

Prof. dr hab. inż. Regina Paszkiewicz
Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki
Politechnika Wrocławska
50-370 Wrocław
ul. Janiszewskiego 11/17

Wrocław, 22.07.2017

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY NAUKOWEJ INSTYTUTU TECHNOLOGII ELEKTRONOWEJ W WARSZAWIE

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

Autor rozprawy: mgr Marek Ekielski
Promotor rozprawy: dr hab. Eliana Kamińska

Technika NIL (Nanoimprint lithography) jest nowoczesną metodą wytwarzania trójwymiarowych struktur o wymiarach mikro- i nanometrów. Jej główne zalety to mały koszt procesu, duża wydajność i duża rozdzielczość. W technice NIL wzór jest uzyskiwany przez bezpośrednią deformacją mechaniczną rezystu. Oznacza to, że minimalny wymiar wytwarzanych tą techniką wzorów nie jest ograniczony zjawiskami, które występują w innych technikach litograficznych takich np. dyfrakcją światła, ograniczającą rozdzielczość litografii optycznej czy rozpraszanie elektronów wpływające na wymiary wzorów wytwarzanych techniką elektronolitografii. Proces NIL został uwzględniony w ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) do wytwarzania elementów w technologii 32nm i 22 nm.

Z tego względu praca doktorska mgr inż. Marka Ekielskiego dobrze wpisuje się w badania prowadzone w wiodących laboratoriach technologicznych nad opracowaniem efektywnych technologii odwzorowania. Autor rozprawy, postawił sobie za cel opracowanie procesu wytwarzania trójwymiarowych struktur mikro- i nanometrowych przy użyciu techniki litografii NIL oraz elektronolitografii w zastosowaniu do przyrządów na bazie GaN.

Praca ma charakter doświadczalno-technologiczny. Cele pracy zostały sformułowane przez Autora w sposób prawidłowy. Praca ma duży element nowości, a jej tematyka jest aktualna i ważna dla badań stosowanych, których celem jest opracowanie nowych technik odwzorowania do zastosowań w technologii elementów elektronicznych i optoelektronicznych.

W oparciu o własne prace doświadczalne oraz wnikliwą analizę danych literaturowych Autor sformułował tezę rozprawy, „ że 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”. W rozprawie mgr

inż. Marek Ekielski powołuje się na 107 prac źródłowych. Aktywność publikacyjna Autora mimo, że nie została zaprezentowana w rozprawie, jest znana Recenzentowi i stanowi potwierdzenie jego wysokich kompetencji w obszarze badań realizowanych w ramach rozprawy. Wnioski z przeprowadzonej analizy danych literaturowych sformułowano w sposób właściwy i przekonywujący.

Praca składa się z wprowadzenia, sformułowania celu i zakresu pracy, ośmiu głównych rozdziałów, podsumowania, spisu literatury oraz spisu rysunków i tabel.

W pierwszym rozdziale Autor przedstawił teoretyczne podstawy realizacji badań. Omówił technologię wytwarzania mikro- i nanostruktur obejmujące: techniki wytwarzania wzorów takie jak nanostemplowanie (NIL) i elektronolitografię, techniki przenoszenia wzorów metoda lift-off i trawienia oraz bezpośrednie wytwarzanie wzorów technika FIB (Focused Ion Beam). W rozdziale drugiej mgr inż. Marek Ekielski omówił główne wyzwania technologiczne w procesie wytwarzania przyrządów na bazie azotków, za które uznał procesy mokrego trawienia, procesy trawienia w plazmie oraz technologię wytwarzania bramki T tranzystorów HEMT (High Electron Mobility Transistor). W rozdziale trzecim została szczegółowo zaprezentowana metodyka badawcza zastosowana przez mgr inż. Marka Ekielskiego. Autor zawarł w tym rozdziale szczegółowy plan badań obejmujący trzy główne obszary: badania nad wytwarzaniem w GaN struktur submikrometrowych przy zastosowaniu technik NIL, wytwarzanie struktur submikrometrowych w strukturach aktywnych AlInN techniką NIL oraz badania nad procesami wytwarzania struktur submikrometrowych techniką elektronolitografii. W rozdziale tym przedstawiono również infrastrukturę technologiczną i badawczą Laboratorium Technologii Półprzewodników Szerokoprzerwowych. Rozdział czwarty poświęcono problematyce opracowania metod wytwarzania matryc oraz stempli roboczych do techniki NIL. W rozdziale tym porównano jakość matryc wytwarzanych zaproponowaną przez Autora metodą i matryc komercyjnych. W rozdziale piątym przedstawiono wyniki badań nad opracowaniem procesu przeniesienia wzoru wykonanego techniką NIL do GaN. Przeprowadzone badania obejmowały: dobór parametrów procesu stemplowania, optymalizację procesu reaktywnego trawienia jonowego GaN oraz opis procesu przeniesienia wzorów wytworzonych techniką NIL do GaN. Rozdział szósty zawiera wyniki badań nad zastosowaniem techniki NIL w technologii tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT. Zaprezentowano proces wytwarzania, w którym bramka wykonywana była w początkowym etapie prac. Omówiono wytwarzanie matryc z wzorem dwuwymiarowych i trójwymiarowych bramek. W kolejnej części rozdziału przeanalizowano integrację procesu wytwarzania bramek techniką NIL z procesem technologicznym wykonywania tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT. W rozdziale siódmym zaprezentowano wyniki badań nad wytwarzaniem kryształów fonicznych techniką NIL oraz integracją opracowanej technologii z technologią diod LED. Rozdział ósmy poświęcono procesowi wytwarzania trójwymiarowych nanostruktur techniką elektronolitografii na przykładzie wytwarzania bra-

mek typu T oraz struktur mostków powietrznych. Wyniki zrealizowanych prac badawczych syntetycznie przedstawiono w podsumowaniu.

Mgr Marek Ekielski przyjął prawidłowe i zasadne założenia badawcze, a do ich udowodnienia wybrał właściwy zestaw metod badawczych, których zastosowanie pozwoliło na osiągnięcie głównego celu badań i udowodnienie sformułowanej tezy rozprawy. Autor zaplanował-i zrealizował-szereg eksperymentów technologicznych i pomiarów. Jego główna aktywność skoncentrowała się na opracowaniu procesu NIL i jego implementacji do wytwarzania tranzystorów AlGaN/GaN HEMT i diod LED ze strukturą kryształów fotonicznych. Wybór przez Autora narzędzi technologicznych oraz zastosowanych do charakteryzacji wytwarzanych struktur, uważam za prawidłowy i adekwatny do zaplanowanego zakresu prac badawczych.

Praca jest oryginalna, a prezentowane wyniki badań stanowią samodzielny i oryginalny dorobek mgr inż. Marka Ekielskiego. Do najważniejszych osiągnięć Autora można zaliczyć:

- opracowanie metod wytwarzania matryc techniką elektronolitografii i trawienia oraz metody wykonywania stempli polimerowych z IPS, OrmoStamp oraz PDMS do nanostemplowania,
- zaproponowanie alternatywnej metody wytwarzania matryc do NIL techniką FIB,
- zastosowanie wielowarstwowej maski, na bazie SiO₂ i Cr, do trawienia azotków oraz opracowanie własnej procedury przenoszenia wzoru NIL do GaN,
- opracowanie powtarzalnej procedury wytwarzania bramek typu T oraz matryc kryształów fotonicznych techniką NIIL,
- połączenie technologii elementów przyrządów, wytwarzanych techniką NIL, z procesem technologicznym wykonywania tranzystorów AlGaN/GaN HEMT i diod LED,
- opracowanie własnej procedury wytwarzania bramek, typu T, tranzystorów AlGaN/GaN HEMT, o wymiarach od 65 do 220 nm, techniką elektronolitografii,
- opracowanie procesu wytwarzania mostków powietrznych techniką elektronolitografii z zastosowaniem dwuwarstwowego rezystu PMGI/PMMA-MMA/PMMA 495k.

Zrealizowane badania stanowią potwierdzenie dojrzałości technologicznej mgr inż. Marka Ekielskiego oraz świadczą o jego dobrej intuicji badawczej.

Uzyskane wyniki mają duże znaczenie dla zastosowania techniki NIL do wytwarzania tranzystorów HEMT i diod LED oraz są istotne dla dalszego rozwoju przyrządów na bazie azotku galu. Autor wykazał się umiejętnością właściwego i przekonującego przedstawienia wyników badań doświadczalnych oraz właściwej analizy otrzymanych rezultatów.

Praca ma prawidłowy układ, który nie budzi żadnych zastrzeżeń. Jest ona dobrze przygotowana od strony edytorskiej. Rysunki są prawidłowej wielkości i poprawnie opisane. Rysunki zaczerpnięte

z publikacji (rys. 1.6 i 7.1) powinny mieć polskie opisy. Nieliczne błędy językowe nie wpłynęły na ogólnie pozytywną ocenę strony edytorskiej rozprawy.

Nie stwierdzam, poza sformułowanymi wyżej uwagami, występowania innych, istotnych uchybień i słabych stron prezentowanej rozprawy. Ze względu na koszt pojedynczego procesu technologicznego oraz długi czas jego realizacji, w pracach technologicznych zawsze istnieje problem właściwego zaplanowania ilości i rodzaju eksperymentów niezbędnych do weryfikacji postawionych hipotez badawczych. W przypadku prezentowanej rozprawy prace doświadczalne oraz przeprowadzone pomiary należy uznać za adekwatne do sformułowanych celów i umożliwiające weryfikację tezy rozprawy. Pewien niedosyt Recenzenta budzi brak szczegółowych informacji na temat powtarzalności procesu stemplowania oraz rozrzutu wymiarów i kształtów struktur periodycznych.

Nie ma to wpływu na ogólnie pozytywną ocenę rozprawy i pozwala stwierdzić, że na podstawie przeprowadzonych eksperymentów **przedstawiona w pracy teza, została udowodniona, a cel pracy osiągnięty.**

Prezentowana praca ma też duże znaczenie praktyczne i może stanowić istotny wkład Autora w rozwój badań nad zastosowaniem techniki NIL do wytwarzania przyrządów elektronicznych i optoelektronicznych. Poczynione przez Autora rozprawy spostrzeżenia są ważne dla dalszego doskonalenia tej technologii.

Recenzent stwierdza, że rozprawa mgr inż. Marka Ekielskiego stanowi oryginalny i samodzielny dorobek Autora oraz spełnia z wyraźnym nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy. Recenzent wnioskuje również o wyróżnienie rozprawy.

Biorąc pod uwagę dorobek naukowy mgr inż. Marka Ekielskiego 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. Marek Ekielski spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora nauk technicznych i wnioskuje o dopuszczenie do publicznej obrony przedstawionej pracy.



Prof. dr hab. inż. Regina Paszkiewicz