

Recenzja rozprawy doktorskiej p.t. „Integrated optical systems based on GaN laser diodes and some applications to spectroscopy” mgr Katarzyny Anny Holc

Półprzewodnikowe struktury laserowe na bazie azotku galu, emitujące w zakresie niebieskim widma światła białego, już mają i mogą mieć więcej ważnych zastosowań. Dlatego optymalizacja ich parametrów poprzez odpowiednią konstrukcję ma prowadzić do uzyskania takich struktur, które pozwolą na nowe praktyczne zastosowania. Badania prowadzone w szeregu ośrodkach badawczych na świecie mają na celu efektywne skomercjalizowanie technologii laserów niebieskich w nowych zastosowaniach. Jednym z niewielu takich ośrodków, w których prowadzi się w skuteczny sposób takie badania na najwyższym światowym poziomie, jest Instytut Wysokich Ciśnień „Unipress” PAN i spółka „TopGaN”, będąca przedsiębiorstwem typu „spin-off” „Unipressu” w Warszawie.

Praca doktorska Pani mgr Katarzyny Holc została wykonana w tym ośrodku pod kierunkiem Doc. dr. hab. Piotra Perlina. Praca dotyczy charakteryzacji i optymalizacji struktur diod laserowych i superluminescencyjnych na bazie InGaN, wytwarzanych przy pomocy techniki MOCVD. Składa się z 8 rozdziałów, w których autorka w konsekwentny sposób opisuje wyniki swoich prac prowadzonych na strukturach na bazie GaN wytwarzanych w „Unipress-ie” i „TopGaN”.

Pierwsze trzy rozdziały pracy stanowią wstęp do opisu wyników badań, przedstawiający podstawy konstrukcji laserów półprzewodnikowych na bazie azotku galu wraz z krótkim opisem historii ich wytwarzania i opisem wpływu parametrów konstrukcji, takich jak rodzaj podłoża, metoda uzyskiwania ograniczenia kwantowego nośników ładunku, konstrukcji i geometrii falowodu, efektów segregacji indu w obszarze aktywnym, wpływu efektów polaryzacji elektrycznej występującej w azotku galu, warstwy blokującej dla elektronów, ilości studni kwantowych w obszarze aktywnym, czy metody wykonywania i jakości luster rezonatora, na wydajność akcji laserowej. Rozdziały te w krótki, ale precyzyjny i wystarczający dla dalszego zrozumienia pracy wyjaśniają podstawy problemów, które zostały przewidziane do rozwiązania w trakcie wykonywania pracy. Wybór przedstawionego materiału wskazuje na bardzo dobrą znajomość autorki podstaw teoretycznych i praktycznych badanych w pracy zagadnień.

Kolejny rozdział czwarty opisuje typową strukturę lasera krawędziowego InGaN wykonanego przy pomocy techniki *Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition* oraz jej podstawowe parametry optyczne, z uwzględnieniem jej struktury modowej. Dla badania struktury modowej lasera autorka używała teleskopu gaussowskiego, pozwalającego obrazować strukturę modową poprzez odwzorowywanie bliskiego pola promieniowania laserowego w płaszczyźnie ogniskowej tego teleskopu. Autorka uruchomiła taki układ pomiarowy w „Unipress-ie”, na wzór podobnego układu używanego na Uniwersytecie w Regensburgu. W celu ograniczenia laserowania w materiale podłoża – powstawania modów laserowych w podłożu, autorka przedstawia badania teoretyczne wykorzystujące efekty plazmonowe w specjalnie skonstruowanym podłożu o dużej koncentracji elektronów i zredukowanym współczynniku załamania dla uzyskania lepszej lokalizacji poprzecznej w światłowodzie, czyli zastosowania płaszcza światłowodu wykorzystującego te efekty (plasmonic cladding). Przedstawione są obliczenia wykorzystujące język symboliczny Mathematica, rozwinięte we współpracującej grupie Prof. U. Schwarza z Uniwersytetu w Regensburgu. Przy pomocy tego oprogramowania autorka uzyskuje teoretyczny rozkład struktury modowej lasera z typowym podłożem i podłożem plazmonowym. Zastosowanie tego pomysłu pozwoliło na uzyskanie struktur laserowych ze znacznie lepszą lokalizacją modów, a przy okazji ze znacznie zredukowanym prądem progowym i lepszą charakterystyką prąd-natężenie światła. Autorka również dyskutuje tutaj dalsze możliwości ulepszenia struktur laserowych dla poprawienia ich wydajności.

W kolejnym rozdziale 5. jest pokazana możliwość zastosowania niebieskich laserów impulsowych do spektroskopii atomowej i molekularnej na przykładzie urządzenia do mierzenia śladowych ilości NO₂ (na poziomie pojedynczych ppb, z możliwością dalszego zwiększenia ich detekcyjności) przy użyciu techniki *cavity ring-down spectroscopy*. W celu zawężenia linii laserowej zastosowano tutaj zewnętrzny element dyspersyjny w postaci siatki dyfrakcyjnej w konfiguracji Littrowa. Także możliwość używania laserów na bazie GaN w wyższych temperaturach (do 200 °C) pozwoliła na uzyskanie przestrajania lasera w zakresie około 15 nm, co jest bardzo ważne dla uzyskania dopasowania do oczekiwanych długości fali w zastosowaniu do detekcji różnych związków chemicznych. Doktorantka pokazuje też, że konfiguracja Littrowa pozwala na uzyskanie w przypadku struktury laserowej pracy ciągłej o długości fali około 405 nm linii laserowej o stabilnej szerokości około 100 MHz bez aktywnego sprzężenia zwrotnego. Badania te były prowadzone we współpracy z naukowcami Uniwersytetu Warszawskiego i Akademii Wojskowo-Technicznej.

Rozdział 6. pracy opisuje badania struktur diod superluminescencyjnych na bazie GaN, działających w zakresie widmowym w okolicy 405 nm. Diody tego typu nie mają rezonatora, dzięki czemu są znacznie prostsze w konstrukcji, jakkolwiek emitowane przez nie światło posiada pewne własności światła laserowego, takie jak kierunkowość promieniowania oraz pewną koherencję przestrzenną przy niedużym stopniu koherencji czasowej. Z drugiej strony posiadają też widmo świecenia o charakterystyce ciągłej, bez modów rezonatora, czym przypominają zwykłe diody luminescencyjne. Diody tego typu mogą mieć szereg praktycznych zastosowań, m.in. w optycznej tomografii koherencyjnej. Autorka prezentuje tutaj prosty model pozwalający wyjaśnić temperaturową zależność superluminescencji, obserwowanej w tych diodach. Istotną konkluzją tego modelu jest pokazanie, że redukcja rekombinacji nieradiacyjnej jest podstawową rzeczą dla uzyskania stabilnej pracy takich diod, co zresztą jest zawsze ważne w strukturach generujących światło. Dodatkowo potrzebna jest też stabilizacja temperatury pracy.

W kolejnym rozdziale 7. doktorantka zajmuje się badaniami własności zintegrowanych mini-macierzy laserów na bazie GaN. Takie zintegrowane macierze mogą mieć zastosowanie np. w litografii, szybkich drukarkach, czy też do otrzymania laserów o większej mocy. Prezentowane są opisy tych struktur, charakterystyki prąd-natężenie światła, widma emisji oraz struktura przestrzenna emisji w postaci obrazów emisji w bliskim polu. Pokazano, że wcześniejsze tego typu struktury wytwarzane w IWC „Unipress” i „TopGaN” wykazywały sprzężenie pomiędzy poszczególnymi laserami, będącymi składnikami macierzy. Ostatnio wytwarzane struktury nie są ze sobą sprzężone, co pozwalałoby wytwarzać struktury, które mogłyby być indywidualnie adresowane. Takie struktury mogłyby znaleźć zastosowania np. w szybkich drukarkach.

Ostatni 8. rozdział jest podsumowaniem pracy, i wymienieniem jej najważniejszych rezultatów. Praca kończy się obszernym spisem literatury, liczącym 155 pozycji.

Rozprawa prezentuje bardzo ważne i aktualne zagadnienia wytwarzania i optymalizacji struktur laserowych na bazie GaN, produkowanych w IWC „Unipress” i „TopGaN”, które są jednym z niewielu ośrodków na świecie, produkującym tego typu struktury. Rozprawa jest napisana bardzo dobrze po angielsku, w bardzo jasny i precyzyjny sposób. Każdy z merytorycznych rozdziałów (rozdziały 4-7), opisujących wyniki badań doktorantki zaczyna się od krótkiego streszczenia wyników, co ułatwia czytanie rozprawy. Praca zawiera szereg wykresów i rysunków, które znakomicie ilustrują jej zawartość. Całość rozprawy sprawia bardzo dobre wrażenie, i pozwala ją ocenić bardzo wysoko. Uzyskane wyniki uważam za oryginalne i bardzo ciekawe. Potwierdzają to opublikowane prace,

dotyczące tematyki rozprawy, których jest aż 10. W 8 z tych prac p. Holc (wcześniej Komorowska) była pierwszą autorką. Doktorantka ma także w swoim dorobku dwie inne prace. Wyniki jej badań były także prezentowane w postaci dziewięciu prac konferencyjnych, w tym również referatu zaproszonego na konferencji E-MRS 2010 Fall Meeting w Warszawie. Część wyników prezentowanych prac powstała w wyniku współpracy z innymi ośrodkami w kraju i za granicą, co bardzo dobrze świadczy o umiejętnościach doktorantki do prowadzenia takich współprac, często niezbędnych we współczesnej praktyce badawczej. Liczba tych prac i prezentacji świadczy bardzo dobrze o umiejętnościach, pracowitości i zdolnościach doktorantki. Wyniki prac doktorantki stały się także podstawą wniosku patentowego.

Wysoko oceniam także poziom edytorski rozprawy. Z recenzenckiego obowiązku wymieniam kilka błędów, które znalazłem w tekście:

1. Na stronie 57 rysunek 4.11 nie ma skal.
2. Na stronie 107 Autorka podaje, że osiągnięta moc dla zintegrowanej struktury 3 laserów wyniosła 2.5 mW – ewidentnie powinno być 2.5 W.
3. Brakuje także listy autorów prezentacji konferencyjnych i podania wszystkich autorów wniosku patentowego.
4. Na stronie 80 i 107 nieprecyzyjnie jest podana wartość poszerzenia Dopplerowskiego linii jako $\sim GHz$, pewno byłoby lepiej napisać $\sim 1 GHz$.

Te drobne uwagi jednak nie wpływają jednak na moją bardzo wysoką ocenę jakości tej pracy. W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgr Katarzyny Anny Holc całkowicie spełnia wymagania Ustawy o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych niezbędne dla uzyskania stopnia naukowego doktora i niniejszym wnoszę do Rady Naukowej Instytutu Fizyki PAN o nadanie jej tego stopnia.

Jednocześnie ze względu na wymienione powyżej zalety tej rozprawy stawiam wniosek o jej wyróżnienie.

