

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Warszawa, 15 maja 2018 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 29 maja 2018 r. publiczna obrona rozprawy doktorskiej

mgr inż. Witolda Rzodkiewicza

temat: „Określenie lokalnych naprężeń mechanicznych w strukturach MOS metodami optycznymi i badanie wpływu tych naprężeń na parametry elektryczne struktur”

promotor – prof. dr hab. inż. Andrzej Jakubowski z Politechniki Warszawskiej

recenzenci:

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

prof. dr hab. inż. Regina Paszkiewicz z Politechniki Wrocławskiej

Obrona odbędzie się w dniu 29 maja 2018 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: „Określenie lokalnych naprężeń mechanicznych w strukturach MOS metodami optycznymi i badanie wpływu tych naprężeń na parametry elektryczne struktur”

Autor: mgr inż. Witold Rzodkiewicz

Promotor: Prof. dr hab. inż. Andrzej Jakubowski

STRESZCZENIE

Część doświadczalna niniejszej pracy została zrealizowana przez Autora w trakcie jego wieloletniej pracy w Zakładzie Charakteryzacji Struktur Nanoelektronicznych (obecnie Zakład Projektowania i Diagnostyki Nanostruktur i Podzespołów Elektronicznych) Instytutu Technologii Elektronowej (ITE) w Warszawie.

Głównym celem tej pracy było określenie lokalnych naprężeń mechanicznych w strukturach MOS (ang. metal – oxide – semiconductor) oraz znalezienie korelacji tych naprężeń z podstawowymi parametrami elektrycznymi struktur MOS takimi jak kontaktowa różnica potencjałów i napięcie wyprostowanych pasm w półprzewodniku.

W pierwszym etapie prac Autor rozprawy przeprowadził próby określania średniej wartości tych naprężeń stosując m.in. interferometrię i elipsometrię. Próby te zakończyły się niepowodzeniem chociaż przyniosły inne ciekawe rezultaty nie związane z głównym celem rozprawy. Skutecznym natomiast narzędziem do pomiaru naprężeń w badanych strukturach okazała się spektroskopia Ramana.

Niestety wyniki badań przy użyciu standardowej dla stosowanego spektrometru Ramana średnicy plamki promieniowania ok. 1 μm nie przyniosły pożądanych rezultatów co do rozkładu naprężeń chociaż jednoznacznie wskazywały na ich obecność. Rezultaty te były bowiem trudne do skorelowania z rozkładami parametrów V_{FB} i ϕ_{MS} . Taką korelację udało się dopiero uzyskać dzięki pomiarom z zastosowaniem spektrometru Ramana z rozogniskowaną wiązką, której średnica (ok. 20 μm) była porównywalna do średnicy plamki stosowanej przy pomiarach fotoelektrycznych dla określania rozkładów lokalnych wartości parametrów elektrycznych struktur MOS oraz znacznemu zagęszczeniu pomiarów (kilkadziesiąt na strukturę) przy użyciu plamki 1 μm . Obie te procedury pomiarowe pozwoliły określić przybliżone rozkłady naprężeń w badanych strukturach.

Dokonano obliczeń lokalnych naprężeń z użyciem widm ramanowskich dla ponad 50 rozkładów. Naprężenia w warstwie tlenkowej na krawędzi i pod bramką zostały określone odpowiednio z dokładnością ± 20 MPa i ± 100 MPa. Kształt rozkładów tych naprężeń był podobny do rozkładów wspomnianych wcześniej parametrów elektrycznych struktury. Łącząc

te rezultaty (rozkład parametrów – rozkład naprężeń) uzyskano zależności V_{FB} , ϕ_{MS} i $\frac{Q_{eff} \cdot t_{ox}}{\epsilon_{ox} \cdot \epsilon_0}$ od wartości naprężeń. W ten sposób Autor udowodnił tezę rozprawy o wpływie naprężeń w warstwie SiO_2 na parametry V_{FB} i ϕ_{MS} struktury MOS.

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 05.03.2018

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

Tytuł rozprawy: Określenie lokalnych naprężeń mechanicznych w strukturach MOS metodami optycznymi i badanie wpływu tych naprężeń na parametry elektryczne struktur.

Autor rozprawy: mgr inż. Witold Rządziejewicz

- 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 określenie lokalnych naprężeń mechanicznych w strukturach MOS metodą Spektroskopii Odbiciowego Rozproszenia Ramanowskiego spolaryzowanej wiązki laserowej o długościach 488nm i 266nm i odpowiedź na pytanie czy istnieje korelacja pomiędzy tymi naprężeniami, zmianami gęstości warstw pod-metalicznych a parametrami elektrycznymi charakteryzującymi te struktury takie jak: ΔV_{FB} (zmiany napięcia wyprostowanych pasm), Φ_{MS} (kontaktowa różnica potencjałów), Q_{eff} (ładunek efektywny pod bramką w tlenku SiO_2). Rozprawa ma charakter eksperymentalny - pomiarowy, z przywołaniem podstawowych teoretycznych wzorów obliczeniowych, słusznych przy określonych założeniach dla rozważanego modelu naprężeń i stosowanych metod optycznych. W przytaczanych modelach, dla wykonywanych pomiarów brakuje mi konsekwentnej dyskusji nad analizą błędów. Z drugiej strony trzeba podkreślić, że jest to trudne i niebywale czasochłonne.

- 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 sformułowano w sposób jasny i przekonujący?**

W rozdziale 2-5 autor prezentuje szeroko modele teoretyczne dotyczące

1 - OK

naprężeń, modeli optycznych i wyniki eksperymentalne przywoływane z literatury oraz wnioski wynikające z doświadczeń prowadzonych w grupie badawczej w ITE, której autor jest znaczącym, wieloletnim współpracownikiem. Przytacza on 125 pozycji literaturowych obejmujących okres od lat 1960 do 2012, zarówno odnoszące się do podstawowych opracowań książkowych, poprzez szczegółowe publikacje w literaturze światowej a w tym 27 publikacji, w których jest współautorem, które dotyczą tych zagadnień. Z jednej strony analizuje wpływ lokalnych naprężeń mechanicznych na parametry elektryczne struktur MOS a z drugiej strony pokazuje trudności w określeniu tego wpływu metodami elipsometrycznymi, interferometrycznymi, wagowymi i fotoelektrycznymi i pokazuje dodatkowe efekty, które należy uwzględnić (zmiana gęstości SiO_2 wraz z naprężeniem). W rozdziale 6-7 autor prezentuje zastosowaną z sukcesem opracowaną przez siebie metodę Ramanowską, dzięki której można było określić korelację pomiędzy naprężeniami a parametrami struktury MOS a w rozdziale 8 podsumowuje otrzymane rezultaty. Otrzymane wyniki w każdym bloku pomiarowym zderza z danymi literaturowymi. Te wnioski i sformułowania są jasne i przekonujące. Przytoczone opisy i krytyczna dyskusja wyników prac świadczą o ugruntowanej wiedzy w przedmiocie naprężeń mechanicznych w szeroko rozumianych strukturach elektronicznych jak i ogólnej dojrzałości autora do prowadzenia samodzielnej działalności naukowej.

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

W rozdziałach początkowych analizując procedury wyznaczania naprężeń wywodzące się z klasycznych rozważań nad strukturą wielowarstwową, różnicami w stałej sieci, termicznym współczynnikiem rozszerzalności liniowej, bazowym promieniem krzywizny podłoża autor stwierdza, że one znacznie różnią się od wartości eksperymentalnych przytoczonych z literatury. Słusznie zwraca uwagę, że mogą wystąpić w sprężystości zjawiska nieelastyczne. Autor rozwiązuje ten problem analizując zmiany w gęstości tlenku stosując metodę elipsometryczną i wagową, tj. jedyne mu dostępnymi metodami. Szkoda, że nie rozważył możliwości zastosowania technik elektronicznej mikroskopii skaningowej. Na podkreślenie zasługuje wybór metody Rozpraszania Ramana w celu określenia zmian naprężenia w tlenku. Porównanie rezultatów z co najmniej kilkudziesięciu pomiarów dla różnych podłoży, dla różnych geometrii elektrody metalowej, dla różnych metali, grubości tlenku oraz wspólne zestawienie naprężeń i zmian w parametrach elektrycznych prowadzi do określenia zależności przedstawianych na Rys. 8.1, 8.2, 8.3. Odzwierciedla to skalę trudności w określeniu związku korelacyjnego i określenia poziomu ufności wokół tej krzywej.

Powstają pytania:

2-OK

1. Czy można określić poziom ufności dla tych krzywych
2. Czy dokładność 100Mpa wobec 0,3 Gpa nie sugeruje, że jesteśmy w granicach błędu.

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 Rozpraszania Ramana wraz z świadomym wyborem takich długości fali lasera jak 488nm oraz fali ultrafioletowej 266nm, które umożliwiają korekcję odbicia fali od tlenku krzemu, i krzemu, a także świadomy wybór analizowanej częstości rozproszonej 430 cm^{-1} jest nie spotykanym w literaturze światowej oryginalnym osiągnięciem autora. Należy też podkreślić, że przygotowanie tego eksperymentu między innymi obejmujące przygotowanie próbek oraz polegające na wyskalowaniu tego urządzenia, stabilizacji długoczasowego Pomiaru Ramana i ekstrakcji interesujących zmian z widma jest również wartościowym osiągnięciem autora. W szczególności określenie jakościowe i ilościowe rozkładu naprężeń pod bramką, na krawędzi bramki i poza bramką jest oryginalnym i wartościowym osiągnięciem.

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

Praca wymaga wysiłku przy czytaniu od czytelnika ze względu na szereg nieczytelnych (zbyt małych) opisów rysunków i równań. Brakuje mi tutaj oznaczania błędów pomiarowych na rysunkach, na których prezentowane są kluczowe rezultaty tej pracy. Natomiast chciałbym podkreślić, że praca napisana jest zrozumiale i przejrzysto, a także struktura kolejnych rozdziałów jest poprawna. Są one zakończone krótkimi wnioskami. Na końcu praca uzupełniona jest o dwa dodatki w których autor m.i. szeroko przedstawia rezultaty ilościowe rozkładu naprężeń; pod, na krawędzi i poza bramką dla linii 488. Nie spotkałem znaczących braków w interpunkcji

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

Pewnym niedostatkiem w pracy jest brak szerszych rozważań nad przyczynami występowania naprężeń oraz ich zmienności w czasie w układach wielowarstwowych typu MOS(zmiany chemiczne, zmiany strukturalne,

adsorbcja gazowa) Brakuje również informacji na temat wpływu tych zmian na kształt linii częstotliwościowej 430cm^{-1}

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Pewnym brakiem w pracy są : 1. brak stwierdzenia ,że tę metodę można tak przygotować aby ją zastosować do standardowych pomiarów przykładowo umożliwiających na eliminację przyrządów, które ze względu na zły rozkład naprężeń należy odrzucić w procesie technologicznym. 2. Jakie jest inne praktyczne zastosowanie dla znajomości takiej korelacji pomiędzy naprężeniami a parametrami elektrycznymi, na projektowanie elementów? Główna wartość przedstawionej pracy polega na przybliżeniu w środowisku elektroników roli badań nad naprężeniami i ich wpływie na własności projektowanych przyrządów Ważne jest pokazanie metod ich pomiaru w tym efektywne zastosowanie metody Rozpraszania Ramana

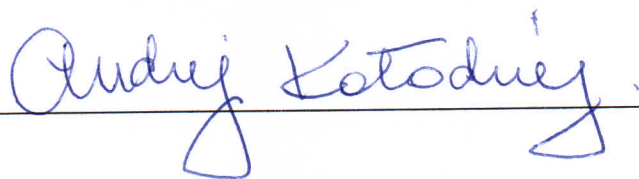
8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
- b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
- c/ spełniająca wymagania

Jeszcze raz pragnę podkreślić ,że przedstawiona praca z nadmiarem spełnia wymagania przewidziane dla rozpraw doktorskich. Należy również podsumować ,że doktorant jest współautorem 27 publikacji w tym 15 z listy filadelfijskiej oraz wykonawcą 10ciu projektów badawczych w tym w trzech był kierownikiem.

d/ spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem

- e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie Uważam, że praca zasługuje na wyróżnienie



4-OK

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

Tytuł rozprawy: „Określenie lokalnych naprężeń mechanicznych w strukturach MOS metodami optycznymi i badanie wpływu tych naprężeń na parametry elektryczne struktur”

Autor rozprawy: mgr inż. Witold Rzodkiewicz

- 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)?**

Recenzowana rozprawa dobrze wpisuje się w nurt badań realizowanych w wiodących ośrodkach badawczych mających na celu określenie lokalnych naprężeń mechanicznych w warstwach i strukturach przyrządowych oraz zbadanie ich wpływu na działanie przyrządów w nich wytwarzanych. Możliwość modyfikacji parametrów przyrządów elektronicznych i optoelektronicznych, przez celowe wprowadzanie statycznych i dynamicznych stanów naprężeń stało się nawet podstawą nowej dziedziny nauki jaką jest piezotronika.

W recenzowanej rozprawie doktorskiej postawiono sobie za cel zbadanie lokalnych naprężeń mechanicznych w strukturach MOS oraz określenie korelacji tych naprężeń z właściwościami elektrycznymi struktur MOS takimi jak kontaktowa różnica potencjału, ϕ_{MS} , i napięcie wyprostowanych pasm w półprzewodniku, V_{FB} . Na podstawie wyczerpującego przeglądu literaturowego, przeprowadzonych różnymi metodami pomiarów oraz wszechstronnej analizy uzyskanych danych pomiarowych mgr inż. Witold Rzodkiewicz sformułował główną hipotezę badawczą rozprawy, którą należy uznać za oryginalną że ”obserwowane rozkłady lokalnych wartości parametrów elektrycznych (np. ϕ_{MS} i V_{FB}) w płaszczyźnie powierzchni bramki są wynikiem nierównomiernych rozkładów naprężeń mechanicznych (i/lub odkształceń) w warstwie dielektryka struktury MOS”. Praca ma charakter doświadczalny. Hipoteza badawcza oraz główny cel rozprawy jakim była jej doświadczalna weryfikacja zostały przez Autora sformułowane w sposób prawidłowy. Praca ma duży element nowości, a jej tematyka jest bardzo aktualna i ważna dla badań stosowanych w obszarze zaawansowanych przyrządów półprzewodnikowych, nie tylko krzemowych.

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 sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Mgr inż. Witold Rzodkiewicz poprzedził swoje prace badawcze krytyczną analizą danych literaturowych dotyczących głównie metod badania naprężeń w warstwach. Oryginalność rozprawy wynika również z faktu, że w odróżnieniu od wielu badaczy, którzy koncentrują się na naprężeniach w półprzewodniku, Autor rozprawy badał naprężenia powstające w dielektryku bramkowym oraz ich wpływie na parametry elektryczne struktur MOS. Z obszernego zbioru publikacji Autor rozprawy wybrał 125 prac źródłowych. W wypadku 27 cytowanych prac mgr inż. Witold Rzodkiewicz jest ich pierwszym autorem (12 prac) lub współautorem (15 prac). Wnioski z analizy tych prac sformułowano w sposób jasny i przekonujący. Dobór źródeł, sposób ich wykorzystania i prezentacji potwierdzają bardzo dobrą wiedzę i umiejętności Autora w dziedzinie prowadzonych badań.

Na podkreślenie zasługuje również umiejętne posługiwanie się przez mgr inż. Witolda Rzodkiewicza danymi literaturowymi, który posłużyły mu do wstępnego wyboru adekwatnych metod pomiarowych oraz krytycznej weryfikacji uzyskanych rezultatów.

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

Mgr inż. Witold Rzodkiewicz przyjął uzasadnione założenia badawcze, a do ich udowodnienia wybrał prawidłowy zestaw metod badawczych. Ich zastosowanie pozwoliło na osiągnięcie zamierzonego celu badań i doświadczałne wykazanie przyjętej hipotezy badawczej. W początkowym etapie prac Autor rozprawy podjął próbę określenia średnich wartości naprężeń mechanicznych w strukturach MOS przy zastosowaniu metod interferometrycznych i elipsometrii. Korzystając z tych metod mgr inż. Witold Rzodkiewicz zbadał wartości naprężeń w strukturach Si-SiO₂, wyznaczone z pomiarów geometrii (kształtu płytek) z zastosowaniem modelu Stoneya oraz modeli będących jego rozwinięciem (model Kleina i model Vilmsa-Kerpsa) i porównał je z dostępnymi danymi literaturowymi. Autor rozprawy stwierdził, że uzyskane dane eksperymentalne znacznie różniły się od danych literaturowych. Sformułował hipotezę badawczą, że było to związane z nieuwzględnianiem w stosowanych modelach efektu densyfikacji warstwy SiO₂ i istnieniem odkształceń niesprężystych w układzie Si-SiO₂, które muszą być uwzględniane przy wyznaczaniu naprężeń. W dalszym etapie badań mgr inż. Witold Rzodkiewicz podjął próbę określenia stopnia densyfikacji warstwy dielektrycznej w strukturach MOS na podstawie pomiarów masy i pomiarów elipsometrycznych. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów Autor rozprawy określił stopień densyfikacji SiO₂, osadzanego na podłożach krzemowych i ocenił jego gęstość. Otrzymana wartość (4,53 g/cm³) była zbliżona do gęstości jednej z polimorficznych odmian dwutlenku krzemu (styszowitu) i na jej podstawie Autor stwierdził, że wartość naprężeń w warstwach dwu

tlenku krzemu wynosiła 633 MPa, dla warstwy o grubości 60 nm. Wartości naprężeń wyznaczone na podstawie elipsometrycznych pomiarów spektroskopowych różniły się jednak od podawanych w literaturze wartości średniego naprężenia w warstwach SiO₂. Dlatego mgr inż. Witold Rzodkiewicz zdecydował, o zastosowaniu do wyznaczania rozkładu lokalnych naprężeń w warstwach dwutlenku krzemu struktur MOS, spektroskopii Ramana z użyciem plamki o średnicy 1 μm i 20 μm. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów Autor opracował własną metodykę określania rozkładu naprężeń mechanicznych w warstwach dielektryków pod bramką struktur MOS. W kolejnym etapie swoich badań mgr inż. Witold Rzodkiewicz zbadał wpływ tych naprężeń na rozkład parametrów elektrycznych struktur MOS, takich jak efektywna kontaktowa różnica potencjałów, ϕ_{MS} , oraz napięcie wyprostowanych pasm, V_{FB} , w płaszczyźnie powierzchni bramki. W tym celu badał struktury MOS z bramkami o różnym kształcie (kwadrat, koło), rozmiarze (bok 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,1 mm), różną grubością elektrody bramki i jej materiałem (Al, AlSiCu). Określił on, że w prowadzonych badaniach z użyciem spektrometru Ramana, najlepiej do tego celu nadawała się wiązka rozogniskowana, o średnicy 20 μm. Dodatkowo, wielkość zastosowanej plamki była porównywalna ze średnicą wiązki stosowaną przy badaniu rozkładów lokalnych wartości parametrów elektrycznych struktur MOS. Zastosowanie plamki o średnicy 1 μm dawało porównywalne wyniki, wymagało jednak znaczącego zwiększenia liczby pomiarów na jednej strukturze. Przeprowadzone badania pozwoliły na doświadczalne potwierdzenie sformułowanej, głównej, hipotezy badawczej. Dlatego należy stwierdzić, że mgr inż. Witold Rzodkiewicz wybrał prawidłowe metody i techniki badawcze do wykazania, że obserwowane, w krzemowych strukturach MOS rozkłady lokalnych wartości parametrów elektrycznych (np. ϕ_{MS} i V_{FB}) w płaszczyźnie powierzchni bramki są wynikiem nierównomiernych rozkładów naprężeń mechanicznych (i/lub odkształceń) w warstwie dielektryka bramkowego.

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 badań i prac eksperymentalnych stanowią samodzielny dorobek mgr inż. Witolda Rzodkiewicza. Do najważniejszych osiągnięć Autora rozprawy należą:

- doświadczalne wykazanie wpływu naprężeń w warstwach tlenku bramkowego na parametry ϕ_{MS} i V_{FB} struktur MOS,
- określenie analitycznej zależności między współczynnikiem złamania, n , i gęstością warstwy SiO₂,
- opracowanie własnej metodyki określania rozkładu naprężeń mechanicznych w warstwach dielektryków pod bramką struktur MOS,

- stwierdzenie, że przy określaniu naprężeń w warstwach SiO₂ na podstawie wyników pomiarów interferometrycznych i elipsometrycznych należy uwzględnić densyfikację warstw SiO₂, osadzanego na podłożach krzemowych.

Uzyskane rezultaty prac badawczych stanowią potwierdzenie dobrej intuicji badawczej mgr inż. Witolda Rzodkiewicza i stanowią istotny wkład badawczy w rozwój technologii wytwarzania zaawansowanych przyrządów, w których konstrukcji wykorzystuje się generowanie/istnienie lokalnych naprężeń do poprawy ich parametrów. W swojej rozprawie Autor podjął również zagadnienia istotne z punktu widzenia dalszego zmniejszenia wymiarów elementów i układów scalonych

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

Mgr inż. Witold Rzodkiewicz wykazał się umiejętnością jasnej i przekonującej prezentacji wyników prowadzonych badań. W sposób logiczny zaplanował i opisał wybór kolejnych metod pomiarowych i związane z nimi oczekiwania. Przygotowana rozprawa ma prawidłowy i czytelny układ, który nie budzi żadnych zastrzeżeń. Składa się ona ze streszczenia, wykazu najważniejszych oznaczeń literowych, siedmiu głównych części, podsumowania, imponującego spisu projektów, w których uczestniczył Autor rozprawy, spisu literatury i dwóch dodatków.

Na podkreślenie zasługuje również czytelny sposób prezentacji stosowanych metod pomiarowych, wyników pomiarów oraz ich krytyczna analiza z uwzględnieniem dostępnymi danymi literaturowymi. Praca jest bardzo dobrze przygotowana od strony edytorskiej. Pewne utrudnienie stanowią bardzo małe rysunki i ich opisy (od rys. 7-23 do rys. 7-31 oraz rys. 7-34).

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

Nie stwierdzam występowania istotnych uchybień i słabych stron prezentowanej rozprawy. Na podkreślenie zasługuje ogromna ilość przeprowadzonych pomiarów, świadomy wybór metod pomiarowych oraz krytyczna analiza ich rezultatów. Podnosi to niewątpliwe walory rozprawy i pozwala stwierdzić, że sformułowane przez Autora główne cele rozprawy zostały osiągnięte a postawiona hipoteza badawcza zweryfikowana.

Niewątpliwie ciekawym byłoby za to powtórzenie przeprowadzonych badań dla struktur MOS z zastosowaniem innego dielektryka bramkowego np. Si₃N₄ oraz innego podłoża półprzewodnikowego np. na bazie półprzewodników złożonych (GaN).

Niezależnie od przedstawionych wątpliwości stwierdzam jednoznacznie, na podstawie analizy różnorodnych danych pomiarowych, uzyskanych z zastosowaniem szeregu dobrze dobranych do celu rozprawy metod pomiarowych, że przedstawiona Rozprawa jest wartościowa, samodzielna i oryginalna.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Prezentowana rozprawa ma duże znaczenie praktyczne dla dalszego rozwoju technologii przyrządów półprzewodnikowych, nie tylko krzemowych, i stwarza szanse na przedłużenie stosowności dobrze znanych i opanowanych procesów technologicznych do wytwarzania nowej generacji, zaawansowanych, przyrządów.

Autor wskazał również na możliwość niestandardowego zastosowania dobrze znanych metod pomiarowych do oceny wpływu lokalnych naprężeń w warstwach dielektryka bramkowego struktur MOS na rozkłady lokalnych wartości ich parametrów elektrycznych w płaszczyźnie powierzchni bramki. Powoduje to, że zrealizowane przez mgr inż. Witolda Rzodkiewicza badania mają duże znaczenie dla rozwoju nauk technicznych.

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**

Przedstawioną rozprawę zaliczam do kategorii prac doświadczalnych i uważam ją za wybitnie dobrą, zasługującą na wyróżnienie. Stanowi ona oryginalny i samodzielny dorobek Autora .

Biorąc pod uwagę dorobek naukowy mgr inż. Witolda Rzodkiewicza i pozytywną ocenę Jego pracy doktorskiej uważam, że w myśl ustawy z 14 marca 2003 r . (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki mgr inż. Witolda Rzodkiewicza spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora nauk technicznych i wnioskuję o dopuszczenie do publicznej obrony przedstawionej rozprawy.

R. Penkiewicz