

Warszawa, 7 sierpnia 2024

Prof. dr hab. Marek Godlewski  
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk  
02-668 Warszawa  
Aleja Lotników 32/46

**Recenzja pracy doktorskiej**  
**Mgr inż. Macieja Kamińskiego**  
**zatytułowanej**

**“Opracowanie wybranych elementów technologii wytwarzania  
wysokonapięciowych diod p-i-n na podłożu węgliku krzemu”**

Praca doktorska mgr inż. Macieja Kamińskiego wykonana została na Politechnice Warszawskiej. Promotorem doktoratu jest dr hab. inż. Mariusz Sochacki, prof. Politechniki Warszawskiej, a promotorem pomocniczym dr inż. Andrzej Taube. Praca wykonana została w ramach dyscypliny naukowej – Automatyka, Elektronika. Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, i dziedzinie nauk – Nauki Inżynieryjno-Techniczne.

Rozprawa doktorska dotyczy niezwykle trudnego zadania wykonania struktur elektronicznych na bazie węgliku krzemu do zastosowań w układach wysokich napięć, wysokiej mocy. Praca zawiera wiele wyników badawczych ale także, co bardzo doceniam, wyników wdrożeniowych. W ramach tej drugiej działalności wykonane zostały struktury elektroniczne (diody p-i-n) o bardzo dobrych parametrach.

Jak już pisałem doktorat dotyczy zastosowań w elektronice struktur na bazie SiC. Aktualnie na rynku dominują tranzystory i inne elementy elektroniczne na bazie krzemu. Konkurencyjne tranzystory mocy i inne przyrządy elektroniczne pracujące przy wysokich napięciach wykorzystujące SiC, GaN, czy też (najnowsze prace) Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mają duży potencjał, ale nie są jeszcze w pełni opracowane. Te konkurujące z krzemem materiały są intensywnie badane w wielu laboratoriach na świecie. Tym samym doktorat dotyczy bardzo aktualnej i ważnej tematyki badawczej, realizowanej intensywnie w licznych laboratoriach badawczych w wielu krajach świata. Recenzję zacznę więc od krótkiego uzasadnienia wagi prowadzonych w doktoracie prac.

Jeśli chodzi o SiC to od roku 1994 większość prac realizowanych w czołowych laboratoriach na świecie dotyczy właściwości i zastosowań politypu 4H-SiC. Ten heksagonalny polityp ma większą przerwę energetyczną i ruchliwość elektronów niż na przykład kubiczny polityp 3C-SiC. Ponadto polityp 4H-SiC posiada skośną przerwę energetyczną, z czego wynika dłuższy czas życia swobodnych nośników.

Porównując parametry struktur elektronicznych na bazie Si i SiC, z większej przerwy energetycznej SiC wynika znacznie większa odporność na przebicia, większa niż w przypadku struktur krzemowych. Inną istotną zaletą SiC, także wynikającą z dużej wartości przerwy energetycznej, jest znacząco niższa koncentracja nośników samoistnych. Łatwiejsza jest kontrola typu przewodnictwa poprzez domieszkowanie. Materiał ten ma więc ogromny potencjał do zastosowań w elektronice przyrządów wysokich mocy, pracujących przy wysokich napięciach.

Praca przygotowana została w formie książkowej, liczy 155 stron plus 7 stron wstępnych, składa się z 10 rozdziałów, podzielonych na szereg podrozdziałów, podsumowania, obszernej bibliografii zawierającej 156 pozycji, z dodatku w którym opisany jest dorobek naukowy kandydata (robiący wrażenie!), oraz spisu rysunków, tabel i informacji o stałych fizycznych. Praca przygotowana jest bardzo starannie. Ilość usterek językowych jest bardzo mała i nie wpływają one na moją bardzo wysoką ocenę złożonego doktoratu. Dlatego nie będę je wymieniać.

W rozdziale drugim autor doktoratu opisuje cele pracy, które, patrz podsumowanie przedstawione w rozdziale 11-tym, są w pełni zrealizowane. W rozdziale trzecim kandydat opisuje aktualny stan wiedzy. Ten rozdział, jak i zebrana obszerna bibliografia, potwierdzają bardzo dobrą orientację doktoranta w podjętej tematyce badań.

Istotne wyniki prac zebrane są w rozdziałach 5-10, w tym dwa ostatnie rozdziały opisują wytworzenie konkretnych przyrządów wysokiej mocy (diody p-i-n), co było finalnym celem pracy doktorskiej. Poniżej nie będę opisywał co zawiera każdy z tych rozdziałów i podrozdziałów, co często jest typowym „wypełniaczem” recenzji. W zamian skupię się na wymienieniu osiągnięć doktoratu, tych które uważam za najważniejsze.

Zacznę od kilku uwag dotyczących stanu polskiej elektroniki. Ta praca znakomicie odzwierciedla jak duże inwestycje należy dokonać aby w pełni wykorzystać bardzo duży potencjał badawczy polskich zespołów naukowych w dziedzinie elektroniki. W ramach swojej pracy doktorant zmierzył się z istotnymi ograniczeniami dostępnego w Polsce sprzętu. Dobrym przykładem są prowadzone przez niego prace dotyczące implantacji. Dostępny implantator (a pro po zakupiony przez Instytut Fizyki PAN) ma znaczące ograniczenia, a przecież jest to podstawowe narzędzie przy produkcji wielu przyrządów elektronicznych! Konieczne były (bardzo ciekawe rozwiązanie!) modyfikacje próbek, tak aby otrzymać właściwe profile głębokościowe rozkładu akceptorów wprowadzanych do SiC. Zaproponowane rozwiązania uważam za istotne osiągnięcie doktoranta.

Innym dobrym przykładem są ograniczenia dostępnych spektroskopów SIMS. Pomiary SIMS są standardowo wykonywane przez liczne zespoły technologiczne, w tym także przez moich współpracowników w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie. Pomiary te wykonywane są w celu oceny profilu rozkładu i koncentracji domieszek. Informacje podane przez doktoranta wskazują na niedokładności tych pomiarów wynikające z ograniczeń sprzętowych. To bardzo niepokojąca informacja!

Aby otrzymać wiarygodne wyniki, doktorant porównał wyniki pomiarowe wykonane na trzech różnych systemach dostępnych w różnych jednostkach. Wysoko oceniam taką dociekliwość badawczą kandydata. Kandydat wykazał duży krytycyzm badawczy! To nietypowe dla wielu doktoratów, a tym samym ważne do podkreślenia.

Istotną zaletą złożonej pracy jest także porównanie wyników modelowania i wykonanych następnie prac eksperymentalnych. Z dużym zainteresowaniem przeczytałem część pracy dotyczącą możliwości modelowania profilów domieszek z implantacji. Doktorant zastosował dwa modele, w tym jeden rozszerzony, uwzględniający strukturę krystaliczną materiału. W tym przypadku możliwe jest uwzględnienie spodziewanego zjawiska kanałowania. Rzeczywiście ten rozszerzony model lepiej zgadzał się z wynikami doświadczalnymi. Te przeprowadzono na podstawie wyników modelowania i wykonane były na dostępnym implantatorze, po odpowiedniej modyfikacji próbek.

Innym przykładem dociekliwości badawczej doktoranta jest zawarta w doktoracie analiza pomiarów transportowych badanych materiałów (badanie zjawiska Halla). Dopiero

zastosowanie zaawansowanego modelu (pierwotnie użyto „klasyczną” analizę, stosując model van der Pauwa, patrz rysunek 6.8) do opisu wyników pomiarowych pozwoliło na otrzymanie energii jonizacji akceptorów zgodnych z oczekiwaniami. Ponownie wysoko oceniam taką dociekliwość naukową kandydata.

Po przeprowadzeniu wielu prac badawczych/technologicznych doktorant zweryfikował uzyskane wyniki poprzez wykonanie docelowych struktur elektronicznych – diod p-i-n pracujących przy wysokich napięciach/dużych mocach. **Ta część doktoratu zrobiła na mnie duże wrażenie.** Pomimo wielu ograniczeń sprzętowych możliwe stało się wytworzenie profesjonalnych struktur diodowych. A jednak **Polak potrafi!** To bardzo istotny sukces tego doktoratu. **Złożony doktorat uważam więc za wyróżniający.** Na moją wysoką ocenę tej pracy wpływa przede wszystkim jej wynik końcowy – wykonanie zakładanych struktur diodowych o bardzo dobrych parametrach, konkurujących z tymi badanymi/wytwarzanymi na świecie. Doktorant z sukcesem zrealizował wszystkie stawiane cele doktoratu. Ponadto wykazał się dużą wiedzą na temat badanego materiału, jego właściwości fizycznych, a także na temat istniejących przyrządów na bazie SiC (patrz bardzo obszerna bibliografia). Uzyskane wyniki stanowią nowe, oryginalne rozwiązanie, ważne dla nauk inżynierijno-technicznych, otwierające szanse na produkcję odpowiednich przyrządów mocy w Polsce.

Godny podkreślenia jest także dotychczasowy dorobek naukowy kandydata (w momencie składania pracy doktorskiej) na który składa się 14 prac naukowych w recenzowanych międzynarodowych czasopismach naukowych, współautorstwo 4 monografii, liczne wystąpienia konferencyjne i aż 7 wniosków patentowych. Ten ostatni wynik jest wybitny, godny wyróżnienia!

### **Podsumowanie recenzji**

Podsumowując, uważam że uzyskane w rozprawie wyniki są **bardzo wartościowe.** **Stwierdzam więc, że praca doktorska mgr inż. Macieja Kamińskiego spełnia (w moim odczuciu z dużym nadmiarem) wszystkie wymagania formalne stawiane pracom doktorskim w odpowiednich ustawach (art. 187 ustawy z dnia 20.07.2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023.742 z dnia 20.04.2023)). Wnioskuje dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów postępowania.**

---

**Jednocześnie będąc pod dużym wrażeniem rezultatów zaprezentowanych w doktoracie składam wniosek o wyróżnienie doktoratu.**

**Krótkie uzasadnienie wniosku o wyróżnienie**

W doktoracie zawarte są nie tylko zaawansowane wyniki badawczo/technologiczne, ale także wykonana została weryfikacja praktyczna tych wyników w postaci konkretnych diod na wysokie napięcia/wysokie moce. Parametry (w tym uzysk przy wytwarzaniu) tych diod są bardzo dobre, konkurencyjne do tych wytwarzanych w innych laboratoriach. **Są to nowe (czytaj nowatorskie) wyniki zasługujące na wyróżnienie!**



