

Dr hab. inż. Mariusz Sochacki
Politechnika Warszawska
Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki
Koszykowa 75
00-662 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Marka Ekielskiego

pt. „Procesy wytwarzania trójwymiarowych struktur mikro- i nanometrowych przy użyciu techniki litografii NIL oraz elektronolitografii w zastosowaniu do przyrządów na bazie GaN”

Recenzowana praca ma zdecydowanie charakter technologiczno-eksperymentalny. Tematem pracy jest analiza możliwości zastosowania dwóch technik litografii – nanostemplowania oraz elektronolitografii – w technologii przyrządów na bazie azotku galu do wytwarzania trójwymiarowych struktur w skali mikro- i nanometrowej. Tematyka pracy wpisuje się w nowoczesny nurt badań poświęconych dokładności i powtarzalności definiowania kształtów za pomocą technik wykorzystywanych w przemyśle półprzewodnikowym. Tematyka tranzystorów GaN HEMT, a w szczególności badania możliwości wykorzystania różnych technik litografii do definiowania kształtu bramki typu T, zarówno w zakresie ograniczeń samych technik litografii, jak również stosowanych na taką bramkę materiałów, zalicza się do najbardziej intensywnie badanych technologii ukierunkowanych na wdrożenia w zakresie przyrządów mocy dla urządzeń energoelektronicznych i pracujących w pasmie częstotliwości mikrofalowych.

Obszerna praca licząca 130 stron jest edytowana bardzo przejrzysto. Przygotowane rysunki, zdjęcia i ilustracje są czytelne i bardzo ułatwiają analizę uzyskanych wyników. Drobne niedociągnięcia pojawiają się głównie w legendzie i opisach rysunków z danymi eksperymentalnymi, np. na rysunku 4.2 na stronie 49 pracy nie ma możliwości oceny składu mieszaniny gazowej CF_4/CHF_3 w komorze reakcyjnej, ponieważ na osi opisanej jako skład gazu pojawiają się symbole chemiczne obu związków. Standardowo stosowaną formą prezentacji wyniku jest określenie przepływu jednego z gazów lub określenie na osi odciętych stosunku przepływu gazów reakcyjnych. Mowa jest w tym miejscu o szczegółach, które nie wpływają na merytoryczną wartość ocenianej pracy. Dobrym pomysłem Autora są w przemyślany sposób zredagowane odrębne podsumowania rozdziałów o charakterze eksperymentalnym.

Bibliografię stanowi 107 pozycji. Szkoda, że Doktorant zaniechał cytowania także własnego dorobku (poza pozycją 44), ponieważ stanowi on bardzo istotny element oceny,

szczególnie w przypadku, gdy tematyka artykułów publikowanych w czasopismach z listy JCR, jest bezpośrednio związana z tematyką pracy, a Doktorant jest pierwszym autorem, jak w przypadku pracy „Nanometer scale patterning of GaN using nanoimprint lithography and Inductively Coupled Plasma etching” opublikowanej w czasopiśmie *Microelectronic Engineering*. Informacja o indeksie $h=5$ oraz prawie 100 cytowaniach powinna znaleźć się gdzieś w treści rozprawy doktorskiej. Tylko w roku ubiegłym prace Autora były cytowane 29 razy! Warto było się tym pochwalić, ponieważ są to bardzo namacalne i wymierne wyniki pracy naukowej Doktoranta. Bardzo brakuje takiego elementu podsumowania dorobku w postaci 17 publikacji w czasopismach z listy JCR, uczestnictwa w konferencjach naukowych, projektach naukowych, uzyskanych patentach, nagrodach i wyróżnieniach. To znakomity wynik i zwieńczenie pracy Pana mgr inż. Marka Ekielskiego warte podkreślenia.

Cel i zakres pracy został sformułowany w odrębnym rozdziale na stronach 13-14. Jest nim „(...) pogłębienie wiedzy na temat metod kształtowania struktur o submikrometrowym wymiarze krytycznym w związkach półprzewodnikowych III-N stosowanych dla wytwarzania tranzystorów mikrofalowych i mocy HEMT oraz niebieskich diod elektroluminescencyjnych i laserowych”. W tym samym rozdziale można znaleźć też tezę pracy sformułowaną w następujący sposób: „Możliwe jest przeniesienie rozmiaru krytycznego zdefiniowanego przy pomocy techniki elektronolitografii za pośrednictwem techniki NIL w zastosowaniu do wytwarzania niskowymiarowych struktur elektronicznych oraz optoelektronicznych w GaN”. Pomimo bardzo czytelnego dla recenzenta przesłania zaproponowanej tezy pracy po jej wnikliwej lekturze należy zaznaczyć, że użycie sformułowania „niskowymiarowe struktury elektroniczne” jest wyjątkowo niefortunne. Powszechnie używana w dyscyplinie naukowej nomenklatura sugeruje wytwarzanie struktur w postaci drutów, kropek kwantowych, itp., co nie jest tematem rozprawy. Ponownie, szczególnie ten nie umniejsza w żaden sposób wartości merytorycznej pracy.

Wyniki badań własnych poprzedzono opisem współczesnych technologii wytwarzania mikro- i nanostruktur (rozdział 1) oraz najważniejszych problemów technologicznych w procesach strukturyzacji materiałów półprzewodnikowych grupy III-N (rozdział 2). Rozdziały te stanowią znakomicie przygotowany przegląd literatury i dowodzą, że Autor porusza się bardzo sprawnie w zakresie zagadnień objętych pracą. Przegląd literatury stanowi około 20% treści rozprawy, co tworzy dobrą proporcję w stosunku do opisywanej części wyników własnych. Rozdział 3 (Metodyka badawcza) dotyczy używanych w pracy technik eksperymentalnych do wytwarzania i charakteryzacji opisywanych struktur tranzystorów GaN HEMT oraz diod DEL. Używana przez Autora metodyka badawcza nie budzi żadnych zastrzeżeń.

Zasadnicza część pracy zawierają wyniki badań Autora w zakresie wytwarzania matryc i stempli dla techniki nanostemplowania oraz przenoszenia wzoru wykonanego techniką nanostemplowania na podłoża GaN (kolejno rozdziały 4-5) oraz implementacji techniki nanostemplowania w technologii tranzystora HEMT oraz diody DEL (kolejne rozdziały 6-7).

Opis wyników własnych zamyka rozdział 8 dotyczący wykorzystania techniki elektronolitografii do wytwarzania nanostruktur 3D. Autor zbadał wnikliwie trzy rodzaje materiałów na stemple (PDMS, folię IPS oraz polimer OrmoStamp) i uzyskał stemple z polimeru OrmoStamp do finalnych procesów nanostemplowania o dużej dokładności odwzorowania, stosując jako główne kryterium oceny jakości zgodność wymiarów krytycznych wzorów odciskanych w fotorezycie TU2-120 w porównaniu z wymiarami wzorów na matrycy w oparciu o analizę obrazów mikroskopii SEM oraz AFM. Opracowane procesy wytwarzania stempla OrmoStamp pozwalają na uzyskanie wzorów najbardziej zbliżonych do oryginału, ale mankamentem tej technologii jest trwałość stempla. W tej kategorii najlepszym kompromisem okazały się stemple wykonywane z folii IPS. Do oceny możliwości przeniesienia wzoru stempla na powierzchnię podłoża GaN użyte zostały podłoża pochodzące z różnych technologii wytwarzania (warstwy epitaksjalne GaN wytwarzane metodą MOCVD na podłożu szafirowym, warstwy epitaksjalne GaN wytwarzane metodą MBE na podłożu krzemowym oraz monokrystaliczny GaN wytwarzany metodą ammonotermalną). Szybkość trawienia materiału półprzewodnikowego w plazmie chlorowej zależy od rodzaju trawionego podłoża i jest związana z gęstością defektów w podłożu. W pracy wykazano silną zależność szybkości trawienia od rodzaju domieszkowania, przy czym nie ma pewności co do mechanizmów decydujących o obserwowanych mechanizmach trawienia. Nie ustalono, czy za szybkość trawienia odpowiada rodzaj oraz koncentracja domieszki, czy powiązane z domieszką defekty strukturalne materiału. Nie wyjaśniono też powodu, dla którego najmniejszą chropowatość trawionego materiału uzyskano dla maksymalnej mocy RF oraz ICP, co nie jest oczywiste. Nie było to jednak głównym tematem recenzowanej rozprawy doktorskiej. Zaproponowany w Rozdziale 6 sposób implementacji techniki nanostemplowania w technologii tranzystora HEMT, polegający na wykorzystaniu fotolitografii DUV od strony podłoża do realizacji wzorów samocentrujących, uzyskał patent RP „Sposób wytwarzania tranzystorów HEMT” o numerze 220518 współautorstwa mgr inż. Marka Ekielskiego.

Najważniejszym z punktu widzenia wartości naukowej oraz praktycznej w opinii recenzenta jest rozdział 7 rozprawy doktorskiej, w którym Autor opracował technologie wytwarzania diody DEL z wbudowanymi strukturami kryształów fotonicznych i wykorzystaniem techniki nanostemplowania w celu poprawy ekstrakcji promieniowania i modyfikacji charakterystyk kierunkowych promieniowania. Składający się z 12 stron rozdział 7 jest doskonałym przykładem rzetelnie przygotowanej, skróconej dokumentacji wykonanych procesów technologicznych oraz charakteryzacji. W efekcie zastosowania techniki nanostemplowania udało się Autorowi wytworzyć kryształy foniczne pozwalające dwukrotnie zwiększyć emisję diody oraz bardzo wyraźnie ograniczyć kąt promieniowania i zmodyfikować rozkład uzyskiwanego promieniowania. Uzyskane wyniki mają zastosowanie praktyczne i stanowią materiał do dalszych badań oraz wdrożeń. Tego elementu zabrakło w rozdziale 6, gdzie znacznie korzystniej byłoby zaprezentować, w kontekście prowadzonych badań, dynamiczne charakterystyki pracy tranzystora i zależności częstotliwościowe. Dane

takie pozwoliłyby znacznie łatwiej ocenić ogromny nakład pracy Autora przy realizacji technologii tranzystora HEMT w zakresie dokładności odwzorowania bramki typu T.

Bardzo wartościowe wyniki wskazujące na praktyczny aspekt prowadzonych badań przedstawiono także w rozdziale 8, gdzie opisano prace zmierzające do opracowania struktur trójwymiarowych bramek typu T oraz mostków powietrznych techniką elektronolitografii. Dla odpowiednio dobranego układu fotorezystów oraz parametrów ekspozycji Autorowi udało się uzyskać bramkę o długości 65 nm, co należy z całą pewnością uznać za bardzo dobry wynik. Podrozdział 8.2 to doskonały przykład pracy technologa widziany po części „od kuchni”. Dobór układu fotorezystów, parametrów ekspozycji oraz parametrów używanych procesów termicznych stanowi potwierdzenie dojrzałości naukowej Doktoranta. Skuteczne prowadzenie procesów w wąskich oknach technologicznych pozwalających uzyskać zakładane rezultaty, to najlepsze potwierdzenie wieloletniego doświadczenia w pracy badawczej w określonej tematyce.

Podsumowując, w pracy wyraźnie brakuje oceny uzyskiwanych efektów w odniesieniu do danych literaturowych. Pewne elementy niezbędne do takiej oceny można znaleźć w cytowanej literaturze, ale Autor nie ustosunkowuje się bezpośrednio do cytowanych prac, przez co trudności następuje ocena oryginalności prezentowanych wyników. Osoba czytająca tę pracę może odnieść wrażenie, że Autor nie jest przekonany do końca o wartości prezentowanych wyników w odniesieniu do badań światowych. Słabszą stroną pracy jest też nomenklatura związana bezpośrednio z elektroniką. Autor niepoprawnie używa w tekście na stronie 38 pojęcia induktancji (powinna być indukcyjność), stosuje rzadziej używane pojęcia jak oporność pasożytnicza, która jest znacznie częściej określana jako rezystancja pasożytnicza, itd. Utwierdza to dodatkowo recenzenta w przekonaniu, że praca ma charakter technologiczny, a nie konstrukcyjno-pomiarowy, co dodatkowo ukierunkowuje na najbardziej wartościowe elementy ocenianej rozprawy. Wiedza doktoranta w zakresie procesów chemicznych wykorzystywanych w technologii półprzewodnikowej jest natomiast zdecydowanie ponadprzeciętna. Podobnie jak doświadczenie związane ze standardami pracy w laboratoriach typu „clean-room”. Z całym przekonaniem stwierdzam, że mgr inż. Marek Ekielski może tworzyć trzon każdego zespołu odpowiedzialnego za opracowywanie procesów technologicznych, a to postrzegam jako wartość samą w sobie.

Cel recenzowanej pracy przytoczony na wstępie został w pełni osiągnięty. Autor udowodnił także tezę pracy, prezentując możliwości techniki nanostemplowania w obszarze technologii półprzewodnikowej o małym wymiarze krytycznym. Zaprezentowane w pracy wyniki świadczą o dużym zaangażowaniu doktoranta w pracę zespołu badawczego oraz umiejętnościach w zakresie planowania eksperymentów (wykorzystywanie metod planowania eksperymentu ograniczających nakłady związane z jego przeprowadzeniem). Prezentowane wyniki mają charakter aplikacyjny i dają możliwość ich wykorzystania, a proponowana interpretacja wyników nie pozostawia wątpliwości czytelnikowi.

Po zapoznaniu się z treścią przedłożonej do oceny pracy bez wahania stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Marka Ekielskiego spełnia wszelkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Uważam, że jest to bardzo wartościowa praca.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Kodziejewski", with a long horizontal flourish extending to the right.