

doi:10.15199/48.2017.08.07

Termiczna analiza azotkowych laserów VCSEL ze złączem tunelowym

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki termicznej analizy laserów VCSEL wykonanych z materiałów azotkowych. Badane przyrządy posiadały różne typy dolnych zwierciadeł, dielektryczne lub azotkowe. Analizie termicznej poddano lasery zaprojektowane na dwie różne długości fali z zakresu fioletowo-zielonego.

Abstract. This paper presents the results of thermal analysis of nitride VCSELs. The structures considered here had different types of bottom mirrors, namely dielectric or nitride. The thermal analysis concerned lasers emitting two different wavelengths from the violet-green spectral range. (Thermal analysis of nitride VCSELs with tunnel junctions).

Słowa kluczowe: GaN, laser VCSEL, DBR, złącze tunelowe, laser półprzewodnikowy

Keywords: GaN, VCSEL, DBR, tunnel junction, semiconductor laser

Wprowadzenie

Lasery VCSEL (od ang. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser*) posiadają wiele zalet w porównaniu z innymi typami laserów półprzewodnikowych, dlatego w ostatnim czasie cieszą się dużym zainteresowaniem. Osiągają one kilkukrotnie większe gęstości mocy (W/m^2) niż lasery EEL (ang. *Edge Emitting Laser*) o krawędziowej emisji promieniowania, a do tego są odporne na COD (*Catastrophic Optical Damage*). Przede wszystkim jednak pracują na pojedynczym modzie podłużnym, emitując wiązkę o bardzo dobrych parametrach optycznych. Skonstruowanie w roku 1996 przez firmę Nichia lasera typu EEL emitującego niebieską wiązkę [1], spowodowało chęć wytworzenia laserów VCSEL emitujących promieniowanie z tego zakresu długości fal. Niestety obecnie nie istnieją komercyjnie dostępne lasery VCSEL emitujące w zakresie od fioletowego do zielonego. Jest to spowodowane dużymi trudnościami technologicznymi i własnościami fizycznymi materiałów azotkowych. Jednym z nich jest problem ze słabą przewodnością elektryczną azotku galu typu p. Z uwagi na ten fakt niektóre najnowsze konstrukcje azotowych laserów VCSEL posiadają wbudowane złącze tunelowe, które pozwala wydajnie wstrzykiwać nośniki do obszaru czynnego [2] bez potrzeby stosowania wysoko absorpcyjnych warstw ITO (*Indium Tin Oxide*). Innym problemem jest wytworzenie efektywnych zwierciadeł DBR (ang. *Distributed Bragg Reflector*), które muszą cechować się niemal stuprocentową odbijalnością. Rodzime materiały azotkowe, z których wytwarza się takie zwierciadła cechują się dużym niedopasowaniem sieciowym, przez co łatwo dochodzi do degradacji takich zwierciadeł. Jednym z rozwiązań jest zastąpienie zwierciadeł rodzimych przez zwierciadła wykonane z materiałów dielektrycznych. Zastosowanie materiałów dielektrycznych pozwala na znaczną redukcję liczby par warstw wchodzących w skład zwierciadła DBR przy zachowaniu ich bardzo dużego współczynnika odbicia. W niniejszej pracy zostały omówione konstrukcje azotkowych laserów VCSEL, posiadające różne typy dolnych zwierciadeł. Konstrukcje te zostały przeanalizowane pod względem ich własności termicznych.

Model numeryczny

Symulacje przeprowadzono z wykorzystaniem samouzgodnionego modelu komputerowego, opracowanego przez Zespół Fotoniki w Instytucie Fizyki w Politechnice Łódzkiej [3]. Model ten umożliwia symulację zjawisk fizycznych zachodzących w laserach półprzewodnikowych z uwzględnieniem zjawisk elektrycznych, termicznych

optycznych i wzmocnieniowych. Użyteczność wspomnianego modelu została potwierdzona eksperymentalnie [4]. Parametry wykorzystane przy symulacjach zaprezentowanych w niniejszej pracy i dotyczących laserów azotkowych można znaleźć w pracy [5].

Rozkład temperatury dla lasera półprzewodnikowego pracującego z falą ciągłą (tryb CW – *Continuous Wave*) opisuje następujące równanie przepływu ciepła:

$$(1) \quad \nabla(\mathbf{k}(r, z) \circ \nabla T(r, z)) = -g(r, z),$$

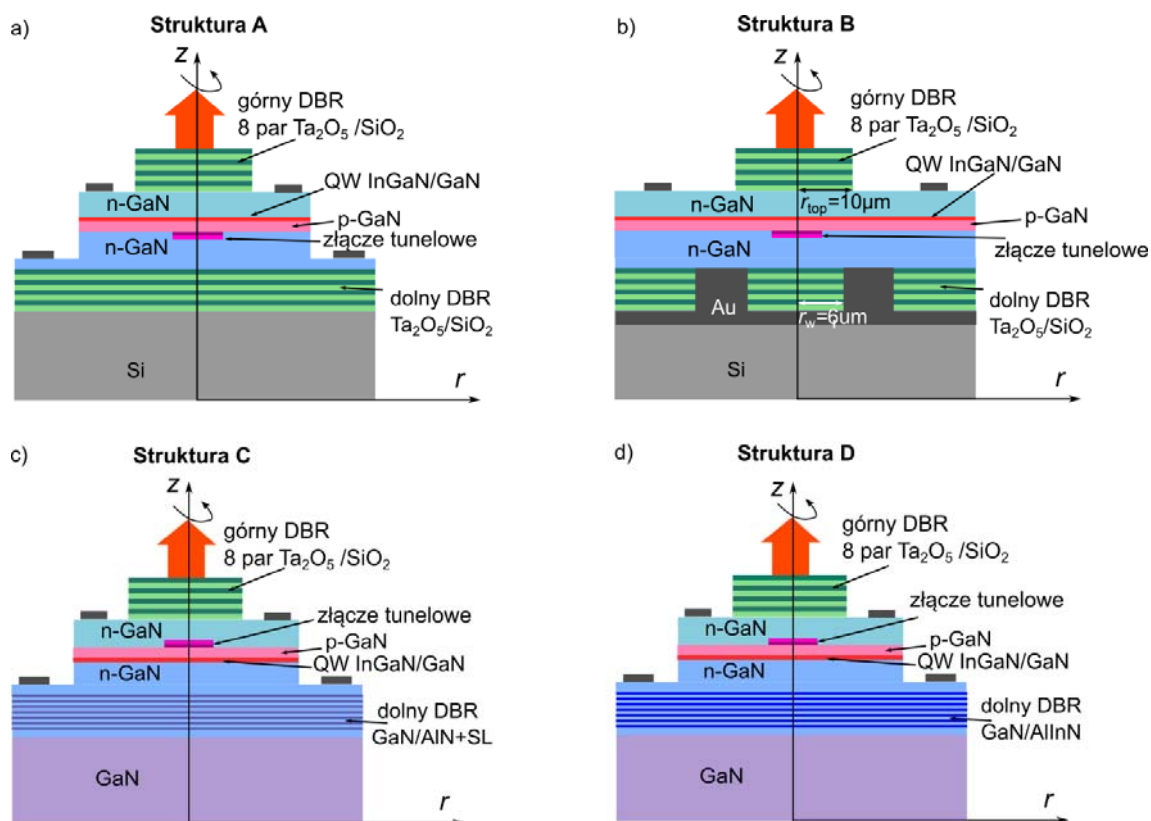
gdzie: T – temperatura, k – przewodność termiczna, g – gęstość mocy źródeł ciepła.

Równanie (1) rozwiązywane jest za pomocą Metody Elementów Skończonych (MES). W obliczeniach przyjmujemy, że całe ciepło generowane wewnątrz lasera odprowadzane jest przez dolną powierzchnię chłodnicy, która utrzymywana jest w temperaturze pokojowej. Zakładamy, że pozostałe ścianki lasera są termicznie izolowane.

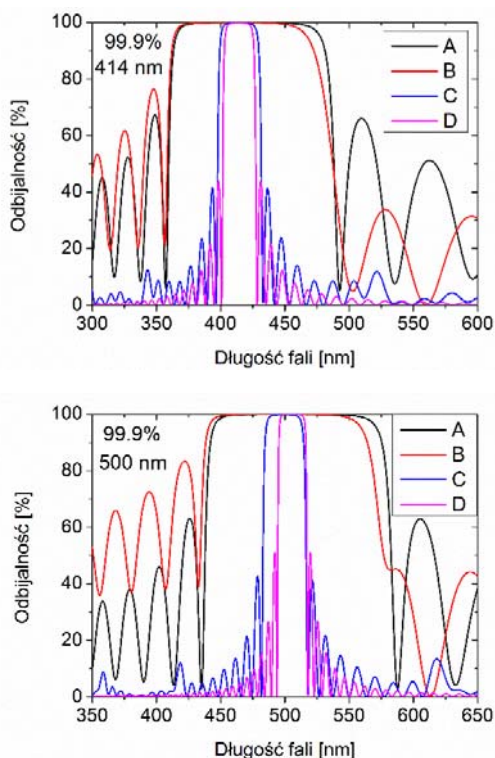
Modelowane struktury

W pracy rozważono różne konstrukcje azotkowych laserów VCSEL ze złączem tunelowym. Analizowane struktury posiadały rezonator 10λ oraz złącze tunelowe o średnicy $6\mu m$, pełniące rolę apertury elektrycznej. Przyrządy zostały zaprojektowane na dwie długości fali, 414 nm oraz 500 nm. Lasery posiadały cztery różne typy dolnego zwierciadła DBR: dielektryczne (struktura A), dielektryczne z wbudowanym pierścieniowym kontaktem ze złota (B) oraz wykonane z materiałów azotkowych (struktury C i D) (rys.1). W strukturze C, posiadającej zwierciadła wykonane z GaN/AlN dodatkowo zastosowano warstwy supersieci, które zmniejszają naprężenia będące wynikiem niedopasowania sieciowego azotku galu i azotku glinu. Takie rozwiązanie zastosowała w swojej konstrukcji grupa badawcza z Uniwersytetu Chiao Tung z Tajwanu [6]. Zwierciadła wykonane z GaN/AlInN (struktura D) wykorzystali w swoich konstrukcjach naukowcy z Uniwersytetu w Lozannie [7].

Przy projektowaniu laserów, ważnym elementem jest odpowiednie dobranie współczynników załamania materiałów tworzących strukturę lasera. Lasery emitujące falę 500 nm posiadają nieco mniejsze materiałowe współczynniki załamania, przez co odpowiadające im warstwy są odpowiednio grubsze w porównaniu z warstwami w laserze emitującym falę 414 nm. W tabeli 1 zestawiono współczynniki załamania materiałów wykorzystanych do projektowania analizowanych przez nas laserów.



Rys.1. Schematy analizowanych struktur azotkowych laserów VCSEL ze złączeniem tunelowym i dolnym zwierciadłem DBR: a) dielektrycznym, b) dielektrycznymi z pierścieniowym kontaktem ze złota c) natywnym GaN/AlIn i supersieciami (SL), d) wykonanym z GaN/AlInN



Rys.2. Wykresy odbijalności dolnego DBR w laserach zaprojektowanych na 414 nm (u góry) oraz 500 nm (na dole), Oznaczenia A, B, C i D dotyczą struktur opisanych na rysunku 1

Tabela 1. Współczynniki załamania n wybranych materiałów użytych w laserach VCSEL

materiał	GaN	AlN	AlInN	SiO ₂	Ta ₂ O ₅	Au	Si
n dla 414 nm	2,51	2,22	2,31	1,49	2,23	1,65	5,27
n dla 500 nm	2,40	2,178	2,26	1,48	2,18	0,85	4,29

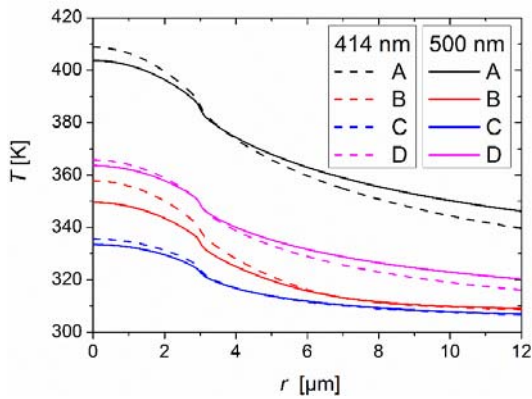
Tabela 2. Zestawienie rodzajów i liczby par warstw dolnych zwierciadeł w analizowanych strukturach. Odbijalność zwierciadeł jest równa 99,89%

typ zwierciadła	liczba par	
	414 nm	500 nm
A. SiO ₂ /Ta ₂ O ₅	11	12
B. SiO ₂ /Ta ₂ O ₅ wbudowanym Au	z 10	10
C. GaN/AlN + SL	37	45
D. GaN/AlInN	48,5	75,5

W tabeli 2 przedstawiono parametry konstrukcyjne zwierciadeł wykorzystanych w analizowanych w pracy laserach VCSEL. Odbijalności dolnego DBR, we wszystkich przypadkach są porównywalne i wynoszą w przybliżeniu 99,89%. Na rysunku 2 przedstawiono wykresy odbijalności dolnego zwierciadła DBR wykonanego wszystkimi czterema sposobami przedstawionymi w tabeli 2.

Wyniki obliczeń

Omówione wcześniej struktury zostały poddane analizie termicznej. W obliczeniach przyjęto stałe źródło ciepła o wartości 50 mW umiejscowione w obszarze czynnym lasera. Na rysunku 3 przedstawiono rozkłady temperatur w analizowanych czterech typach struktur, zaprojektowanych do emisji fal 414 nm oraz 500 nm. Z rysunku widać, że zauważalnie wyższe temperatury są osiągnięte przez laser z dwoma dielektrycznymi zwierciadłami DBR (struktura A).

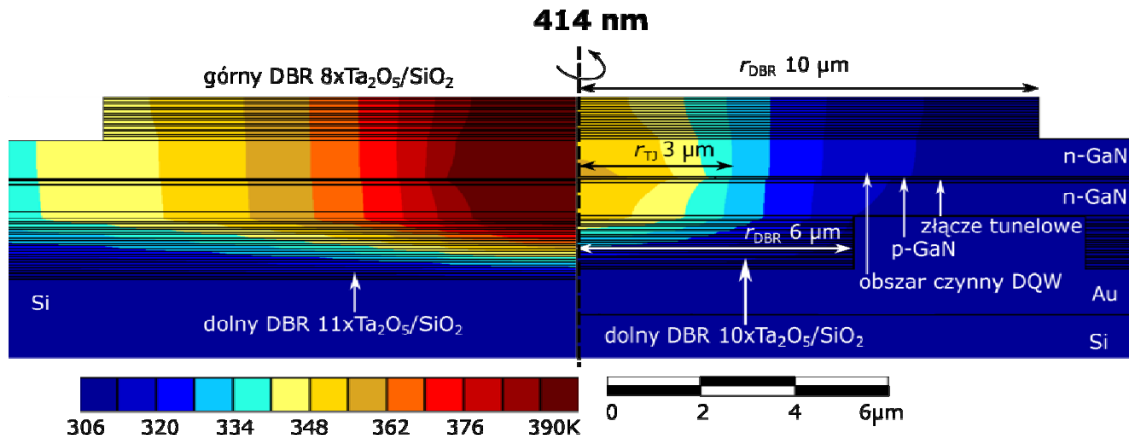


Rys.3. Rozkłady temperatur w obszarze czynnym w analizowanych strukturach A, B, C i D (oznaczenia jak na rysunku 1) dla dwóch długości fal: 414 nm i 500 nm

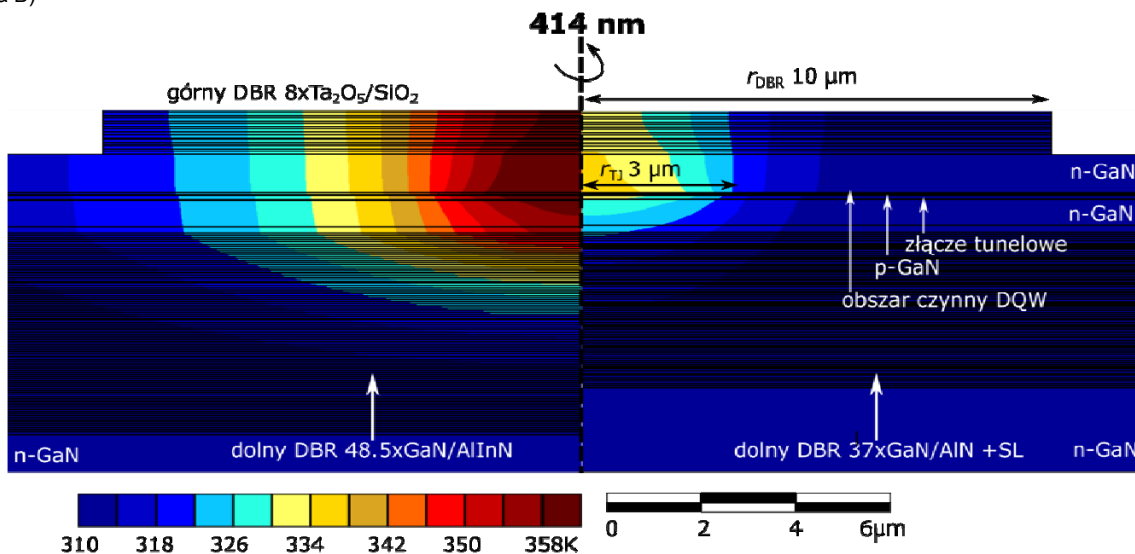
Jest to spowodowane słabą przewodnością termiczną materiałów dielektrycznych w porównaniu z materiałami azotkowymi. Jednakże w strukturze z dwoma zwierciadłami dielektrycznymi z wbudowanym pierścieniowym kontaktem ze złota (struktura B) temperatury są zauważalnie mniejsze w porównaniu ze strukturą z pełnymi zwierciadłami. W tym przypadku (struktura B) złoto, które cechuje się dużą przewodnością termiczną pomaga efektywniej odprowadzić

ciepło z wnętrza struktury, co w efekcie znacznie obniża temperaturę wewnątrz przyrządu. Podobne rozwiązanie konstrukcyjne zastosowali naukowcy z Uniwersytetu Santa Barbara w Kalifornii [8].

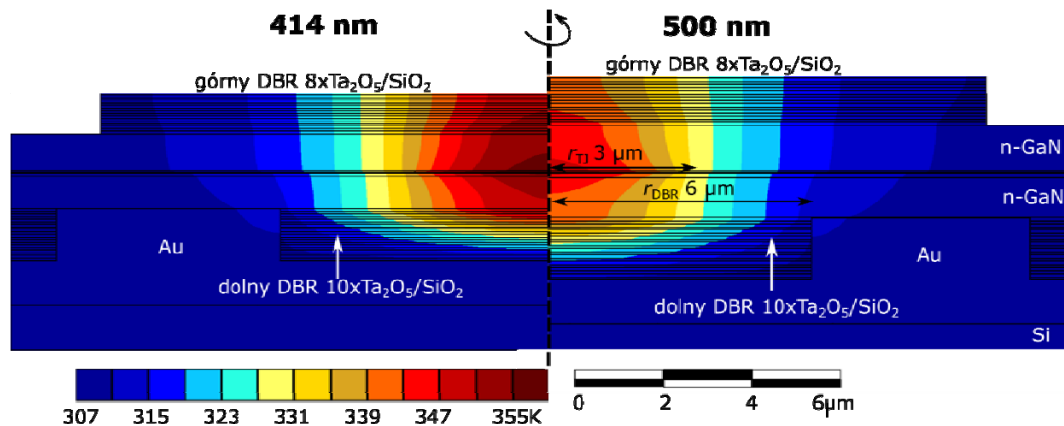
Z rysunku 3 zauważyć można również, że lasery zaprojektowane na dłuższą długość fali (500 nm) osiągają trochę niższe temperatury w porównaniu do laserów emitujących krótszą falę (414 nm). Różnice te stają się jeszcze większe dla laserów posiadających dielektryczne dolne DBR (struktury A i B). Różnice w temperaturach dla struktur emitujących te dwie długości fal wynikają z tego, że laser emitujący falę o długości 500 nm posiada dłuższy (w sensie rozmiarów metrycznych) rezonator. Wiąże się to z mniejszą wartością współczynnika załamania GaN w tym przypadku i potrzebą zachowania tej samej (10λ) długości optycznej rezonatora. Warstwy GaN otaczające warstwę czynną (patrz rysunek 1) działają w badanych laserach jak warstwy rozpraszające ciepło, dlatego w strukturach z fizycznie dłuższym rezonatorem, czyli emitujących dłuższą falę, ciepło jest lepiej rozpraszane wewnątrz przyrządu. Na rysunkach 4–6 przedstawiono izotermy temperatur dla wybranych struktur.



Rys.4. Mapy temperatur dla lasera VCSEL z rezonatorem 10λ i dolnymi zwierciadłami dielektrycznymi, zaprojektowanego na emisję fali o długości 414 nm. Źródło ciepła o wartości 50 mW umiejscowione jest w obszarze czynnym. Lewa część rysunku odpowiada strukturze z pełnymi dolnymi zwierciadłami (struktura A), prawa strona obrazuje strukturę z dolnym zwierciadłem ograniczonym do szerokości $6 \mu\text{m}$ (struktura B)



Rys.5. Mapy temperatur dla lasera VCSEL z rezonatorem 10λ i zwierciadłami azotkowymi, zaprojektowanego na emisję fali o długości 414 nm. Źródło ciepła o wartości 50 mW umiejscowione jest w obszarze czynnym. Lewa część rysunku odpowiada strukturze ze zwierciadłami wykonanymi z GaN/AlInN (struktura D) natomiast prawa strona obrazuje strukturę ze zwierciadłami wykonanymi z GaN/AlN i warstwami super sieci (struktura C)



Rys.6. Mapy temperatur dla lasera VCSEL z rezonatorem 10λ i zwierciadłami dielektrycznymi z wbudowanym kontaktem ze złota (struktura B), zaprojektowanego na emisję fali o długościach 414 nm (po lewej) oraz 500 nm (po prawej). Źródło ciepła o wartości 50 mW umiejscowione jest w obszarze czynnym

Podsumowanie

W pracy porównano termiczne własności laserów VCSEL z różną konfiguracją dolnych zwierciadeł DBR. Najgorsze pod względem termicznym, jak można się było spodziewać, okazały się zwierciadła dielektryczne. Najlepiej wypadły zwierciadła azotkowe (wykonane z AlN/GaN z supersieciami). Wzrost temperatury w przypadku dielektrycznych DBR był aż o 73 K (dla 414 nm) oraz 70 K (dla 500 nm) wyższy niż w przypadku najlepszych zwierciadeł azotkowych. Pokazano, że efektywność cieplną dielektrycznych zwierciadeł DBR można jednak znacznie poprawić wbudowując w nie kontakt ze złota. To rozwiązanie powoduje, że dielektryczne DBR-y stają się porównywalne pod względem oporu cieplnego ze zwierciadłami azotkowymi. Zwierciadła natywne wykonane z materiałów AlInN/GaN mają mniejszy kontrast współczynnika załamania od AlN/GaN z supersieciami. Stąd konieczne jest zastosowanie większej liczby okresów (par AlInN/GaN). Ponadto trójskładnikowy materiał AlInN posiada dużo gorszą przewodność cieplną (około 5 W/m/K) w porównaniu do AlN (około 270 W/m/K) i GaN (około 150 W/m/K). W konsekwencji objawia się to gorszymi właściwościami cieplnymi lasera z dolnymi DBR wykonanymi z AlInN/GaN.

Z przeprowadzonych badań wynika także, że duży wpływ na warunki termiczne przyrządu ma fizyczna grubość rezonatora, szczególnie dla przypadku z dolnym dielektrycznym zwierciadłem DBR z wbudowanym pierścieniowym kontaktem ze złota, co obrazuje rysunek 3. Grubość rezonatora decyduje o efektywności odprowadzania ciepła w kierunku radialnym, a następnie poprzez pierścieniowy kontakt do chłodnicy. Dlatego też należałoby w dalszych rozważaniach przeprowadzić termiczną analizę dotyczącą optymalnej grubości rezonatora dla tak zaprojektowanego lasera.

Praca częściowo finansowana z projektu NCN nr UMO-2014/13/B/ST7/00633.

Praca jest związana tematycznie z realizowanym w latach 2009–2014 projektem POIG.01.03.01-00-159 InTechFun i powstała w okresie jego trwania.

Autorzy: mgr inż. Patrycja Śpiewak, dr inż. Michał Wasiak, dr hab. inż. Robert Piotr Sarzała, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, E-mail: patrycja.spiewak@edu.p.lodz.pl, michal.wasiak@p.lodz.pl, robert.sarzala@p.lodz.pl.

LITERATURA

- [1] Nakamura S. et al., Room temperature continuous wave operation of InGaN multi quantum well structure laser diodes, *Appl. Phys. Lett.*, nr 69 (1996), 4056-8
- [2] Leonard J.T. et al., Nonpolar III-nitride vertical-cavity surface-emitting laser with a photoelectrochemically etched air-gap aperture, *Appl. Phys. Lett.*, nr 108 (2016), 031111
- [3] Sarzała R.P., et al., Comprehensive self-consistent three-dimensional simulation of an operation of GaAs-based oxide-confined 1.3- μm quantum-dot (InGa)As/GaAs vertical-cavity surface-emitting lasers, *Optical and Quantum Electronics*, 36(4) (2004), 331–347
- [4] Wasiak M. et al., Numerical model of capacitance in verticalcavity surfaceemitting lasers, *J. Phys. D Appl. Phys.*, 49(17), (2016)
- [5] Kuc M. et al., Thermal crosstalk in arrays of III-N-based Lasers, *Materials Science and Engineering: B*, vol. 178(20) (2013), 1395-1402,
- [6] Lu T.-C. et al., Continuous wave operation of current injected GaN vertical cavity surface emitting lasers at room temperature, *Appl. Phys. Lett.* nr 97 (2010), 071114
- [7] Cosendey G. et al., Blue monolithic AlInN-based vertical cavity surface emitting laser diode on free-standing GaN substrate, *Appl. Phys. Lett.*, nr 101 (2012), 151113
- [8] Leonard J.T. et al., Comparison of nonpolar III-nitridevertical-cavity surface-emitting lasers with tunnel junction and ITO intracavity contacts, *Proc. SPIE 9748, Gallium Nitride Materials and Devices XI*, 97481B, (2016)