

Kraków, 19.07.2023r.

Prof. dr hab. Tomasz Stapiński
Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica
w Krakowie
Instytut Elektroniki
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. Krzysztofa Stojka

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

Promotor:

Pan Prof. dr hab. inż. Jan Felba

Problematyka rozprawy

Problematyka rozprawy związana jest z metodami montażu w elektronice. Aktualny nurt w elektronice dotyczy alternatywnych technik łączenia elementów elektronicznych ażeby wyeliminować lutowanie z użyciem stopów zawierających szkodliwe substancje i które zapewnią wymagania związane ze skutecznym odprowadzaniem ciepła. Autor skoncentrował się nad zastosowaniem techniki niskotemperaturowego spiekania nanocząstek srebra. Cechą tej metody jest niska temperatura wykonywania połączeń elementów do podłoża, przy czym temperatura pracy wykonanego złącza może być wyższa, co ma znaczenie w elektronice wysokotemperaturowej.

Autor był zmotywowany przeprowadzeniem badań dotyczących wykonania połączeń o małej wartości rezystancji termicznej oraz materiałami o dużej odporności termicznej. Wybór padł na techniki łączenia z wykorzystaniem procesu spiekania nanocząstek srebra. Proces nosi nazwę „Low Temperature Joining Technique” (LTJT) czyli „niskotemperaturowa technika łączenia z wykorzystaniem procesu spiekania nanocząstek srebra”. Pan mgr Krzysztof Stojek w rozprawie doktorskiej skoncentrował się na technologii LTJT.

Pan mgr Krzysztof Stojek zwrócił uwagę, że wytrzymałość mechaniczna złącza nie powinna być jedynym kryterium jakości połączenia, gdyż struktura spieczonej warstwy nie jest jednorodna. Na transport ciepła wpływają inne materiały wchodzące w skład złącza, a najlepszą metodą walidacji transportu ciepła jest dokładny pomiar rezystancji termicznej. Prowadziło to Autora do postawienia I tezy rozprawy „*możliwy jest dokładny pomiar rezystancji termicznej złącza wykonanego niskotemperaturową techniką łączenia wykorzystaniem procesu spiekania nanocząstek srebra*”.

Pan mgr inż. Krzysztof Stojek dla potwierdzenia postawionej tezy zaangażował się w prace eksperymentalne, wytypował stosowną aparaturę badawczą i technologiczną i rozplanował eksperymenty. Metodyka badań wymagała zapewnienia powtarzalności procesów, jednoznacznego określenia parametrów materiałowych i technologicznych.

Autor wykazał się dobrą znajomością obsługi aparatury technologicznej i interpretacji wyników pomiarowych. Na aparaturę, która była używana w części eksperymentalnej składały się urządzenia: piec konwekcyjny Binder GmbH, szlifierka, zrywarka Lloyd Instruments LRX, kamera termograficzna FLIR, model ThermoVision™ A40m, Mikrotomograf Nanomex|180, Optyczny mikroskop ZEISS AXIO, skaningowy mikroskop elektronowy (Hitachi, SU6600), magnetron Pfeiffer Classic 570, maszyna Secotom 50 marki Struers. Pan mgr inż. Krzysztof Stojek, jak wynika z treści rozprawy, czynnie uczestniczył w obsłudze aparatury i jej konfiguracji.

Autor szczegółowo opisał metodę pomiaru rezystancji termicznej złączy, geometrię układu pomiarowego i stosowane elementy wspomagające np. stabilne źródło ciepła. Pan mgr inż. Krzysztof Stojek uzyskał zadawalającą dokładność pomiaru temperatur oraz powtarzalność metody pomiarowej rezystancji termicznej złączy. Istotne była również identyfikacja udziału rezystancji cząstkowych w połączeniach różnych powierzchni.

Autor koncentrował się również na złączach powierzchni niemetalizowanych jednego rodzaju w postaci powierzchni krzemu. Badano wytrzymałość mechaniczną złączy spiekane (TIM) i gorszą - dla klejonego (TCA). Istotnym wnioskiem z badań Pana mgr inż. Krzysztofa Stojka jest stwierdzenie, że dobre złącza uzyskuje się dla niemetalizowanej powierzchni po dodaniu do materiału do spiekania niewielkiej ilości żywicy epoksydowej, co potwierdza drugą tezę rozprawy. Autor wykazał, że wytrzymałości mechaniczne połączeń są odpowiednie i w pełni spełniają wymagania stawiane elementom montowanym w urządzeniach elektronicznych.

Charakterystyka rozprawy

Rozprawa ukazała się w formie zwartej i posiada oryginalny układ. Rozprawa ukazała się w formie wydania książkowego Politechniki Wrocławskiej Wydziału Elektroniki, Fotoniki

i Mikrosystemów w 2023 roku. Językiem rozprawy jest język polski, jednakże zamieszczono szereg angielskojęzycznych pojęć i akronimów. Wskazano publikacje Pana mgr inż. Krzysztofa Stojka stanowiących dzieła Autora, gdzie wielokrotnie był pierwszym Autorem.

Rozprawa doktorska wraz składa się ze 123 stron i ma prawidłowy układ edytorski, a jej struktura jest przejrzysta. Przytoczona bibliografia jest w pełni wystarczająca dla naświetlenia problematyki i zawiera 153 pozycje, w większości z kilku ostatnich lat wydanych w liczących się czasopismach naukowych, z czego Pan mgr inż. Krzysztof Stojek powołuje się na 14 publikacji, w których w większości jest pierwszym autorem. Bibliografia świadczy o dobrym rozeznaniu literaturowym Autora w uprawianej przez Niego dyscyplinie naukowej oraz o znacznym dorobku naukowym. Rozprawa zawiera 9 rozdziałów, spis treści, spis akronimów, spis oznaczeń oraz streszczenie w języku polskim i angielskim, co bez wątplenia jest przydatne. Na końcu zamieszczono Podsumowanie, oraz spis literatury.

Pierwszy rozdział obejmuje dość obszerny wstęp poświęcony cechom montażu oraz stosowanych metod i materiałów. Wskazano też podstawowe właściwości i oczekiwania montażu takie jak wierne fizyczne odtworzenie zaprojektowanego schematu funkcjonalnego, uzyskanie dużej wartości wytrzymałości mechanicznej, małej wartości rezystancji elektrycznej, małej wartości rezystancji termicznej, oraz wytrzymałości termicznej.

W rozdziale 2 omówiono fizyczne podstawy procesu spiekania nanocząstek, opisano proces spiekania i teorie spiekania z uwzględnieniem spiekania nanocząstek (w tym nanocząstek srebra) oraz inne materiały do spiekania. Rozdział 3. Zatytułowany jest Złącza w montażu w elektronice z wykorzystaniem procesu spiekania nanocząstek srebra. Opisano właściwości materiałowe i stosowaną technologię i ich wpływ na parametry złącza. Te dwa rozdziały stanowią rzetelny materiał przeglądowy wprowadzający czytelnika w istotę teorii procesu spiekania i wykonania złącz w montażu. Doktoranta zaciekał problem zbadania wartości rezystancji termicznej złącza. W rozdziale 4- postawiono dwie tezy rozprawy:

(1) Możliwy jest dokładny pomiar rezystancji termicznej złącza wykonanego niskotemperaturową techniką łączenia z wykorzystaniem procesu spiekania nanocząstek srebra.

(2) Możliwe jest takie skomponowanie pasty do procesu LTJT, aby utworzone zostały złącza z powierzchniami niemetalizowanymi

Rozdział 5 dotyczy opracowania metodologii badawczej, a także przygotowania odpowiedniej aparatury technologicznej i pomiarowej oraz zaplanowania eksperymentu. Autor przeprowadził badania wytrzymałości mechanicznej próbek przy użyciu zrywarki Lloyd Instruments LRX. Analiza defektów w złączu była przeprowadzona przy użyciu metod rentgenowskich, a adhezja warstwy była oceniana przy użyciu mikroskopii optycznej.



Rozdział 6 obejmuje technologię wykonywania złączy. Autor dysertacji uczestniczył w realizacji prac technologicznych w ramach zespołu naukowego w Laboratorium PWR.

W rozdziale 7 Autor odniósł się do metodyki pomiarowej rezystancji termicznej złączy. Zaproponował konfigurację własnej metody pomiarowej i zestawiał wymagane elementy stanowiska pomiarowego. Opracowana metoda pomiaru rezystancji termicznej złączy została opisana w rozdziale 8 oraz wykazano użyteczność proponowanej metody, co opisano w podrozdziale „Ocena czułości metody pomiarowej”.

W rozdziale 9 Pan mgr inż. Krzysztof Stojek zajmował się złączami powierzchni niemetalizowanych. Potwierdzono II tezę dysertacji „Możliwe jest takie skomponowanie pasty do procesu LTJT, aby utworzone zostały złącza z powierzchniami niemetalizowanymi”. Autor wykazał, że metalizowanie nie jest konieczne, w przypadku odpowiednio skomponowanego się spiekane materiału.

Rozdział 10 stanowi podsumowanie wykonanych prac, stanowiących oryginalne rozwiązanie naukowo-technologiczne Autora, które wnoszą wkład do rozwoju montażu w elektronice, (w tym w elektronice wysokotemperaturowej).

Oryginalne osiągnięcia Autora

Należy zauważyć, iż Pan mgr inż. Krzysztof Stojek podjął się trudnego zadania w warstwie technologiczno-eksperymentalnej.

Za oryginalne osiągnięcia Autora uważam:

1. Koncepcja i opracowanie stanowiska pomiarowego do pomiaru rezystancji termicznej złączy
2. Opracowanie metody pomiaru tej rezystancji
3. Technologia wykonania złączy wraz z opracowaniem składu past do spiekania
4. Opracowanie połączeń przydatnych w elektronice wysokotemperaturowej.

Mocne strony rozprawy

Nie ulega wątpliwości, iż fakt uprzedniego opublikowania wyników części badań składających się na doktorat Pana mgr inż. Krzysztofa Stojka w recenzowanych czasopismach i materiałach konferencyjnych ściśle związanych ze specjalizacją Doktoranta świadczy o randze prowadzonych badań. Przytoczone prace naukowe potwierdzają mocne strony doktoratu i merytoryczne przygotowanie doktoranta. Aktywny udział w opracowaniu koncepcji eksperymentów i ich wykonaniu, świadczy o przygotowaniu Doktoranta do

prowadzenia badań na wysokim poziomie. Recenzent zauważył nieliczne nieścisłości natury redakcyjnej w przedstawionej do oceny pracy, lecz nie ulega wątpliwości, iż mocne strony rozprawy są dominujące.

Wnioski końcowe

Recenzent wysoko ocenia przedłożoną rozprawę doktorską. Autor w czasie realizacji swojej pracy doktorskiej wykazał się dużym wkładem w opracowanie eksperymentów intuicją jako naukowiec oraz wiedzą i doświadczeniem praktycznym. Podkreśleniu zasługuje możliwość wykorzystania wyników badań dla rozwoju technik montażu w elektronice.

Cel pracy został osiągnięty a recenzowana rozprawa doktorska posiada znaczny poziom naukowy i stanowi znaczący wkład w dyscyplinę naukową automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Dojrzałość naukową Autora potwierdza fakt, iż wyniki prac były już opublikowane w recenzowanych czasopismach naukowym i angielskojęzycznych materiałach konferencyjnych (Soldering & Surface Mount Technology, Electronics Packaging Technology Conference, International Spring Seminar on Electronics Technology, Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC), European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC) & Exhibition, International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems, International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)).

Reasumując stwierdzam, że cel pracy został osiągnięty, recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Krzysztofa Stojka z uwagi na poziom naukowy spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim. Na podstawie stosownej Ustawy wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.



Tomasz Stapiński