

Wpływ niedokładności wykonania wybranych elementów azotkowego lasera VCSEL na jego charakterystyki emisyjne

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki komputerowego modelowania półprzewodnikowego lasera VCSEL wykonanego z materiałów bazujących na azotku galu. Analiza dotyczy wpływu niedokładności wykonania różnych elementów konstrukcyjnych lasera na emitowaną przez niego moc. Rozważono różne przesunięcia obszaru czynnego i złącza tunelowego w rezonatorze lasera względem położenia pierwotnie zaprojektowanego. Zbadano również wpływ zmian grubości warstw zwierciadeł DBR na osiągi lasera..

Abstract. This paper presents results of numerical simulations of a semiconductor vertical-cavity surface-emitting laser made of nitride materials. The analysis concerns the impact of the imperfections in fabrication of various laser elements on its emitted power. Different locations of the active area and the tunnel junction in the laser resonator with respect to the originally designed structures were considered. The influence of changes in the thickness of the DBR mirrors layers on the laser performance was also investigated. (**Impact of the imperfections in fabrication of selected elements of a nitride VCSEL on its emission characteristics**).

Słowa kluczowe: laser półprzewodnikowy, GaN, laser VCSEL, modelowanie.

Keywords: semiconductor laser, GaN, VCSEL, computer modeling.

Wprowadzenie

Wytwarzanie półprzewodnikowych laserów typu VCSEL (vertical-cavity surface-emitting laser), których obszary czynne zbudowane są z materiałów InGaN/GaN następcza wiele trudności. Podstawowym problemem jest niedopasowanie sieciowe materiałów binarnych AlN, GaN i InN, co praktycznie uniemożliwia wytwarzanie efektywnych zwierciadeł DBR (distributed Bragg reflector). Innym problemem jest słaba przewodność elektryczna materiału p-GaN. Niemniej jednak lasery VCSEL posiadają wiele zalet w stosunku do tradycyjnych laserów o emisji krawędziowej, co może potwierdzić znakomity sukces komercyjny laserów VCSEL emitujących promieniowanie z zakresu bliskiej podczerwieni. Do podstawowych zalet tych przyrządów można zaliczyć: ich niewielkie rozmiary obszaru czynnego, niewielkie prądy progowe, małe moce zasilania, stosunkowo dobre parametry emitowanej wiązki, niską cenę przy masowej produkcji oraz łatwość wytwarzania na ich bazie dwuwymiarowych matryc laserowych. Uzyskanie efektywnie działających laserów VCSEL emitujących w zakresie światła widzialnego stało się więc priorytetem wielu ośrodków badawczych. Wydaje się, że materiały azotkowe takie jak GaN, AlGaIn i InGaIn najlepiej nadają się obecnie do konstrukcji takich przyrządów.

Pierwsze azotkowe lasery VCSEL zasilane elektrycznie oraz działające w temperaturze pokojowej (RT – room temperature) i z falą ciągłą (CW – continuous wave) powstały dopiero w 2008 roku [1, 2], czyli kilkanaście lat po powstaniu azotkowych laserów krawędziowych. Cechowały się one bardzo słabymi parametrami pracy lub ulegały szybkiej degradacji. Zdecydowany postęp w tej dziedzinie nastąpił w ostatnich dwóch latach. Najlepsze rezultaty otrzymali naukowcy z Faculty of Science and Technology z Meijo University w Japonii oraz współpracująca z nimi firma R&D Laboratories, Stanley Electric Co. [3]. Moc optyczna zaprezentowanych przez nich przyrządów pracujących w warunkach CW RT sięgała 15.7 mW, a napięcie progowe, prąd progowy i gęstość prądu progowego wynosiły odpowiednio: 5.1 V, 4.5 mA i 9.0 kA/cm². Ostatnie doniesienia tych grup (z początku lutego 2019 r.) przedstawione na konferencji Photonics West 2019 w San Francisco mówią o uzyskaniu mocy optycznej przekraczającej 20 mW, całkowitej sprawności 10% oraz pracy z falą ciągłą w temperaturze otoczenia sięgającej 140°C. Wszystko to pozwala sądzić, że w niedalekiej

przyszłości lasery te mogą osiągnąć etap komercyjnej produkcji.

Mimo dużego postępu i wielu sukcesów w wytwarzaniu azotkowych laserów VCSEL, nadal poszukuje się alternatywnych rozwiązań konstrukcyjnych. Na przykład firma SONY pokazała konstrukcję laserów VCSEL z tylnymi zakrzywionymi zwierciadłami DBR [4]. Naukowcy z UCSB Santa Barbara w Kalifornii prowadzą badania nad azotkowymi laserami VCSEL, w których zamiast często stosowanej w tych urządzeniach półprzezroczystej warstwy ITO (indium tin oxide), w celu uzyskania odpowiedniego rozprętu prądu w strukturze lasera, stosują złącze tunelowe (TJ – tunnel junction) oraz implantację jonami glinu [5]. Ostatnio ukazała się praca pokazująca elektrycznie zasilany azotkowy laser VCSEL, w którym dolne zwierciadło DBR wykonano na bazie nanoporowatego GaN, a górne z materiałów dielektrycznych [6]. Cechą wspólną wielu tych konstrukcji jest duży stopień skomplikowania struktury wewnętrznej. Konsekwencją tego jest nie tylko trudny proces projektowania takich urządzeń, ale przede wszystkim wyzwanie dla technologów, od których żąda się precyzyjnego wykonania zaprojektowanych struktur.

Niniejsza praca poświęcona jest zbadaniu wpływu niedokładności wykonania różnych elementów konstrukcyjnych azotkowego lasera VCSEL ze złączem tunelowym (TJ GaN VCSEL) na jego charakterystyki pracy. Przebadano wpływ takich elementów jak: umiejscowienie w rezonatorze obszaru czynnego lasera, umiejscowienie położenia złącza tunelowego oraz precyzję wykonania górnych i dolnych zwierciadeł DBR.

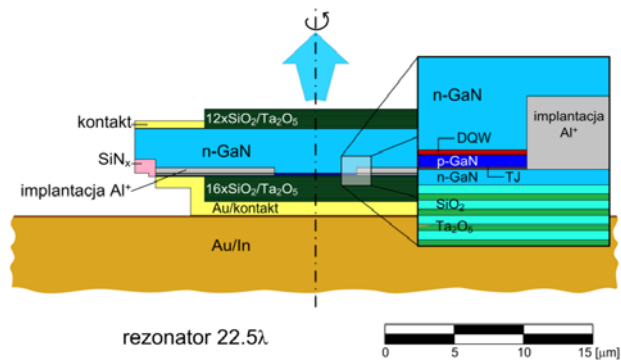
Struktura modelowanego lasera VCSEL

Modelowana struktura została zaprojektowana na bazie konstrukcji wykonanej na Uniwersytecie Kalifornijskim w Santa Barbara (UCSB) [5] (patrz rys. 1).

Badana struktura jest zaprojektowana na emisję fali o długości $\lambda = 406$ nm. Konstrukcja ta ma stosunkowo długi rezonator równy 22.5λ . Struktura posiada dwie pary dielektrycznych zwierciadeł DBR wykonanych z materiałów Ta₂O₅/SiO₂. Górne zwierciadło zawiera 12, a dolne – 16, par wspomnianych materiałów. Dolny kontakt lasera ma postać pierścienia otaczającego dolne zwierciadło DBR, co zapewnia dobre odprowadzenie ciepła z wnętrza struktury do chłodnicy. Obszar czynny lasera stanowią dwie studnie kwantowe (DQW – double quantum wells) o łącznej grubości 28 nm wykonane z InGaIn oraz bariera o grubości

1 nm wykonana z GaN. Poniżej obszaru czynnego znajdują się warstwa p-GaN oraz złącze tunelowe. Część zewnętrznego obszaru lasera jest implantowana jonami glinu, przez co powstałe w ten sposób wysokorezystywne obszary stanowią ograniczenie dla prądu przepływającego przez laser.

Parametry materiałowe wykorzystane do modelowania struktury zaczerpnięto z pracy [7]. Opisy modeli numerycznych można znaleźć w pracach [7, 8].



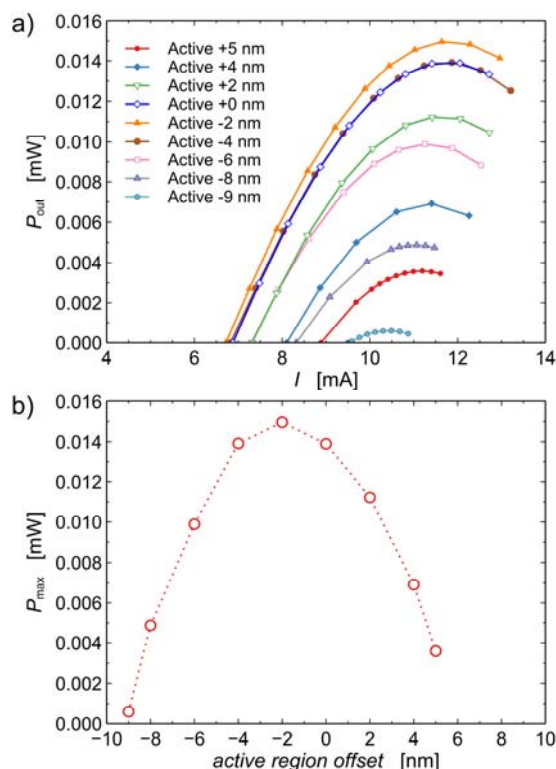
Rys.1. Schemat modelowanej konstrukcji TJ GaN VCSEL.

Wyniki

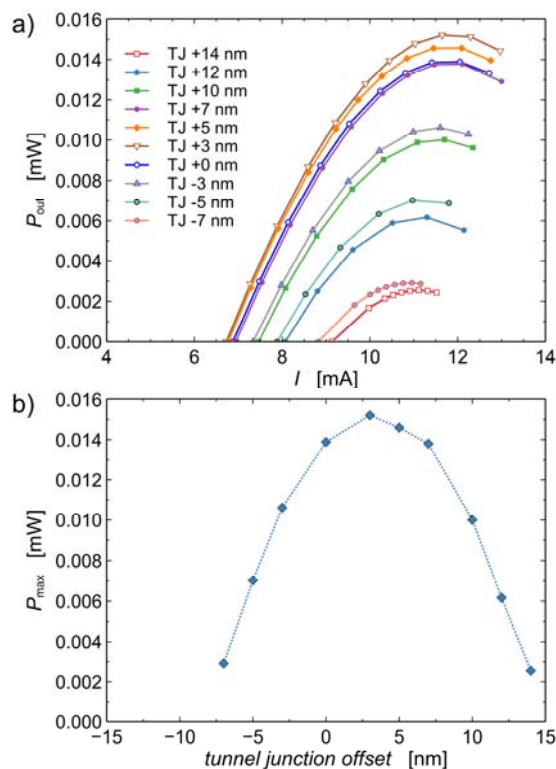
W pierwszej kolejności zostały rozważone różne przesunięcia obszaru czynnego w górę struktury aż do wartości maksymalnej równej +5 nm względem pierwotnego położenia oraz analogicznie w dół struktury do wartości -9 nm. W położeniu pierwotnym oznaczonym jako 0, strzałka fali stojącej powstaje w rezonatorze znajduje się w środku obszaru czynnego (rys. 4b). Na rysunku 2 przedstawiono charakterystyki mocy emitowanej przez laser (rys. 2a) oraz maksymalne wartości mocy P_{max} w funkcji przesunięcia obszaru czynnego (active junction offset). Maksymalna emitowana moc obserwowana jest dla wysunięcia -2 nm. Przesunięcie obszaru czynnego o więcej niż 9 nm w dół lub 5 nm w górę skutkuje gwałtownym obniżeniem mocy emitowanej przez laser. W tych rozważaniach na emitowaną moc ma wpływ efektywne wzmocnienie w obszarze czynnym. Na rysunku 5a przedstawiono wykres współczynnika wypełnienia studni kwantowych Γ w funkcji przesunięcia obszaru czynnego lasera. Współczynnik wypełnienia Γ jest wielkością względną, którą opisuje się jako stosunek liczby fotonów wzmacnianych w obszarze czynnym do ogólnej liczby fotonów powstałych w rezonatorze. Zatem, zgodnie z rysunkiem 5a, największe wzmocnienie obszaru czynnego uzyskuje się w momencie, gdy obszar ten przesunięty jest o -2 nm w dół struktury (porównaj rys. 1).

Analogiczne zmiany położenia rozważono dla złącza tunelowego (TJ). W analizowanej strukturze złącze tunelowe składa się z warstw p++GaN oraz n++GaN o grubościach równych odpowiednio: 14 nm i 32 nm, przy czym absorpcja warstwy p++GaN jest znacznie większa niż n++GaN. Złącze tunelowe zostało umieszczone pierwotnie w taki sposób, że węzeł fali stojącej znajdował się w środku warstwy p++GaN, natomiast warstwa n++GaN – pomiędzy węzłem a strzałką fali (rys. 4a). Rozważono przesunięcia obszaru czynnego od +14 nm w górę do -7 nm w dół struktury. Na rysunku 3 przedstawiono otrzymane charakterystyki moc-prąd (rys. 3a) oraz wykres maksymalnej emitowanej mocy w funkcji przesunięcia złącza tunelowego (tunnel junction offset). Wyniki pokazują, że najwyższą emitowaną moc uzyskuje się w przypadku, gdy złącze tunelowe jest wysunięte o +3 nm w górę struktury. Przesunięcie złącza tunelowego w górę struktury powoduje umiejscowienie obu warstw złącza efektywnie bliżej węzła fali stojącej, co powoduje zmniejszenie strat w

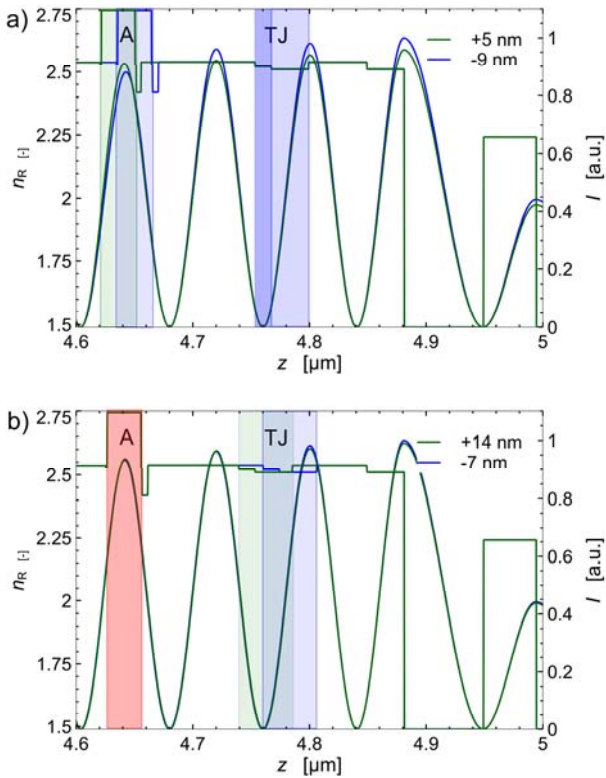
przyrządzie i w konsekwencji zwiększenie emitowanej mocy.



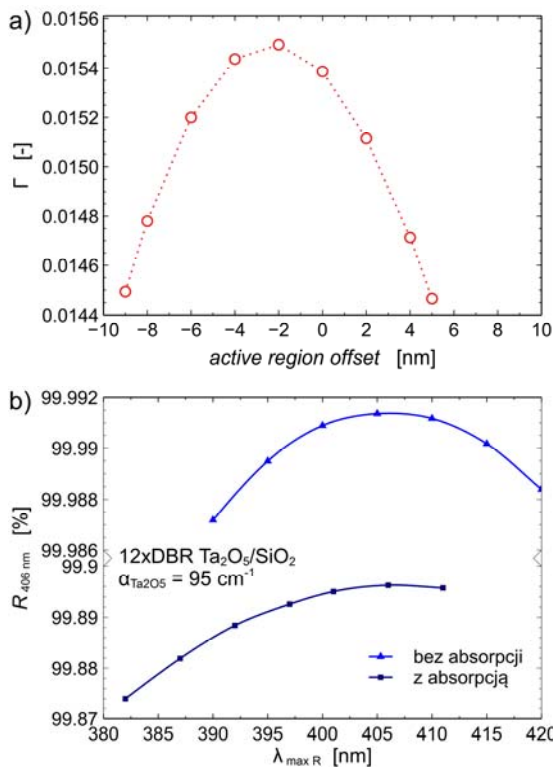
Rys.2. a) Charakterystyki mocy emitowanej przez laser dla różnych przesunięć obszaru czynnego. b) Wykres maksymalnych mocy emitowanych w funkcji przesunięcia obszaru czynnego względem początkowego położenia „0 nm”.



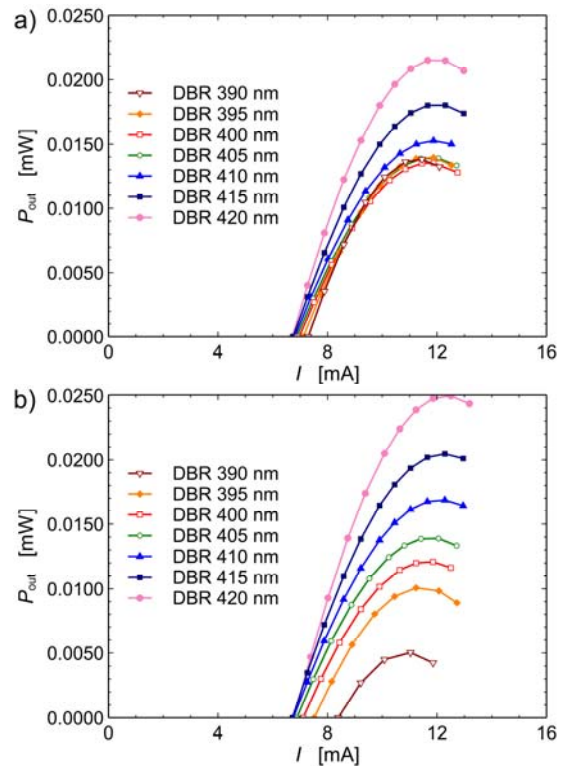
Rys.3. a) Charakterystyki mocy emitowanej przez laser dla różnych przesunięć złącza tunelowego (TJ). b) Wykres maksymalnych mocy emitowanych w funkcji przesunięcia złącza tunelowego względem początkowego położenia „0 nm”.



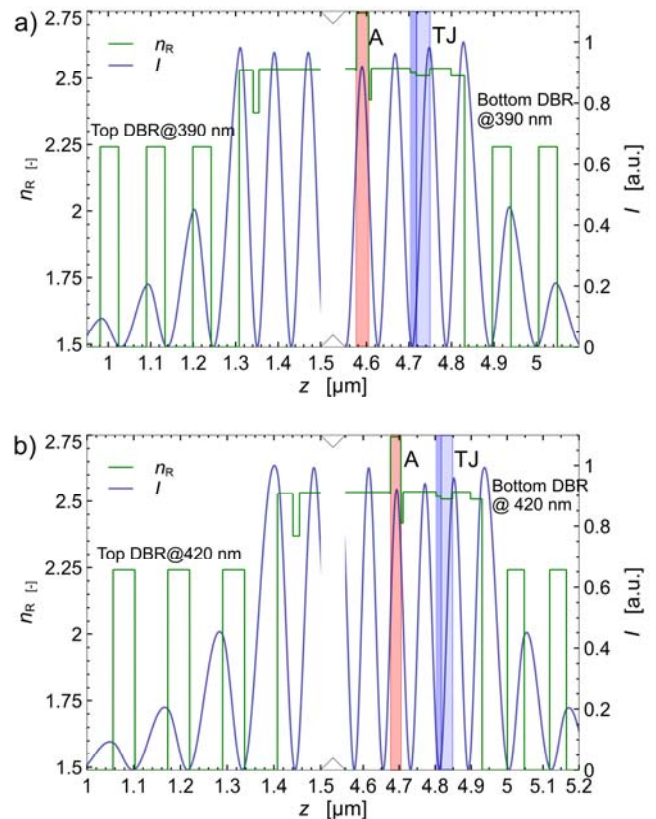
Rys.4. Rozkład natężenia pola elektrycznego w rezonatorze w pobliżu obszaru czynnego (A) i złącza tunelowego (TJ) w przypadku przesunięcia a) obszaru czynnego o 5 nm w górę i 9 nm w dół, b) złącza tunelowego o 14 nm w górę i 7 nm w dół w stosunku do położenia pierwotnego.



Rys.5. a) Zależność współczynnika wypełnienia studni kwantowych Γ od wartości przesunięcia obszaru czynnego. b) Współczynnik odbicia fali 406 nm zmiennych grubości warstw przesuwających maksimum ich odbicia w przedziale od 390 do 420 nm.



Rys.6. Moc optyczna od prądu zasilania lasera ze zwierciadłami DBR mającymi maksima odbijalności dla różnych długości fal. a) Przekształcenie tylko górnego zwierciadła, b) przekształcenie obu zwierciadeł DBR.



Rys.7. Rozkład natężenia pola elektrycznego w rezonatorze w przypadku wykonania górnego i dolnego DBR z maksimum odbicia przypadającym na falę a) 390 nm, b) 420 nm.

Na rysunku 5b przedstawiono wykres odbijalności zwierciadła DBR z uwzględnieniem absorpcji w warstwach Ta₂O₅ oraz z jej pominięciem. Optymalnie zaprojektowane zwierciadła DBR powinny mieć maksimum odbicia dla fali 406 nm. Nieznaczne zmiany grubości tych warstw powodują, że maksymalna odbijalność przesuwa się w stronę dłuższych bądź krótszych fal. Rysunek 6 przedstawia charakterystyki mocy emitowanej przez lasery ze zwierciadłami DBR, których długość fali odpowiadająca maksimum odbicia zmienia się w przedziale 390–420 nm. Zastosowanie zwierciadeł o mniejszej grubości warstw skutkuje zmniejszeniem mocy promieniowania, natomiast użycie grubszych zwierciadeł poprawia parametry struktury. Efekt ten jest bardziej zauważalny, gdy zmiany te zastosujemy w obu zwierciadłach DBR. Na rysunku 7 przedstawiono rozkłady współczynnika załamania i fali stojącej w rezonatorze lasera. Wykres 7a prezentuje sytuację, w której maksimum odbicia dolnego i górnego zwierciadła DBR przypada dla fali 390 nm. Skutkuje to przesunięciem strzałek fali stojącej w kierunku materiału Ta₂O₅, który posiada wysoką absorpcję. Natomiast na rysunku 7b widoczne są rozkłady, w których maksimum odbicia zwierciadła DBR przypada na dłuższą falę, równą 420 nm. W tym przypadku strzałki fali elektromagnetycznej przesuwały się do materiału SiO₂, który charakteryzuje się znikomą absorpcją. Stąd zastosowanie nieco grubszych warstw zwierciadła skutkuje zmniejszeniem strat w przyrządzie i w efekcie zwiększeniem emitowanej przez niego mocy.

Podsumowanie

W pracy zbadano wpływ niedokładności wykonania wybranych elementów konstrukcyjnych na charakterystyki emisyjne lasera TJ GaN VCSEL. Przeanalizowano umiejscowienie obszaru czynnego lasera w rezonatorze oraz położenie złącza tunelowego. Ponadto zbadano precyzję wykonania górnych i dolnych zwierciadeł DBR. Pokazano, że wysunięcie obszaru czynnego w górę (w stronę górnego zwierciadła DBR) o więcej niż 9 nm oraz w dół (w stronę dolnego DBR) o więcej niż 5 nm powoduje utratę akcji laserowej. Największą moc uzyskano przy niewielkim (2 nm) przesunięciu obszaru czynnego w stronę górnego DBR, co wiąże się z najlepszym współczynnikiem wypełnienia dla studni kwantowych. Przesunięcie TJ o więcej niż 6 nm w górę lub więcej niż 14 nm w dół także powoduje utratę akcji laserowej. Ze względu na rozmiar i poziom domieszkowania poszczególnych warstw półprzewodnikowych składających się na złącze tunelowe, niewielkie (3 nm) wysunięcie TJ w górę w stosunku do położenia pierwotnego zapewnia największą moc optyczną lasera. Duże znaczenie ma właściwe wykonanie zwierciadeł DBR. Zbyt mała grubość tworzących je warstw (maksymalne odbicie przypada wtedy na mniejszą długość fali niż projektowana) powoduje obniżenie mocy optycznej lasera. Zwierciadła DBR z warstwami grubszymi (niż zaprojektowane na falę 406 nm) mają maksymalne odbicie przesunięte w stronę fal dłuższych. Dla takich zwierciadeł

obserwujemy zwiększenie mocy optycznej lasera. Efekty te związane są z własnościami fizycznymi materiału Ta₂O₅, który w zakresie fal około 400 nm posiada znaczną absorpcję optyczną (około 100 cm⁻¹). Odstrojenie zwierciadeł DBR powoduje zmianę rozkładu fali powstałej w rezonatorze lasera i zwierciadłach DBR, która w zależności od odstrojenia mocniej wnika w Ta₂O₅ (zwiększenie strat absorpcyjnych) lub mocniej wnika w SiO₂ (zmniejszenie strat absorpcyjnych).

Praca częściowo finansowana przez MNiSW (I-3/501/17-3-1-758). Praca jest związana tematycznie z projektem NCN nr UMO-2014/13/B/ST7/00633 oraz z realizowanym w latach 2009-2014 projektem POIG.01.03.01-00-159 InTechFun i powstała w okresie jego trwania

Autorzy: dr hab. inż. Robert P. Sarzała, prof. PŁ, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, E-mail: robert.sarzała@p.lodz.pl; mgr inż. Patrycja Śpiewak, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, E-mail: patrycja.spiewak@edu.p.lodz.pl.

LITERATURA

- [1] Lu T.-C., Kao C.-C., Kuo H.-C., Huang G.-S., Wang S.-C., CW lasing of current injection blue GaN-based vertical cavity surface emitting laser, *Appl. Phys. Lett.*, 92 (2008), nr 14, 141102
- [2] Higuchi Y., Omae K., Matsumura H., Mukai T., Room-temperature CW lasing of a GaN-based vertical-cavity surface-emitting laser by current injection, *Applied Physics Express*, 1 (2008), nr 12, 121102
- [3] Kuramoto M., Kobayashi S., Akagi T., Tazawa K., Tanaka K., Saito T., Takeuchi T., High-Power GaN-Based Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers with AlInN/GaN Distributed Bragg Reflectors, *Appl. Sci.*, 9 (2019), 416.
- [4] Hamaguchi T., Tanaka M., Mitomo J., Nakajima H., Ito M., Ohara M., Kobayashi N., Fujii K., Watanabe H., Satou S., Koda R., Narui H., Lateral optical confinement of GaN based VCSEL using an atomically smooth monolithic curved mirror, *Scientific Reports*, 8 (2018), 10350
- [5] Forman C. A., Lee S., Young E. C., Kearns J. A., Cohen D. A., Leonard J. T., Margalith T., DenBaars S. P., Nakamura S., Continuous-wave operation of m-plane GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with a tunnel junction intracavity contact, *Applied Physics Letters*, 112 (2018), nr 11, p. 111106
- [6] Mishkat-Ui-Masabih S. M., Aragon A. A., Monavarian M., Luk T. S., Feezell D. F., Electrically injected nonpolar GaN-based VCSELs with lattice-matched nanoporous distributed Bragg reflector mirrors, *Appl. Phys. Express*, 12 (2019), 036504
- [7] Kuc M., Sarzała R. P., Nakwaski W., Thermal crosstalk in arrays of III-N-based Lasers, *Materials Science and Engineering: B*, 178 (2013) nr 20, 1395-1402
- [8] Sarzała, R. P., Nakwaski W., Optimisation of the 1.3- μ m GaAs-based oxide-confined (GaIn)(NAs)vertical-cavity surface-emitting lasers for their low-threshold room-temperature operation, *Journal of Physics: Condensed Matter* 16 (2004), S3121-S3140