

Kraków, 13.10.2026 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana **mgr. inż. Adriana Michała Pietruszki** pt. „*Analiza wpływu warunków montażu powierzchniowego na parametry termiczne tranzystorów*”, której promotorami są Pani dr hab. inż. Agata Skwarek-Illés (Sieć Badawcza Łukasiewicz- Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki) oraz Pan dr hab. inż. Paweł Górecki (Uniwersytet Morski w Gdyni).

Podstawa prawna

Recenzję wykonałem w odpowiedzi na pismo o wyznaczeniu na recenzenta z dnia 16.09.2026 r. przesłane przez Dziekana Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, Pana dra. hab. inż. Piotra Jankowskiego, prof. UMG w oparciu o uchwałę Rady Naukowej Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni z dnia 10 września 2026 r., i w odniesieniu do wymagań określonych w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.) oraz na podstawie rekomendacji Rady Doskonałości Naukowej zawartych w poradniku pt. „Recenzje w postępowaniach o awans naukowy” z 2022 r., gdzie zwrócono uwagę, że recenzja rozprawy doktorskiej powinna co do zasady zawierać odpowiedzi z uzasadnieniem na 3 pytania:

(1) czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w określonej dyscyplinie albo dyscyplinach;

(2) czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej przez osobę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora;

(3) czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.

Zgodnie z art. 186, pkt. 3 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce - stopień doktora nadaje się osobie, która posiada w dorobku co najmniej:

a) 1 artykuł naukowy opublikowany w czasopiśmie naukowym lub w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowej, które w roku opublikowania artykułu w ostatecznej formie były ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. b, lub

b) 1 monografię naukową wydaną przez wydawnictwo, które w roku opublikowania monografii w ostatecznej formie było ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. a, albo rozdział w takiej monografii, lub

c) dzieło artystyczne o istotnym znaczeniu.

Charakterystyka ogólna pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt. „*Analiza wpływu warunków montażu powierzchniowego na parametry termiczne tranzystorów*” dotyczy opracowania, wytworzenia oraz eksperymentalnej weryfikacji wpływu montażu powierzchniowego na parametry termiczne tranzystorów, w szczególności MOSFET oraz IGBT. Celem pracy było określenie zależności pomiędzy właściwościami zastosowanych materiałów lutowniczych, warunkami procesu montażu, rodzajem podłoża oraz parametrami termicznymi przylutowanych struktur. Praca została napisana w języku polskim i składa się z siedmiu rozdziałów oraz streszczenia (również w języku angielskim), wykazu istotnych oznaczeń i symboli oraz literatury i opisu sylwetki autora rozprawy.

Praca została wyraźnie podzielona na dwie części. W części pierwszej przedstawiono opis stanu techniki w tematyce rozprawy, zaś w części drugiej zawarto własne wyniki badań i analiz właściwości kompozytowych stopów lutowniczych, połączeń lutowanych tranzystorów, wpływu procesu montażu powierzchniowego oraz wyniki modelowania wpływu rezystancji termicznej połączenia lutowanego

i materiału podłoża na parametry termiczne badanych tranzystorów. W pracy brakuje jasno określonych hipotez badawczych czy celów, jednak uzyskane wyniki oraz wnioski wyciągnięte w ich następstwie prowadzą do interesujących konkluzji.

We wstępie autor rozprawy omawia ogólnikowo znaczenie, podział oraz krótko rozwój tranzystorów we współczesnej elektronice, choć temat *per se* może stanowić podstawę wielotomowej książki. Doktorant omawia we wstępie również prognozy rynkowe, które sugerują dynamiczny rozwój w obszarze tranzystorów, w tym tranzystorów mocy. Słabą stroną tej części rozprawy jest chaos w przedstawianiu treści, zbyteczne powtórzenia przy jednoczesnym upraszczaniu treści, część skrótów jest wyjaśniana jak CAGR, BJT, FET, CMOS, a część nie, np. MOSFET. W mojej ocenie we wstępie brakuje ogólnej klasyfikacji tranzystorów, którą można by zilustrować rysunkiem i/lub tabelą. Brakuje też opisu, czym różnią się poszczególne rodzaje, a następnie wprowadzenia czytelnika w dwa wybrane do badań: MOSFET i IGBT. Wstęp zawiera też liczne ogólniki, takie jak „dużych wartości prądu”, „wyższych gęstości mocy” czy „niezawodność układów”, bez podania odniesień, a w szczególności wartości liczbowych, które potwierdzałyby te przymiotniki, np. jak definiowana jest *większa niezawodność układu*. Autor reasumuje, że na podstawie przedstawionego przez niego opisu można stwierdzić, iż „wynalezienie tranzystora bez wątplenia należy do jednych z najważniejszych i najbardziej przełomowych osiągnięć w historii nauki i techniki”. Tak, wynalezienie tranzystora i jego późniejsze modyfikacje na pewno można zaliczyć do najważniejszych i najbardziej przełomowych osiągnięć w historii nauki oraz techniki, ale zdecydowanie opis przedstawiony przez autora nie oddaje tego w sposób zwięzły i metodycznie spójny. W rozprawie często pojawiają się określenia bez konkluzji, które zostawiają czytelnika bez wniosków, np. „Na dzień dzisiejszy (...) tranzystorów wykorzystujących półprzewodniki szerokopasmowe zbudowane z węgla krzemu oraz azotu galu”. Brak jest dalszego rozwinięcia, dlaczego możliwość zastosowania SiC i GaN jest tak istotna dla rozwoju tranzystorów oraz w jaki sposób było/jest to przełomowe w porównaniu z poprzednimi technologiami, choćby poprzez odwołanie do odpowiedniej literatury. W tekście brakuje wyjaśnienia, dlaczego wybrano konkretny model tranzystora do przedstawienia zależności średniego czasu do awarii (MTTF) w odniesieniu do średniej wartości temperatury złącza, co zostało zilustrowane na rys.1.2. (str. 14). Narracja we wstępie podkreśla, że „temperatura złącza jest jednym z najbardziej krytycznych parametrów” (str. 12, str. 13, str. 14, *etc.*), brakuje jednak podania pozostałych parametrów oraz komentarza, jaka jest relacja pomiędzy wpływem temperatury złącza na długoterminową niezawodność elementu a wpływem innych parametrów. Skoro temperatura złącza jest *jednym z* to nasuwa się pytanie, czy doktorantowi znane są inne. Na str. 16 doktorant wprowadza definicję rezystancji termicznej (R_{th}) wraz z podaniem jednostek ($^{\circ}C/W$), podczas gdy w dalszej części rozprawy posługuje się wyłącznie (K/W), czym podyktowana jest ta zamiana jednostek? Opis przepływu ciepła z wnętrza elementu przedstawiony na str. 17 i dodatkowo zilustrowany na rys. 1.3. jest powielony (nad i pod rysunkiem) i jednocześnie brakuje wyjaśnienia, dlaczego strumień ciepła kierowany ku dołowi stanowi zazwyczaj dominującą część strumienia cieplnego, ale nie zawsze, czyli jakie muszą być spełnione przesłanki albo zapewnione warunki, aby kierunek ku dołowi nie był dominujący?

W rozdziale drugim czytelnik zostaje zaznajomiony z wybranymi zagadnieniami z obszaru montażu powierzchniowego (SMT) tranzystorów z naciskiem na rozwój montażu powierzchniowego w przemyśle elektronicznym, budową oraz funkcją połączenia lutowanego oraz kierunkami rozwoju w zakresie opracowywania nowych stopów lutowniczych. W opisie procesu SMT doktorant sugeruje, że pady montażowe są wykonane z miedzi (obszary miedzi), pytanie czy zawsze są to powierzchnie miedziane, czy mogą być inne, a jeśli mogą, to jak wpływa to na zagadnienie omawiane w rozprawie? W akapicie „Nieustannie rosnące (...) w szerokim zakresie temperaturowym” na str. 29 brakuje konkluzji. Nasuwa się pytanie, co doktorant chciał wyrazić w tym fragmencie? Podobnie na tej samej stronie pojawia się zdanie: „Może mieć to istotne znaczenie podczas poprawiania się zmiennych warunków pracy urządzeń elektronicznych, takich jak obciążeniowe cykle termiczne” – prośba o doprecyzowanie, co autor miał na myśli w odniesieniu do prowadzonych przez siebie prac badawczych, ponieważ nie jest to jednoznaczne.

Wyniki prac własnych rozpoczynają się od rozdziału trzeciego, w którym autor przedstawił badania i analizę właściwości kompozytowych stopów lutowniczych, uwzględniając proces przygotowania tych stopów oraz przeprowadzenie badań z zakresu wytrzymałości mechanicznej, zwilżalności i temperatury topnienia. W procesie przygotowania kompozytów wykorzystano trzy rodzaje nanoproszków (komercyjnie dostępnych) na bazie SiC, TiO₂ oraz Al₂O₃, przy czym autor uzasadnia wykorzystanie ww. materiałów ze względu na ich „unikalne właściwości mechaniczne, termiczne” bez podania, jakie to są te unikalne właściwości i bez porównania materiałów między sobą w odniesieniu do tychże właściwości – prośba o przedstawienie takiego porównania wraz z komentarzem uzasadniającym wybór tychże materiałów. Dodatki zastosowano w różnych stężeniach wagowych, od 0,125 wt% do 1,0 wt% brakuje natomiast informacji w jaki sposób kontrolowano proces domieszkowania i jaki był potencjalny błąd, w szczególności przy małych wartościach wt%. Opis na stronie 33 „odpowiednio odmierzone składniki” i „wybrane nanoproszki w różnych stężeniach” nie oddaje całości metodologii wykorzystanej przez doktoranta do fabrykowania past, które, *nota bene*, są przedmiotem analizy pod kątem przewodnictwa termicznego, a dalsze wnioski w rozprawie bazują na wynikach pozyskanych właśnie z wykorzystaniem tychże kompozytów, stąd prośba o doprecyzowanie opisu wykorzystania tej metodologii i analizy potencjalnych błędów w zakresie powtarzalności procesu. Na rys. 3.2. przedstawione zostały profile temperaturowe dla dwóch pieców. Nasuwa się pytanie, dlaczego przebieg dla pieca konwekcyjnego kończy się po czasie 300 s (~160°C) zaś dla pieca okresowego po czasie 600 s (~140°C)? Proszę o doprecyzowanie, co autor miał na myśli w zdaniu: „Również dzięki wymuszonemu przepływowi gorącego powietrza proces nagrzewania jest bardziej jednorodny, a wzrost wartości temperatury większy, gdzie TAL jest istotnie krótszy w porównaniu do pieca okresowego”. Co autor rozumie przez *bardziej jednorodny, większy* (tzn. większy od czego) oraz *istotnie krótszy*? Brakuje również informacji, przy jakiej wartości temperatury proces lutowania zostaje zakończony, aby możliwe było jednoznaczne porównanie tych dwóch pieców (rys. 3.2) pod kątem czasu trwania zastosowanych profili temperaturowych. Podobna uwaga do danych przedstawionych na rys. 3.3. Biorąc pod uwagę, że przedstawione są profile temperaturowe dla 3 różnych pieców, zasadne byłoby umieszczenie ich na jednym wykresie, czyli połączyć rys. 3.2 i rys. 3.3., co dałoby możliwość szybszego porównania przebiegów. Brak tej informacji ujawnia się również w dalszej części rozprawy, gdzie na stronie 52 autor pisze: „podobnie przebiegała faza chłodzenia, która również odbywała się z małym spadkiem temperatury w czasie”, jednakże brakuje inżynierskiego podejścia wraz z opisem wartości i prędkości opadania, wyrażonej w stopniach na jednostkę czasu, dla wszystkich pieców użytych w eksperymencie. W opisie metodologii brakuje informacji na temat procesu oczyszczania i odtłuszczania (*dokładnego*, str. 38) lub odwołania do pozycji literaturowej, w której te procesy są szczegółowo opisane. Przedstawiony na str. 42 opis procesu wyznaczania temperatury początku topnienia metodą stycznych mógłby zostać wzbogacony o rysunek ilustrujący cały ten proces. Jednocześnie, w mojej ocenie, autor niefortunnie ilustruje wyniki pomiarów wytrzymałości kompozytowych połączeń lutowanych rys. 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 w odniesieniu do próbki referencyjnej SAC0307 (przebieg czerwony), bowiem może sugerować, że do próbki tej dodawane były różne wartości domieszek od 0,125 wt% do 1,0 wt% i nie miało to żadnego wpływu na wartość siły ścinania, stąd też rysunki 3.9a, 3.10a, 3.11a, 3.12a, 3.13a, 3.14a nie wnoszą żadnej wartości do analizy wyników, bowiem 3.9b, 3.10b, 3.11b, 3.12b, 3.13b, 3.14b zawierają pełniejsze dane z analizą statystyczną. Ogólna uwaga do danych przedstawionych w rozdziale 3 to taka, że brakuje tabel podsumowujących uzyskane wyniki w poszczególnych podrozdziałach albo jednej zbiorczej, co znacząco ułatwiłoby wyciąganie wniosków zarówno autorowi, jak i czytelnikowi. Na stronie 54 autor pisze: „Wyniki te pokrywają się z obserwacjami innych autorów (...), co uważa się za akceptowalny, choć pod pewnymi warunkami nieoptymalny poziom rozpyłu”. Prośba o doprecyzowanie, jakie są te *pewne warunki*. Autor wnioskuje również, że „nanowłókna SiC zmieniają morfologię lutu” (str. 55). Nasuwa się pytanie, czy zostało to weryfikowane metodą mikroskopową? Prośba o rozwinięcie skrótów GNSs oraz CoGNSs (str. 56), ponieważ nie zostały zdefiniowane ani wyjaśnione w opisie skrótów na stronach 7-8; oraz wyjaśnienie, co dla autora oznacza *lepsza zwilżalność* (str. 60) w kontekście praktycznego zastosowania opracowanych stopów lutowniczych.

Rozdział czwarty zawiera wyniki badań oraz analizę właściwości kompozytowych połączeń lutowanych tranzystorów MOSFET. W celu wyznaczenia parametrów termicznych autor wykorzystał pośrednią metodę elektryczną, która wykorzystuje jednoznaczność zależności wybranego parametru elektrycznego od temperatury i pozwala pośrednio ocenić wpływ właściwości termicznych materiałów oraz jakości połączeń lutowanych na proces odprowadzania ciepła. Autor wykonał również pomiary powierzchni pustek lutowniczych oraz przeprowadził analizę uzyskanych wyników. Nasuwa się pytanie, dlaczego nie wykorzystano kamery IR jako metody odniesienia w pomiarach termicznych oraz jaka byłaby metoda referencyjna dla zastosowanej przez autora techniki analizy pustek na bazie graficznej oceny zdjęć rentgenowskich? Na rysunkach 4.9 i 4.11 przedstawione są krzywe średniej przejściowej impedancji termicznej dla różnych próbek wyliczone z siedmiu próbek w danej klasie, a następnie na rysunkach 4.10 i 4.12 podane są wartości średnie i rozkład wartości, natomiast brakuje komentarza, dlaczego dla próbek SiC(p) 0,5wt% i SiC(f) 0,5wt% wyniki są znacząco inne, choć SiC(f) wydaje się w całym zakresie mieć zbliżone do siebie wartości średnie, czego nie można powiedzieć o SiC(p). Co, według autora, mogło wpłynąć na odmiennosc wyników wyznaczania rezystancji termicznej tego konkretnego składu stopu, biorąc pod uwagę, że badano siedem próbek? Wyznaczona przez autora średnia wartość rezystancji termicznej z wykorzystaniem stopu referencyjnego (SAC0307) wynosiła 2,97 K/W. Brakuje konkluzji, czy ta wartość jest zgodna z oczekiwaniami, czy od nich odbiega. W wyniku prac badawczych autor uzyskał poprawę parametrów cieplnych o 7% dla SiC(p) 0,5wt% względem stopu referencyjnego. Nasuwa się pytanie, czy uzysk ten jest faktycznie znaczący z perspektywy wdrożeniowej, czy możliwe jest oszacowanie kosztocłonności procesu wytwarzania stopu w odniesieniu do zysków wynikających z obniżenia parametrów cieplnych o 7%, i co to znaczy, że *pomiary były bardziej spójne* dla tego konkretnego stopu? Słusznie zauważa autor (str. 79): „Dodatkowo, dokonując analizy wykresów pudełkowych (Rys. 4.12b), widać, iż w każdej grupie zauważalne są istotne różnice pomiędzy próbkami badawczymi”. Brakuje konkluzji, z czego wynikają te *zauważalne* i *istotne* różnice pomiędzy badanymi próbkami – prośba o komentarz. W analizie wyników dotyczących występowania pustek lutowniczych (4.3.2) autor stwierdza, że: „dodatki nanorpozsków (...) spowodowały istotne zmiany w mikrostrukturze tych połączeń lutowanych, co przyczyniło się do zmniejszenia wartości rezystancji termicznej, pomimo zwiększonej liczby pustek lutowniczych w połączeniu”. Natomiast czy nie zasadniejszym byłoby obliczenie objętości zajmowanej przez pustki lub, w uproszczeniu, powierzchni na zdjęciu RTG 2D (np. rys. 4.13, str. 80), ponieważ pustki nie są jednakowe i tym samym liczba pustek może nie oddawać w pełni istoty zjawiska – prośba o komentarz. Na podstawie wyników uzyskanych techniką SIMS (rys. 4.18, str. 86) autor wnioskuje, że „SiC lokuje się w górnej części połączenia lutowanego”. Nasuwa się pytanie, czy gdyby SiC lokowało się w dolnej części połączenia lutowanego, to miało by to jakiś wpływ na pomiar rezystancji termicznej zgodnie z metodyką wyznaczania przyjętą w niniejszej rozprawie? Jednocześnie autor na str. 87 pisze: „W związku z tym, mikrostruktura połączeń lutowanych SAC-SiC(p) jest znacznie bardziej niejednorodna niż w przypadku SAC-SiC(f), co może implikować zróżnicowanie ich właściwości mechanicznych, cieplnych oraz niezawodnościowych”, zasadnym byłoby więc dokonanie takiego porównania, np. w formie tabeli z podaniem wartości wyznaczonych przez autora i/lub innych badaczy. Na stronie 88 autor podaje, że rozmiar cząstek wynosił 21 nm dla próbek SAC-TiO₂(p₁), pytanie czym potwierdzono, że jest to dokładnie 21 nm i czy nie było żadnego rozrzutu? Porównując krzywe średniej przejściowej impedancji termicznej dla próbek SAC-SiC(p/f), SAC-TiO₂(p₁) i SAC-Al₂O₃(p) można zauważyć, że dla próbek z domieszką Al₂O₃ przebiegi są mniej zróżnicowane, gładkie oraz że rezystancja termiczna połączeń przy dodatku 1,0 wt% znacząco odbiega od pozostałych. Czy autor ma tezę, z czego to może wynikać? W pracy jest analiza statystyczna i wzmianka o występowaniu szerokiego rozstępu międzykwartyłowego (str. 102), ale brakuje konkluzji, co mogło być powodem tak znaczącej różnicy, oraz brakuje informacji, czy warunki pomiaru były utrzymane jak w przypadku poprzednich próbek i czy pomiary przeprowadzono po upływie określonego czasu dla tej grupy próbek – prośba o wyjaśnienia. Na stronie 110 autor odwołuje się do rysunków, których w pracy nie ma: Rys. 4.4.7d, 4.4.7f, 4.4.7h, str. 111 rys. 4.4.7a, 4.4.7i – prośba o sprostowanie.

W rozdziale piątym omówiono wpływ procesu montażu powierzchniowego, w tym profilu temperaturowego, na parametry termiczne tranzystorów IGBT. W części poświęconej opisowi próbek badawczych autor pisze, że zastosowany tranzystor IGBT w obudowie TO-263 charakteryzuje się dużym padem termicznym i w rezultacie połączenie lutowane zajmuje dużą powierzchnię. Brakuje natomiast wartości bezwzględnych oraz jednoznacznego porównania różnic między badaniami przeprowadzonymi z elementem MOSFET (rozdział 4) a IGBT (rozdział 5). Co ciekawe, rysunek 5.1 (str. 117) ilustruje krzywe temperaturowe profili lutowaniczych użytych w trakcie prac badawczych z elementem IGBT, na którym zebrane zostały wszystkie profile jednocześnie (*vide* rys. 3.2 i 3.5), ale podobnie jak poprzednio brakuje danych o powrocie do temperatury początkowej, jedynie dla czterostrefowego pieca rozpyłowego podane zostały te wartości, i stąd nasuwa się pytanie dlaczego dla innych nie wykreślono pełnych profili od temperatury pokojowej do temperatury pokojowej lub jak to zdefiniował autor – temperatury otoczenia (T_a , str. 119), a co najmniej do temperatury $< 70^\circ\text{C}$. Również w tabeli 5.3 (str. 118) scharakteryzowane są użyte metody, ale najniższa wartość temperatury chłodzenia zdefiniowana jest w przedziale $140\text{--}175^\circ\text{C}$ w zależności od metody, nie zaś do wartości początkowej (T_a). Z czego wynika taki sposób przedstawiania danych? Ciekawość wzbudza również zmniejszenie liczby próbek w serii z siedmiu (MOSFET, rozdział 4) do pięciu, prosba o wyjaśnienie, czym to było podyktowane? W szczególności ma to znaczenie przy analizie wyników, gdzie na stronie 122 autor podaje, że „badana grupa różni się istotnie (w sensie statystycznym) od pozostałych analizowanych grup”. Proszę więc o komentarz, jak pomiar na 5 próbkach może być *statystycznie istotny* w odniesieniu do montażu powierzchniowego tranzystorów. Dodatkowe pytania nasuwają się przy analizowaniu wyników uzyskiwanych przy lutowaniu ręcznym strumieniem gorącego powietrza, ponieważ w tym przypadku czynnik ludzki będzie miał duże znaczenie. Tym bardziej analiza istotności statystycznej, bez podania, ilu operatorów wykonywało ten proces, jaka była powtarzalność między nimi oraz jakie kryteria zostały zastosowane do oceny poprawności, powinna być przeprowadzona z dużą dozą niepewności. Interesujące jest również, dlaczego dla danych zaprezentowanych w rozdziale 5 przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji (str. 120), podczas gdy dla danych z rozdziału 4 nie przeprowadzono takiej analizy. Ważne wnioski zostały przedstawione na str. 125: „(...) obecność pustek lutowaniczych w połączeniu lutowanym (przynajmniej do poziomu ok. 30% powierzchni padu termicznego (...)) nie jest czynnikiem dominującym w procesie kształtowania efektywności odprowadzania ciepła z wnętrza przylutowanej struktury półprzewodnikowej do podłoża o relatywnie niskiej przewodności cieplnej”.

Rozdział szósty zawiera wyniki modelowania wpływu rezystancji termicznej połączenia lutowanego oraz materiału podłoża na parametry termiczne tranzystorów MOSFET i już na wstępie nasuwa się pytanie, dlaczego modelowanie przeprowadzono wyłącznie dla próbek z tranzystorami MOSFET, a pominięto te z tranzystorami IGBT? Autor przygotował precyzyjne modele z wykorzystaniem dwóch podłoży, tj. FR4 i MCPCB, tak, aby jak najwierniej odwzorować układ fizyczny. Warto podkreślić, że w obszarze połączenia lutowanego autor zastosował dodatkowe zagęszczenie siatki, co pozwoliło na lepsze odwzorowanie przewodzenia ciepła w tym kluczowym obszarze. Dzięki przeprowadzeniu prac eksperymentalnych możliwa była również konfrontacja wyników symulacyjnych z wynikami pomiarowymi. W mojej ocenie obie krzywe średniej przejściowej (rys. 6.4a i 6.4b) powinny się znaleźć na jednym wykresie, ewentualnie można zastosować dwie osie Y; pozwoliłoby to na łatwe porównanie z wykorzystaniem metodycznie poprawnej metody graficznej analizy wyników. W podsumowaniu części 6.3.1. brakuje konkluzji w odniesieniu do 5,3-krotnie większej średniej wartości rezystancji termicznej uzyskanej dla tranzystorów osadzonych na różnych podłożach. Częściowo autor podsumowuje te wyniki we fragmencie „Oznacza to, że dominującym składnikiem całkowitej rezystancji termicznej pozostaje podłoże FR4, jednak samo połączenie lutowane stanowi istotny element lokalnej ścieżki przepływu ciepła i może wpływać na rozkład temperatury w obszarze struktury półprzewodnikowej” (str. 139) oraz „(...) zastosowanie podłoża MCPCB znacząco poprawia warunki odprowadzania ciepła z badanego elementu półprzewodnikowego w porównaniu z klasycznym laminatem FR4 (..)” (str. 140).

Cześć merytoryczna kończy się rozdziałem siódmym, obejmującym podsumowanie zrealizowanych badań. W wyniku przeprowadzonych prac badawczych autor potwierdził przypuszczenia, że warunki montażu powierzchniowego, takie jak profil temperaturowy procesu lutowania, materiał wykorzystany do produkcji podłoża (badano FR4 i MCPCB) oraz skład stopu lutowniczego, mają istotny wpływ na parametry termiczne, co ma szczególne znaczenie w elektronice i elektroenergetyce. W pracy wykorzystano trzy różne materiały stanowiące dodatek do stopu SAC0307, tj. SiC, TiO₂, Al₂O₃ w postaci nanoproszków o różnych morfologiach. Dla tak dobranych materiałów efektywność modyfikacji właściwości mechanicznych i cieplnych była najwyższa w stopach lutowniczych z dodatkiem SiC. Dodatkowo wyniki badań wskazują, że mikrostruktura połączenia ma większy wpływ na transport ciepła niż sama obecność pustek w stopie, o ile ich poziom mieści się w granicach technologicznych (<30%).

Praca zawiera osobny wykaz pozycji literaturowych wykorzystanych w pracy oraz opis sylwetki autora wraz z wykazem dorobku naukowego.

Praca niestety nie jest pozbawiona błędów językowych. Zauważalny jest brak korekty językowej przed wydrukiem, np. nagminne stosowanie pleonastycznych połączeń (np. w finalnym efekcie (str.35), w efekcie finalnym (str. 55, 92, 96)). Liczne są również niedociągnięcia edytorskie: str. 7, wyjaśnienie skrótu DSC małymi literami podczas gdy wszystkie inne rozwinięcia w języku angielskim są wielką literą; na tej samej stronie wyraz 'Cynowanie' jest niepotrzebnie z wielkiej litery; „Równie istotnym aspektem, który w sposób istotny definiuje” nadmierne stosowanie 'istotny' (str. 23); brak konsekwencji w używaniu symboli chemicznych, np. miedzi (bez Cu) i zaraz dalej srebra (z Ag), a potem na str. 29 bizmut i antymon już bez symboli, etc.; używanie zwrotów „na wskutek” (str. 27), „w raz” (str. 27, str. 131), „w skutek” (str. 128) oraz bardzo liczne powtórzenia i nadużywanie wyrazu „niewątpliwie”. Brak spójności: raz „odziałem w Krakowie” (str. 33) a raz „Odziałem w Krakowie” (str. 41) oraz w zakresie stosowania jednostek, tzn. raz ze spacją, raz bez: 35µm vs 35 µm, przy czym poprawne jest stosowanie spacji zgodnie z wytycznymi Głównego Urzędu Miar (zasady zapisu wielkości wyrażonych w jednostkach SI) czy opisu podłoża FR4 vs FR-4 czy obudowy D2PAK vs D²PAK. Wykaz przykładowych literówek:

literówka w tekście	poprawna forma	Strona
czasu życie	czasu życia	15
uwzględniają	uwzględniając	19
powuższe	powyższe	19
R _{th}	R _{th}	19
o wielu czynników	od wielu czynników	19
możę	może	20
w znacznym stopniu sposób	albo w znacznym stopniu albo w znaczny sposób	20
głównie	głównie	28
gdzie temperatura jego temperatura	gdzie jego temperatura	28
elementtu	elementu	28
ze względu ograniczenia kosztów	ze względu na lub celem ograniczenia	28
Ce ₂	CeO ₂	30
optymalizacja	optymalizacją	30
rozwój	rozwojem	30
„(...) modyfikacja u stopów (...)”	modyfikacja stopów	30
okazać	okazać się	30
stosunek	stosunkiem	32
niepotrzebne pogrubienie litery 'i'	-	32
rysunku	rysunków	33
warstwę	warstwą	33
w skutek	wskutek	51, 57
niesielką	niewielką	51

mechaniczną	mechaniczna	53
tuulowania	lutowania	53
dotyczy	dotyczyły	60
opis składu sac0307 z kropkami	z przecinkami	32
praca	prace	62
kilkunastu do kilkudziesięciu	od kilkunastu do kilkudziesięciu	64
termicznej	termiczna	69
zwarcia zwarcia	zwarcia	70
próbki..	próbki.	70
z użyciem użyciu	z użyciem	78
intensy wności	intensywności	85
kropka zamiast przecinka 5.5%, 8.84%. 16.18% na rys. 4.21		92 i dalsze
psutych	pustych	92
strukturze	w strukturze	94
z wrostem	ze wzrostem	110
w ukła	w układzie	117
związany studzeniem	związany ze studzeniem	119
strumienia	strumieniem	128
z wykorzystanie	z wykorzystaniem	131
termicznejm	termicznej	137
0,42 °C/W	0,42 K/W	141
termiczne	termiczna	144

Czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w określonej dyscyplinie albo dyscyplinach?

Doktorant w rozprawie udowodnił posiadaną przez siebie wiedzę teoretyczną w zakresie zagadnień związanych z przygotowaniem podłoży elektronicznych, stopów lutowniczych o różnych składach, w tym z wykorzystaniem nanocząsteczek SiC, TiO₂ i Al₂O₃ oraz wykonaniem eksperymentów w zakresie wyznaczania parametrów termicznych podstawowych elementów półprzewodnikowych, na przykładzie tranzystorów z grupy MOSFET oraz IGBT. Praca ma bez wątpienia charakter interdyscyplinarny i doktorant wykazał się wiedzą teoretyczną z kilku dyscyplin, m.in. automatyki, elektroniki, elektrotechniki i technologii kosmicznych, inżynierii materiałowej oraz metrologii. Celem pracy było określenie zależności pomiędzy właściwościami zastosowanych materiałów lutowniczych, warunkami procesu montażu, rodzajem podłoża oraz parametrami termicznymi przylutowanych struktur i w tym celu doktorant przygotował odpowiednie stanowisko badawcze, wykorzystał metodę pośredniego wyznaczania parametrów termicznych opracowaną wcześniej w zespole badawczym, przeprowadził cykl eksperymentów z różnymi stopami, tj. stopem referencyjnym SAC0307 oraz jego modyfikacjami SAC-SiC, SAC-TiO₂, SAC-Al₂O₃. Należy podkreślić, że doktorant przeprowadził analizę problemu badawczego oraz zaplanował cały przebieg eksperymentu w sposób właściwy dla prac z dziedziny inżynierijno-technicznych. Ponadto analiza licznych pozycji literaturowych potwierdza dobre rozeznanie teoretyczne w temacie. Praca jest obszerna, ale pewien niedosyt budzi pobieżne i wybiórcze wprowadzenie teoretyczne. Szczegółowe uwagi przedstawiłem powyżej.

Czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej przez osobę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora?

Przedstawiona do recenzji rozprawa stanowi spójne dzieło z uporządkowanym ciągiem logicznym, w którym doktorant w pierwszej części rozprawy wprowadza czytelnika w zagadnienia związane z montażem powierzchniowym, rozwojem tranzystorów z naciskiem na tranzystory mocy do zastosowań elektroenergetycznych, przedstawia bieżące analizy rynkowe oraz prognozy na najbliższą dekadę, co stanowiło motywację do podjęcia się tej wymagającej tematyki badawczej. Brakuje w rozprawie zdefiniowania hipotez badawczych lub klarownego określenia celów prowadzonych prac

badawczych, bowiem cel został zdefiniowany na wysokim poziomie ogólności, który można podsumować jako określenie zależności pomiędzy właściwościami zastosowanych materiałów lutowniczych, warunkami procesu montażu, rodzajem podłoża oraz parametrami termicznymi przylutowanych struktur. W mojej ocenie Pan mgr inż. Adrian Pietruszka w sposób prawidłowy dla prac inżyneryjno-technicznych wykazał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, w której po analizie obecnego stanu wiedzy oraz zapotrzebowania gospodarczego zidentyfikował elementy wymagające eksploracji naukowej, zaplanował adekwatne działania badawcze, przeprowadził eksperymenty i na podstawie wyników zaproponował rozwiązania w celu osiągnięcia zakładanych celów. Wyniki prac zostały zaprezentowane w środowisku naukowym zarówno w czasopiśmie (*Applied Sciences, Journal of Materials Research and Technology, Przegląd Elektrotechniczny, Scripta Materialia, Soldering & Surface Mount Technology*) jak i na międzynarodowych konferencjach naukowych (*46th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems, IMAPS*). Reasumując, autor wykazał się, w mojej ocenie, zdolnością do prowadzenia prac naukowych, jakiej oczekuje się od kandydatów na stopień doktora inżyniera.

Czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne?

Rozprawa doktorska przedstawia wyniki dotyczące określenia zależności pomiędzy właściwościami zastosowanych materiałów lutowniczych, warunkami procesu montażu, rodzajem podłoża oraz parametrami termicznymi przylutowanych struktur. Szczególną uwagę poświęcono rezystancji termicznej oraz efektywności odprowadzania ciepła. Zaprezentowane w rozprawie wyniki potwierdzają rozwiązanie oryginalnego problemu naukowego w zakresie poszukiwania unowocześnionych stopów lutowniczych do zastosowania w montażu powierzchniowym dla elementów półprzewodnikowych nowej generacji, w tym z naciskiem na zastosowania w obszarze elektroenergetyki i aplikacji wielkich mocy. Poruszane zagadnienia badawcze są aktualne i ważne dla rozwoju dyscypliny AEEiT i mają potencjał wdrożeniowy. Praca ma charakter interdyscyplinarny i, jak każda praca naukowa, budzi pewne pytania i wątpliwości podczas czytania, co zostało wyrażone w pierwszej części recenzji. Jednak pytania i uwagi przedstawione w niniejszej recenzji **nie wpływają na pozytywną ocenę pracy**, którą uważam za **bardzo dobrą** i spełniającą wszelkie wymagania ustawowe, jak wskazałem w podsumowaniu.

Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera ciekawe i ważne dla rozwoju dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne wyniki. Praca ma charakter eksperymentatorski. Biorąc pod uwagę osiągnięcia przedstawione w rozprawie Pana **mgr. inż. Adriana Pietruszki** pt. „*Analiza wpływu warunków montażu powierzchniowego na parametry termiczne tranzystorów*” stwierdzam, że rozprawa **spełnia** wszelkie warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i może zostać dopuszczona do publicznej obrony. Wnoszę również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

