

## Projekt azotkowego lasera VCSEL z bezpośrednim wstrzykiwaniem prądu do obszaru czynnego

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono projekt azotkowego lasera VCSEL z bezpośrednim wstrzykiwaniem prądu do obszaru czynnego lasera. Bezpośrednie wstrzykiwanie prądu do obszaru czynnego uzyskano stosując zamiast górnego zwierciadła DBR zwierciadło w postaci metalizowanej monolitycznej siatki podfalaowej o wysokim kontraście współczynnika załamania. Korzystając z autorskiego oprogramowania powstałego w Zespole Fotoniki w Instytucie Fizyki Politechniki Łódzkiej przeprowadzono obliczenia numeryczne pozwalające wyznaczyć podstawowe parametry pracy zaproponowanej struktury laserowej.

**Abstract.** The paper presents the design of the nitride-based VCSEL enabling direct current injection into the active region of the laser. The direct injection of current into the active region is possible due to semiconductor-metal subwavelength grating used as top facet mirror. Using the multiphysics model of laser operation developed in the Photonics Team at the Institute of Physics of the Lodz University of Technology, numerical calculations were performed determining fundamental operation parameters of the proposed nitride-based VCSEL. (*Design of nitride-based VCSEL with vertical current injection*)

**Słowa kluczowe:** lasery półprzewodnikowe, modelowanie, laser VCSEL, GaN, HCG

**Keywords:** semiconductor lasers, numerical simulation, VCSEL, GaN, HCG

### Wprowadzenie

Półprzewodnikowe lasery o emisji powierzchniowej z pionową wnęką rezonansową nazywane laserami VCSEL (ang. *Vetical-Cavity Surface-Emitting Lasers*) cechują się wieloma cechami przewyższającymi własności wielu struktur laserów o emisji krawędziowej [1]: niska cena produkcji, kołowa i o małej rozbieżności wiązka promieniowania, stabilność emitowanej fali, wąskie spektrum emisji, łatwość wytwarzania na ich bazie dwuwymiarowych matryc laserowych, praca na pojedynczym modzie podłużnym, szybkość modulacji itp.

Azotkowe lasery krawędziowe weszły do użytku komercyjnego około 20 lat temu, natomiast pierwsze konstrukcje azotkowych laserów VCSEL zasilanych elektrycznie i emitujących falę ciągłą w temperaturze pokojowej pojawiły dopiero 10 lat temu [2]. Mimo upływu lat nadal nie udało się wytworzyć konstrukcji azotowego lasera VCSEL nadającej się do komercjalizacji. Podstawowymi problemami technicznymi w tego typu przyrządach są po pierwsze problemy z wytworzeniem efektywnych zwierciadeł DBR (materiały GaN i AlN są niedopasowane sieciowo do siebie) oraz duża rezystancja materiału GaN typu p powodująca konieczność zastosowania złącza tunelowego [3] lub warstwy półprzezroczystego kontakt ITO (ang. *Indium Tin Oxide*) [4]. Oba te rozwiązania przysparzają dużych trudności technologiczno-konstrukcyjnych oraz wprowadzają duże straty optyczne utrudniające zajęcie akcji laserowej.

W ostatnich latach pokazaliśmy, że górne zwierciadło DBR (ang. *Distributed Bragg Reflector*) można z powodzeniem zastąpić monolityczną siatką podfalaową o wysokim kontraście MHCG (ang. *Monolithic High-refractive-index Contrast Gratings*) [5]. Następnie zaproponowaliśmy wykonanie częściowej metalizacji tej siatki (w rowkach struktury HCG), co umożliwia jej wykorzystanie zarówno

jako wysoko odbijającego zwierciadła ale także jako kontaktu po stronie p struktury laserowej [6]. Rozwiązanie to może być szczególnie interesujące w azotkowych laserach VCSEL ze względu na wysoką rezystywność materiału p-GaN. Powinno ono umożliwić bezpośrednie i jednorodne wstrzykiwanie prądu do obszaru czynnego tych laserów jednocześnie eliminując potrzebę stosowania takich elementów jak złącze tunelowe, warstwa ITO czy dielektryczne zwierciadła DBR. Korzystając z autorskiego oprogramowania powstałego w Zespole Fotoniki w Instytucie Fizyki Politechniki Łódzkiej zaprojektowaliśmy strukturę azotkowego lasera VCSEL z metalizowaną monolityczną siatką HCG, a następnie przeprowadziliśmy obliczenia numeryczne pozwalające wyznaczyć podstawowe parametry pracy tego przyrządu.

### Model

Do modelowania działania zaproponowanej przez nas konstrukcji azotkowego lasera VCSEL zastosowaliśmy nasz autorski model numeryczny, składający się z następujących części:

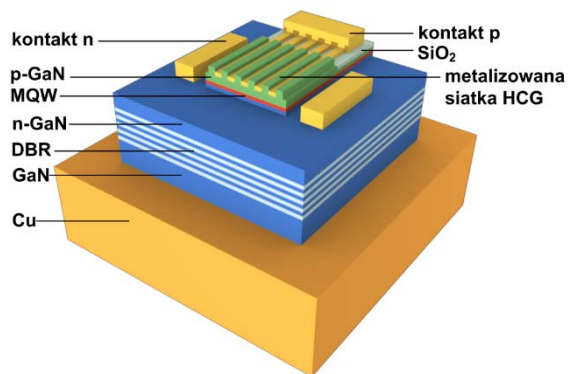
- 1) w pełni trójwymiarowy model optyczny bazujący na metodzie admittancji fal płaskich PWAM (ang. *Plane-Wave Admittance Method*) – pozwalający wyznaczyć rozkład pola optycznego w całej objętości lasera VCSEL, a także wyznaczyć długość fali poszczególnych modów oraz określić ich wzmocnienie modowe,
- 2) quasi-trójwymiarowy model elektryczny bazujący na metodzie elementów skończonych FEM (ang. *Finite Element Method*) – pozwalający wyznaczyć rozkład gęstości prądu w całej strukturze lasera oraz rozkład koncentracji nośników w jego obszarze czynnym,
- 3) trójwymiarowy model cieplny bazujący na metodzie FEM – umożliwiający wyznaczenie rozkładu temperatury w całej objętości lasera oraz jego chłodnicy,

4) model rekombinacyjny korzystający ze Złotej Reguły Fermiego – dzięki któremu można obliczyć spektrum wzmocnienia obszaru czynnego lasera.

Integralną częścią modelu jest dokładny opis wszystkich istotnych i zwykle nieliniowych zależności między poszczególnymi zjawiskami fizycznymi, tworzący skomplikowaną sieć oddziaływań. W rezultacie w każdej pętli samouzgodnionych obliczeń trójwymiarowe rozkłady wszystkich parametrów modelu są przeliczane biorąc pod uwagę, nie tylko skład chemiczny poszczególnych warstw, ale również obliczone w poprzedniej pętli trójwymiarowe rozkłady temperatury, koncentracji nośników i gęstości prądu. Szczegóły modelu można znaleźć w pracach [7, 8].

### Modelowana struktura

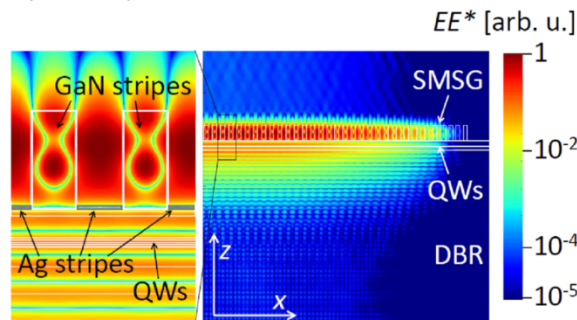
Rysunek 1 przedstawia trójwymiarowy schemat zaproponowanej przez nas struktury azotowego lasera VCSEL z uwzględnieniem jej najważniejszych elementów. Laser za-projektowany został do emisji fali około 414 nm. Założono, że struktura laserowa zostanie wykonana na płytce podłożowej z GaN, której grubość może zmieniać się w zakresie 20-100  $\mu\text{m}$ , szerokość 100-300  $\mu\text{m}$ , a całość zostanie posadowiona na miedzianej chłodnicy, której spód utrzymywany będzie w temperaturze 300 K. Dolne zwierciadło lasera za-projektowano jako typowe zwierciadło DBR wykonane z 46 par warstw AlInN/GaN, albo z 35.5 pary materiałów AlN/GaN. Ze względu na niedopasowanie sieciowe AlN i GaN w tym typie zwierciadeł co 5.5 pary zwierciadła (bliżej rezonatora co 3 pary) jedną z jego ćwierćfalowych warstw zaprojektowano jako warstwę supersieci (SL – ang. *superlattice*) o bardzo małym okresie, co zmniejsza naprężenia i nie powoduje pęknięcia warstw. Obszar czynny składał się z dwóch 3 nm grubości studni kwantowych z InGaN rozdzielonych 10 nm grubości barierami z GaN. Od strony p struktury zastosowano 20 nm warstwę AlGaIn z 20% Al. Zapobiegającą ucieczce prądu i poprawiającą sprawność wstrzykiwania nośników do studni kwantowych. Górne zwierciadło lasera wykonane zostało jako monolityczna siatka HCG wykonana z GaN o okresie zmieniającym się od 350 do 410 nm i współczynnikiem wypełnienia około 0.5. W rowkach struktury HCG umieszczono metalowe paski wykonane z Ag o szerokości około 150 nm i grubości do 50 nm. Rozmiary poprzeczne opisywanej siatki były zmieniane i zawierały się w przedziale 4-50  $\mu\text{m}$ . Rezonator lasera był wykonany z GaN, a jego długość była zmieniana od 2 do 30 długości fali. W przypadku dłuższych rezonatorów prawie cała jego długość związana była z warstwą GaN po stronie n struktury. Ze względu na słabą przewodność elektryczną warstw AlN/GaN tworzących dolny DBR, kontakt od strony n zaprojektowano jako tzw. kontakt wewnętrzny (ang. *intracavity contact*).



Rys. 1. Schemat zaproponowanej struktury azotowego lasera VCSEL z metalizowaną monolityczną siatką HCG

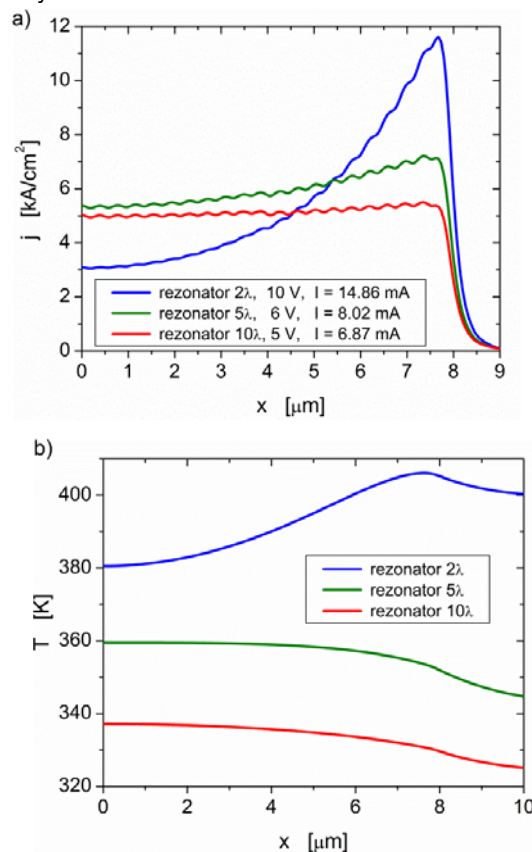
### Wyniki

Jednym z kluczowych elementów było właściwe zaprojektowanie górnego zwierciadła, stanowiącego jednocześnie kontakt elektryczny od strony p, umożliwiając bezpośrednio wstrzykiwanie prądu do obszaru czynnego. Rysunek 2 przedstawia rozkład pola optycznego w zaprojektowanym przez nas zwierciadle.



Rys. 2. Rozkład natężenia pola elektromagnetycznego dla modu podstawowego w strukturze analizowanego lasera (prawa strona) oraz powiększony fragment (lewa strona) pokazujący dwa wybrane paski metalizowanej siatki HCH

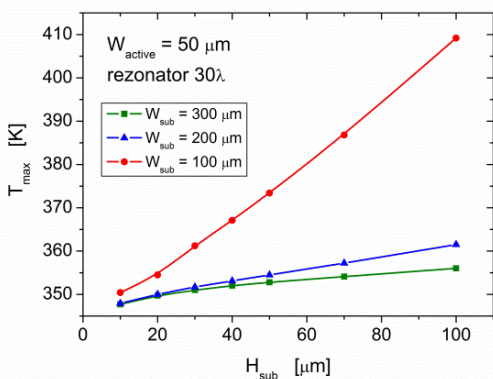
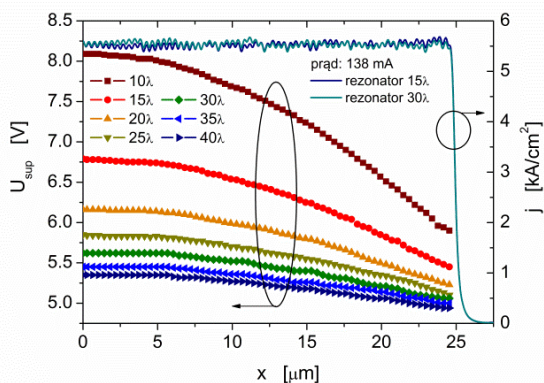
Zwierciadło to zapewnia duży współczynnik odbicia (98.6-99.9%) i ograniczenie boczne dla wzbudzonego w rezonatorze modu (dzięki zaburzeniu periodyczności pasków na krańcach struktury HCG), a także rozsądne straty optyczne kierując większość światła do pasków struktury HCG.



Rys. 3. Rozkład gęstości prądu wstrzykiwanego do obszaru czynnego lasera w przypadku konstrukcji o różnej długości rezonatora (a) oraz odpowiadające im rozkłady temperatury w warstwie czynnej (b)

Obliczenia elektryczno-ciepne pokazały, że zwiększając długość rezonatora można uzyskać jednorodny rozkład gęstości prądu wstrzykiwanego poprzez metalizowane

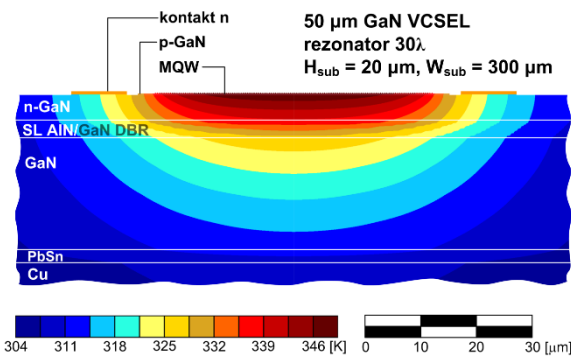
paski zwierciadła do obszaru czynnego lasera, a jednocześnie zmniejszyć wzrost temperatury w jego wnętrzu. Odpowiednie rozkłady gęstości prądu i odpowiadające im rozkłady temperatury w obszarze czynnym lasera przedstawia rys. 3. Obliczenia te wykonano dla lasera z dość dużym jak na azotkowe lasery VCSEL obszarem czynnym o wymiarach 16x16 μm i dolnymi zwierciadłami w postaci AlInN/GaN. W obliczeniach założono, że wartość prądu potrzebna do uzyskania akcji laserowej wynosi około 5.5 kA/cm<sup>2</sup>. W przypadku obszarów czynnych o wspomnianych rozmiarach wzrost temperatury w laserze wydaje się akceptowalny, jednak dla większych obszarów czynnych należy dokonać dalszej optymalizacji struktury. Podstawowym ograniczeniem stają się tu zwierciadła AlInN/GaN. Niewielki kontrast współczynnika załamania między tymi materiałami (około 8%) wymusza stosowanie wielu okresów DBR, co w połączeniu z niską przewodnością cieplną AlInN (4.87 W/mK) [9] powoduje dużą oporność termiczną struktury. Obliczenia pokazały, że wymiana tych zwierciadeł na zwierciadła AlN/GaN z supersieciami zdecydowanie polepsza własności cieplne lasera, prowadząc do obniżenia temperatury w jego wnętrzu nawet o około 50%.



Rys. 4. Napięcie na poszczególnych paskach metalizowanego zwierciadła HCG w zależności od ich oddalenia od centrum struktury pozwalające uzyskać jednorodną gęstość prądu wstrzykiwanego do obszaru czynnego lasera (lewy rysunek) oraz zależność maksymalnej temperatury we wnętrzu lasera w zależności od szerokości  $W_{sub}$  i grubości  $H_{sub}$  podłoża (prawy rysunek)

Następnie wykonano obliczenia termiczno-elektryczne dla laserów z dolnym zwierciadłem w postaci struktury DBR AlN/GaN z supersieciami oraz o bardzo dużych rozmiarach obszaru czynnego tzn. nawet do około 50x50 μm. Okazało się, że dla tak dużych obszarów czynnych rozkład wstrzykiwanego prądu do warstwy czynnej staje się niejednorodny nawet przy zwiększaniu długości rezonatora lasera do 30λ. Wynika to z konieczności wykonania dolnego

kontaktu jako kontaktu wewnątrzwnętkowego (z bocznym wstrzykiwaniem). Zastosowanie metalizowanej monolitycznej siatki HCG z wieloma oddzielnymi paskami spełniającymi rolę kontaktu umożliwia jednak przyłożenie do poszczególnych pasków lub grup pasków trochę innych potencjałów. Dobierając właściwie potencjał na poszczególnych paskach można uzyskać jednorodne wstrzykiwanie prądu na całej powierzchni obszaru czynnego. Pokazuje to rys. 4 w przypadku lasera z obszarem czynnym 50x50 μm i różnymi długościami rezonatora. Widać, że maksymalne wahania gęstości prądu nie przekraczają 5%, a po uwzględnieniu dyfuzji nośników dają bardzo jednorodne zasilanie obszaru czynnego lasera.



Rys. 5. Izotermie temperatury w laserze z obszarem czynnym 50x50 μm uzyskane w przypadku wstrzykiwania jednorodnego prądu o wartości 5.5 kA/cm<sup>2</sup>

Poprawę warunków cieplnych lasera można uzyskać także poprzez optymalizację dalszych elementów jego struktury takich jak np. grubość i szerokość płytki podłożowej. Rysunek 4 (prawa część) przedstawia wpływ właśnie szerokości podłoża i jego grubości na maksymalną temperaturę w laserze. Widzimy, że zwiększając szerokość podłoża ze 100 do 300 μm i pocieniając je do 20 μm możemy znacznie obniżyć przyrost temperatury w laserze (o około 50%). Rysunek 5 przedstawia izotermie temperatury w centralnej części lasera z obszarem czynnym o rozmiarach 50x50 μm. W konstrukcji tej płytka podłożowa o szerokości 300 μm została pocieniona do 20 μm. Zastosowano też zwierciadła AlN/GaN z supersieciami o lepszych parametrach cieplnych niż zwierciadła AlInN/GaN. W celu wydajniejszego odprowadzenia ciepła z obszaru czynnego zastosowano rezonator o długości 30λ. Wszystkie te zabiegi doprowadziły do tego, że maksymalny wzrost temperatury w zaprojektowanym azotowym laserze VCSEL ze wspomnianym wcześniej bardzo dużym obszarem czynnym wyniósł około 50 K. Taki wzrost temperatury osiągnięto przy założeniu wartości gęstości prądu wstrzykiwanego do obszaru czynnego na poziomie 5.5 kA/cm<sup>2</sup>.

## Podsumowanie

W pracy pokazano, że istnieje teoretyczna możliwość zastosowania metalizowanej monolitycznej siatki HCG do bezpośredniego wstrzykiwania prądu do obszaru czynnego azotowego lasera VCSEL. Odpowiednia optymalizacja struktury laserowej umożliwia otrzymanie przyrządów z obszarami czynnymi o wielkości nawet 50x50 μm przy rozsądnym wzroście temperatury we wnętrzu urządzenia. Wyniki pokazują, że koncepcja zastosowania metalizowanego monolitycznego zwierciadła HCG jako zarówno przedniego zwierciadła laserowego jak i kontaktu po stronie p, umożliwiającego bezpośrednie wstrzykiwanie prądu do obszaru czynnego laserów azotkowych VCSEL, wydaje się być bardzo obiecująca.

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:** dr hab. inż. Robert Sarzała Instytut Fizyki Politechnika Łódzka ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, dr hab. inż. Tomasz Czyszanowski Instytut Fizyki Politechnika Łódzka ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź,

#### LITERATURA

- [1] R. Michalzik, VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (Berlin: Springer-Verlag) 2013.
- [2] T. C. Lu, C. C. Kao, H. C. Kuo, G. S. Huang, and S. C. Wang, "CW lasing of current injection blue GaN-based vertical cavity surface emitting laser", Appl. Phys. Lett., vol. 92, no. 14, p.141102, 2008.
- [3] J. T. Leonard et al., "Demonstration of a III-nitride vertical-cavity surface-emitting laser with a III-nitride tunnel junction intracavity contact", Appl. Phys. Lett., vol. 107, no. 9, p. 091105, 2015.
- [4] T. Hamaguchi et al., "Milliwatt-class GaN-based blue vertical-cavity surface-emitting lasers fabricated by epitaxial lateral overgrowth", Phys. Status Solidi A, vol. 213, no. 5, pp. 1170–1176, 2016.
- [5] M. Gębski, et al., "Monolithic high-index contrast grating: a material independent high-reflectance VCSEL mirror" Opt. Exp., 23, 11674 (2015).
- [6] T. Czyszanowski, et al., Subwavelength grating as both emission mirror and electrical contact for VCSELs in any material system Sci. Rep. 7, 40348 (2017).
- [7] R. P. Sarzała and W. Nakwaski, "Optimisation of the 1.3- $\mu$ m GaAs-based oxide-confined (GaIn)(NAs) vertical-cavity surface-emitting lasers for their low-threshold room-temperature operation," J. Phys Cond. Mat. vol. 16, art. S3121, 2004.
- [8] M. Dems, R. Kotynski, K. Panajotov, "Planewave admittance method—A novel approach for determining the electromagnetic modes in photonic structures," Opt. Exp., vol. 13, pp. 3196–3207, 2005.
- [9] H. Tong et al., "Thermoelectric properties of lattice-matched AlInN alloy grown by metal organic chemical vapor deposition," Appl. Phys. Lett. vol. 97, no.11, p.112105, 2010.