

doi:10.15199/48.2022.09.37

Analiza termiczna dwuwymiarowych matryc laserów VCSEL

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki numerycznej analizy termicznej matryc laserów GaAs VCSEL emitujących falę 850 nm. Obliczenia wykonano dla pojedynczego lasera oraz dwóch typów matryc: nieskończonej i półnieskończonej. Uwzględniono różne wielkości apertury elektrycznych, różne odległości między emiterami oraz różną gęstość źródeł ciepła. Trójwymiarowe modele rozprzysięcia ciepła pozwoliły określić rozkłady temperatury, dolną i górną granicę rezystancji termicznej analizowanych urządzeń oraz wzajemne oddziaływanie cieplne między emiterami matryc laserowych.

Abstract. In this paper the results of thermal numerical analysis of 850 nm GaAs VCSEL arrays are presented. A single VCSEL emitter and two types of VCSEL arrays: infinite and semi-infinite, were modelled. Several oxide aperture diameters, several values of the distance between emitters and various heat source densities were considered. The models for 3-D heat spreading allowed us to determine the heat flow distribution and to obtain the upper and lower bounds for both thermal resistance of single emitters and thermal crosstalk in arrays. (*Thermal Investigation of GaAs-Based 2D VCSEL Diode Arrays*).

Słowa kluczowe: GaAs VCSEL, matryce laserowe, analiza termiczna, bliska podczerwień.

Keywords: GaAs VCSEL, diode laser arrays, thermal analysis, near IR.

Wstęp

Liczne nowe rozwiązania zaproponowane w ciągu ostatnich lat w sektorze smartfonów, motoryzacyjnym, medycznym, przemysłowym oraz robotyce, jak i rozwój przełomowych technologii typu VR (ang. *virtual reality* – wirtualna rzeczywistość), czy też inteligentnej elektroniki do noszenia (ang. *smart wearable devices*) powodują, że zapotrzebowanie na źródła emitujące promieniowanie podczerwone stale rośnie. Kluczową rolę zaczynają odgrywać w nim lasery o emisji powierzchniowej z pionową wnęką rezonansową (ang. *VCSEL – Vertical Cavity Surface Emitting Laser*), a w szczególności dwuwymiarowe matryce tych laserów. Zgodnie z raportem badawczym Global Market Insights Inc., do 2027 roku wielkość rynku laserów VCSEL ma przekroczyć 5 mld. dolarów [1]. Można wyróżnić trzy główne grupy zastosowań, dla których lasery VCSEL i ich matryce emitujące promieniowanie w bliskiej podczerwieni mają kluczowe znaczenie: detekcja 3D, pojazdy autonomiczne i LiDAR (ang. *Light Detection and Ranging*) oraz obróbka cieplna materiałów [2-4].

Jednym z najważniejszych czynników wpływających na niezawodność matryc laserowych oraz ich parametry eksploatacyjne, takie jak prąd progowy i moc wyjściowa promieniowania, są warunki termiczne panujące w ich wnętrzu [5-8]. Warunki te są ściśle związane z wzajemnym termicznym oddziaływaniem na siebie poszczególnych elementów matrycy laserowej nazywanym z angielskiego *thermal crosstalk* [9]. Właściwe projektowanie matryc laserów VCSEL wiąże się z ograniczeniem wpływu tego efektu na wzrost i rozkład temperatury w matrycy.

W pracy zaprezentowano wyniki trójwymiarowej analizy termicznej matryc arsenkowych laserów VCSEL emitujących promieniowanie o długości fali około 850 nm. Symulacje przeprowadzono zarówno dla pojedynczego emitera oraz wykonanych na jego bazie matryc nieskończonych i półnieskończonych. W przypadku każdego typu matryc zbadano jak moc źródła ciepła oraz parametry geometryczne takie jak rozmiar apertury elektrycznej pojedynczego emitera matrycy czy odległość między emiterami matrycy wpływają na rozkład oraz maksymalny przyrost temperatury we wnętrzu analizowanych urządzeń. Pozwoliło to określić możliwość uzyskania dolną i górną granicę rezystancji termicznej analizowanych urządzeń oraz wzajemne oddziaływanie cieplne między emiterami matryc laserowych.

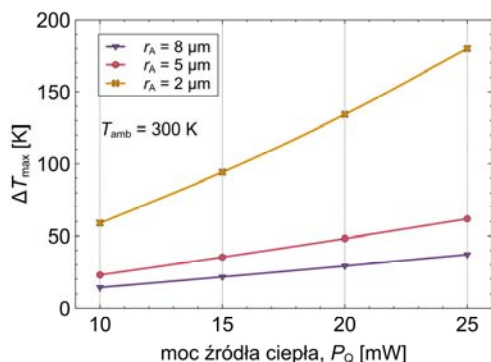
Modelowana struktura laserowa

Wszystkie analizowane w pracy matryce laserowe zostały zaprojektowane w oparciu o konstrukcję pierwszego polskiego lasera VCSEL emitującego falę o długości około 850 nm. Projekt struktury epitaksjalnej tego lasera oraz jego *processing* został opracowany przez Zespół Fotoniki Instytutu Fizyki Politechniki Łódzkiej (IF PŁ) we współpracy z firmą Vigo System, w której laser został wytworzony. Podstawą struktury jest substrat (n+)GaAs domieszkowany krzemem, na powierzchni którego wyhodowano strukturę dolnego zwierciadła DBR (*Distributed Bragg Reflector*) składającą się z 35.5 par warstw $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ i $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ o grubościach odpowiednio 48.6 nm oraz 43.1 nm. Obszar czynny lasera składa się z 5 studni kwantowych $In_{0.11}Ga_{0.89}As$, przedzielonych czterema barierami $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ o grubościach odpowiednio 3.4 oraz 6.8 nm. Górne zwierciadło DBR lasera składa się z 17 par warstw $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ i $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ o grubościach odpowiednio 43.1 nm oraz 48.6 nm. Rezonator lasera zaprojektowany został na półtorę długości fali. Na przejściu między rezonatorem, a górnym zwierciadłem DBR znajduje się warstwa materiału $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$, która po częściowym utlenieniu (Al_xO_y) pełni rolę apertury elektrycznej wyznaczając zarazem granice obszaru czynnego lasera w kierunku radialnym. Szczegóły konstrukcyjne, opis zastosowanych technologii wytwarzania oraz charakterystyki eksploatacyjne przyrządu można znaleźć w pracy [10].

Wyniki obliczeń przedstawione w pracy uzyskano na drodze symulacji numerycznych stosując autorskie oprogramowanie opracowane z Zespołem Fotoniki IF PŁ. Zastosowany model bazujący na metodzie elementów skończonych pozwalał rozwiązać równanie przewodnictwa cieplnego w stanie stacjonarnym dla przypadku trójwymiarowego. Obliczenia obejmujące zarówno całą strukturę półprzewodnikową przyrządu jak i warstwy łączące go z chłodnicą oraz chłodnicę przeprowadzono w trybie samouzgodnionym, uwzględniając zmianę przewodności cieplnych wszystkich materiałów tworzących przyrząd wraz z temperaturą panującą aktualnie w jego wnętrzu. Na górnej powierzchni przyrządu jak i na jego bocznych ściankach przyjęto warunki adiabaticzne, zakładając, że zdecydowana większość ciepła odpływa z urządzenia poprzez miedzianą chłodnicę, której spód utrzymywany jest w temperaturze 300 K. W modelu założono, że źródło ciepła znajduje się w obszarze czynnym poszczególnych emiterów i ma stałą założoną

moc. Bardziej szczegółowy opis modelu, założeń odnośnie warunków brzegowych jak i wartości parametrów materiałowych można znaleźć w pracy [11].

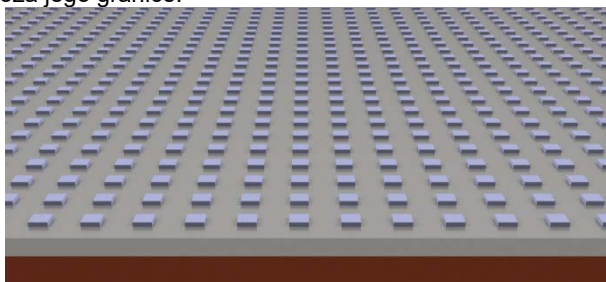
Analizę rozpoczęto od obliczeń dla pojedynczego emitera umiejscowionego na płytce podłożowej o rozmiarach 5 mm na 5 mm przymocowanej do chłodnicy o rozmiarach 20 mm na 20 mm. Średnica górnej masy lasera VCSEL wynosiła 45 μm . Na rysunku 1 przedstawiono maksymalny przyrost temperatury w pojedynczym emiterze w zależności od promienia apertury jego obszaru czynnego i mocy źródła ciepła. Przyrost ten maleje wraz ze zwiększaniem promienia apertury oraz ze zmniejszaniem mocy źródła ciepła. Przykładowo dla promienia apertury wynoszącego 2 μm zmiana mocy źródła ciepła z 10 mW do 25 mW powoduje zwiększenie maksymalnego przyrostu temperatury ponad temperaturę 300 K o około 206%, dla promienia apertury równego 5 μm o około 170%, natomiast dla promienia apertury wynoszącego 8 μm o około 162%. W tym przypadku przyrząd ma największą rezystancję termiczną zawierającą się w przedziale od 5,82 K/mW do 7,20 K/mW. W przypadku promienia apertury 5 μm i 8 μm wartość ta oscyluje w granicach odpowiednio 2.4 K/mW i 1.45 K/mW, co dobrze zgadza się z danymi eksperymentalnymi [12]. Uzyskane wyniki dla pojedynczego lasera stanowią dobry punkt odniesienia dla wyników uzyskanych dla matryc laserowych.



Rys.1. Maksymalny przyrost temperatury ponad temperaturę chłodnicy (300 K) w pojedynczym emiterze w zależności od promienia apertury obszaru czynnego lasera i mocy źródła ciepła

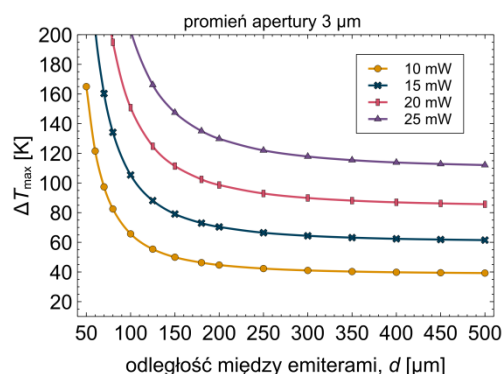
Matryce nieskończone

Matryce nieskończone stanowią dobry punkt wyjściowy do analizy termicznej tego typu przyrządów. Po pierwsze wyznaczając górny zakres temperatur jakie mogą w nich panować, a po drugie są stosunkowo łatwe do modelowania dzięki cyklicznemu powtarzaniu tych samych fragmentów struktury w przestrzeni. Wizualizację 3D matrycy nieskończonej, a dokładnie widok na przekrój poprzeczny przez jej fragment pokazano na rysunku 2. Struktura rozciąga się do nieskończoności w każdą stronę poza jego granice.

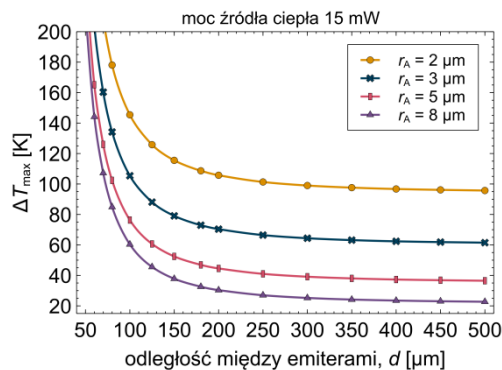


Rys.2. Wizualizacja 3D przekroju poprzecznego przez fragment matrycy nieskończonej. Struktura rozciąga się w nieskończoność w każdą stronę poza granice rysunku. Skala nie została zachowana

Obliczenia przeprowadzono dla czterech różnych wartości promienia apertury obszaru czynnego pojedynczego emitera matrycy tzn. r_A : 2 μm , 3 μm , 5 μm i 8 μm , czterech mocy źródła ciepła P_0 : 10 mW, 15 mW, 20 mW i 25 mW oraz odległości między środkami emiterów d zmieniającej się od 50 μm do 500 μm . Na rysunku 3 przedstawiono (na przykładzie matrycy z emiterami o promieniu apertury 3 μm) zależność maksymalnego przyrostu temperatury w matrycy od odległości między jej emiterami. Wyniki uzyskano dla różnych mocy źródła ciepła. Na ich podstawie można stwierdzić, że największy spadek temperatury w strukturze następuje przy zwiększeniu odległości między środkami sąsiednich emiterów od 50 μm , poprzez 100 μm , do 150 μm . Dalsze oddalanie od siebie sąsiednich emiterów powoduje znacznie mniejszy spadek maksymalnego przyrostu temperatury aż do osiągnięcia pomiędzy ich środkami odległości równej 250 μm . Powyżej tej wartości d maksymalny przyrost temperatury utrzymuje się na niemalże jednakowym poziomie – jego wartość nie zmienia się o więcej niż około 10 K.



Rys.3. Maksymalny przyrost temperatury ponad temperaturę chłodnicy (300 K) w matrycy nieskończonej złożonej z emiterów o promieniu obszaru czynnego 3 μm w zależności od odległości między emiterami i różnych mocy źródła ciepła w każdym emiterze

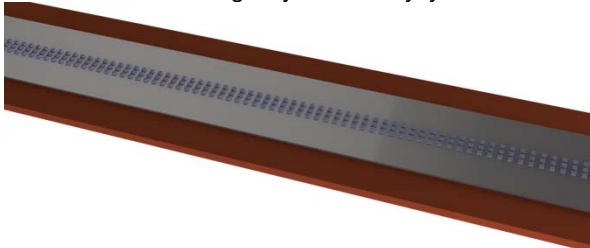


Rys.4. Maksymalny przyrost temperatury ponad temperaturę chłodnicy (300 K) w matrycy nieskończonej w zależności od odległości między jej emiterami posiadającymi różne promienie obszaru czynnego i moc źródła ciepła 15 mW

Wyżej otrzymane wnioski są w ogólności słuszne także przy zmianie apertury obszaru czynnego emitera. Pokazuje to rysunek 4 obrazujący zależność maksymalnego przyrostu temperatury w matrycy w zależności od odległości między jej emiterami dla mocy źródła ciepła 15 mW i różnych promieni apertur obszaru czynnego emiterów. Gwałtowny wzrost temperatury w matrycy, gdy odległość między jej emiterami jest mniejsza niż 100 μm , związany jest ze zjawiskiem *thermal crosstalk*, czyli samonagrzewaniem się poszczególnych emiterów tworzących matrycę.

Matryce półnieskończone

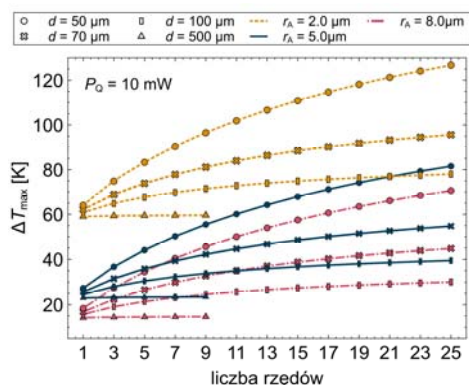
Matryce półnieskończone stanowią przypadek matrycy w której w jednym kierunku (np. w kierunku x) struktura matrycy powtarza się periodycznie w nieskończoność. Natomiast w kierunku do niego prostopadłym (niech to będzie kierunek z) zawiera skończoną ilość emiterów. Innymi słowy matryca taka zawiera określoną liczbę nieskończonych rzędów emiterów. Wizualizację 3D matrycy półnieskończonej, na przykładzie matrycy zawierającej 3 rzędy emiterów, przedstawiono na rysunku 5. Taki rodzaj matrycy jest stosunkowo łatwy w modelowaniu, gdyż wykorzystując symetrię przyrządu można ograniczyć się do modelowania niewielkiego wycinka matrycy.



Rys.5. Wizualizacja 3D matrycy półnieskończonej zawierającej 3 rzędy emiterów. Z lewej i prawej strony struktura rozciąga się poza rysunek do nieskończoności. Skala nie została zachowana

Obliczenia przeprowadzono dla matryc zawierających od 1 do 25 rzędów emiterów, każdorazowo zwiększając liczbę rzędów o 2. Podobnie jak dla matryc nieskończonych obliczenia wykonano dla różnych mocy źródła ciepła. Odległości między emiterami zmieniała się od 50 μm do 500 μm . Założono także trzy różne wartości promienia apertury obszaru czynnego pojedynczego emitera: 2 μm , 5 μm i 8 μm .

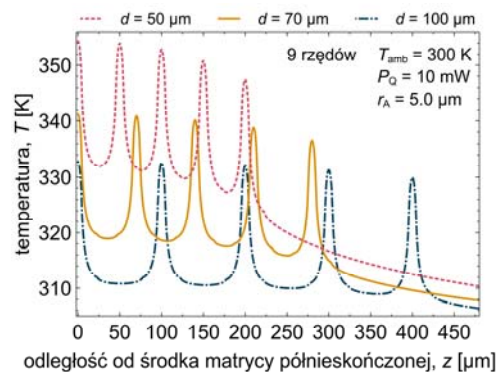
Jak pokazują wyniki dla matrycy jednorzędowej (linijki laserowej), każde zwiększenie mocy o 5 mW wiąże się ze zwiększeniem przyrostu temperatury o około 10% dla matrycy o promieniu apertury 2 μm , o około 5% dla matrycy o promieniu apertury 5 μm oraz o około 3% dla matrycy o promieniu apertury równym 8 μm . Ponadto, dla odległości między środkami emiterów większych od 125 μm wartość przyrostu temperatury utrzymuje się na ustalonym poziomie.



Rys.6. Maksymalny przyrost temperatury ponad temperaturę chłodnicy (300 K) dla matryc półnieskończonych o mocy źródła ciepła 10 mW w każdym emiterze, w zależności od ilości rzędów, odległości między środkami emiterów i promienia apertury

Rysunek 6 przedstawia zależność maksymalnego przyrostu temperatury w półnieskończonej matrycy laserów VCSEL 850 nm o mocy źródła ciepła 10 mW w każdym emiterze, w zależności od ilości rzędów, odległości między emiterami oraz promienia apertury. Z danych na nim zaprezentowanych wynika, że im mniejszy promień

apertury tym większy przyrost temperatury osiągany w matrycy. Dla małych odległości pomiędzy środkami emiterów, tzn. 50 μm oraz 70 μm , dodawanie kolejnych rzędów prowadzi do widocznego wzrostu temperatury w strukturze. Efekt ten jest tym słabszy, im dalej rozsuwane są od siebie emityery – w przypadku odległości między emiterami równej 100 μm zwiększenie liczby rzędów z 17 do 25 powoduje, że przyrost temperatury rośnie zaledwie o około 0.6%, niezależnie od rozmiaru apertury. Natomiast dla maksymalnej badanej odległości między emiterami, czyli 500 μm przyrost temperatury można uznać za stały i podobny do przyrostu temperatury w pojedynczym emiterze.



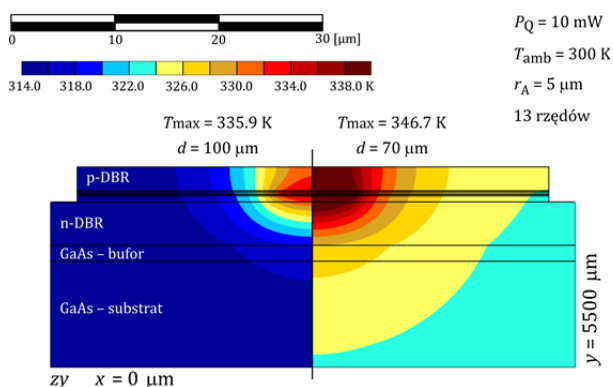
Rys.7. Rozkład temperatury wzdłuż prostej przechodzącej przez środki obszarów czynnych w kierunku prostopadłym do matrycy w półnieskończonej 9-rzędowej matrycy laserów VCSEL dla trzech wybranych odległości między środkami emiterów

W celu lepszego pokazania jak odległość między emiterami wpływa na ich wzajemne oddziaływanie cieplne (tzw. efekt *thermal crosstalk*) przygotowano rysunek 7. Przedstawia on rozkład temperatury wzdłuż prostej przechodzącej przez środki obszarów czynnych w kierunku prostopadłym do matrycy złożonej z 9 rzędów emiterów dla trzech różnych odległości między sąsiednimi emiterami. Współrzędna $z = 0$ to środek matrycy. Można zauważyć, że im bliżej siebie znajdują się emityery, tym wyższa jest temperatura osiągnięta w środku obszaru czynnego emitera oraz tym większe są różnice tych temperatur w zależności od odległości emitera od środka modelowanej matrycy. Dla odległości między emiterami wynoszącej $d = 50 \mu\text{m}$ temperatura w środkowym rzędzie wynosi około 355 K. Dla kolejnych rzędów wartość ta maleje, aż do około 347 K dla rzędu skrajnego. Natomiast w przypadku, gdy $d = 100 \mu\text{m}$, oddziaływanie cieplne pomiędzy sąsiednimi laserami staje się znacznie słabsze, a różnica temperatur pomiędzy środkowym a skrajnym rzędem wynosi o około połowę mniej, czyli 4 K.

Wręcz ze zwiększaniem liczby rzędów w matrycy półnieskończonej rośnie temperatura w środku obszarów czynnych wszystkich emiterów tworzących matrycę. Przykładowo dla matrycy utworzonej z emiterów z aperturą obszaru czynnego 5 μm i odległością między emiterami wynoszącą 100 μm , różnica przyrostu temperatury między środkowym i skrajnym rzędem 9-rzędowej matrycy, to około 30 K, a w matrycy 25-rzędowej, to około 38 K biorąc pod uwagę te same rzędy. Zatem zwiększenie ilości rzędów o 16 spowodowało w tym przypadku wzrost przyrostu temperatury maksymalnej w środku obszaru czynnego o około 27%. W analogicznym przypadku, kiedy odległość między emiterami jest zmniejszona o połowę, czyli wynosi 50 μm przyrost temperatury jest znacznie większy. Porównując maksymalne przyrosty temperatury w tych samych rzędach co poprzednio można stwierdzić, że więk-

szczenie liczby rzędów o 16 powoduje, że przyrost temperatury ponad temperaturę otoczenia wzrósł o około 66%.

Wpływ wzajemnego oddziaływania cieplnego poszczególnych emiterów matrycy na siebie można zaobserwować także analizując rysunek 8, który przedstawia izotermę temperatury w przekroju yz półnieskończonej 13-rzędowej matrycy laserów VCSEL składającej się z emiterów z promieniem apertury obszaru czynnego równym 5 μm . Rysunek wykonano dla dwóch wybranych odległości między środkami emiterów. Po lewej stronie przedstawiony jest rozkład temperatury dla odległości pomiędzy emiterami równej 100 μm , a po prawej dla odległości między emiterami wynoszącej 70 μm . Założenia dla obliczeń przedstawione są na rysunku. Dla odległości między emiterami równej 70 μm temperatura analizowanego fragmentu emitera nie spada poniżej 322 K, a w przypadku większości zwierciadeł DBR po stronie n oraz całej górnej mesy, poniżej 324 K. Fragment warstw nad i pod obszarem czynnym nagrzewa się do wartości temperatury większych niż 338 K. Z kolei, gdy odległość pomiędzy emiterami wynosi 100 μm tak wysokie temperatury nie są obserwowane. Przyrost temperatury w obszarze czynnym nie przekracza 36 K, a w znajdującym się bezpośrednio nad nim fragmencie zwierciadeł DBR typu p 30 K. Temperatura większości struktury nie przekracza 315 K. Zwiększenie odległości między środkami emiterów z 70 μm do 100 μm przyczyniło się zmniejszenia maksymalnego przyrostu temperatury o około 30%.



Rys.8. Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym uzyskany dla emitera z pierwszego rzędu 13-rzędowej matrycy półnieskończonej laserów VCSEL, której emitery miały promień apertury wynoszący 5 μm i były w odległości 100 μm (po lewo) oraz 70 μm (po prawo) od siebie.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki analizy termicznej matryc arsenkowych laserów VCSEL z aperturą elektryczną wykonaną w postaci utlenionej warstwy Al_xO_y . Przyrządy były projektowane na emisję fali około 850 nm, jednak uzyskane wyniki mają charakter bardziej ogólny. W szczególności zbadano w jaki sposób rozłożenie emiterów, wielkość ich apertury obszaru czynnego oraz ilość wydzielonego w nich ciepła wpływają na warunki cieplne panujące we wnętrzu matrycy danego typu. Obliczenia przeprowadzono dla matryc nieskończonych i półnieskończonych oraz pojedynczego emitera. Jak wynika z przedstawionej analizy zwiększenie promienia obszaru czynnego pojedynczego emitera matrycy z 2 μm do 8 μm przy wydzielonej w nim mocy 10 mW, powoduje, że maksymalny przyrost temperatury zmniejsza się: o około 315% dla pojedynczego emitera; o około 75% dla matrycy nieskończonych i $d < 100 \mu\text{m}$; o około 250% dla matrycy nieskończonych i $d > 100 \mu\text{m}$. Zwiększenie emitowanej mocy z 10 mW do 15 mW powoduje, że maksymalny przyrost temperatury zwiększa się o około 55% dla

pojedynczego emitera i o około 60% dla matryc nieskończonych. Analiza matryc półnieskończonych pozwoliła zbadać efekt wzajemnego samonagrzewania się emiterów matrycy nazywany efektem *thermal crosstalk*. Wyniki pokazują, że dla odległości między sąsiednimi emiterami większej od 100 μm wzajemne oddziaływanie cieplne emiterów jest już mocno ograniczone, a maksymalny przyrost temperatury ponad temperaturę otoczenia w matrycy dąży do wartości odpowiadającej pojedynczemu emiterowi o analogicznych parametrach konstrukcyjnych i warunkach zasilania. Zaprezentowane wyniki mogą służyć jako zestaw wskazówek dla zespołów projektujących i wytwarzających matryce laserowe pomagając w ich optymalizacji oraz w celu oszacowania ich niezawodności czy czasu życia przyrządów na nich bazujących.

Autorzy pragną podziękować Narodowemu Centrum Badań i Rozwoju za wsparcie badań i rozwoju technologii laserów VCSEL w ramach grantu MAZOWSZE/0032/19-00.

Autorzy: dr hab. inż. Robert P. Sarzała, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 217/221, 93-005 Łódź, E-mail: robert.sarzała@p.lodz.pl; mgr inż. Julita Poborska, ICFO - The Institute of Photonic Sciences, The Barcelona Institute of Science and Technology, Av. Carl Friedrich Gauss, 3 08860 Castelldefels Barcelona (Spain), E-mail: Julita.Poborska@icfo.eu.

LITERATURA

- [1] Wadhvani, P., Yadav, S., VCSEL Market Size Worth Over \$5bn by 2027, Global Market Insights (2021), February 1
- [2] Seurin J.F., Zhou D., Xu G., Miglo A, Li D., Chen T., Guo B., Ghosh C, High-efficiency VCSEL arrays for illumination and sensing in consumer applications, *Proc. of SPIE* 9766 (2016) 97660D-1(9)
- [3] Dummer M., Johnson K., Rothwell S., Tatah K., Hibbs-Brenner M., The role of VCSELs in 3D sensing and LiDAR, *Proc. SPIE* 11692 (2021), Optical Interconnects XXI, 116920C
- [4] Pruijboom A., Apetz R., Conrads R., Deppe C., Derra G., Gronenborn S., Kolb J.S, Moench H., Ogiewa F., Pekarski P., Pollmann-Retsch J., Weichmann U., Vertical-cavity surface emitting laser-diodes arrays expanding the range of high-power laser systems and applications, *J. Laser Appl.* 28 (2016), n.3, 032005-1(7)
- [5] Zhong C.Y., Zhang X., Liu D., Ning Y.Q., Wang L.J., Enhanced thermal stability of VCSEL array by thermoelectric analysis-based optimization of mesas distribution, *Chinese Phys. B*, 26 (2017), n.6, 064204
- [6] Wang C., Li C., Dai J., Lan T., Zhou G., Meng J., Wang Z., Thermal analysis of VCSEL arrays based on first principle theory and finite element method, *Opt. Quantum Electron.*, 51 (2019), n.6, 1–14
- [7] Wu G.M., Kung F.C., Lee C.Y., Study of fabrication and characterization of high power 850 nm vertical-cavity surface-emitting laser arrays, *Surf. Coatings Technol.*, 387 (2020), 125489
- [8] Qi Y., Li W., Liu S., Ma X., Optimized arrangement of vertical cavity surface emitting laser arrays to improve thermal characteristics, *J. Appl. Phys.*, 126 (2019), n.19, 19310
- [9] Xun M., Pan G., Zhao Z., Sun Y., Yang C., Kan Q., Analysis of Thermal Properties of 940-nm Vertical Cavity Surface Emitting Laser Arrays, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 68 (2021), n.1, 158-163
- [10] Gębski M., Śpiewak P., Kołkowski W., Pasternak I., Głowadzka W., Nakwaski W., Sarzała R.P., Wasiak M., Czyszanowski, T. Strupiński W., First vertical-cavity surface-emitting laser made entirely in Poland, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 69 (2021), n.3, e137272-1-e137272-6
- [11] Sokół A.K., Sarzała R.P., Thermal management of GaInNAs/GaAs VECSELs, *Opto Electronics Review.*, 21 (2013) n.2, 191-198
- [12] Liao W.Y., Li J., Li C.C., Guo X.F., Guo W.T., Liu W.H., Zhang Y.J., Wei X., Tan M.Q., Oxide-aperture-dependent output characteristics of circularly symmetric VCSEL structure, *Chin. Phys. B*, 29 (2020), n.2, 024201-7