Prof. dr hab. inż. Andrzej Napieralski
tytuł, stopień, imię i nazwisko

Politechnika Łódzka
Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych
miejsce pracy

Łódź, dn. 21.08.2020 r.
data

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ WYKONANA DLA RADY NAUKOWEJ DYSCYPLINY AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Tytuł rozprawy: ***„Modelowanie charakterystyk prądowo-napięciowych tranzystora tunelowego TFET".***

Autor rozprawy: **mgr inż. Piotr Wiśniewski**

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

Redukcja rozmiarów przyrządów jest jednym z podstawowych zagadnień niezbędnych do obniżenia kosztów produkcji układów scalonych i systemów elektronicznych oraz do wzrostu stopnia integracji układów scalonych.

W ramach prowadzonych rozważań Autor rozprawy sformułował następujące tezy:

1. ***Wybór ścieżki tunelowania w podejściu półklasycznym ma znaczący wpływ na uzyskane wyniki symulacji klasycznych tranzystorów tunelowych z podwójną bramką dla różnych parametrów konstrukcyjnych.***
2. ***Niskowymiarowość gazu nośników w obszarze transportu w połączeniu z inżynierią struktury pasmowej materiału pozwalają na zwiększenie prądu włączenia oraz nachylenia charakterystyki przejściowej, umożliwiając w konsekwencji obniżenie napięcia zasilania.***

   oraz podjął następujące zagadnienia:

   - opracowanie dwuwymiarowego symulatora przyrządu bazującego na rozwiązaniu równań ciągłości elektronów i dziur razem z równaniem Poissona,
   - uwzględnienie efektu tunelowania międzypasmowego poprzez szybkość generacji tunelowej nośników,

- opracowanie modelu charakterystyk prądowo-napięciowych krzemowego tranzystora TFET z podwójną bramką dla różnych parametrów konstrukcyjnych,
- opracowanie jednowymiarowego symulatora kwantowo-mechanicznego przyrządu EHB TFET. Przy jego zastosowaniu zamodelowano charakterystyki przejściowe tranzystora EHB TFET dla różnych materiałów kanału i parametrów konstrukcyjnych przyrządu.

Powyższe zagadnienia zostały w pełni zrealizowane i przedstawione w rozprawie, zaś tezy zostały udowodnione.

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

Autor rozprawy opublikował wyniki dotyczące rozprawy doktorskiej w 5 artykułach: P1 AEU-INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRONICS AND COMMUNICATIONS (20 pkt., 2010) (w trakcie procesu publikacyjnego), P2 i P6 (IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES (32 pkt., 2010)), P7 (Proceedings of the SPIE), P9 (ELEKTRONIKA- KONSTRUKCJE, TECHNOLOGIE, ZASTOSOWANIA (9 pkt., 2010) oraz zaprezentował uzyskane wyniki na dwóch konferencjach naukowych: K5 (ELTE 2019) i K13 (ELTE 2016). Pozostałe pozycje całościowego wykazu dorobku obejmującego 9 artykułów i 16 komunikatów konferencyjnych, to efekty własnej pracy doktoranta w CEZAMAT oraz pracy jeszcze w okresie studiów.

W spisie literatury autor zacytował 93 prace innych autorów, obejmujące bardzo szeroki przegląd zagadnień związanych z modelowaniem tranzystorów MOSFET i TFET.

W większości są to prace anglojęzyczne świadczące o bardzo dobrej orientacji autora w trendach i osiągnięciach nauki światowej. W szczególności na podkreślenie zasługuje cytowanie najbardziej reprezentatywnych prac zamieszczanych w najlepszych czasopismach jak np. Nature.

Cytowane publikacje zostały wykorzystane poprawnie a wnioski z ich analizy przedstawiono w sposób jasny.

3. **Czy autor rozwiązał przedstawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?**

Przedstawione w rozprawie zagadnienia zostały rozwiązane a doktorant wykazał szeroką wiedzę, obejmującą problematykę:

- modelowania półprzewodnikowych elementów elektronicznych,
- formułowania i rozwiązywania matematycznego opisu kanału w tranzystorach EHB TFET,

- wyboru ścieżki tunelowania w strukturze tranzystora TFET co ma istotny wpływ na wynik symulacji.

Przyjęta przez doktoranta metodologia jest właściwa.

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?

Recenzowana praca stanowi oryginalne i samodzielne rozwiązanie postawionych przez doktoranta zagadnień. Za oryginalne elementy rozprawy oraz oryginalny dorobek jej autora uważam rozwiązanie postawionych celów ze szczególnym naciskiem na zgodność z fizycznymi właściwościami i parametrami tranzystorów TFET oraz EHB TFET.

Opracowany przez Autora symulator pozwala na liczenie międzypasmowego prądu tunelowania bezpośredniego oraz prądu tunelowania z uczestnictwem fononów. Dodatkowo pozwala na modelowanie charakterystyk przejściowych tranzystora EHB TFET dla różnych materiałów kanału (Si, Ge, InAs, $Ge_{1-x}Sn_x$) i parametrów konstrukcyjnych przyrządu.

Co istotne we wszystkich tych modelach zastosowano podejście, w którym parametry modelu mają bezpośrednią interpretację fizyczną.

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

Praca napisana jest poprawnym językiem. Autor stosował w rozprawie poprawną terminologię. Analizy pośrednie oraz końcowe wyniki zostały zilustrowane graficznie. Wnioski zostały przedstawione w sposób jasny i zwięzły.

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Uzyskane w pracy wyniki są niezbędne do zmniejszenia kosztów produkcji nowoczesnych układów scalonych poprzez umożliwienie szybkiej symulacji przy poszukiwaniu nowych topologii układów elektronicznych. W szczególności w przypadku symulacji układów ASIC przed wysłaniem ich do produkcji wymagana jest dokładna symulacja post-layoutowa. Zastosowanie prostych modeli tranzystorów, których parametry mają interpretację fizyczną pozwala na znaczne przyśpieszenie obliczeń a także na wyciąganie wniosków dotyczących związku zastosowanej technologii z końcowymi wynikami symulacji.

7. **Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:**

a) nie spełniająca wymagań stawianych rozprawą doktorskim przez obowiązujące przepisy,

b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,

c) spełniająca wymagania,

d) <u>spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem,</u>

e) wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Podjęte w rozprawie zagadnienia stanowią teoretyczny wkład do modelowania tranzystorów tunelowych TJFET. Na podstawie analizy dysertacji można stwierdzić, że jej autor posiada bardzo duży zasób wiedzy teoretycznej w przedmiocie rozprawy, spełnia więc wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora.

W konkluzji stwierdzam, że praca mgr. inż. Piotra Wiśniewskiego pt.: **„Modelowanie charakterystyk prądowo-napięciowych tranzystora tunelowego TFET"** spełnia wymagania Ustawy o tytule i stopniach naukowych stawiane rozprawom doktorskim. Wnioskuję, zatem o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

A. Napieralski

Podpis