

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Warszawa, 7 czerwca 2017 r.

D z i e k a n a t

Uprzejmie informuję, że na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej odbędzie się w dniu 22 czerwca 2017 r. publiczna obrona rozprawy doktorskiej

mgr inż. Dominika Tanousa

temat: „Modelling of transport of charge carriers in the metal-insulator-semiconductor structures with nanocrystals embedded in the insulator layer”.

promotor – prof. dr hab. inż. Bogdan Majkusiak z Politechniki Warszawskiej

recenzenci:

dr hab. inż. Andrzej Kołodziej, prof. Akademii Górniczo-Hutniczej

dr hab. inż. Lidia Łukasiak, prof. Politechniki Warszawskiej

Obrona odbędzie się w dniu 22 czerwca 2017 r. w sali 116 na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych – Gmach im. Janusza Groszkowskiego, Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19; początek godz. 12.00.

Po adresem: www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje zapewniony jest na stronie Wydziału dostęp do tekstów streszczenia rozprawy i recenzji, jak również do tekstu rozprawy umieszczonej w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej.

Dziekan



prof. dr hab. inż. Krzysztof Zaremba

Tytuł rozprawy doktorskiej: "Modelowanie transportu nośników ładunku w strukturach metal-izolator-półprzewodnik z nanokryształami w warstwie izolatora"

Imię i nazwisko doktoranta: mgr inż. Dominik Tanous

Opiekun naukowy: prof. dr hab. inż. Bogdan Majkusiak

Streszczenie

Przedmiotem rozprawy jest modelowanie transportu nośników ładunku w strukturach metal-izolator-półprzewodnik z nanokryształami w warstwie izolatora (struktura typu nc-MOS). W pracy zaprezentowano oryginalny model struktury nc-MOS. Stworzony model umożliwia wygenerowanie jako danych wyjściowych następujących wielkości fizycznych: rozwiązanie zagadnienia elektrostatyki, t.j., rozkładu potencjału elektrostatycznego oraz ładunku nośników w strukturze, szybkości procesów transportu nośników przeładowywujących nanokryształy, wielkości takie jak prąd elektryczny i małosygnałowa pojemność w warunkach stanu ustalonego, zależności czasowe prądu elektrycznego oraz małosygnałowej pojemności w warunkach nierównowagi spowodowanych zmianami napięcia polaryzującego. Model zaimplementowany w postaci programu komputerowego napisanego w języku C charakteryzuje się dużą efektywnością obliczeniową umożliwiającą wygenerowanie danych wyjściowych przy akceptowalnych nakładach czasu symulacji. W pracy zaprezentowano wyniki symulacji charakterystyk prądowo-napięciowych (I-V-t) oraz pojemnościowo-napięciowych (C-V-t) uwzględniające parametry czasowe sygnału pobudzającego dla struktur nc-MOS oraz przeprowadzono analizę teoretyczną wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych i elektrofizycznych struktury oraz czasowych zależności na właściwości fizyczne struktury (elektrostatyka, mechanizmy transportu) oraz na wyjściowe wielkości elektryczne (prąd, ładunek, pojemność). Wyniki symulacji charakterystyk I-V-t oraz C-V-t uzyskane z teoretycznego modelu zostały porównane z pomiarami elektrycznymi doświadczalnych struktur Al-SiO₂-Si(p) / Al-HfO_x-Si(p) zawierającymi nanokryształy germanu (Ge) / krzemu (Si) w warstwie dwutlenku krzemu (SiO₂) / tlenku hafnu (HfO_x).

Prof. nadzw. dr hab. Andrzej Kołodziej
Instytut Politechniczny,
Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Tarnowie
Katedra Elektroniki
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Akademia Górniczo- Hutnicza w Krakowie

Kraków 15.05.2017

**KWESTIONARIUSZ- RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY
WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy: Modeling of Transport of Charge Carriers in the Metals-Insulator-Semiconductor Structures with Nanocrystal Embedded in the Insulator Layer charakterystyk admitancyjnych tunelowych struktur MIS (metal –izolator- półprzewodnik)

Autor rozprawy: mgr inż. Dominik Tanous

- 1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Przedmiotem rozprawy jest modelowanie transportu nośników ładunku , w specjalnych strukturach nc- MOS(metal-izolator-półprzewodnik z nanokryształkami w warstwie izolatora) podlegające efektom rozmiarowym. Propozycja składa się z modelu dyfuzji dryftowej nośników, równania Poissona modelu rekombinacyjno-generacyjnego z elementami równań Schroedingera. Model jest w formie komputerowego programu w C. Umożliwia symulację prądowo-napięciowo-czasowej (I-V-t) i pojemnościowo-napięciowo-czasowej (C-V-p) charakterystyki i jest odniesiony do przytoczonych eksperymentalnych wyników z literatury dla struktury nc-MOS. Struktura fizyczna z mechanizmami transportu jest wyjaśniana na podstawie uproszczonego diagramu pasmowego. Własności elektrostatyczne struktury są opisane dla obszaru półprzewodnika regionu studni kwantowych w warstwach izolatora i interfejsach pomiędzy nimi. Autor dodaje obliczenia tunelowych procesów i generacyjno-rekombinacyjnych procesów w warstwach izolacyjnych. Zwraca uwagę na ten układ w warunkach równowagi, a z drugiej strony procesów ładowania i rozładowania. W pomiarach C-V-t i I-V-t używa systemu Keithley 4200.

Rozprawa ma charakter teoretyczny, z niewielkim przywołaniem danych eksperymentalnych. W zaproponowanym modelu brakuje mi sprecyzowania jakiej wielkości są proponowane nanokryształy, jaka jest ich gęstość, czy są one zlokalizowane i monoenergetyczne i czym ten model różni się od warstwy dielektryka z ciągłym rozkładem pułapek wokół poziomu Fermiego.

- 2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle /świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformulowano w sposób jasny i przekonujący?**

W wstępie autor w publikacjach od 1 do 53 przytacza bardzo cennie podstawową literaturę dotyczącą wytwarzania nanocząstek w strukturze izolatora MIS, ich własności w układach 3D, rozwiązań równań Schroedingera i Poissona oraz zastosowania tego typu układów jako przyrządów z pływającą bramką do układów pamięci. W kolejnych publikacjach aż do publikacji nr 100 między innymi wskazuje ideę jednoelektronowego tranzystora, efektu kulombowskiej blokady i rozwiązań kwantowych dla nanokryształu (studni kwantowej). Kolejne prace to prace o jednoelektronowych przyrządach logicznych, elektronowych pompach, cyfrowych konwerterach. Literatura od 100 do 180 w dużym stopniu odnosi się do teoretycznych i eksperymentalnych badań dotyczących tunelowych diod MIS, modeli małosygnałowych oraz struktur nc-MOS a także metod pomiarowych opartych o system Keithley, zrealizowanych lub realizowanych przez zespół badawczy, w którym pracuje autor ,a często zamieszczonych w

czasopismach z listy filadelfijskiej. Brakuje mi tutaj odniesienia do istniejących już wdrożeń przemysłowych tego typu struktur nc-MOS. One pozwoliłyby autorowi na zobaczenie przyczyn odstępstwa przewidywań wypływających z tego modelu w stosunku do układów realnych.

. Przytoczone opisy i równania z prac świadczą o ugruntowanej wiedzy na temat znajomości problemów elektrostatycznych, transportu i ograniczeń występujących w strukturach MIS.

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

W rozdziale 2 autor zaprezentował ideę struktury MOS z nanokryształkami w izolatorze oraz schematyczne diagramy pasmowe takiej struktury z przebiegiem potencjału usytuowaniem defektów i stanów ładunkowych. Celowo zestawil fundamentalne równania takie jak: Poissona, dryftu, rozkłady gęstości stanów równania, rekombinacyjno-generacyjne decydujące o stanie równowagi, ładowania i rozładowywania, o transporcie nośników w tej strukturze.

Uważam, że w ramach bardzo szeroko postawionego zadania, dobrze, że autor w kolejnych rozdziałach od 2-4 skupił się nad wpływem transportu, uwarunkowanego stanami powierzchniowymi, objętościowymi i grubością w tlenku tunelującym na ładunkową sytuację studni kwantowej określonej zmianami potencjału V_g przy założeniu grubego izolatora po stronie bramki. Wykorzystując „Język C” zmieniając automatycznie parametr V na osi x wyliczał wartości C lub I dla różnych czasów przemiatania, różnych gęstości zgromadzonych ładunków na powierzchniach i w środku izolatora tunelującego, powierzchniach graniczących ze studnią. Przyjął, że w badanym przedziale napięć ładunek na studni zmienia się według wzoru ze strony 32., oraz, że sytuacja ładunkowa w półprzewodniku nie wpływa na dV_g (można wykonywać małosygnałowe pomiary C). Są to założenia możliwe do przyjęcia. Symulowane krzywe $C-V$ i $I-V$ przypominają te proponowane przez innych autorów. Dają one informację na temat niektórych parametrów występujących w rzeczywistych strukturach przykładowo koncentracji czy położenia pułapek. Model jest jasny, uniwersalny i sprawny matematycznie. Natomiast nie wiem w którym miejscu autor wykorzystał wzory procesów generacyjno-rekombinacyjne.

Pytanie: Proszę o ideowe przedstawienie zastosowania takiej struktury w nośnikach pamięci. Zalety i Wady.!

Pytanie: Proszę o przedstawienie zasad pomiaru i przykładowej charakterystyki $C-V$ z systemu Keithley.

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?

Zaproponowana metoda porównywania symulowanych napisanym programem charakterystyk z charakterystykami $C-V$ uzyskanymi, w określony sposób przy pomocy systemu pomiarowego Keithley 4200-SCS w zastosowaniu do próbki, którą znał z przebiegu procesu technologicznego oraz wyciągnięte tutaj wnioski, uważam za bardzo wartościowe. Pomiary przeprowadzono dla struktury $Al-SiO_2-Si(p)$ z nc-Ge i $Al-HfOx-Si(p)$ z nc-Si dla częstotści 1MHz z różnymi czasami przemiatania, w tym wybranym opóźnieniem w stosunku do skoku napięcia.

Porównanie to, odzwierciedla skalę trudności i zmusza do wprowadzania dodatkowych założeń do modelu.

Zawarte tu uwagi są nowatorskie i cenne.

Wydaje mi się, że zaproponowana metoda z pewnymi ograniczeniami (lokalizacja) może być stosowana do struktur nc-MOS i można ją kolejno rozbudowywać do poziomu bardziej uniwersalnego modelu (metody) obejmującej przypadkowy rozkład gęstości i rozmiary samorzutnie kreowanych nanocząstek w izolatorze. Jest kilka zastosowanych już w przemyśle elektronicznym patentów stosujących przedmiotowe struktury.

Przykładowo:

(12) **United States Patent**
Kang et al.

(10) Patent No.: **US 8,329,543 B2**
(45) Date of Patent: **Dec. 11, 2012**

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

Praca wymaga skupienia od czytelnika ze względu na szereg przywołanych równań, opisów modeli elektrostatycznych i odpowiadających im przebiegów $I-V$, $C-V$ odnoszących się do klasycznych i kwantowych zachowań.

Brakuje mi tutaj zestawienia i definicji używanych parametrów i symboli, jak i podstawowych równań. Brakuje mi numeracji równań prezentowanych w rozprawie.

Natomiast chciałbym podkreślić, że praca napisana jest w języku angielskim zrozumiale i przejrzysto, a także struktura kolejnych rozdziałów jest poprawna. Nie spotkałem braków w interpunkcji. Na podkreślenie zasługują również czytelne i logiczne rysunki i wykresy (jedynie szkoda, że nie większe).

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Pewnym brakiem w pracy jest nie porównanie tego rozwiązania z nanocząstkami (rys 1) z innymi propozycjami np. bardziej upływnymi, a współcześnie stosowanymi, które reprezentuje 2nm niestechiometryczny SiN (brak jednego O to jeden defekt) w przyrządach z pływającą bramką. Takie porównanie nasuwa pytanie czy w tym modelu przyjęto nanocząstkę jako zlokalizowaną studnię potencjału i czy obowiązuje tutaj blokada kulombowska. Brakuje również informacji na temat innych ograniczeń tutaj przyjętych (brak tunelowania między cząstkami, że koncentracja defektów płytkich i głębokich w izolatorze nie zmienia się z napięciem V_g , nie występują zjawiska metastabilności modulowane sytuacją ładunkową). W żadnym wypadku nie umniejsza to oryginalności i przydatności modelu i pracy włożonej w analizę ładunków i prądów w takiej strukturze.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

W moim przekonaniu zaproponowane modele, metoda charakteryzacji oraz interpretacja na tej podstawie dynamiki takiego układu są kolejnym krokiem w opisie zachowań nowej generacji przyrządów półprzewodnikowych wykorzystujących zjawiska kwantowe w celu obniżenia zużycia materiałów i energii, miniaturyzacji, itp. Mogą mieć zastosowanie do analizy tunelowych struktur MIS do grubości izolatora do 3 nm. Atrakcyjny jest również sam program obliczeniowy do tego typu obwodów oparty o pomiary admitancyjne. Tego typu układy są już wytwarzane na świecie.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
- b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
- c/ spełniająca wymagania
- d/ spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem
- e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie – Uważam, że praca zasługuje na wyróżnienie



Andrzej Kołodziej

16.05.2017

KWESTIONARIUSZ – RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY
WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH POLITECHNIKI
WARSZAWSKIEJ

Tytuł rozprawy: Modeling of Transport of Charge Carriers in the Metal-Insulator-Semiconductor Structures with Nanocrystals Embedded in the Insulator Layer

Autor rozprawy: mgr inż. Dominik Tanous

- 1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Autor postawił tezę, że „możliwe jest zbudowanie takiego modelu struktury metal-dielektryk-półprzewodnik, w której warstwa dielektryka zawiera nanokryształy, który opisie charakterystyki elektryczne (prąd, pojemność małosygnałową) w funkcji napięcia zależnego od czasu, osiągnie zbieżność w rozsądnie krótkim czasie i wykaże dobrą zgodność z doświadczeniem”

Rozprawa ma charakter teoretyczno-doświadczalny. Autor opracował model transportu nośników ładunku w strukturach metal-dielektryk-półprzewodnik (MOS), w których warstwa dielektryka zawiera nanokryształy (nc-MOS), a następnie poddał go weryfikacji doświadczalnej poprzez porównanie z charakterystykami rzeczywistych struktur nc-MOS i uzyskał dobrą zgodność modelu z doświadczeniem.

Zarówno teza jak i cele pracy zostały sformułowane czytelnie i jednoznacznie.

- 2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej i stanu zagadnień w przemyśle) świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?**

Przeglądowa część pracy obejmuje literaturę poświęconą przede wszystkim modelowaniu transportu nośników transportu w strukturach MOS (różne warianty tunelowania, zjawisko generacji-rekombinacji), ale również charakteryzacji takiego

transportu, właściwościom i zastosowaniom nanokryształów oraz struktur je zawierających (np. pamięci nieulotne lub przyrządy jednoelektronowe) oraz wytwarzaniu struktur MOS zawierających nanokryształy (np. metody nanokryształizacji i wytwarzania warstw dielektrycznych).

Analiza literatury nie budzi zastrzeżeń, a wnioski zeń wyciągnięte zostały umiejętnie wykorzystane w pracy, m.in. do określenia parametrów modelowanej struktury. Bibliografia obejmuje 180 publikacji (w tym 15 pozycji z udziałem Autora). Autor prezentuje głęboką znajomość przedmiotu rozprawy.

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

Autor rozpoczął budowanie modelu transportu nośników w strukturach nc-MOS od opisu zależności elektrostatycznych w obecności ładunków w dielektryku, w tym pułapek zlokalizowanych w pobliżu powierzchni granicznej dielektryk-półprzewodnik. Wymagało to m.in. użycia odpowiednich formuł opisujących obszar ładunku przestrzennego w podłożu, prawdopodobieństwa obsadzenia pułapek oraz stałej czasowej procesów tunelowania z/do tych pułapek. Następnym krokiem było uwzględnienie właściwych mechanizmów transportu nośników. Sposób wykonania tego zadania ma duży wpływ na użyteczność końcowego modelu. Autor uwzględnił tunelowanie obu rodzajów nośników oraz ich generację i rekombinację również w obecności pułapek w dielektryku, co wydaje się poprawnym rozwiązaniem problemu. Model uzupełniony jest przez równania bilansu prądów. Opracowanie modelu wymagało także wyboru odpowiednich parametrów materiałowych dla podłoża półprzewodnikowego, warstw dielektrycznych i obszaru studni oraz określenia geometrii symulowanych struktur. Również z tym zadaniem Autor poradził sobie znakomicie.

Autor napisał program w języku C, który realizuje obliczenia zgodnie z zaproponowanym modelem. Warto podkreślić, że za pomocą programu można przeprowadzać nie tylko obliczenia w warunkach stanu ustalonego, ale także symulować procesy przejściowe. Dzięki temu oprócz symulacji zwykłych charakterystyk prądowo-napięciowych i pojemnościowo-napięciowych można także przeprowadzić symulacje takich charakterystyk w sytuacji, kiedy napięcie jest zależne od czasu, co umożliwia dokładniejszą analizę procesów przeładowywania nanokryształów.

Opracowany model został przez Autora użyty do oceny wpływu szybkości zmian napięcia oraz elektro-fizycznych parametrów struktury (ładunek stały, położenie krawędzi pasm w obszarze studni, czas życia, masa efektywna dziur i elektronów w dielektryku, domieszkowanie podłoża) na otrzymane charakterystyki I-V-t oraz C-V-t. Dyskusja otrzymanych wyników poparta modelami pasmowymi ilustrującymi zjawiska

występujące podczas zmian napięcia w czasie świadczy o tym, że Autor bardzo dobrze orientuje się w mechanizmach determinujących działanie struktur nc-MOS.

Ostatnim elementem rozprawy była doświadczalna weryfikacja modelu poprzez porównanie charakterystyk teoretycznych z charakterystykami zmierzonymi. Do tego celu Autor wybrał dwie struktury, tj. strukturę aluminium – dwutlenek krzemu – krzem typu p z nanokryształami germanowymi oraz strukturę aluminium – dwutlenek hafnu – krzem typu p z nanokryształami krzemowymi. Autor uzyskał bardzo dobrą jakościową zgodność charakterystyk teoretycznych z eksperymentalnymi. Zaobserwowane rozbieżności są najprawdopodobniej spowodowane niedostatecznie dokładną znajomością parametrów mierzonych struktur lub też niejednorodnością wartości tych parametrów w obrębie struktury, w szczególności położenia i rozkładu energetycznego pułapek powierzchniowych. Otrzymane wyniki wskazują, że model transportu nośników został opracowany prawidłowo.

Autor wykazał się szerokim wachlarzem umiejętności, poczynwszy od konstruowania matematycznego opisu działania badanych struktur, poprzez tworzenie oprogramowania i fizyczną analizę wyników symulacji do pomiarów charakterystyk elektrycznych i charakteryzacji struktur. Wykazał się ponadto krytycznym stosunkiem do otrzymanych wyników wyrażonym w dyskusji dotyczącej doświadczalnej weryfikacji modelu.

Do realizacji pracy Autor zastosował odpowiednie narzędzia, toteż w rezultacie cele rozprawy zostały osiągnięte, a teza udowodniona.

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.

Za najbardziej oryginalne osiągnięcie Autora uważam opracowanie modelu umożliwiającego obliczenie prądowej i pojemnościowej odpowiedzi struktury nc-MOS na zależne od czasu wymuszenie napięciowe, co umożliwia dokładniejszą niż dotąd analizę procesów przejściowych w badanych strukturach. Ma to niebagatelne znaczenie dla rozwoju struktur nc-MOS oraz ich zastosowań. Jak dotąd, nie zaprezentowano w literaturze fachowej takiego modelu, a tym samym nie przeprowadzono wcześniej popartej symulacjami analizy tego typu.

Oryginalnym osiągnięciem Autora jest również interpretacja otrzymanych przebiegów prądu i pojemności w funkcji zależnego od czasu napięcia w oparciu o zaproponowany model.

Warto podkreślić, że wyniki przeprowadzonych przez Autora badań zostały opublikowane na międzynarodowych konferencjach (WODIM, INFOS, E-MRS) oraz w czasopismach o cyrkulacji międzynarodowej (Journal of Physics, Proc. of SPIE)

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

Ze względu na dużą liczbę wzorów oraz szczegółową dyskusję otrzymanych wyników czytanie pracy wymaga skupienia. Autor dołożył jednak starań, aby ułatwić życie czytelnikowi. Struktura pracy jest logiczna, a styl poprawny i zwięzły. Na szczególną pochwałę zasługuje zilustrowanie interpretacji otrzymanych charakterystyk I-V-t oraz C-V-t modelami pasmowymi rozważanej struktury, co bardzo ułatwia zrozumienie tego fragmentu pracy.

Autor dobrze daje sobie radę z językiem angielskim, w którym napisana jest praca. Wprowadził nie uniknął drobnych błędów językowych, np. 'ion implementation' (str. 13, linia 10 i 12 - chodziło oczywiście o implantację jonów, a nie ich implementację), ale nie mają one żadnego wpływu na wartość merytoryczną pracy.

6. Jakie są słabe strony i jej główne wady?

Porównanie teoretycznych i eksperymentalnych charakterystyk C-V-t na rys. 51 (str. 67) pokazuje, że charakterystyki teoretyczne są znacznie bardziej strome niż eksperymentalne, co wskazywałoby na obecność pułapek powierzchniowych o ciągłym rozkładzie energetycznym w rzeczywistej strukturze. Warto byłoby przeprowadzić symulacje z uwzględnieniem takiego rozkładu pułapek. Nie stawiam jednak Autorowi zarzutu z powodu braku takich symulacji, gdyż wymagałoby to poważnego zwiększenia złożoności obliczeniowej modelu, która i tak jest bardzo duża w jego obecnej formie, a ponadto dobranie właściwego rozkładu gęstości pułapek jest zadaniem bardzo trudnym. Nie dostrzegam innych wad i słabych stron pracy.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Zaproponowany model umożliwia głębsze zrozumienie zjawisk zachodzących w strukturach nc-MOS pod wpływem zaleźnego od czasu wymuszenia napięciowego, znajdzie też z pewnością zastosowanie w ocenie jakości tych struktur, co znacząco ułatwi ich rozwój i przyspieszy komercyjne zastosowania. Gdyby udało się opracować na podstawie modelu wygodną w użyciu metodę charakteryzacji, przydatność przeprowadzonych przez Autora badań wzrosłaby jeszcze bardziej.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a) *nie spełnia wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy*
- b) *wymagająca poprawek i ponownego recenzowania*
- c) *spełniająca wymagania*
- d) *spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem*
- e) **wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie**

.....*L. Zaleski*.....

(podpis)