

Warszawa, 20 sierpnia 2024

Prof. dr hab. Marek Godlewski  
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk  
02-668 Warszawa  
Aleja Lotników 32/46

**Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Adrianny Łozińskiej**

**zatytułowanej**

**“Opracowanie nowej konstrukcji falowodów do zastosowania w kwantowych laserach kaskadowych”**

Praca doktorska mgr inż. Adrianny Łozińskiej wykonana została na Politechnice Wrocławskiej. Promotorem doktoratu jest prof. dr hab. inż. Marek Tłaczała, a promotorem pomocniczym dr inż. Beata Ściana. Praca wykonana została w ramach dyscypliny naukowej – Automatyka, Elektronika. Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne i dziedzinie nauk – Elektronika.

Rozprawa doktorska dotyczy niezwykle trudnego zadania wykonania struktur (konstrukcja falowodów) kwantowych laserów kaskadowych (QCL) na bazie heterostruktur InGaAs/AlInAs/InP. Jest to niewątpliwie praca zespołowa, w której realizację włączone były grupy badawcze z poza Politechniki Wrocławskiej, o czym wspomnę w dalszej części recenzji. Wynik końcowy (działające lasery QCL na dwie długości fal w podczerwieni) jest sukcesem wszystkich wykonawców projektu TechMatStrateg zatytułowanego „Opracowanie technologii struktur dla jednomodowych laserów kaskadowych do zastosowań w układach optycznej detekcji gazów”. Fakt, że była to praca zespołowa nie zmniejsza w żadnym przypadku roli doktorantki w finalnym sukcesie.

Praca przygotowana została w formie książkowej, liczy 182 strony, składa się z abstraktu w języku polskim i angielskim, spisu symboli i akronimów, 8 rozdziałów i obszernej bibliografii zawierającej 187 pozycji. Praca przygotowana jest bardzo starannie. Ilość usterek językowych jest znikoma i nie wpływają one na moją wysoką ocenę złożonego doktoratu. Wymienię tylko jedną, która mnie rozbawiła. Pracę czytałem zaraz po zakończeniu

olimpiady w Paryżu i może pod wpływem tego wydarzenia pojawił się w tekście rozprawy zabawny błąd językowy - „starty” zamiast „straty”.

Zamiast opisywania co jest zawarte w poszczególnych rozdziałach recenzję zacznę od krótkiego uzasadnienia wagi prowadzonych w doktoracie prac. Doktorantka (w rozdziale drugim doktoratu) bardzo dobrze opisuje zasadę działania laserów QCL, jak i szereg możliwych ich zastosowań (podrozdział 2.3). W szczególności ten akapit o możliwych zastosowaniach laserów QCL jasno dokumentuje wagę prowadzonych przez doktorantkę prac. **Technologia kwantowych laserów kaskadowych (QCL) jest ekstremalnie trudna. Tylko w nielicznych laboratoriach na świecie wykonywane są takie lasery.** Wielkim sukcesem grupy kierowanej przez prof. Macieja Bugajskiego (z dawnego ITE) było wykonanie pierwszych takich laserów w Polsce. **Także finalne osiągnięcia całego zespołu wykonywującego projekt TechMatStrateg uważam za duży sukces.**

O ile pierwsze polskie lasery QCL wykonywane były w pełni w technologii MBE to dla struktur na bazie InP (heterostruktury InP/InGaAs/AlInAs) powstających z wykorzystaniem podłoży, a także domieszkowanych warstw InP, konieczne było zastosowanie technologii MOVPE (patrz rozdział czwarty w którym opisana jest ta technologia, a także technologia MBE).

Co ważniejsze, przedstawione w doktoracie wyniki dotyczą modelowania i optymalizacji technologii nie tylko warstw InP wykonywanych w technologii MOVPE. W ramach doktoratu doktorantka (poza zaawansowanym modelowaniem) testowała możliwości wykonania warstw InP nie tylko jako „okładek” (warstw separujących i ograniczających) w technologii MOVPE, ale też innych warstw III-V jako składowych tzw. rdzenia lasera QCL. Choć wynikiem końcowym są lasery QCL z rdzeniami wykonanymi w Instytucie Mikroelektroniki i Fizyki Sieci Badawczej Łukasiewicz w Warszawie i w VIGO w zespole dr hab. inż. Włodzimierza Strupińskiego, a nie na Politechnice Wrocławskiej, to wkład doktorantki jest bardzo istotny. Pracę wytworzonych laserów QCL testowano w Instytucie Mikroelektroniki i Fizyki Sieci Badawczej Łukasiewicz w Warszawie (w dawnym ITE). W wykonanych laserach z dużym sukcesem (patrz podsumowanie osiągnięć doktoratu (rozdział ósmy)) zastosowano zoptymalizowaną przez doktorantkę technologię wytwarzania warstw separujących i ograniczających wykonanych w technologii MOVPE.

Dla mnie oczywistym pytaniem było i jest czy technologia MOVPE umożliwi docelowo wykonywanie laserów QCL na różne długości fali. Ten doktorat dokumentuje szanse na wykonanie takich laserów w tej technologii. **To bardzo ważny wynik!**

Jak już pisałem rozdział drugi zawiera wnikliwie napisany wstęp teoretyczny. Doktorantka bardzo fachowo opisuje zasady działania laserów QCL, a także ich rozliczne zastosowania. Te ostatnie wynikają głównie z braku „konkurencji”. Tylko lasery typu QCL są wydajnymi źródłami światła na dalszą podczerwień. Na przykład, w ramach wspomnianego projektu badawczego wykonano dwa typy takich laserów na długości fal 5 i 9  $\mu\text{m}$ . **Wykonanie takich laserów jest dużym sukcesem zespołu badawczego. Na podstawie rozdziału drugiego z dużym przekonaniem mogę napisać, że doktorantka wykazała się znakomitą znajomością realizowanej tematyki badawczej.**

Istotną zaletą złożonej pracy jest porównanie wyników zaawansowanego modelowania (rozdział trzeci) i wykonanych następnie prac technologicznych. Uzyskana duża zgodność pomiędzy przewidywaniami modelowania i wynikami pracy technologicznej jeszcze raz potwierdziła moje przekonanie o wybitnych osiągnięciach grupy łódzkiej (z Politechniki Łódzkiej) stworzonej przez profesora Nakwaskiego, a teraz kierowanej przez jego uczniów/współpracowników. Doktorantka z dużym sukcesem współpracowała z kolegami z Łodzi i korzystała z ich oprogramowania. W doktoracie zawarte są podziękowania dla prof. dr hab. inż. Tomasza Czystanowskiego i jego współpracowników.

Doktorat zawiera szereg wyników technologicznych. Nie będę ich szczegółowo opisywać. Skupię się na podaniu głównego osiągnięcia doktoratu. Jeśli mam wskazać co uważam **za największy sukces doktoratu**, to za takowy **uważam opracowanie (najpierw modelowanie, a potem opracowanie odpowiedniej technologii) metod domieszkowania warstw InP na typ n z zadany profilem (na przykład sinusoidalnym). Opanowanie wykonywania takich warstw InP uważam za wybitne osiągnięcie złożonego doktoratu.** W szczególności, że takie domieszkowanie okazało się bardzo ważne dla finalnego sukcesu całego zespołu realizującego projekt TechMatStrateg. Muszę nadmienić, że to osiągnięcie także doktorantka (patrz koniec strony 166 doktoratu) uważa za swój najważniejszy wynik. W pełni zgadzam się z tym stwierdzeniem zawartym w podsumowaniu.

## Podsumowanie recenzji

Podsumowując, uważam że uzyskane w rozprawie wyniki są **bardzo wartościowe**. **Stwierdzam więc, że praca doktorska mgr inż. Adrianny Łozińskiej spełnia wszystkie wymagania formalne stawiane pracom doktorskim w odpowiednich ustawach (art. 187 ustawy z dnia 20.07.2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023.742 z dnia 20.04.2023)). Wnioskuje dopuszczenie doktorantki do dalszych etapów postępowania.**

