

Kalonka, 23 stycznia, 2016 r.

Profesor dr hab. inż. Włodzimierz Nakwaski
Instytut Fizyki
Wydział Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej
Politechnika Łódzka
ul. Wólczańska 219
90-924 Łódź

tel.: (042) 631-3668
FAX: (042) 631-3639
e-mail: wlodzimierz.nakwaski@p.lodz.pl

Recenzja
rozprawy doktorskiej
Pana mgra inż. Piotra I. Karbownika
z Instytutu Technologii Elektronowej w Warszawie

Niniejszą recenzję przygotowuję zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 10 listopada 2015 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora.*

Przedmiotem recenzowanej rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Piotra Karbownika pod tytułem „*Study of mid-infrared quantum cascade laser fabrication technology*” jest, zgodnie z jej tytułem i *Abstractem*, rozwój technologii wytwarzania półprzewodnikowych laserów kaskadowych emitujących w temperaturze pokojowej promieniowanie w zakresie średniej podczerwieni. Ściślej rzecz ujmując, chodzi o technologię wytwarzania powyższych laserów wykonanych w systemach materiałowych GaAs/AlGaAs bądź InGaAs/InAlAs/InP jako laserowych źródeł promieniowania o długości fali około 9.0-9.5 μm . Zakres zagadnień rozpatrywanych w pracy jest niezwykle obszerny, obejmuje zarówno symulacyjne badania teoretyczne przewidywanych własności wytwarzanych laserów, jak i eksperymentalne badanie poszczególnych etapów technologicznych ich wytwarzania, tj. trawienia struktur typu mesa, wytwarzanie izolacji dielektrycznej, nakładanie kontaktów omowych, fabrykowanie zwierciadeł

laserowych, czy też montowanie struktur laserów. Warto podkreślić, że podczas badań symulacyjnych autor stosował własny program komputerowy dla rozwiązywania powiązanych równań Schrödingera i Poissona uzgodnionych metodami iteracyjnymi z równaniami kinetycznymi.

Praca składa się z pięciu rozdziałów oraz podsumowania. Zgodnie z ogólnymi zasadami, przedmiotem jej rozdziału pierwszego, czyli wprowadzenia, jest krótka dotychczasowa historia wytwarzania laserów kaskadowych, opis ich zastosowań oraz sformułowanie celu pracy. Jak wynika z podrozdziału 1.4 rozprawy, główna motywacja przeprowadzania recenzowanych badań była bezpośrednio związana z instalacją nowej aparatury technologicznej w Instytucie Technologii Elektronowej w Warszawie w laboratorium zespołu profesora dra hab. Macieja Bugajskiego. Zamiarem profesora było wykorzystanie tej aparatury do wytwarzania nowych laserów półprzewodnikowych zwanych laserami kaskadowymi w celu ich zastosowania do generacji laserowego promieniowania średniej podczerwieni. Wymagało to nie tylko zaznajomienia się ze specyfiką nowego sprzętu laboratoryjnego, ale również adaptacji do nowych warunków i nowych zamierzeń sprzętu już zgrupowanego w tym laboratorium. Głównym celem badań zespołu było uzyskanie w temperaturze pokojowej akcji laserowej obu typów badanych laserów, tj. laserów kaskadowych wytworzonych w systemach materiałowych GaAs/AlGaAs i InGaAs/InAlAs/InP jako laserowych źródeł promieniowania o długości fali około 9.0-9.5 μm . Interesującym celem szczegółowym badań autora pracy było sprawdzenie hipotezy, później potwierdzonej podczas realizacji celów pracy, że standardowe charakterystyki prądowo-napięciowe i emisyjne, tj. zależności spadku napięcia i emitowanej mocy promieniowania od prądu zasilania, stanowią wystarczające narzędzia do szybkiej analizy przydatności wytwarzanych przyrządów kaskadowych.

W drugim rozdziale rozprawy doktorant, Pan mgr inż. Piotr Karbownik, przedstawił wnikliwie teorię laserów kaskadowych głównie w oparciu o równania kinetyczne. Jej efektem było między innymi autorskie opracowanie symulatora SciLab służącego do teoretycznej analizy pracy wytwarzanych laserów kaskadowych. Stosując powyższy symulator doktorant był w stanie analizować pracę badanego lasera kaskadowego rozpatrując rozkłady funkcji falowych w jego strukturze. Zwykle rozprawa doktorska składa się z tzw. części nieoryginalnej, przedstawiającej wcześniejsze dokonania innych autorów i przygotowującej czytelnika do prezentacji właściwych wyników badań doktoranta, oraz części oryginalnej, będącej prezentacją własnych wyników jej autora, a stanowiącej właściwą część rozprawy. W przypadku recenzowanej rozprawy takiego rozróżnienia nie ma, jej autor przedstawia swoje oryginalne wyniki również w pierwszej części Swej rozprawy, a w całej rozprawie prezentuje na przemian wyniki własne i cudze.

Rozdział trzeci stanowi przegląd kolejnych procesów technologicznych prowadzących do wytwarzania analizowanych laserów kaskadowych. Jego autor opisał je wnikliwie dowodząc znajomości tej tematyki. Jest to chyba właściwie wspomniana powyżej część nieoryginalna rozprawy.

Kolejny najbardziej obszerny rozdział czwarty prezentuje wyniki stosowania opisanych w poprzednim rozdziale procesów technologicznych do zamierzonej produkcji laserów kaskadowych. Doktorant, Pan mgr inż. Piotr Karbownik, przedstawił w kolejnych

podrozdziałach tego rozdziału kolejne etapy wytwarzania tych przyrządów, tj. fotolitografię, wytwarzanie struktury mesa, nakładanie kontaktów omowych i złotych ścieżek, tworzenie izolacji dielektrycznej, nakładanie powłok na zwierciadła laserowe i montowanie gotowych laserów. Główną częścią tego rozdziału jest obszerny zestaw pięknych zdjęć ilustrujących kolejne etapy wytwarzania tych laserów oraz liczne charakterystyki prezentujące eksperymentalne wyniki tych etapów. Istotnym wynikiem praktycznym badań opisanych w tym rozdziale są wskazówki dotyczące najbardziej odpowiednich realizacji kolejnych etapów wytwarzania laserów kaskadowych, co ma niebagatelne znaczenie praktyczne. Według doktoranta, spośród najważniejszych wyników Jego badań prezentowanych w tym rozdziale należy wymienić:

- opracowanie metod gładkiego trawienia struktury typu mesa z dwoma rowkami dla obu badanych heterostruktur wytworzonych w systemach materiałowych GaAs/AlGaAs i InGaAs/InAlAs/InP,
- opracowanie wytwarzania odpowiednich kontaktów omowych,
- wytwarzanie izolacji dielektrycznej w przyrządach InGaAs/InAlAs/InP,
- opracowanie pokryć zwierciadeł o wysokich współczynnikach odbicia, w przyrządach GaAs/AlGaAs.

Eksperymentalne wyniki uzyskane dla badanych laserów kaskadowych są przedmiotem piątego rozdziału. Zawiera on wykresy dokumentujące wyniki badań doświadczalnych, głównie zależności spadku napięcia i mocy emitowanego promieniowania od impulsowego prądu zasilania (lub jego gęstości) o różnej częstotliwości i o różnych czasach trwania impulsów zmierzonych dla różnych laserów i w różnych temperaturach. Dane te pozwoliły Autorowi rozprawy wyznaczyć i przedstawić w tabelach typowe parametry badanych laserów kaskadowych wytworzonych w systemach materiałowych GaAs/AlGaAs i InGaAs/InAlAs/InP. Następnie doktorant zajął się zmierzonymi charakterystykami spektralnymi emitowanego przez te lasery promieniowania, rozkładami natężenia promieniowania w strefie dalekiej, jego jednorodnością oraz degradacją.

W rozdziale szóstym Autor rozprawy przedstawił rozczarowująco krótkie i mało treściwe jej podsumowanie.

Z danych przedstawionych w recenzowanej rozprawie wynika, że do momentu jej oddania doktorant był współautorem zdumiewająco dużej liczby, bo aż 42 publikacji, co prawdopodobnie jest konsekwencją liczego zespołu realizującego wpierw przygotowanie zakupionej i używanej przez niego aparatury technologicznej, a następnie planującego i realizującego wytwarzanie laserów kaskadowych o oczekiwanych własnościach. W zdecydowanej większości są to prace wieloautorskie, co jest zrozumiałe, jako że dokumentują one osiągnięcia bardzo liczego zespołu, a jest bardzo częste w przypadku prac technologicznych. Aż 28 spośród powyższych publikacji było artykułami drukowanymi w bardzo znaczących, renomowanych czasopismach naukowych. Pozostałe publikacje są pracami konferencyjnymi. Niestety, tylko w 4 przypadkach Autor recenzowanej rozprawy był

pierwszym autorem artykułu. Sam doktorant wymienił w Szej rozprawie trzy spośród powyższych artykułów jako Swoje główne osiągnięcie publikacyjne i dołączył je do recenzowanej rozprawy. Rzeczywiście prace te, choć w dwóch przypadkach tak jak poprzednie są pracami wieloautorskimi, przedstawiają głównie indywidualne teoretyczne i eksperymentalne osiągnięcia Autora rozprawy. Dodatkowo Doktorant jest jednym z autorów dołączonego patentu.

Przygotowując Swoją recenzowaną przeze mnie rozprawę doktorską, Pan mgr inż. Piotr I. Karbownik stanął przed wyjątkowo trudnym zadaniem. Pracując w bardzo licznych zespołach prowadzącym obszerne badania technologiczne zajmował się różnymi zagadnieniami naukowymi. Dzięki Swojej uniwersalności i Swoim różnorodnym umiejętnościom nie skupiał się na jednej wybranej przez Siebie dziedzinie badań, a wykonywał to, co w danym momencie było najważniejsze i najbardziej pilne dla zespołu, którego był istotnym członkiem. I wykonywał to sumiennie dzięki Swojej znajomości fizyki, szerokim zainteresowaniom i pracowitości. Jak zdążyłem się zorientować, nie specjalizował się w żadnych szczególnych określonych badaniach, zajmował się tym, co w danym momencie było najbardziej pilne, najbardziej pilne dla zespołu. I realizował te wycinkowe badania umiejętnie, ze znaczącym sukcesem. W dużym stopniu dzięki jego indywidualnej pracy cały zespół był w stanie osiągnąć bardzo znaczące wyniki naukowe udokumentowane w licznych wieloautorskich publikacjach. Ogólne znaczenie Swojej pracy naukowej w zespole Profesora M. Bugajskiego wyjaśnił Pan mgr inż. P. Karbownik pod koniec podrozdziału 1.4 Swojej rozprawy doktorskiej. Stwierdził tam, i trudno się z tym nie zgodzić, że dla uzyskania właściwego postępu prac tak dużego zespołu ludzi realizujących tak obszerny projekt badawczy, oprócz osób zajmujących się kompetentnie wycinkowymi częściami tego projektu, konieczna jest też praca osób zajmujących się całością tego projektu, nadzorujących wzajemne powiązania między realizatorami tych wycinkowych części. A taką właśnie pracę wykonywał Autor recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Doktorant, Pan mgr inż. P. Karbownik, był jednym z wielu współautorów publikacji wymienionych w Jego rozprawie. Trudno jednak spośród tych osiągnięć naukowych wyselekcjonować to jedno znaczące osiągnięcie, którego jedynym bądź kluczowym autorem byłby Autor recenzowanej rozprawy. Dlatego zgadzam się z Doktorantem, że głównym wynikiem jego dotychczasowej pracy naukowej, i to wynikiem w pełni zasługującym na doktorat, była, zgodnie z powyższym fragmentem mojej recenzji, Jego kompleksowa kontrola nad wszystkimi etapami wykonywania laserów kaskadowych w systemach materiałowych GaAs/AlGaAs i InGaAs/InAlAs/InP przy zastosowaniu technologicznej aparatury w laboratorium kierowanym przez Profesora Macieja Bugajskiego. Co warte szczególnego podkreślenia, taka kontrola wymagała gruntownej znajomości fizyki poszczególnych etapów technologicznych, a jej głównym celem było osiągnięcie podczas pracy impulsowej w temperaturze pokojowej akcji laserowej w obu powyższych typach laserów. Było to celnie, choć dość lapidarnie przedstawione w podrozdziale 1.4 Jego rozprawy, a rozczarująco mało kompletnie i mało treściwie w podsumowaniu rozprawy. W każdym razie główny cel recenzowanych badań, tj. osiągnięcie w temperaturze pokojowej przez oba rozpatrywane lasery progu akcji laserowej przy zasilaniu impulsowym został osiągnięty. Dlatego uważam, że przedstawiona przez Pana mgr inż. Piotra I. Karbownika rozprawa doktorska stanowi wiarygodny dowód skuteczności Jego badań naukowych w tym zakresie.

Wszystkie powyżej przedstawione fakty, dowodzące osiągnięcia znaczącej wiedzy oraz udokumentowanych osiągnięć w dziedzinie technologicznego wytwarzania nowoczesnych laserów kaskadowych, a w szczególności spełniający wymagania jakościowe i ilościowe dotychczasowy dorobek naukowy Pana mgra inż. Piotra Karbownika, utwierdzają mnie w przeświadczeniu, że, mimo pewnej niestandardowej formy Jego rozprawy doktorskiej, spełnia On wymagania stawiane zgodnie z obowiązującymi przepisami przed kandydatami do uzyskania stopnia naukowego doktora. Dlatego bez żadnych zastrzeżeń w pełni popieram Jego starania w tym zakresie.

