

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Piskorskiego p.t. „Opracowanie fotoelektrycznych metod określania rozkładów lokalnych wartości parametrów elektrycznych struktur MOS w płaszczyźnie powierzchni bramki”

Temat pracy doktorskiej pojawił się jako konsekwentny etap badań prowadzonych od kilkudziesięciu lat w zespole kierowanym przez dr hab. inż. Henryka Przewłockiego. Z prac wykonanych wcześniej przez ten zespół logicznie rysuje się celowość zastosowania metod fotoelektrycznych do określania powierzchniowych rozkładów wartości parametrów struktur MOS. Opracowanie metodyki takich pomiarów i ich wykonanie dla szeregu różnorodnych struktur to trafnie wybrany, oryginalny problem badawczy. Zadanie realizowane bezpośrednio przez Doktoranta obejmowało kompleks zagadnień dotyczących modyfikacji aparatury pomiarowej, jak też gruntownej analizy modeli fizycznych służących do identyfikacji wyznaczanych parametrów oraz interpretacji otrzymanych wyników pomiarowych. W przypadku tak subtelnej metodyki pomiarowej oba zagadnienia, t.j. doskonałość aparatury pomiarowej jak i poprawność stosowanych modeli fizycznych, są równie ważne. Konstrukcja rozprawy, t.j. struktura rozdziałów, formułowanie szczegółowych celów i hipotez badawczych, dowodzi, że Doktorant poprawnie wyważył znaczenie obu w/w zagadnień. Analiza modeli fizycznych zyskała na przejrzystości przez jej podział na dwa rozdziały: pierwszy dotyczący wpływu światła i drugi dotyczący parametrów elektrycznych. Nieco mylące może być użycie frazy „stan wiedzy” w tytule rozdziału drugiego. Taka fraza zwykle sugeruje tzw. studia literaturowe, podczas gdy w tym rozdziale Autor prezentuje istotne wyniki prac własnych i zespołu, mającego w tym obszarze uznany w świecie dorobek publikacyjny.

W przypadku, gdy rozprawa doktorska staje się składnikiem długoletnich prac badawczych zespołu, dla recenzenta istotną sprawą jest „wyłowienie” indywidualnego wkładu Doktoranta w te badania. Autor wykonał obszernie badania rozkładów powierzchniowych parametrów dla wielu różnorodnych technologicznie struktur MOS, na podłożu krzemowym i na podłożu z SiC, różniących się również materiałem bramki. Wyniki tych badań i ich interpretacja są bardzo ciekawe i nie budzą wątpliwości. Jednak główną wartość tej pracy upatruję nie w jej części „technologicznej”, ale w części dotyczącej metodyki pomiarowej. Do tego tematu jeszcze wrócę. Stanowisko pomiarowe, zaprojektowane według założeń Autora rozprawy, wyróżnia się bardzo wysoką czułością dzięki zastosowaniu homodynamicznej koncepcji pomiaru małych sygnałów na tle dużych szumów. W połączeniu z laserowym źródłem impulsowym światła (LPT) uzyskano aparaturę o unikalnych możliwościach pomiarowych. Badając rozkłady powierzchniowe parametrów Autor bazował na wcześniejszej wiedzy o kopułowych kształtach tych rozkładów dla parametru φ_{ms} . Bardzo przekonująca jest koncepcja określania podobnych rozkładów dla napięcia V_{FB} , polegająca na sekwencji pomiarów prowadzących od kontaktowej różnicy potencjałów φ_{ms} przez bariery E_{BG} , E_{BS} do napięcia wyprostowanych pasm V_{FB} . Wartościowe jest porównanie i wykazanie zgodności dwóch metod badania rozkładów powierzchniowych, t.j. skanowania plamką świetlną o średnicy istotnie mniejszej od rozmiarów bramki, lub pomiarów dla typoszeregu struktur próbnych o różnych rozmiarach (zmienny parametr R).

Tu chciałbym wrócić do wcześniej zasygnalizowanego tematu – co jest głównym osiągnięciem tej pracy doktorskiej. Autor w ostatnim zdaniu rozprawy pisze: „*Udało się opracować nowe techniki pomiaru, które w dobie rozwijającej się nanoelektroniki powinny być bardzo dobrym narzędziem do charakteryzacji nowoczesnych struktur*”

nanoelektronicznych”. Trudno nie zauważyć w tym kontekście, że skanowanie plamką świetlną o średnicy 0,3 mm nijak się ma do rozmiarów bramki tranzystora w realnych współczesnych technologiach. Sam Autor ubolewa nad tym w dwóch miejscach, t.j. na str. 110, pisząc: „Postęp w dziedzinie elektroniki jaki dokonał się w ciągu ostatnich lat przejawiający się m.in. w dalszej miniaturyzacji struktur MOS spowodował, że przydatność pewnych fotoelektrycznych metod pomiarowych została mocno ograniczona. Z punktu widzenia niniejszej pracy przejawia się to głównie w trudności w zastosowaniu tych metod do pomiarów wartości lokalnych niektórych parametrów elektrycznych ze względu na niemożliwe do osiągnięcia małe rozmiary plamki światła...” oraz na str. 87, pisząc: „Szczególną uwagę zwrócono na definicję kształtu plamki (kwadrat o boku $l_a \approx 0,3 \text{ mm}$) oraz na zapewnienie jednorodnego rozkładu gęstości mocy w niej. Obecnie wytwarzane przy użyciu nowych technologii struktury są bardzo małe (bramki o rozmiarach pojedynczych nm) i pożądane byłoby dalsze zmniejszenie wielkości plamki światła padającego na badaną strukturę. Jednakże jest to niemożliwe zarówno ze względu na ograniczenia układu kształtowania wiązki światła...”

Nie rozumiem sensu tych uwag, tej samokrytyki. Otóż gdybyśmy się mieli zafiksować na porównaniach rozmiarów plamki światła z rozmiarami bramki w układach scalonych, to nawet 40 lat temu tranzystory MOS miały rozmiary 100 razy mniejsze od tej plamki. A więc nigdy nie było tranzystorów wystarczająco olbrzymich (oczywiście, nie mówimy o tranzystorach mocy, dla których badane efekty i dokładności pomiaru φ_{ms} nie mają najmniejszego znaczenia), by można było skanować rozkłady parametrów wzdłuż i wszerz powierzchni ich bramki. I nie ma tu znaczenia, czy plamka świetlna jest większa od bramki 100 razy, czy 10 000 razy, jak to miałoby miejsce dla współczesnych technologii. Na marginesie, w obecnie stosowanej przemysłowo technologii 14 nm bramka tranzystora ma strukturę trójwymiarową (np. struktura „płetwowa” w technologii Intel), a więc rozważania dla struktur planarnych w ogóle nie odnoszą się do tej technologii. Dla pełnej jasności – moja krytyka nie odnosi się do istoty recenzowanej pracy, lecz tylko dotyczy zacytowanych wyżej dwóch niefortunnych akapitów, stawiających nietrafnie pod znakiem zapytania użyteczność praktyczną opracowanej w rozprawie metody pomiarowej. Od metody fotoelektrycznej nie można wymagać rzeczy niemożliwych. Jest to metoda o fantastycznej dokładności i może doskonale posłużyć do weryfikacji nowych idei technologicznych, nowych materiałów bramki, dielektryka i podłoża, różnych wariantów procesów technologicznych, szczególnie w aspekcie generacji naprężeń, itp. Miejsce tej metody jest w badaniach laboratoryjnych poszczególnych fragmentów opracowywanych technologii, a nie ma sensu „przymierzać” tę metodę do produkcyjnych technologii układów scalonych zawierających miliardy tranzystorów.

Dlatego wyniki badań „technologicznych” prezentowane w rozprawie traktuję jako egzemplifikację możliwości aplikacyjnych opracowanej metodyki pomiarowej. Natomiast za główne osiągnięcie Doktoranta uważam dopracowanie metodyki fotoelektrycznych pomiarów parametrów struktur MOS, zarówno w części aparaturowej jak i w analizie modeli fizycznych, w tym również odnoszących się do pomiarów rozkładów powierzchniowych. Autor wniósł tu wiele oryginalnych koncepcji i nowatorskich rozwiązań.

Konstrukcja rozprawy, jej język i staranność edytorska dowodzą dojrzałości badawczej Doktoranta. Uwzględniając wagę wyników prezentowanych w pracy doktorskiej i w 12 liczących się publikacjach Doktoranta oceniam rozprawę pozytywnie i proponuję przyznać jej wyróżnienie.

Prof. dr hab. inż. Wiesław Marciniak