

Mody poprzeczne w azotkowym laserze typu VCSEL

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki modelowania półprzewodnikowego lasera złączonego z pionową wnęką rezonansową o emisji powierzchniowej. Laser zaprojektowano na emisję fali 414 nm w oparciu o materiały azotkowe. Modelowany przyrząd miał konstrukcję hybrydową, tzn. z jednej strony posiadał zwierciadła rodzime (AlN/GaN), a z drugiej dielektryczne Ta_2O_5/SiO_2 . W pracy wyznaczono rząd modu optycznego jaki wzbudza się w laserze w zależności od jego apertury elektrycznej, długości rezonatora oraz składu molowego jego obszaru czynnego. Dla wybranych warunków pracy określono także selektywność modową przyrządu.

Abstract. This paper presents results of numerical modeling of a nitride vertical cavity surface emitting laser. This structure of the laser was designed to emit wavelength of 414 nm. Construction of the analyzed laser is hybrid – the bottom DBR is a native AlN/GaN mirror and the top DBR is made from dielectric materials (Ta_2O_5 and SiO_2). In this paper we determined the order of transverse mode which is excited in the active region for different radius of electric aperture, different resonator thicknesses and concentration of indium in the quantum well. For selected parameters mode selectivity was determined. (**Transversal modes in nitride VCSELs**).

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

Keywords: GaN, semiconductor laser, VCSEL, numerical modelling.

Wprowadzenie

Lasery półprzewodnikowe to urządzenia o ogromnym potencjale aplikacyjnym. Są one składnikami zarówno urządzeń używanych w życiu codziennym, jak i elementami wyrafinowanej aparatury naukowej. Obok tradycyjnych laserów o emisji krawędziowej ogromne znaczenie mają lasery o emisji powierzchniowej z pionową wnęką rezonansową, w skrócie nazywane laserami typu VCSEL (ang. *Vertical Cavity Surface Emitting Laser*). Lasery typu VCSEL, pracując w sposób naturalny na pojedynczym modzie podłużnym, charakteryzują się znacznie lepszymi parametrami emitowanej wiązki promieniowania niż klasyczne lasery emitujące z krawędzi. Dodatkowo, mimo swojej znacznie bardziej skomplikowanej budowy wewnętrznej, są one często tańsze w masowej produkcji od laserów krawędziowych. Pomimo tak wyraźnych zalet tych konstrukcji na chwilę obecną azotkowe lasery o emisji powierzchniowej praktycznie nie istnieją, a zaprezentowane w ostatnich latach prototypy tych urządzeń charakteryzują się parametrami bardzo dalekimi od tych, jakie oczekiwane są przez ich ewentualnych użytkowników [1].

Jednym z większych problemów laserów VCSEL, szczególnie tych wykonanych z materiałów azotkowych, jest łatwe wzbudzenie się w ich rezonatorach poprzecznych modów optycznych wyższych rzędów i praca wielomodowa. W dużej mierze jest to wynikiem trudności z uzyskaniem efektywnego wstrzykiwania nośników do ich warstwy czynnej, co związane jest bezpośrednio z niską przewodnością elektryczną materiałów azotkowych typu p, ale także ze stosowanymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi.

W pracy określono rząd modu poprzecznego wzbudzającego się w laserze w zależności od jego parametrów konstrukcyjno-materiałowych, takich jak rozmiar apertury elektrycznej, długość rezonatora czy też skład molowy studni kwantowych InGaN/GaN stanowiących jego obszar czynny.

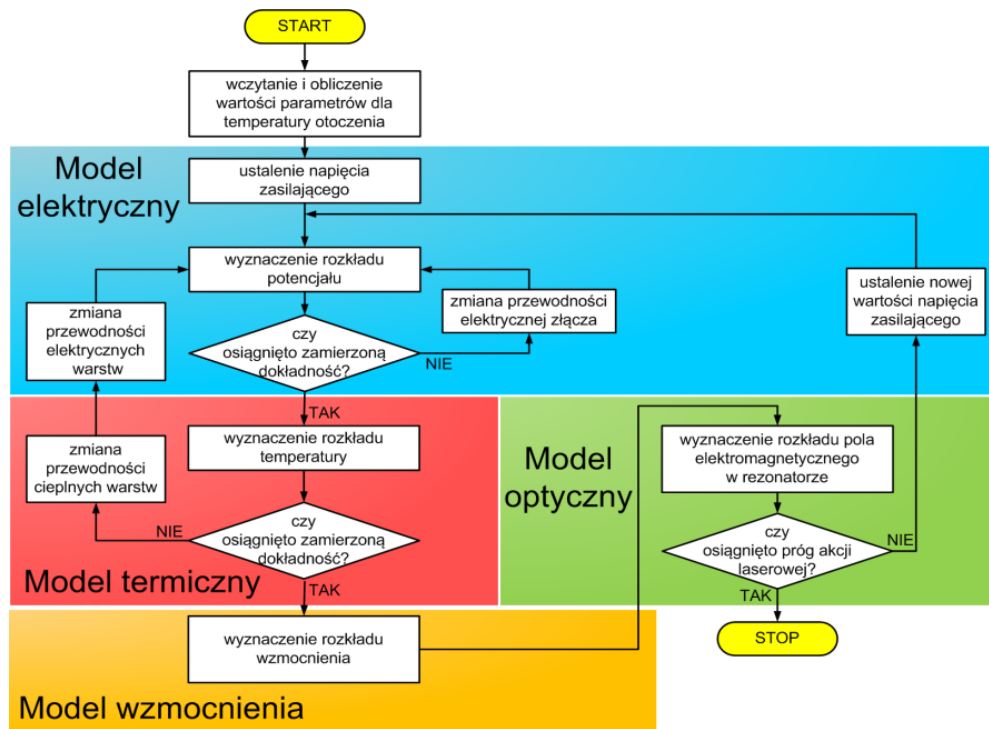
Model numeryczny

Analizę pracy lasera VCSEL przeprowadzono przy użyciu zaawansowanego samo-uzgodnionego modelu komputerowego. Model ten (patrz rys. 1) składa się z czterech zasadniczych modułów do obliczeń rozptyłu ciepła, struktury pasmowej obszaru czynnego i wzmocnienia materiałowego, rozptyłu prądu oraz zjawisk optycznych. Użyteczność modelu została potwierdzona np. w pracy [2], a jego szczegóły przedstawiono w pracy [3]. Moduł cieplny pozwala wyznaczyć temperaturę nie tylko w strukturze epitaksjalnej, ale również w elementach

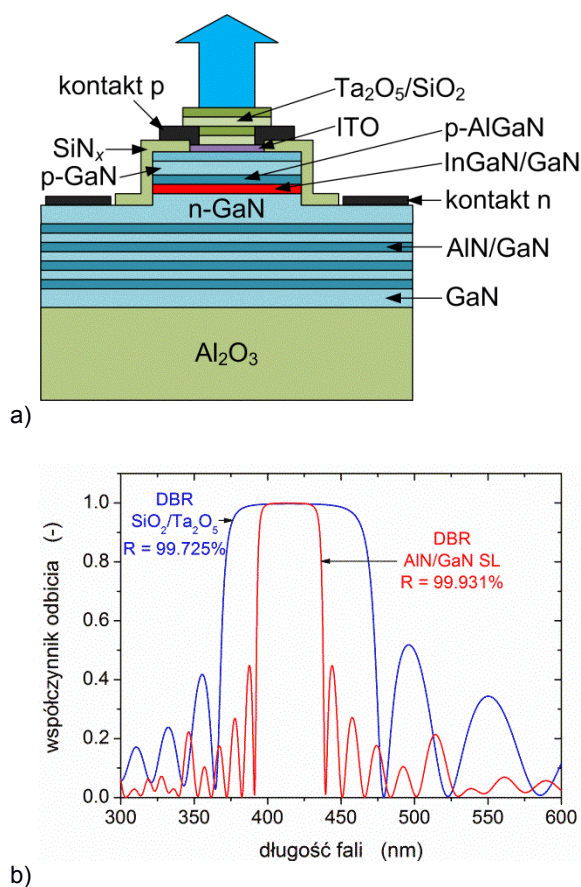
montażowych takich jak: luty, chłodnice czy obudowy. Obliczenia prowadzone są z uwzględnieniem temperaturowych zależności parametrów materiałowych takich jak: przewodność cieplna, współczynnik załamania czy współczynnik absorpcji poszczególnych materiałów w tzw. samouzgodnieniu. Moduł struktury pasmowej umożliwia wyznaczenie poziomów energetycznych w studniach kwantowych obszaru czynnego. Moduł wzmocnienia pozwala wyznaczyć obsadzenie poziomów energetycznych w studniach kwantowych oraz wzmocnienie materiałowe generowane w obszarze czynnym. Moduł transportu nośników uwzględnia mechanizmy rekombinacyjne w postaci niepromienistej rekombinacji na defektach, rekombinacji spontanicznej, rekombinacji Augera oraz rekombinacji wymuszonej i związanej z nią zjawiska wypalania nośników. Ponadto umożliwia analizę termicznej ucieczki nośników ze studni. Moduł optyczny umożliwia wyznaczenie rozkładu natężenia pola elektromagnetycznego w strukturze. Przy jego pomocy można np. szczegółowo badać zjawiska związane ze wzbudzeniem się poprzecznych modów optycznych i selektywnością modową.

Struktura modelowanego lasera VCSEL

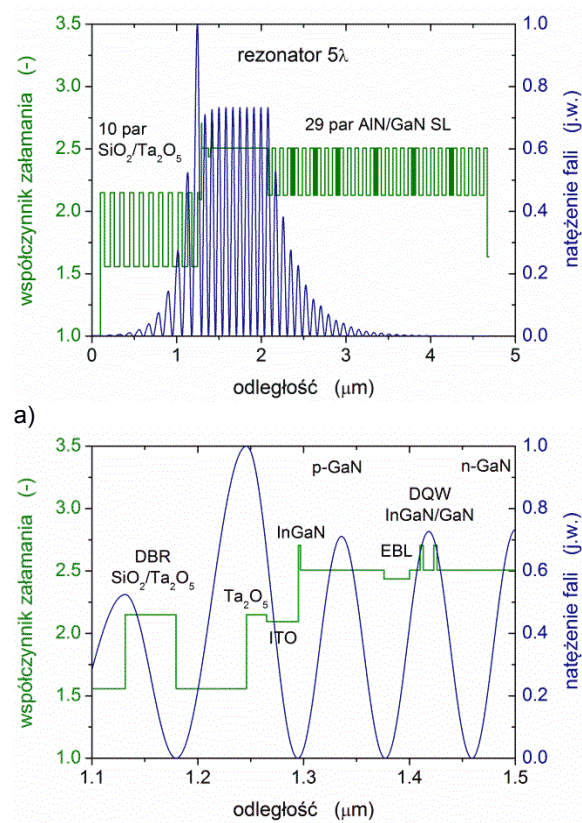
Modelowany laser zaprojektowany został na bazie konstrukcji przedstawionej w pracy [4]. Charakterystyczną cechą tej struktury są hybrydowe zwierciadła DBR (ang. *Distributed Bragg Reflector*): po stronie n wykonane z materiałów azotowych AlN/GaN, a po stronie p z materiałów dielektrycznych Ta_2O_5/SiO_2 . W celu rozładowania naprężeń mechanicznych wynikających z niedopasowania sieciowego warstw AlN/GaN niektóre warstwy zwierciadła DBR zaprojektowano w postaci supersieci AlN/GaN o małym okresie. Zwierciadło przednie zaprojektowano tak, aby jego współczynnik odbicia wynosił 99,725%, a tylne tak, aby analogiczny współczynnik wynosił 99,931% (patrz rys. 2b). W celu zapewnienia dopływu prądu do centrum struktury po stronie p zaprojektowano warstwę półprzezroczystego kontaktu w postaci warstwy ITO (ang. *Indium-Tin-Oxide*) o grubości 30 nm poprzedzonej 2 nm warstwą $In_{0.1}Ga_{0.9}N$. Z uwagi na wysoką absorpcję wymienionych obszarów, konstrukcję rezonatora należało zaprojektować tak, aby warstwy te znalazły się w węźle fali stojącej wygenerowanej w rezonatorze lasera. Możliwe to było dzięki dodaniu między ITO i zwierciadłem DBR dodatkowej warstwy Ta_2O_5 o odpowiednio dobranej grubości (19 nm). Obszar czynny stanowił zespół dwóch studni kwantowych InGaN/GaN o szerokości 3 nm każda umieszczonych w strzałce fali (patrz rys. 3a i 3b) zawierających od 13 do 14% indu.



Rys. 1. Schemat obliczeń samouzgodnionych zastosowanych przy analizie lasera VCSEL



Rys. 2. a) Schemat struktury modelowanego lasera VCSEL oraz b) obliczona odbijalność jego zwierciadła tylnego i przedniego



Rys. 3. a) Rozkład fali stojącej w rezonatorze lasera VCSEL oraz b) powiększony fragment z naniesionymi detalami konstrukcyjnymi

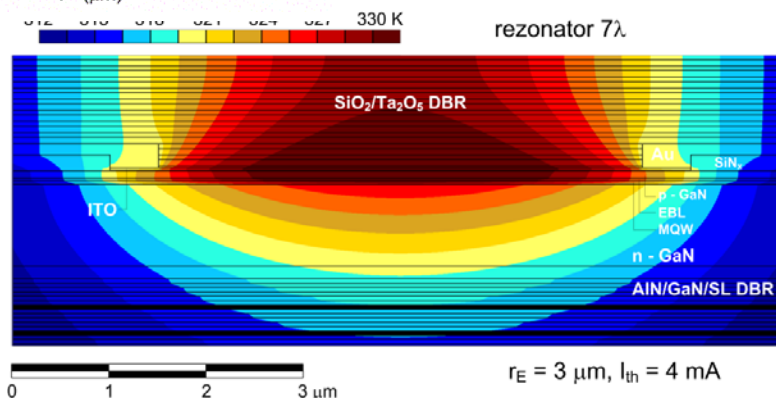
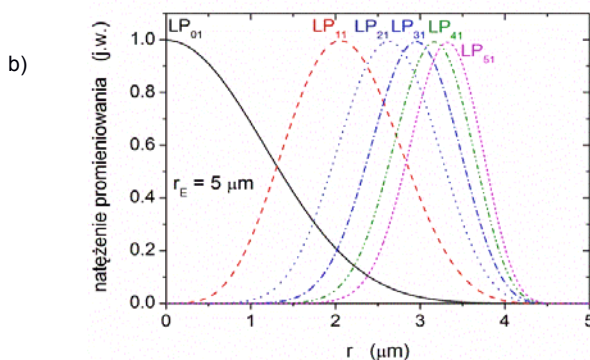
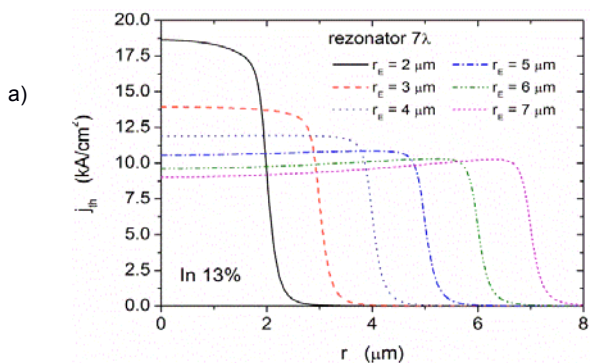
Parametry materiałowe poszczególnych warstw użyte do obliczeń elektryczno-ciepłych, takie jak przewodności cieplne i elektryczne, można znaleźć np. w pracy [5]. Podstawowe parametry użyte do obliczeń optycznych zamieszczono w tabeli 1.

Wyniki obliczeń

Mimo że laser VCSEL pracuje w sposób naturalny na pojedynczym modzie podłużnym, to w konstrukcjach tych bardzo łatwo wzbudzą się mody poprzeczne wyższych rzędów. Może to znacznie pogorszyć jakość emitowanej wiązki promieniowania. Wynika to z dużych trudności z zapewnieniem jednorodnego wstrzykiwania prądu do obszaru czynnego lasera VCSEL oraz z dość silnego optycznego ograniczenia radialnego sprzyjającego wzbudzeniu się modów wyższego rzędu, które często występuje w tego typu przyrządach. Opisane efekty są szczególnie silne dla azotkowych laserów VCSEL i nasilają się wraz z poszerzaniem apertury ich obszaru czynnego. W pracy przeprowadzono obliczenia dla szerokiego zakresu zmian apertury obszaru czynnego, która w większości przypadków określona jest przez aperturę elektryczną

Tabela 1. Wybrane parametry materiałowe stosowane podczas modelowania zjawisk optycznych określone dla temperatury 300 K i fali 414 nm

materiał	GaN	AlN	In _{0,1} GaN	Al _{0,2} GaN	SiO ₂	Ta ₂ O ₅	ITO	SiN _x	Au
współczynnik załamania [-]	2.506	2.130	2.765	2.420	1.56	2.15	2.095	2.07	1.64
absorpcja [cm ⁻¹]	-0.67	-0.001	-3600	-0.002	-1	-1	-1000	-1	-6e5



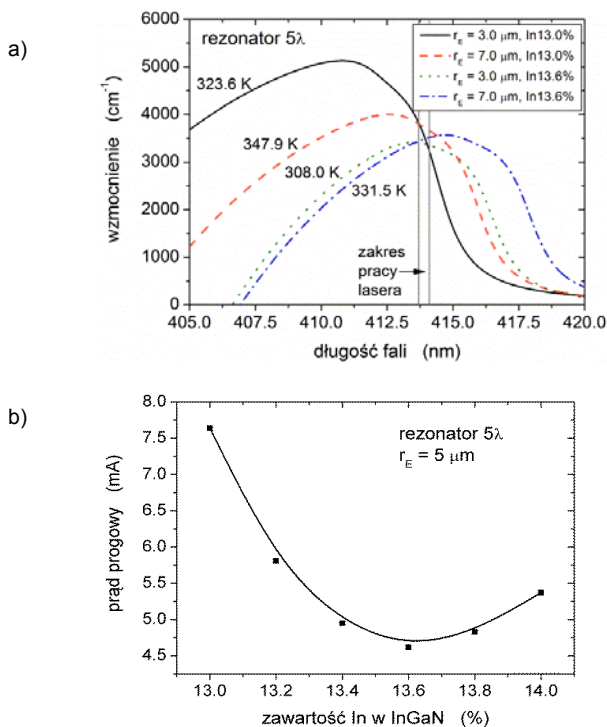
Rys. 5. Przykładowy rozkład temperatury w otoczeniu obszaru czynnego, policzony dla warunków progowych akcji laserowej lasera z rezonatorem 7 lambda i aperturą elektryczną o promieniu 3 micrometers

przyrządu. Na rysunku 4a przedstawiono rozkłady gęstości prądu wstrzykiwanego do warstwy czynnej lasera. Można zauważyć, że wraz z poszerzeniem apertury rozkład prądu staje się bardziej niejednorodny. Sprzyja to wzbudzeniu się modów poprzecznych wyższych rzędów, których profil (patrz rys. 4b) staje się bardziej dopasowany do wspomnianego profilu prądu, a co za tym idzie także do profilu wzmocnienia obszaru czynnego lasera. Analizując rysunek 4b warto zauważyć, że mody ograniczone są do współrzędnej r równej około 4,5 micrometers, mimo że promień apertury elektrycznej wynosi 5 micrometers. Dzieje się tak dlatego, że dolna część górnych zwierciadeł DBR ma promień 4,5 micrometers, a między $r = 4,5$ micrometers i $r = 5$ micrometers jest obszar silnie absorbującego złota (porównaj np. rys. 5), który zapewnia dopływ prądu.

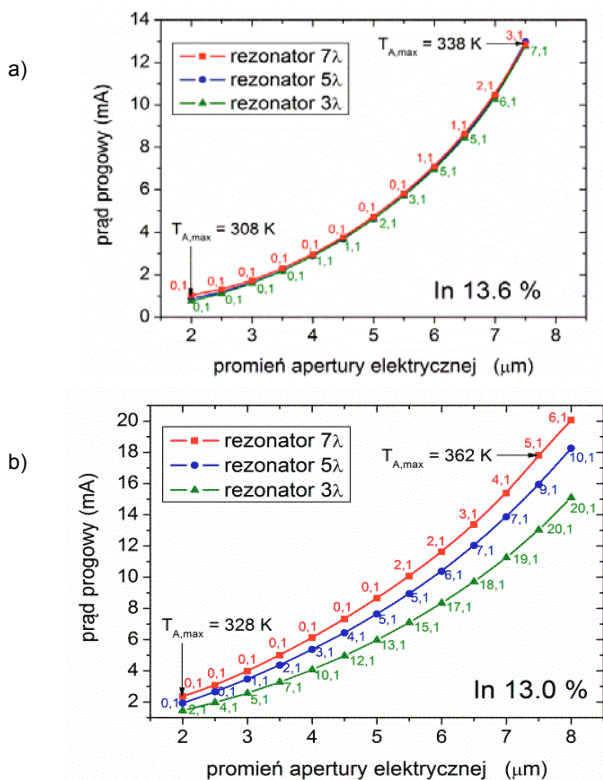
Rys. 4. a) Rozkład gęstości prądu wstrzykiwanego do obszaru czynnego lasera z rezonatorem 7 lambda dla różnych apertur elektrycznych oraz b) przykładowe profile modów poprzecznych

Przepływ prądu przez strukturę lasera powoduje wydzielanie się ciepła, a co za tym idzie wzrost temperatury w jego wnętrzu. Przykładowy rozkład temperatury w otoczeniu obszaru czynnego pokazany został na rysunku 5. Wzrost temperatury powoduje zmianę parametrów materiałowych, w szczególności zmianę przerwy energetycznej materiałów, z których składa się obszar czynny lasera. Powoduje to m.in. przesuwanie się spektrum wzmocnienia obszaru czynnego, którego profil zależy także istotnie od jego składu molowego (patrz rys. 6a). Szybkie przesuwanie się profilu wzmocnienia względem pików rezonatora jest w laserach VCSEL podstawową przyczyną zaniku akcji laserowej, a względne wstępne zestrojenie lub odstrojenie tych elementów może służyć do optymalizacji parametrów eksploatacyjnych tych przyrządów np. stabilizacji lub minimalizacji prądu progowego, co pokazano na rysunku 6b.

W pracy przeanalizowano dwa podstawowe przypadki jakie występują w tego typu przyrządach tzn. laser z wstępnie dostrojonym maksimum spektrum wzmocnienia do pików rezonatora oraz laser wstępnie odstrojony (patrz rys. 6a).



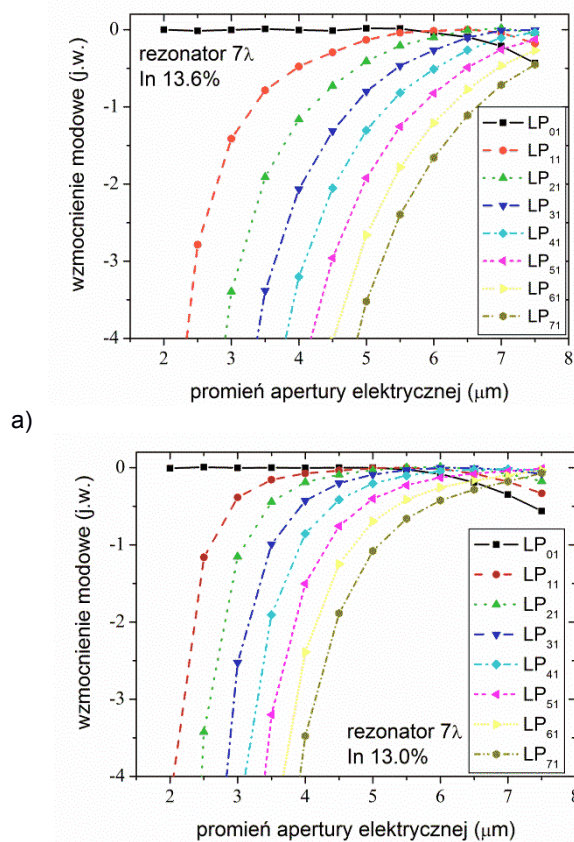
Rys. 6. a) Zależność wzmocnienia obszaru czynnego lasera od długości fali dla różnych składów molowych studni kwantowych InGaN/GaN i apertur elektrycznych oraz b) wartość prądu progowego lasera z aperturą elektryczną o promieniu $r_E = 5 \mu\text{m}$ w zależności od składu molowego studni kwantowych InGaN/GaN



Rys. 7. Wartość prądu progowego lasera w zależności od promienia apertury elektrycznej dla studni kwantowych InGaN/GaN zawierających a) 13,6% In oraz b) 13% In. Na rysunku pokazano także rząd modu poprzecznego o najniższym progu wzbudzenia oraz temperaturę obszaru czynnego

Konstrukcja zestrojona zawierała obszar czynny ze studniami kwantowymi InGaN/GaN z 13,6% zawartością indu, zaś konstrukcja odstrojona zawierała go 13%. Dla każdej z tych konstrukcji wyznaczono zależność prądu progowego od promienia apertury elektrycznej. Wyniki przedstawione zostały na rysunku 7.

Podsumowując uzyskane wyniki należy stwierdzić, że praca na podstawowym modzie poprzecznym tzn. LP₀₁ możliwa jest tylko dla apertur obszaru czynnego do około 6 – 9 μm. Dla większych apertur mamy pracę na modach wyższego rzędu, często pracę wielomodową. Potwierdza to rysunek 8, na którym pokazano względne wzmocnienie modowe poszczególnych modów w funkcji promienia apertury obszaru czynnego analizowanych laserów VCSEL. Jedną z metod selekcji modowej oraz zapewnienia pracy lasera VCSEL na podstawowym modzie poprzecznym jest zaprojektowanie dłuższego rezonatora. Analiza taka została przedstawiona na rysunku 7. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że analizowane konstrukcje azotkowych laserów VCSEL, posiadające krótsze rezonatory (szczególnie te z odstrojonym obszarem czynnym), cechują się pracą wielomodową na modach poprzecznych wysokich rzędów. Efekt ten uwydatniony jest też przez to, że długość fali modów wyższego rzędu zmniejsza się wraz ze wzrostem rzędu modu. W przypadku lasera odstrojonego mniejsza długość fali zapewnia większe wzmocnienie materiałowe (porównaj rys. 6a), a co za tym idzie większe wzmocnienie modowe i niższy próg wzbudzenia modu. Z uzyskanych wyników wynika także, że w przypadku laserów dostrojonych szybka ucieczka spektrum wzmocnienia względem pików rezonatora powoduje, że ich praca ograniczona jest do temperatur około 20 K niższych niż w przypadku laserów odstrojonych.



Rys. 8. Względne wzmocnienie modowe poszczególnych modów poprzecznych w zależności od promienia apertury elektrycznej lasera z rezonatorem 7λ i zawartością indu w studni kwantowej InGaN/GaN a) 13,6% i b) 13%

LITERATURA

- [1] Sarzała R.P., Piskorski Ł., Nakwaski W., Azotkowe lasery typu VCSEL, *Elektronika*, nr 11, 104-107, 2014
- [2] Sarzała R.P., Czyszanowski T., Nakwaski W., Effect of relief aperture on single-fundamental-mode emission of 1.3- μm GaInNAs GaAs-based VCSELs, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 50, Issue 11, 874-881, 2014
- [3] Sarzała R.P. and Nakwaski W., Optimisation of the 1.3- μm GaAs-based oxide-confined (GaIn)(NAs) vertical-cavity surface-emitting lasers for their low-threshold room-temperature operation (invited), *Journal of Physics: Condensed Matter* vol. 16, S3121-S3140, 2004
- [4] Lu T.-C., Chen S.-W., Wu T.-T., Tu P.-M., Chen C.-K., Chen C.-H., Li Z.-Y., Kuo H.-C., and Wang S.-C., Continuous wave

operation of current injected GaN vertical cavity surface emitting lasers at room temperature, *Appl. Phys. Lett.* 97, 071114, 2010

- [5] Kuc M., Sarzała R.P., Nakwaski W., Thermal crosstalk in arrays of III-N-based Lasers, *Materials Science and Engineering: B*, vol. 178, no. 20, 1395-1402, 2013

Autorzy: inż. Magdalena Marciniak, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, E-mail: 193840@edu.p.lodz.pl; inż. Patrycja Śpiewak, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, E-mail: 193848@edu.p.lodz.pl; inż. Marta Więckowska, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź; dr hab. inż. Robert Piotr Sarzała, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, E-mail: robert.sarzala@p.lodz.pl;