

doi:10.15199/48.2022.09.36

Tłumienie efektu *thermal crosstalk* w linijkach laserowych

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki termicznej analizy numerycznej matrycy azotkowych laserów o emisji krawędziowej emitujących fale 540 nm. Rozważono trzy różne rozwiązania konstrukcyjne zapewniające efektywne ograniczenie modu w rejonie obszaru czynnego emitera. Obliczenia przeprowadzono dla matryc zawierających od dwóch do dziesięciu emiterów. Wyniki pokazują, iż równomierny rozkład temperatury w poszczególnych emiterach można uzyskać bez wyrafinowanego układu sterującego, ale jedynie odpowiednio rozmieszczając emiter w matrycy.

Abstract. In the paper the results of a numerical thermal crosstalk analysis of 540 nm nitride-based edge-emitting lasers are presented. The work investigated three different structures that provide effective mode reduction in the active region of the emitter. A laser array consisting of two to ten emitters was considered. The obtained results show that a uniform temperature distribution in individual emitters can be achieved without a sophisticated control system, but only by properly placing the emitters in the array. (**Suppression of the thermal crosstalk effect in laser arrays**).

Słowa kluczowe: matryce laserów o emisji krawędziowej, InGaN/GaN, analiza termiczna, symulacja komputerowa

Keywords: edge emitting laser bars, InGaN/GaN, thermal analysis, computer simulation

Wstęp

Lasery półprzewodnikowe emitujące światło zielone wykonane na bazie InGaN/GaN na przestrzeni ostatnich lat stały się szerzej wykorzystywane w kilku dziedzinach. Są między innymi stosowane w wyświetlaczach laserowych, systemach oświetlenia, przechowywania danych, systemach projekcji, światłowodach telekomunikacyjnych, jak i przy obróbce metali [1-5]. Pomimo tych sukcesów nadal trwają intensywne prace m.in. nad zmniejszeniem gęstości prądu progowego tych przyrządów oraz zwiększeniem ich przyrostowej sprawności różniczkowej. Wciąż ważnym i wymagającym poprawy aspektem jest zapewnienie ich dłuższej żywotności i większej niezawodność [3].

W porównaniu do niebieskich diod laserowych, zielone lasery są trudniejsze do wytworzenia ze względu np. na potrzebną, w celu przesunięcia długości fali emisji do zakresu zielonego, wyższą zawartość indu. Jednym z podstawowych problemów jest też zapewnienie efektywnego ograniczenia modu w rejonie obszaru czynnego zielonych emiterów [6]. Wiąże się z tym problem niedopasowania sieciowego materiałów i silna degradacja termiczna przyrządu [5]. Problemy te nasilają się w przypadku matrycy laserowej. W tym przypadku jednym z głównych ograniczeń działania matrycy jest dodatkowo nierównomierny rozkład temperatury w poszczególnych jej emiterach, co przyczynia się do poszerzenia widma emisyjnego i zauważalnie różniących się prądów progowych poszczególnych emiterów. Typowo zapobiega się tym niechcianym efektem stosując skomplikowane układy zasilające, które indywidualnie pobudzają poszczególne emiter matrycy.

W niniejszej pracy przedstawiamy wyniki termicznej analizy numerycznej jednowymiarowych linijek laserowych złożonych z laserów emitujących światło zielone (540 nm), w których zastosowano różne rozwiązania konstrukcyjne zapewniające efektywne ograniczenie modu w rejonie obszaru czynnego. We wszystkich strukturach po stronie p przyrządu jako ograniczenie stosowana jest warstwa ITO (ang. indium tin oxide), natomiast po stronie n zastosowano trzy różne rozwiązania odnośnie warstwy okładkowej. Pierwsze to standardowa pojedyncza warstwa n-GaN (rozwiązanie o słabym ograniczeniu optycznym), którą dalej będziemy oznaczać jako strukturę 1 (S1) – strukturę podstawową. Inną możliwością jest kombinacja warstwy n-GaN oraz warstwy AlInN o dopasowanym składzie (S2: struktura 2) lub warstwy n-GaN i wysoko domieszkowanego n-GaN, który wykorzystuje efekt plazmniczny (S3: struktura 3) [7-10]. Odpowiedni dobór grubości tych warstw

daje optymalne ograniczenie modu zapewniając minimalną wielkość prądu progowego. Wpływ wspomnianych warstw na ograniczenie modów dokładnie opisano w pracach [10,11]. Zaproponowane rozwiązania są korzystne ze względów optycznych natomiast posiadają pewne negatywne cechy związane z efektami termicznymi. Niska przewodność cieplna zastosowanych warstw AlInN (4,87 W/(m·K)) oraz n-GaN o wysokim domieszkowaniu (10 W/(m·K)) w stosunku do normalnego n-GaN (97,5 W/(m·K)) [10,11] może powodować nadmierne nagrzewanie się przyrządów, a w szczególności linijek laserowych. Przeprowadzone badania pokazują wpływ wspomnianych zmian konstrukcyjnych na warunki termiczne panujące w ich wnętrzu, a także możliwość uzyskania jednakowej temperatury w poszczególnych emiterach matrycy przez odpowiednie ich ustawienie względem siebie.

Struktura

Symulacje przeprowadzono dla laserów krawędziowych z falowodem grzbietowym. Wszystkie analizowane w pracy struktury zostały zaprojektowane na podstawie danych umieszczonych w pracy [10]. Niektóre szczegóły dotyczące budowy analizowanych struktur zamieszczono w tabeli 1, na rysunku 2 oraz na rysunku 3 przedstawiającym schemat dwuelementowej linijki laserowej.

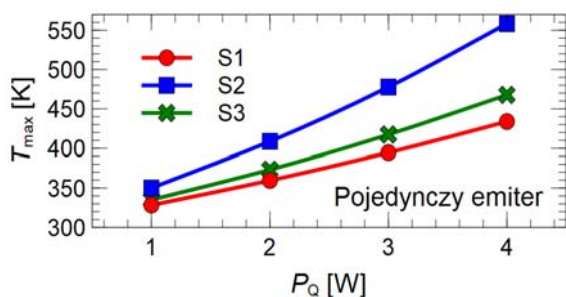
Tabela 1. Dane konstrukcyjne modelowanych trzech zielonych laserów krawędziowych: S1 – struktura podstawowa (warstwa okładkowa z normalnego p-GaN), S2 – struktura z dodatkową warstwą n-AlInN oraz S3 – struktura z dodatkową plazmiczną warstwą GaN. MQW (ang. multi quantum well) – wielokrotna studnia kwantowa, EBL (ang. electron blocking layer) – warstwa ograniczająca ucieczkę elektronów.

Warstwa	Materiał	Grubość [μm]
kontakt typu p	Au	1,00
izolacja	SiO ₂	0,25
warstwa okładkowa typu p	ITO/p-GaN	0,28/0,27
falowód typu p	p-In _{0,08} Ga _{0,92} N	0,045
EBL	p-Al _{0,2} Ga _{0,8} N	0,01
obszar czynny	MQW In _{0,08} Ga _{0,92} N/GaN	0,0027/0,01
falowód typu n	n-In _{0,08} Ga _{0,92} N	0,01
warstwa okładkowa typu n	S1: n-GaN	0,55
	S2: n-GaN/n-AlInN	0,35/0,50
	S3: n-GaN/ plazmiczny GaN	0,50/0,20
podłoże	n-GaN	50,0
lut	PbSn	1,0
kontakt typu n	Au	0,3

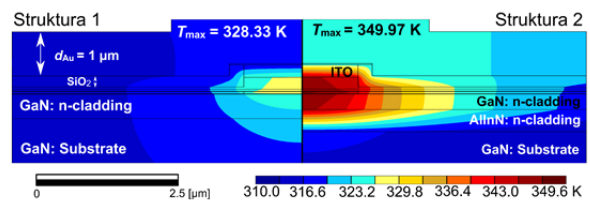
Przedstawione w pracy wyniki uzyskano poprzez wykonanie symulacji numerycznych wykorzystując autorski program komputerowy Zespołu Fotoniki Instytutu Fizyki Politechniki Łódzkiej, który pozwala na symulowanie zjawisk fizycznych zachodzących podczas pracy laserów półprzewodnikowych oraz ich matryc. Część służąca do modelowania zjawisk cieplnych oparta jest na metodzie elementów skończonych. Aby wyznaczyć rozkład temperatury w modelowanej matrycy i wchodzących w jej skład laserów EEL w warunkach stacjonarnych, czyli dla pracy z falą ciągłą, rozwiązywane jest równanie przewodnictwa cieplnego. Podczas obliczeń przyjęto prosty model termiczny, w którym całe źródło ciepła zostało umieszczone w obszarze czynnym lasera. Do wszystkich obliczeń przyjęto adiabaticzny warunek brzegowy na bocznych oraz górnych ściankach matrycy, natomiast dolna zewnętrzna część chłodnicy utrzymywana jest w stałej temperaturze otoczenia wynoszącej 300 K. Podczas rozwiązania wspomnianych równań zastosowano podejście samouzdognione, w którym parametry materiałowe zmieniają się wraz z temperaturą. Szczegółowy opis i wartości zastosowanych parametrów materiałowych można znaleźć w pracy [10].

Wyniki

Symulacje rozpoczęto od wyznaczenia rozkładów temperatury w pojedynczym emiterze. Wymiary płytki podłożowej GaN i chłodnicy pozostawiono takie same jak w przypadku liniiki z dwoma emiterami (rys. 3). Obliczenia przeprowadzono dla trzech badanych struktur i pięciu wartości mocy ciepła rozproszonej w emiterze. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 1 w postaci zależności maksymalnej temperatury uzyskanej w pojedynczym emiterze w zależności od mocy ciepła rozproszonego w jego wnętrzu. W przypadku struktur, które zawierają dodatkowe warstwy ograniczające mod, obserwowany jest większy wzrost temperatury w przyrządzie. Warstwa AlInN powoduje nawet dwukrotnie większy wzrost temperatury w stosunku do struktury podstawowej zawierającej tylko n-GaN jako warstwę okładkową od strony *n*. Wpływ niższej przewodności cieplnej warstwy okładkowej AlInN na warunki cieplne panujące w laserze można zobaczyć na rysunku 2 przedstawiającym izotermy temperatury w otoczeniu środka pojedynczego emitera (okolice obszaru czynnego i falowodu grzbietowego) w przekroju *xy*. Rysunek wykonano zarówno dla struktury bazowej (po lewej stronie) jak i dla struktury z warstwą AlInN (po prawej stronie). Przyjęto moc źródła ciepła 1 W. Zauważalny wzrost temperatury w obszarze czynnym lasera spowodowany jest zwiększeniem rezystancji termicznej przyrządu z 28,3 K/W do 50 K/W. Efekt ten może istotnie przyczynić się do wzrostu temperatury w matrycy laserowej.

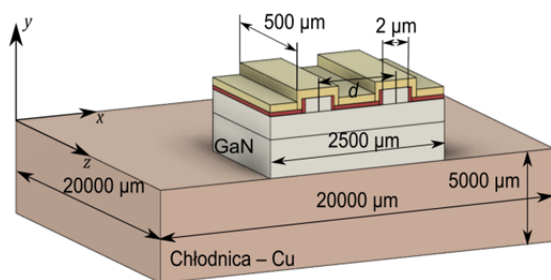


Rys.1. Zależność maksymalnej temperatury T_{max} od mocy źródeł ciepła P_0 w rozpatrywanych trzech strukturach: S1 – struktura podstawowa (warstwa okładkowa z normalnego n-GaN), S2 – struktura z dodatkową warstwą n-AlInN oraz S3 – struktura z dodatkową plazmniczną warstwą GaN



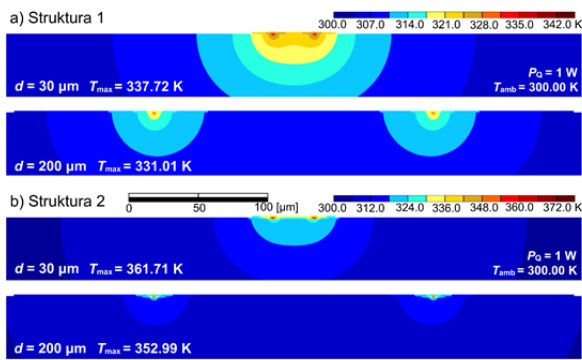
Rys.2. Rozkład temperatury w otoczeniu środka pojedynczego emitera (okolice obszaru czynnego i falowodu grzbietowego) w przekroju *xy* dla struktury bazowej (po lewej stronie) oraz dla struktury z dodatkową warstwą AlInN (po prawej stronie) dla mocy źródeł ciepła 1 W

Analizę efektu samonagrzewania się poszczególnych emiterów matrycy rozpoczęto od zbadania jaki wpływ na wzrost temperatury w ich obszarach czynnych ma zmniejszanie odległości między dwoma emiterami umieszczonymi na wspólnym podłożu o rozmiarach 2,5 mm na 0,5 mm przymocowanym do miedzianej chłodnicy o wymiarze 20 mm na 20 mm. Budowę rozpatrywanej najprostszej dwuemiterywej liniiki laserowej pokazano na rysunku 3, na którym również zaznaczono najważniejsze jej wymiary oraz zastosowany układ współrzędnych. Zbadano kilka różnych odległości między dwoma emiterami dla trzech rozpatrywanych struktur i dwóch mocy źródeł ciepła. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, iż w przypadku większych niż 250 μm odległości między laserami oddziaływanie cieplne między nimi praktycznie znika, a przy odległości 1000 μm poszczególne emitery pracują jak pojedynczy przyrząd. Istotny wzrost oddziaływania cieplnego między emiterami odnotowano przy odległościach między nimi mniejszych niż 50 μm . W celu wyraźniejszego uwidocznienia efektu „thermal crosstalk” wykonano rysunek 4 przedstawiający izotermy temperatury w przekroju *xy*. Izotermy wykonano dla dwóch znacznie różniących się odległości między emiterami, tzn. 30 μm i 200 μm . Na rysunku 4 widać wyraźną różnicę zarówno w wartościach temperatury jak i w rozkładzie izoterm w przypadku kiedy poszczególne emitery są blisko lub daleko od siebie.

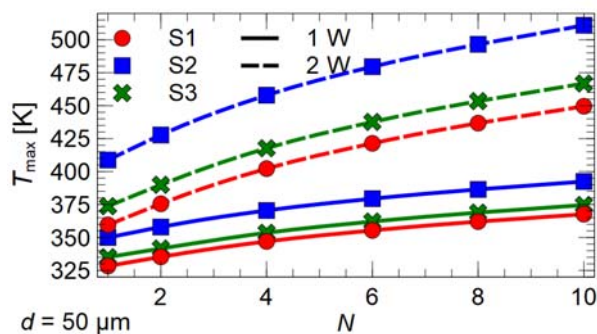


Rys.3. Schemat budowy liniiki laserowej zbudowanej z dwóch emiterów. W celu dokładniejszego zobrazowania wyglądu rysunek nie został wykonany w skali

Jak już wspomniano zbliżenie emiterów powoduje znaczny wzrost temperatury w ich obszarach czynnych. Największy względny wzrost (o przeszło 22,5%) występuje dla struktury podstawowej z warstwą okładkową w postaci normalnego n-GaN (rys. 4a). W przypadku użycia plazmnicznej warstwy n-GaN wzrost ten wynosi około 19%, a dla ograniczenia optycznego z wykorzystaniem warstwy AlInN około 17% (rys. 4b). Różnice we względnych wzrostach temperatury wynikają nie tyle z osłabienia oddziaływania cieplnego występującego między poszczególnymi emiterami matrycy po zastosowaniu warstwy plazmnicznego GaN lub AlInN ile z początkowej jego silnej wartości, wynikającej ze słabej przewodności cieplnej wspomnianych warstw.



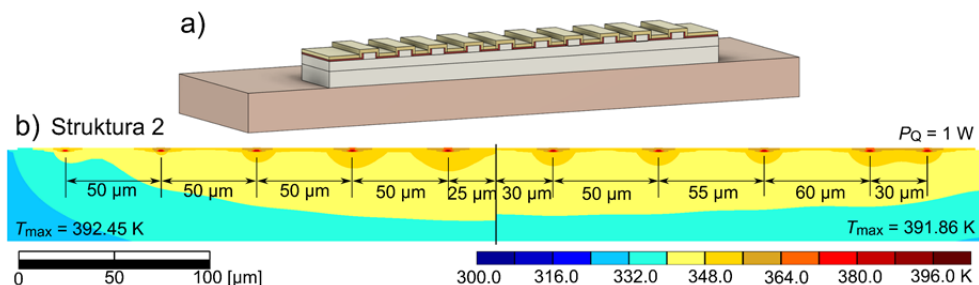
Rys. 4. Rozkład temperatury w przekroju xy 2-elementowej linii laserowej i dwóch różnych odległości pomiędzy emiterni dla a) struktury podstawowej i b) struktury z warstwą AllN. Na górze odległość d między emiterni wynosząca 30 μm , a na dole 200 μm . Obliczenia wykonano dla mocy 1 W wydzielonej w każdym emiterni



Rys. 5. Zależność maksymalnej temperatury T_{max} od ilości emiterni N w matrycy dla rozpatrywanych trzech struktur i dwóch mocy źródeł ciepła: 1 i 2 W

Efekt samonagrzewania się poszczególnych emiterni matrycy przybiera na sile wraz ze wzrostem ich ilości w pojedynczej linii laserowej. Wraz z ilością emiterni rośnie maksymalna temperatura w matrycy, co przedstawione zostało na rysunku 5. Najwyższy względny przyrost temperatury w matrycy obserwowany jest w strukturze podstawowej (S1) i wynosi prawie 140% dla mocy rozproszonej 1 W w każdym emiterni. Natomiast dla struktury AllN (S2) obserwowany jest najmniejszy względny przyrost temperatury sięgający 85%. Dodatkowo efekt samonagrzewania nasila się wraz ze wzrostem mocy cieplnej rozproszonej w emiterni i dla mocy 2 W analogiczne dane wynoszą 150% w strukturze 1 i prawie

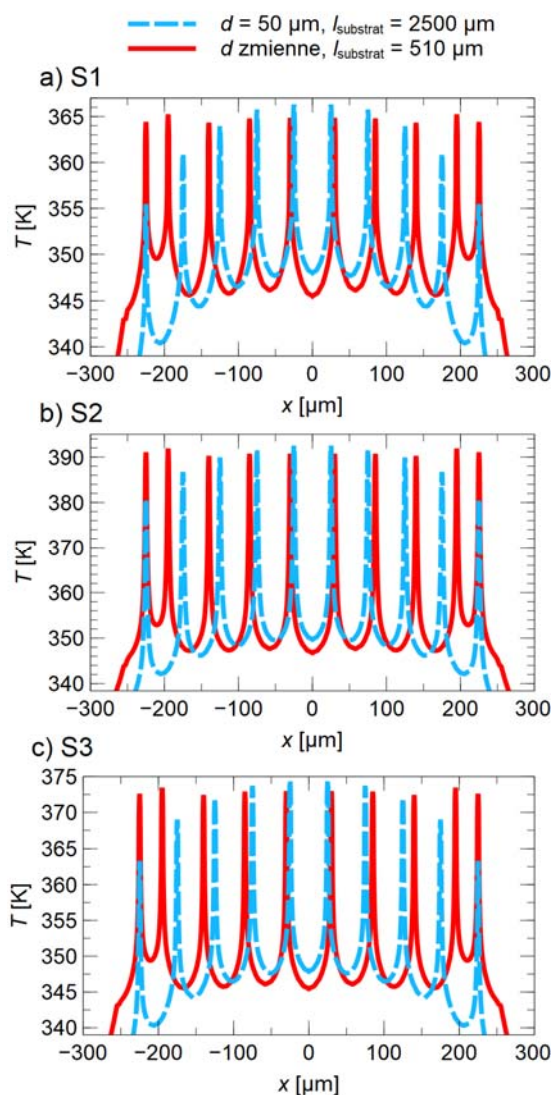
g
u



Rys. 6. a) Schemat budowy linii laserowej zbudowanej z dziesięciu emiterni. W celu dokładniejszego zobrazowania wyglądu rysunek nie został wykonany w skali. b) Rozkład temperatury w przekroju xy 10-elementowej linii laserowej z warstwą AllN. Po lewej stronie rysunku linijka laserowa z równomiernie rozłożonymi emiterni umieszczonymi na substracie GaN o wymiarach 2500 μm na 500 μm . Po prawej stronie rysunku linijka z nierównomiernie rozłożonymi emiterni umieszczonymi na substracie GaN o wymiarach 510 μm na 500 μm . Moc cieplna wydzielona w każdym emiterni wynosi 1 W

oraz maksymalną temperaturę w 10-emiterniowej matrycy, której schemat pokazano na rysunku 6a.

Jednym z podstawowych problemów linii laserowych zawierających większą liczbę emiterni jest zróżnicowana temperatura w obszarach czynnych poszczególnych emiterni matrycy. Efekt ten związany jest ściśle z efektem „thermal crosstalk” i nasila się wraz ze zmniejszeniem odległości między emiterni. Tego niekorzystnego zjawiska można uniknąć oddalając znacznie poszczególne emiterni od siebie. Jednak w ten sposób tracona jest kompaktowość takiej matrycy. Standardowo poszczególne emiterni w matrycy oddalone są od siebie na te same odległości. Przykładowo taki rozkład emiterni został przedstawiony na lewej części rysunku 6b. Rysunek został wykonany dla przypadku konstrukcji, w której jako warstwę okładkową po stronie n zastosowano układ warstw n-GaN/AllN. Prawa część rysunku 6b przedstawia analogiczną matrycę, ale z nierównomiernie rozłożonymi emiterni. Dodatkowo w celu poprawy równomierności temperatury w obszarach czynnych poszczególnych emiterni zmieniono rozmiary podłoża. Jak pokazują wykresy na rysunku 7 równomierne rozłożenie emiterni w matrycy powoduje znaczną różnicę temperatury w obszarach czynnych poszczególnych emiterni linii laserowej (niebieska przerywana krzywa). Współrzędna $x = 0$ to środek matrycy. Względne różnice temperatur między skrajnym i środkowym emiterni matrycy wynoszą dla struktury 1 prawie 20%, dla struktury 2 - 15%, a dla struktury 3 prawie 18% licząc względem skrajnego emiterni. Tak niekorzystny rozkład temperatury będzie powodował różną pracę poszczególnych emiterni matrycy. Emiterni te nie tylko będą się różnie włączały i wyłączały podczas jej pracy, ale będą także emitowały fale o różnych długościach pogarszając parametry optyczne wiązki promieniowania użytecznego. Wspomnianemu powyżej efektowi można przeciwdziałać wykorzystując zjawisko „thermal crosstalk”, tym razem jednak celem wyrównania wspomnianych temperatur. Nie zmieniając położenia (odległości) krańcowych emiterni matrycy można nierównomiernie rozłożyć emiterni wewnętrzne matrycy oraz tak dobrać rozmiary podłoża, że temperatura poszczególnych obszarów czynnych laserów matrycy będzie niemal wyrównana. Przykładowy rozkład emiterni dla matrycy z dziesięcioma laserami pokazany jest na prawej części rysunku 6b. Efekt takich zabiegów przedstawiony jest na rysunku 7 w postaci czerwonej ciągłej krzywej. Widać tam, że zaproponowana zmiana konstrukcyjna obniża nieznacznie maksymalną temperaturę w matrycy, ale przede wszystkim znakomicie wyrównuje temperaturę między poszczególnymi jej emiterni. Dla wszystkich struktur różnice temperatury między poszczególnymi emiterni są poniżej 2%. Dokładnie dla



Rys.7. Rozkład temperatury w środku obszaru czynnego 10-elementowej linii laserowej. Kolorem niebieskim przedstawiono przypadek z równomiernie rozłożonymi emiterami umieszczonymi na substracie GaN o wymiarach 2500 μm na 500 μm . Natomiast kolorem czerwonym przypadek z nierównomiernie rozłożonymi emiterami umieszczonymi na substracie GaN o wymiarach 510 μm na 500 μm . W każdym emiterze wydziela się moc 1 W. a) struktura podstawowa, b) struktura z warstwą AlIn oraz c) struktura z plazmicznym n-GaN

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki analizy termicznej jednowymiarowej matrycy azotkowych laserów o emisji krawędziowej z falowodem grzbietowym emitujących falę około 540 nm. Zbadano trzy konstrukcje matryc, w których zastosowano różne warstwy okładkowe po stronie n (n-GaN, n-GaN z warstwą n-AlIn oraz n-GaN z warstwą wysoko domieszkowanego GaN). Warstwy te zostały dobrane tak by zapewnić efektywne ograniczenie modu w okolicach obszaru czynnego. Porównując wyniki uzyskane dla pojedynczego lasera oraz matryc zawierających różną ilość emiterów i różne odległości między nimi pokazano efekt samonagrzewania się emiterów, który przybiera na sile wraz ze wzrostem ich ilości w pojedynczej linii laserowej. Zwiększa się nie tylko sama temperatura w przyrządzie, ale także jej nierównomierność. Analiza 10-elementowej matrycy pokazuje, iż równomierny rozkład

temperatury w poszczególnych emiterach można uzyskać bez wyrafinowanego układu sterującego zasilaniem pojedynczych emiterów, a jedynie poprzez odpowiednie rozmieszczenie tych emiterów w matrycy. Odległości między nimi powinny być nierównomierne, a wymiary podłoża odpowiednio dobrane. Nie trzeba przy tym zmieniać końcowych wymiarów matrycy. Wyznaczenie odpowiednich parametrów geometrycznych możliwe jest dzięki zaawansowanym komputerowym metodom optymalizacyjnym. Zjawisko „thermal crosstalk”, które przynosi zazwyczaj niekorzystne efekty termiczne, można jak pokazują zaprezentowane wyniki wykorzystać także dla polepszenia warunków pracy matrycy laserowej, a co za tym idzie poprawienia jej parametrów użytkowych.

Praca częściowo powstała w ramach realizacji grantu NCN nr 2015/19/D/ST7/01609. Praca została ukończona podczas, gdy pierwszy autor był doktorantem w Interdyscyplinarnej Szkole Doktorskiej Politechniki Łódzkiej.

Autorzy: dr hab. inż. Robert P. Sarzała, mgr inż. Dominika Dąbrowka, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 217/221, 93-005 Łódź, E-mail: robert.sarzala@p.lodz.pl, dominika.dabrowka@dokt.p.lodz.pl

LITERATURA

- [1] Wang H., Kawahito Y., Yoshida R., Shiohawa K., Development of a high-power blue laser (445 nm) for material processing, *Opt. Lett.*, 42 (2017), 2251
- [2] Nakatsu Y., Nagao Y., Kozuru K., Hirao T., Okahisa E., Masui S., Yanamoto T., Nagahama S., High-efficiency blue and green laser diodes for laser displays, *Proc. SPIE* 10918 (2019), 99-107
- [3] Xiu H., Xu P., Wen P., Zhang Y., Yang J., Rapid degradation of InGaN/GaN green laser diodes, *Superlattices and Microstructures*, 142 (2020), 106517
- [4] Marioli M., Meneghini M., Rossi F., Salviati G., de Santi C., Mura G., Meneghesso G., Zanoni E., Degradation mechanisms and lifetime of state-of-the-art green laser diodes, *Phys. Status Solidi*, 212 (2015) 974–979
- [5] Tian A., Hu L., Zhang L., Liu J., Yang H., Design and growth of GaN-based blue and green laser diodes, *Science China Materials*, 63 (2020), 1348-1363
- [6] König H., Ali M., Bergbauer W., Brückner J., Brüderl G., Eichler C., Gerhard S., Heine U., Lell A., Naehle L., Peter M., Ristic J., Rossbach G., Somers A., Stojetz B., Tautz S., Wagner J., Wurm T., Strauss U., Baumann M., Black A., Krause V., Visible GaN laser diodes: from lowest thresholds to highest power levels, *Proc. SPIE* 10939 (2019), 29-37
- [7] Pourhashemi, A.; Farrell, R.M.; Cohen, D.A.; Speck, J.S.; DenBaars, S.P.; Nakamura, S. High-power blue laser diodes with indium tin oxide cladding on semipolar (2021) GaN substrates. *Appl. Phys. Lett.*, 106 (2015), 111105
- [8] Schenk H.P.D., Nemoz M., Korytov M., Vennégués P., Demolon P., Dräger A.D., Hangleiter A., Charash R., Maaskant P.P., Corbett B., Duboz J.Y., AlInN optical confinement layers for edge emitting group III-nitride laser structures. *Phys. Status Solidi C*, 6 (2009), 897–901
- [9] Stańczyk S., Czyszanowski T., Kafar A., Czernecki R., Targowski G., Leszczyński M., Suski T., Kucharski R., Perlin P., InGaN laser diodes with reduced AlGaIn cladding thickness fabricated on GaN plasmonic substrate, *Appl. Phys. Lett.*, 102 (2013), 151102
- [10] Kuc M., Piskorski Ł., Dems M., Wasiak M., Sokół A.K., Sarzała R.P., Czyszanowski T., Numerical Investigation of the Impact of ITO, AlInN, Plasmonic GaN and Top Gold Metalization on Semipolar Green EELs, *Materials*, 13 (2020), n.6, 1444
- [11] Kuc M., Sokół A.K., Piskorski Ł., Dems M., Wasiak M., Sarzała R.P., Czyszanowski T., ITO layers as an optical confinement for nitride edge-emitting lasers, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 68 (2020), n.1, 147-154