

Prof. dr hab. inż. Regina Paszkiewicz
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska
50-370 Wrocław
ul. Janiszewskiego 11/17

Wrocław, 19.07.2024

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Kamińskiego pt.: „Opracowanie wybranych elementów technologii wytwarzania wysokonapięciowych diod p-i-n na podłożach z węgliku krzemu”, wykonana dla Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej na podstawie uchwały w wym. Rady nr 777/II/2024 z dnia 25.06.2024 i pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny AEEiTK Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego z dnia 28.06.2024r.

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Mariusz Sochacki, prof. uczelni
Promotor pomocniczy: dr inż. Andrzej Taube

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

Recenzowana rozprawa poświęcona jest intensywnie rozwijanej, w wiodących ośrodkach badawczych, problematyce opracowania wysokonapięciowych diod p-i-n wytwarzanych w podłożach z węgliku krzemu. Autor rozprawy wybrał do swoich badań podłoże 4H-SiC, ponieważ w porównaniu do podłoża 6H-SiC jest ono preferowane do większości zastosowań elektronicznych. Wykazano teoretycznie, że diody 4H-SiC p-i-n będą miały spadek napięcia w stanie włączenia porównywalny z diodami Si przy wystarczająco dużej gęstości prądu, 30 razy większe prędkości przełączania w porównaniu do ich odpowiedników krzemowych ze względu na możliwość stosowania znacznie cieńszych warstw epitaksjalnych oraz będą się charakteryzowały bardzo dobrymi parametrami elektrycznymi w wysokich temperaturach pracy. Jednak opracowanie technologii diod wysokonapięciowych jest dużym wyzwaniem technologicznym, w szczególności problem stanowi opracowanie technologii obszaru zakończenia złącza określane angielskim terminem Junction Termination Extension (JTE), które w wypadku diod krzemowych typowo wykonuje się przez redyfuzję domieszki wprowadzonej na skraj złącza w procesie selektywnej implantacji. W wypadku technologii diod na bazie węgliku krzemu to rozwiązanie nie może być zastosowane, dlatego do wytwarzania diod p-i-n na bazie węgliku krzemu testuje się szereg alternatywnych

technologii i konstrukcji. Rozprawa mgr inż. Macieja Kamińskiego dobrze wpisuje się w ten nurt badań. Sformułował on tezę, że możliwe jest wytworzenie diody p-i-n na podłożu 4H-SiC o napięciu powyżej 2kV i gęstości prądu powyżej 4kAcm^{-2} , dzięki odpowiedniemu zaprojektowaniu technologii wytwarzania krytycznych elementów konstrukcyjnych. Do udowodnienia postawionej tezy przyjął on szereg (6) dobrze dobranych, realizowalnych, cząstkowych hipotez badawczych. Teza pracy oraz jej cele zostały sformułowane przez Autora jasno i poprawnie. Praca ma znaczny element nowości, a jej tematyka jest ważna dla badań stosowanych.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł w tym literatury światowej i stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?

Podstawą prowadzonych prac badawczych była przeprowadzona przez Autora rozprawy wszechstronna analiza danych z literatury światowej z zakresu technologii węgla krzemu, metod jego domieszkania, pomiarów właściwości elektrycznych materiału i struktur przyrządowych oraz technologii i konstrukcji wysokonapięciowych diod na bazie SiC. Przeprowadzony przegląd literatury jest obszerny i aktualny. Obejmuje on 156 pozycji, w tym 9 pozycji stanowiących informacje zawarte na stronach internetowych, dla których podano adres i datę dostępu. Informacje ze stron internetowych dotyczą głównie komercyjnie dostępnych diod na bazie SiC. Jedna z fundamentalnych prac, na którą powołuje się Autor rozprawy, została opublikowana w 1947 roku. Wnioski z analizy źródeł literaturowych i stron internetowych sformułowano w sposób jasny i przekonujący. Autor rozprawy dokonał prawidłowego doboru źródeł, właściwie je wykorzystał i zaprezentował. Potwierdza to jego dobrą znajomość tematyki badawczej.

3. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

W celu osiągnięcia głównego celu rozprawy jakim było opracowanie wybranych elementów technologii wytwarzania wysokonapięciowych diod 4H-SiC p-i-n Autor rozprawy zastosował zróżnicowany i bogaty zestaw metod badawczych ukierunkowanych na opracowanie technologii implantacji jonów Al^+ do podłoża 4H-SiC oraz technologii aktywacji domieszki. Prace eksperymentalne zostały poprzedzone symulacjami procesu implantacji w programach SRIM, ATHENA i ATLAS firmy Silvaco, następnie przeprowadzono testowe procesy implantacji i aktywacji domieszki oraz pomiar właściwości selektywnie wytworzonych obszarów typu p, mierząc efekt Halla w funkcji temperatury, na podstawie których wyznaczono parametry akceptorów przy zastosowaniu metod Pensla i

Matsuury, co umożliwiło ocenę stopnia aktywacji elektrycznej domieszek. Autor rozprawy zaproponował również modyfikację metody Matsuury, która pozwoliła na zwiększenie dokładności pomiarów. Proces selektywnej implantacji wymagał opracowania technologii i konstrukcji specjalizowanych masek Al lub SiO₂, o dużej rozdzielczości, do procesu implantacji oraz sposobu zabezpieczenia powierzchni SiC w procesie wygrzewania poimplantacyjnego. W kolejnym etapie badań mgr inż. Maciej Kamiński skoncentrował się na opracowaniu technologii termicznego tlenku pasywującego, zapewniającego dobrą jakość interfejsu dielektryk-półprzewodnik. Następnie zaproponował on konstrukcję obszaru JTE diody oraz zbadał zależność napięcia przebicia diody od zastosowanej dozy. Autor rozprawy testował jedno- dwu- i trzystrefowe konstrukcje JTE oraz konstrukcje uzupełnione o trzy lub pięć dodatkowych pierścieni typu „guard ring” różniące się dozą zaimplantowanej domieszki. Następnie porównał parametry testowych struktur przyrządowych, o różnej konstrukcji i poziomach domieszkowania, z parametrami struktur pozbawionych obszarów JTE oraz dokonał wyboru struktury JTE o największej tolerancji na rozrzut implantowanej dozy. Wszystkie te elementy opracowanej technologii mgr inż. Maciej Kamiński wykorzystał do wytworzenia diody 4H-SiC p-i-n, na komercyjnych strukturach firmy Cree, o powierzchni umożliwiającej uzyskanie prądu powyżej 20 A i klasie napięciowej 1,7 kV. Prace technologiczne były wspomagane symulacjami procesów i przyrządów. Do charakteryzacji materiałów, struktur testowych i przyrządów Autor rozprawy zastosował bogaty i różnorodny zestaw technik charakteryzacji obejmujący pomiary SIMS, obserwacje SEM i AFM, pomiary z użyciem profilometru mechanicznego, elipsometrię, pomiary efektu Halla na strukturach van der Pauw’a oraz pomiary I-C-V. Parametry kontaktów omowych badał metodą CTLM.

Mgr inż. Maciej Kamiński osiągnął wszystkie postawione cele rozprawy oraz zweryfikował sformułowane, cząstkowe hipotezy badawcze. Wielowątkowość prowadzonych prac badawczych obejmujących: symulacje, prace technologiczne, wytwarzanie struktur testowych i przyrządów oraz rozbudowane pomiary pozwalają stwierdzić, że do rozwiązania postawionych zagadnień zostały użyte właściwe metody badawcze, które umożliwiły Autorowi udowodnienie sformułowanej tezy pracy oraz potwierdziły, że przyjęte założenia badawcze były uzasadnione.

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.

Rozprawa jest oryginalna, a prezentowane wyniki symulacji, prac doświadczalnych i pomiarów stanowią samodzielny i oryginalny dorobek mgr inż. Macieja Kamińskiego. Przeprowadzone przez niego badania pozwoliły na zweryfikowanie sformułowanych hipotez badawczych, osiągnięcie głównego celu rozprawy oraz udowodnienie jej tezy.

Do najważniejszych, oryginalnych, osiągnięć Autora rozprawy należy zaliczyć:

- opracowanie wybranych elementów technologii wytwarzania wysokonapięciowych diod 4H-SiC p-i-n w konkretnych uwarunkowaniach technologicznych,
- zamodelowanie różnych konstrukcji obszaru JTE oraz zaproponowanie rozwiązań konstrukcyjnych pozwalających na zwiększenia okna parametrów technologicznych procesu implantacji obszarów JTE umożliwiającą zwiększenie wartości napięcia przebicia wytwarzanych diod wysokonapięciowych z zachowaniem akceptowalnego uzysku,
- rozwinięcie metodyki międzyoperacyjnej charakteryzacji procesu wytwarzania diod,
- szczegółowe zbadanie procesu implantacji i wygrzewania poimplantacyjnego z uwzględnieniem wpływu materiału maski, dozy i energii wiązki
- zbadanie wpływu technologii warstwy pasywującej na działanie obszaru JTE oraz ocena roli ładunku powierzchniowego zgromadzonego na interfejsie półprzewodnik-dielektryk,
- eksperymentalna walidacja opracowanej technologii przez wytworzenie dedykowanych struktur testowych oraz demonstratorów wysokonapięciowych diod 4H-SiC o klasie napięciowej 1,7 kV.

Wyniki badań mgr inż. Macieja Kamińskiego są ważne dla rozwoju technologii wysokonapięciowych diod p-i-n na bazie SiC, stanowią one liczący się wkład w badania nad zwiększeniem ich napięć przebicia, co jest ważne z punktu widzenia potencjalnych zastosowań takich elementów. Jakość prowadzonych badań została potwierdzona i zweryfikowana przez publikacje Autora rozprawy, które ukazały się w renomowanych czasopismach krajowych i zagranicznych oraz materiałach konferencyjnych.

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

Mgr inż. Maciej Kamiński wykazał się umiejętnością prawidłowego i przekonującego zaprezentowania uzyskanych wyników swoich badań obejmujących symulacje, prace technologiczne i pomiary. Dokonano właściwego podziału treści pracy między poszczególnymi rozdziałami.

Rozprawa napisana jest w sposób staranny, jasny i logiczny, poprawny pod względem językowym i stylistycznym. Rysunki mają odpowiednią wielkość i są prawidłowo opisane za wyjątkiem rysunku 4.1 zawierającego schematyczne przedstawienie zastosowanej technologii wytwarzania diody p-i-n, gdzie zarówno rysunki jak i opisy są zbyt małe.

Rozprawa jest trudna w czytaniu ze względu na dużą ilość informacji, które zostały w niej zawarte. Analizę uzyskanych rezultatów i ich ocenę znacząco ułatwiłyby krótkie podsumowania na końcu poszczególnych rozdziałów. Zapoznanie się z rozprawą utrudnia też brak spisu stosowanych symboli i oznaczeń, który co prawda są typowe ale stanowiłyby duże ułatwienie dla jej czytelnika.

Recenzowana rozprawa dotyczy złożonej problematyki zaprojektowania i wytworzenia zaawansowanego elementu elektronicznego w dysponowanych uwarunkowaniach technologicznych nie zawsze optymalnych z punktu widzenia technologii półprzewodników szeroko przerwowych. Powoduje to, że uzyskane wyniki badań są tym bardziej wartościowe. Ze względu na złożoność zagadnienia Recenzent uważa, że rozprawa nie ma istotnie słabych stron i niedoskonałości. Pewien niedosyt recenzenta budzi jedynie ograniczona ilość informacji dotyczących struktur do testów procesów przyrządowych.

Niezależnie od tych wątpliwości jednoznacznie stwierdzam, na podstawie rezultatów symulacji, przeprowadzonych prac technologicznych oraz wyników pomiarów testowych struktur i przyrządów, że rozprawa przygotowana przez mgr inż. Macieja Kamińskiego jest oryginalna i wartościowa.

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Rozprawa ma duże znaczenie poznawcze, ponieważ zawiera ona całościowy opis metodyki projektowania i realizacji wybranych, istotnych, elementów procesu technologicznego wytwarzania zaawansowanego przyrządu elektronicznego z uwzględnieniem dysponowanej infrastruktury laboratoryjnej. Ponadto Autor rozprawy, na podstawie szerokiej gamy stosowanych metod diagnostyki międzyoperacyjnej, wskazał, że możliwa jest świadoma modyfikacja parametrów realizowanych procesów technologicznych (w szczególności procesu implantacji) pozwalająca na uzyskanie oczekiwanych właściwości materiałów i wytworzenie przyrządów o zakładanych parametrach. Ponadto uzyskane przez Autora rezultaty badań dostarczają wielu cennych informacji na temat procesu projektowania i wytwarzania obszarów JTE diod 4H-SiC p-i-n i mogą znaleźć szersze zastosowanie np. do doskonalenia procesu ich wytwarzania w podłożach o innej orientacji.

Ze względu na duże walory poznawcze rozprawy oraz jej potencjalne możliwości aplikacyjne uważam ją za bardzo dobrą.

Recenzent stwierdza, że rozprawa mgr inż. Macieja Kamińskiego stanowi oryginalny i samodzielny dorobek Autora oraz spełnia z nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy.

Biorąc pod uwagę dorobek naukowy mgr inż. Macieja Kamińskiego i pozytywną ocenę Jego pracy doktorskiej uważam, że w myśl ustawy z 20 lipca 2018 r (Dz. U. Nr Dz.U.2022.574, z późn. zm.) Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, mgr inż. Maciej Kamiński spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz wnioskuję o dopuszczenie go do publicznej obrony przedstawionej pracy.

Wnioskuję ponadto o wyróżnienie jego pracy ze względu na jej wartościowy wkład w problematykę opracowania nowych, zaawansowanych przyrządów elektronicznych na bazie węgliku krzemu.

R. Perlicki