakter doświadczalny.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczący o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonywujący ?

Część teoretyczna pracy, rozdziały nr 2 i 3, oparta jest o analizę ponad 100 pozycji, wiele z nich dotyczy okresu sprzed 2010 roku, ale nie może to być dziwne, gdyż wtedy badano i analizowano podstawy teoretyczne i doświadczalne technologii LTJT.

Opis zjawisk, sformułowania i pojęcia, którymi operuje Autor wskazują, że posiada on wiedzę i rozumie zjawiska związane z procesem spiekania nano- i mikro- cząstek Ag. W rozdziale nr 2 analizowano procesy formowania porów w warstwach spiekanych, szkoda, że tej analizie nie pogłębiono w rozdziałach nr 8 i 9 wiążąc to zjawisko z właściwościami mechanicznymi i termicznymi złącz.

Na szczególną uwagę zasługuje rozdział nr 3, w którym dokładnie analizowano wpływ czynników materiałowych i technologicznych na uzyskiwane parametry wytrzymałościowe złączy. Zdaniem Recenzenta, w rozdziale tym brakuje podsumowania i wskazania, które z parametrów procesu spiekania są najistotniejsze i będą dalej wykorzystane w badaniach z rozdziału nr 6. (Technologia wykonywania złączy).

3. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwych metod i czy przyjęte założenia są uzasadnione ?

Autor zastosował właściwe metody badawcze oraz wykorzystał dostępną mu, i odpowiednią do realizowanych badań, aparaturę badawczą (piec konwekcyjny z kontrolowaną szybkością nagrzewania, kamerę termowizyjną FLIR, mikrotomograf komputerowy Nanomex 180, mikroskopy optyczne oraz skaningowy mikroskop elektronowy firmy Hitachi SU6600). Na podkreślenie zasługuje fakt, że wiele doświadczeń planowano i wykonywano korzystając z teorii planowania eksperymentów DoE, a analizę wyników prowadzono w oparciu o metodę ANOVA.

Recenzent ma uwagę co do konfiguracji próbki stosowanej do pomiarów rezystancji termicznej złącza, Rys. 6.9. Złącze do pomiaru rezystancji cieplnej jest usytuowane między źródłem a odbiornikiem, a analizowany obraz złącza kamerą termowizyjną jest obserwowany z góry „na umownie górnej płaszczyźnie” próbki, podczas gdy strumień ciepła płynie w całej objętości próbki. Zatem dla prawidłowych pomiarów niezbędny jest stan ustalony, aby temperatura wzdłuż krawędzi TIM była jednakowa na całej długości próbki i tożsama z temperaturą we wnętrzu próbki. Jeśli w warstwie TIM będą wady (pustki, niezwilżenia) to powstaje pytanie jak to będzie wpływało na pomiar temperatury na górnej powierzchni próbki.

4. *Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?*

Prace naukowo badawcze z zakresu opracowywania nowych materiałów oraz rozwijania technologii montażu prowadzone są zawsze w zespołach wieloosobowych. Jak zaznaczył sam Doktorant, uczestniczył on w realizacji wielu prac dyplomowych studentów służąc im głosem doradczym i pomocą techniczną. Istotny był wkład Doktoranta w realizację eksperymentów I oraz II a eksperyment DoE definiujący sposób wykonania próbek do dalszych badań jest jego autorstwem (Rozdział 6). Niewątpliwym dorobkiem Doktoranta są prace oraz analizy zawarte w rozdziałach nr 7, 8 i 9. Szkoda tylko, że błędnie przy opisie eksperymentów cytowano pozycje literatury nr [132] i [122], które nie są pozycjami z Politechniki Wrocławskiej.

Oryginalnym pomysłem Doktoranta było zaproponowanie metody pomiaru rezystancji termicznej złącza przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej, zaprojektowanie do tego geometrii próbek i układu pomiarowego ze stabilnym źródłem mocy oraz odbiornika ciepła a także interpretacja wyników.

Drugim niewątpliwym osiągnięciem jest spostrzeżenie, że przez odpowiednie skomponowanie pasty Ag jest możliwe utworzenie złącza z powierzchniami niemetalizowanymi. Doktorant stwierdził, że prawdopodobnie adhezję wspomaga niewielki dodatek żywicy epoksydowej, a większa wytrzymałość złącza jest wynikiem bardziej równomiernych sił adhezji do podłoża i adhezji do Si. Zdaniem Recenzenta w interpretacji dobrej adhezji past Ag do powierzchni Si należy wziąć pod uwagę dane z Rys.9.5. Można postawić taką hipotezę, że dobrą adhezję może wspierać obecność tlenu i niewielka srebra na powierzchni Si po zerwaniu. Warto też zauważyć, pewną analogię z Rys.8.16, gdzie można zauważyć akceptowalną rezystancję termiczną złącza z utlenionymi powierzchniami Si (złącze SiO_2 - SiO_2).

Podsumowując te rozważania, rozprawa wpisuje się w ciąg rozważań nad wykorzystaniem technologii LTJT opartej o nanopasty Ag z dodatkiem żywicy epoksydowej w montażu elektronicznym. Technologia ta może być szczególnie przydatna dla elektroniki mocy, gdzie parametr rezystancji cieplnej złącza jest szczególnie krytyczny.

5. *Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?*

Autor wykazał się umiejętnością zaplanowania eksperymentów materiałowo-technologicznych związanych z formowaniem złącza z wykorzystaniem past Ag. Potrafi wyniki eksperymentów odpowiednio zinterpretować i zilustrować. W pracy daje się zauważyć wiele elementów porządkujących ciąg badań i rozumowań. I tak we wstępie wymieniono warunki poprawnego montażu elektronicznego, a w rozdziale nr 7 jasno wypunktowano założenia metody dokładnego pomiaru rezystancji termicznej złącza. Dalej krok po kroku w rozdziale nr 8 pokazano jak w kolejnych krokach poszukiwano takich rozwiązań, które poprawiają dokładność pomiaru rezystancji złącza.

W pracy dostrzeżono kilka błędów redakcyjnych i nieścisłości. Poniżej przykłady dostrzeżonych uchybień:

Str.29 – 6 linia od dołu; „o przeciwnych polaryzacjach – hydrofobowej j i hydrofobowej [26],

Str. 62 – 2 linia od dołu: „na krzem nanoszono warstwy srebra i aluminium” a w Tab.6.4, str.63 mamy Ag i Cu.

Str 110. W podsumowaniu nie powinna znaleźć się informacja , że „Wyniki przedstawiono w rozdziale 9.6”, którego nie ma w pracy.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady ?

W pracy jest rozbudowana część teoretyczna (rozdziały nr 2 i 3, 28 stron) w porównaniu do części merytorycznej (rozd. nr 5-9, 48 stron). Ponadto w rozdziałach merytorycznych są wstawki teoretyczne, np. w rozdziale 9.1 o klejach elektrycznie przewodzących.

Mam też uwagę odnośnie koncepcji pracy. Moim zdaniem w rozdziale nr 9 poza pełną analizą właściwości mechanicznych złączy z powierzchniami niemetalizowanymi powinna być przypomniana informacja z rozdziału nr 8 (Rys.8.16), że takie złącza cechują się dodatkowo porównywalną z powierzchniami metalizowanymi rezystancją cieplną.

Zdaniem Recenzenta, rozdział nr 10, „Podsumowanie”, jest zbyt lakoniczny, ma nieco ponad 2 strony. Obszerne uzasadnienia słuszności postawionych tez, tezy nr 1 jest zawarte w rozdziale nr 8, a tezy nr 2 w rozdziale nr 9. Zdaniem Recenzenta w podsumowaniu mogłyby znaleźć się wytyczne i sugestie odnośnie dalszych badań. Niektóre z nich są opisane we fragmencie rozdziału nr 8, gdzie analizowane jest wykorzystanie próżni do pomiarów, czy też we fragmencie z rozdziału nr 9 gdzie jest sugerowane wykorzystanie metody progowania do oceny jakości warstwy TIM.

Recenzent ma też uwagę co do sformułowania zawartego w tezie nr 1 „dokładny pomiar rezystancji termicznej złącza” oraz stwierdzenia zawartego w tekście na str.90 „Zastosowana metoda jest na tyle dokładna, że możliwe jest określenie wpływu poszczególnych składników rezystancji złącza na wartość θ_T ”. Połączenie dwóch pojęć „dokładny” oraz „określenie wpływu poszczególnych składników rezystancji złącza” sugerowałoby, że rzeczywiście staje się możliwe liczbowe określenie θ_{Ag-TIM} czy θ_{Ag} . Tymczasem możliwe są tylko względne porównania między rezystancjami interfejsów i wskazanie rozwiązania o najmniejszej rezystancji złącza.

Na str.48 tuż pod tezą nr 2 jest zawarte stwierdzenie: “Teoretycznie, zmniejszenie ilości składników powinno skutkować obniżeniem wartości rezystancji termicznej złącza”. Tymczasem, jak wynika z pomiarów, Rys.8.16, złącza do niemetalizowanych powierzchni Si mają zdecydowanie większą rezystancję niż złącza do metalizacji Ag. W rozprawie nie znalazłem komentarza do tego stwierdzenia.

Konkluzje zawarte w rozdziale 8.7 opierają się na założeniach „jednakowe warunki materiałowe i technologiczne” przy wykonywaniu złączy, co pozwala zakładać, że rezystancja cieplna spieczonej warstwy pasty Ag „ θ_{Ag} ” ma stałą wartość. Jest to trudne do realizacji założenie, biorąc pod uwagę ręczne nakładanie pasty. Na str.89 jest informacja, że w każdej grupie statystycznej znajdowała się próbka, która wartością dostarczonej mocy znacznie odbiegała od wyznaczonej średniej. Zdaniem Recenzenta może to być związane z niejednorodnością grubości warstwy TIM.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Tematyka rozprawy doktorskiej dotyczy badań zagadnień materiałowo-technologicznych związanych z ekologicznym oraz wysokotemperaturowym montażem elektronicznym. Autor w dysertacji analizuje przydatność technologii LTJT (spiekania) wykorzystującej nanopasty Ag. Badane nanopasty zawierały od 50%wg. do 80% wg. nanocząstek Ag, przy czym konkluzje oparto na pastach zawierających 50% wg. nanocząstek Ag oraz płatkowe mikrocząstki Ag o rozmiarach 2-4 mikrometry zawieszonych w żywicy epoksydowej (5-10%wg). Zasadność wyboru tematyki dysertacji wynika z co najmniej kilku przesłanek:

- przewodność cieplna past Ag może przekraczać 200 W/mK, a stosowanych dotychczas lutów zawiera się w przedziale 50-70 W/mK,
- dodatkowo odporność temperaturowa połączeń opartych na pastach Ag zdecydowanie przekracza 300°C, podczas gdy dla lutów bezołowiowych sięga 150-170°C, a dla lutów wysokoołowiowych (Pb5Sn) może co najwyżej sięgać 250°C,
- połączenia w technologii LTJT można formować w przedziale temperatur 200-300°C, a z udziałem nanocząstek Ag w temperaturach poniżej 250°C.

Drugim ważnym zagadnieniem analizowanym w pracy jest możliwość aplikacji nanopast Ag opartych na żywicach epoksydowych do formowania połączeń z powierzchnią niemetalizowanego Si.

Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a) ~~nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy~~
- b) ~~wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania~~
- c) **spełniająca wymagania**
- d) ~~spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem~~
- e) ~~wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie~~

Podsumowanie

Doktorant udowodnił, że jest dojrzałym badaczem, który potrafi realizować złożone zadania naukowe wykorzystując w sposób świadomy nabytą przez siebie wiedzę, analizując dostępną literaturę, wykorzystując dostępną aparaturę badawczą oraz stosować właściwe metody badawcze. Rezultaty badań zostały dobrze udokumentowane i właściwie przeanalizowane.

Wnoszę zatem o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony jego pracy doktorskiej. Stwierdzam, że oceniana praca spełnia wymagania ustawowe i zwyczajowo stawiane rozprawom doktorskim.

