

doi:10.15199/48.2023.10.48

Analiza własności cieplnych matryc laserów VCSEL emitujących falę 850 nm

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki numerycznej trójwymiarowej analizy termicznej w stanie ustalonym macierzy laserów VCSEL (laserów emitujących z powierzchni z pionową wnęką rezonansową) emitujących falę 850 nm, wykorzystując metodę elementów skończonych. Zbadano wpływ na wzrost temperatury w matrycy rozmiaru apertury tlenkowej obszaru czynnego pojedynczych emiterów matrycy, rozmiaru matrycy, rozmiaru podłoża, odległości między emiterami, ilości ciepła wydzielonego w każdym emiterze oraz jakości połączenia termicznego między matrycą a chłodnicą.

Abstract. A thermal 3D steady-state analysis of 850 nm vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) arrays based on the finite element method (FEM) is presented in this paper. Several oxide aperture diameters active region of single emitter, array sizes and substrate sizes, several values of the distance between adjacent emitters, various heat source densities, and the impact of the quality of thermal connections between the semiconductor structure and the heat sink are considered. (Analysis of thermal properties of 850-nm vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) arrays).

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

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

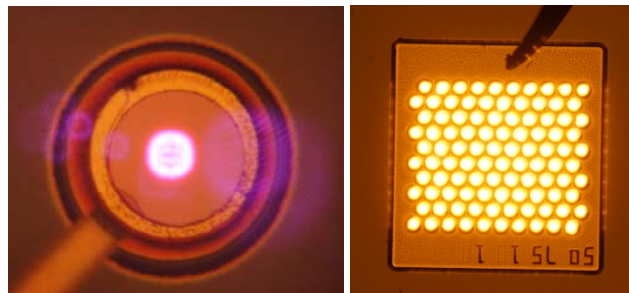
Wstęp

Rok 2018 był przełomowy dla laserów VCSEL (ang. VCSEL – Vertical Cavity Surface Emitting Laser) emitujących w podczerwieni, a szczególnie dla dwuwymiarowych matryc tych przyrządów. To właśnie wtedy na bardzo dużą skalę rozpowszechniło się wiele aplikacji konsumenckich, w szczególności tych związanych ze smartfonami, których działaniem bazuje w dużej części na wykorzystaniu matryc wspomnianych laserów. Obecnie do najdynamiczniej rozwijających się technologii wykorzystujących lasery VCSEL i ich dwuwymiarowe matryce oprócz zastosowań telekomunikacyjnych możemy zaliczyć technologie LIDAR, skanowanie przestrzeni i pomieszczeń, poruszanie się pojazdów autonomicznych i dronów, wspomaganie dla osób niepełnosprawnych, rozpoznawanie gestów, technologie rozszerzonej i wirtualnej rzeczywistości, autofocus, czujniki i detektory optyczne, urządzenia nadzoru itp. [1-4].

Klienci końcowi, a co za tym idzie wspomniane nowe aplikacje, wymagają często przyrządów o coraz lepszych parametrach pracy, w tym wyższej ich wydajności i niezawodności, a dodatkowo w znacznie większych ilościach i niższej cenie. Pozwała to na wprowadzanie na rynek urządzeń oferujących różne nowe funkcje, wychodząc naprzeciw oczekiwaniom konsumentów. Poszerzenie zastosowań matryc laserowych może zostać osiągnięte np. poprzez zwiększanie gęstości emitowanej przez nie mocy optycznej. Jedną z większych trudności w tym wypadku jest właściwe zaprojektowanie urządzenia pod względem tzw. termicznego zarządzania ciepłem. Chodzi tu zarówno o utrzymanie w miarę niskiej temperatury pracy przyrządu jak i jednorodnego rozkładu tej temperatury w jego wnętrzu. Często wymaga to wielu obliczeń numerycznych.

Ogromny popyt na lasery VCSEL emitujące w podczerwieni i ich matryce sprawił, że obecnie przeważa on nad podażą tych urządzeń. Otwierają się więc tu możliwości wejścia na rynek nawet dla mniejszych i lokalnych wytwórców, tym bardziej, że wiele tego typu urządzeń jest projektowanych i wytwarzanych pod bardzo konkretnego konsumenta. Wynika stąd, że często wiele z tych konstrukcji projektuje się od podstaw tak, żeby charakteryzowały się bardzo specyficznymi parametrami pracy. To właśnie między innymi te powody były podstawą opracowania technologii wytwarzania wspomnianych laserów i ich matryc w warunkach polskich. Zakończony

właśnie wspólny projekt firmy VIGO Photonics, Politechniki Łódzkiej i Politechniki Warszawskiej realizowany w ramach grantu finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju zaowocował powstaniem zarówno pierwszych polskich laserów VCSEL jak i pierwszych polskich dwuwymiarowych matryc tych przyrządów (patrz Rysunek 1).



Rys.1. Zdjęcie działającego pojedynczego lasera VCSEL (po lewej) oraz działającej matrycy laserów VCSEL składającej się ze 100 emiterów (po prawej). Lasery wytworzono w VIGO Photonics w ramach grantu MAZOWSZE/0032/19-00 i pomierzono w Instytucie Fizyki Politechniki Łódzkiej (IF PŁ). Zdjęcia Marcin Gębski

Wytwarzanie tak zaawansowanych przyrządów jak matryce laserów VCSEL musi być poprzedzone szeregiem badań w tym symulacji komputerowych wielu zjawisk fizycznych decydujących o ich pracy. Jak wspomniano już wcześniej jednym z kluczowych problemów projektowania matryc laserowych, i jak się okazuje cały czas aktualnym, jest właściwe zaprojektowanie tych urządzeń z uwzględnieniem zjawisk termicznych [5-6]. Prezentowana praca skupia się na wybranych aspektach analizy zagadnień cieplnych w matrycach laserów VCSEL zbudowanych na bazie arsenku galu i przeznaczonych do emisji fali w bliskiej podczerwieni. W szczególności w pracy przeanalizowano wpływ rozmiaru matrycy na wzrost temperatury w jej wnętrzu. Analizowano matryce o rozmiarach od 2x2 do 14x14 emiterów. W obliczeniach założono różne apertury obszaru czynnego pojedynczego emitera matrycy (od 4 μm do 16 μm), a także różną odległość między emiterami w matrycy. Dodatkowo obliczenia przeprowadzono dla różnej mocy cieplnej wydzielonej w pojedynczym emiterze. Zbadano także wpływ rozmiaru struktury półprzewodnikowej na wzrost i rozkład temperatury w matrycy laserowej o zadanej wielkości.

Przeanalizowano także wpływ jakości połączenia termicznego między półprzewodnikową strukturą laserową a chłodnicą. Na koniec zbadano jaki wpływ na wyniki ma uproszczenie polegające na założeniu źródła ciepła tylko w obszarze czynnym pojedynczego emitera matrycy.

Struktura laserowa i model obliczeniowy

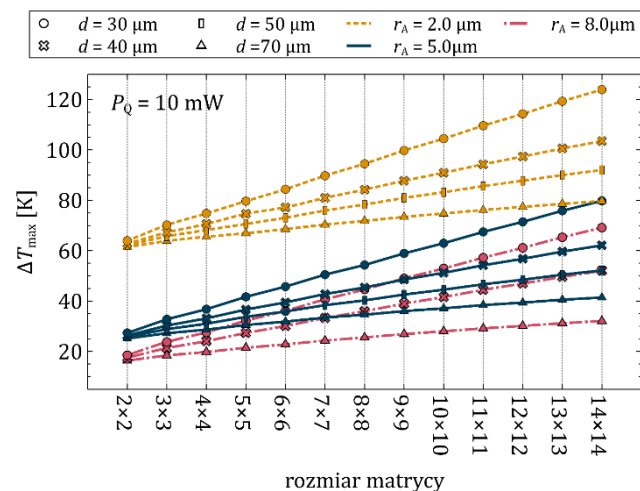
Analizowane w pracy matryce laserów VCSEL zbudowane były na bazie pojedynczego emitera emitującego z górnej powierzchni z wytrawioną mesą. Lasery wykonano na bazie materiałów arsenkowych (GaAs, AlGaAs, InGaAs), a aperturę ich obszaru czynnego zdefiniowano za pomocą utleniania warstw AlGaAs o dużej zawartości aluminium. Struktura półprzewodnikowa powstała na podłożu (n+)GaAs domieszkowany krzemem. Na jego powierzchni wyhodowano najpierw dolne zwierciadło DBR (*Distributed Bragg Reflector*) składające się z 35.5 par warstw $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ i $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ o grubościach odpowiednio 48.6 nm oraz 43.1 nm. Następnie wyhodowano obszar czynny lasera składający się z 5 studni kwantowych $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}$, przedzielonych czterema barierami $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ o grubościach odpowiednio 3.4 oraz 6.8 nm. Strukturę zamknięto górnym zwierciadłem DBR składającym się z 17 par warstw $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ i $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ o grubościach odpowiednio 43.1 nm oraz 48.6 nm. Rezonator lasera zaprojektowany został na półtorej długości fali. Na przejściu między rezonatorem, a górnym zwierciadłem DBR znajduje się warstwa materiału $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$, która po częściowym utlenieniu (Al_xO_y) pełni rolę apertury elektrycznej wyznaczając zarazem granicę obszaru czynnego lasera w kierunku radialnym. Szczegóły konstrukcyjne, opis zastosowanych technologii wytwarzania oraz charakterystyki eksploatacyjne przyrządu można znaleźć w pracy [7].

Symulacje numeryczne przeprowadzono stosując autorskie oprogramowanie opracowane z Zespołu Fotoniki IF PŁ. Zastosowany model bazujący na metodzie elementów skończonych pozwala 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, uwzględniając fakt, że zdecydowana większość ciepła odpływa z urządzenia poprzez miedzianą chłodnicę, której spód utrzymywany jest w temperaturze 300 K. Bardziej szczegółowy opis modelu, założeń odnośnie warunków brzegowych jak i wartości parametrów materiałowych można znaleźć w pracy [8]. Organizacja pojedynczych emiterów w matryce laserowej była podobna do przedstawionej w pracy [9].

Wyniki

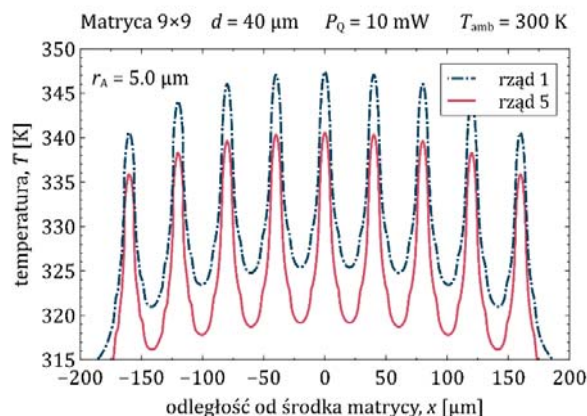
Rysunek 2 przedstawia zależność maksymalnego przyrostu temperatury ponad temperaturę 300 K od rozmiaru matrycy skończonej (analizowano matryce o rozmiarach od 2x2 do 14x14 emiterów). Wielkości promienia apertury r_A oraz odległości d pomiędzy środkami emiterów zawarte są na rysunku. Moc źródła ciepła dla wszystkich przypadków wynosiła 10 mW na emiter. Można zauważyć, że struktury o promieniu apertury obszaru czynnego równym 2 μm nagrzewają się najintensywniej i znacznie odbiegają od wyników dla matryc z emiterami o większych aperturach. Można zauważyć także, że dla danej odległości między emiterami zmiana promienia apertury prowadzi do zmiany maksymalnego przyrostu temperatury

o pewną stałą wartość, niezależnie od rozmiaru matrycy. Istotnie, zmiana promienia apertury z 5 μm na 2 μm dla wybranej odległości między środkami emiterów powoduje, że maksymalny przyrost temperatury zwiększa się o około 40 K, natomiast z 8 μm do 5 μm o około 10 K. Ponadto analizując Rysunek 2 można zaobserwować, że im mniejsza odległość pomiędzy środkami emiterów tym bardziej, wraz ze zwiększaniem rozmiaru matrycy, rośnie maksymalny przyrost temperatury. Przyrost temperatury zwiększa się tym bardziej, im większy jest promień apertury.



Rys.2. Zależność maksymalnego przyrostu temperatury ponad temperaturę 300 K dla matryc laserów VCSEL zawierających różną ilość emiterów (mocy źródła ciepła 10 mW na emiter), różną odległości d między środkami emiterów i różne promienie apertury

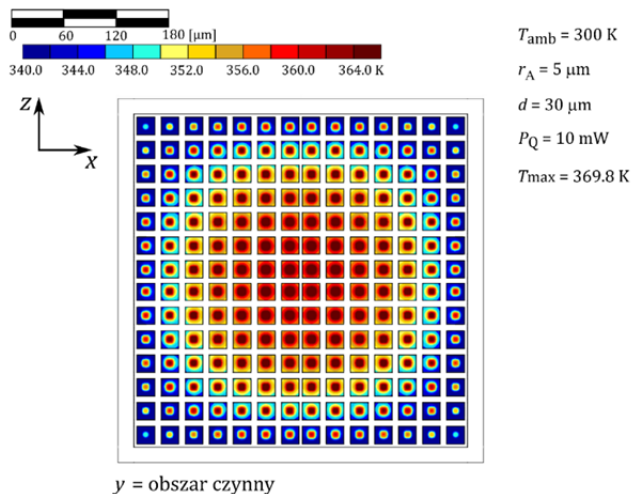
Na Rysunku 3 porównano rozkłady temperatury w środku obszaru czynnego w środkowym i skrajnym rzędzie matrycy 9x9 laserów VCSEL. W emiterze centralnym matrycy przyrost temperatury ponad temperaturę 300 K jest wyższy o około 17% w porównaniu do emitera skrajnego ze środkowego rzędu. Z kolei porównując emiter centralny oraz narożny matrycy okazuje się, że przyrost temperatury w emiterze centralnym jest większy o około 32%.



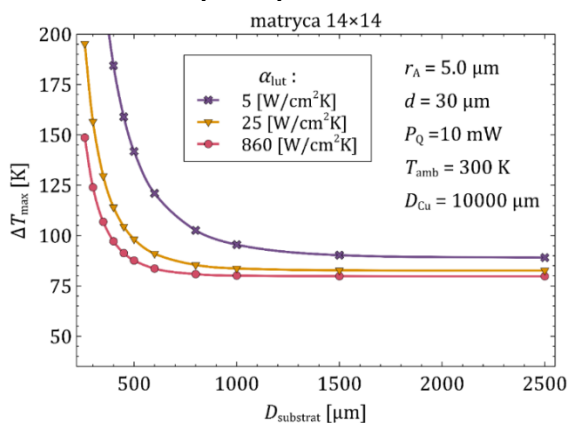
Rys.3. Rozkład temperatury w środku obszaru czynnego w 81-elementowej matrycy laserów VCSEL w centralnym jej rzędzie (rzęd 1) i skrajnym rzędzie (rzęd 5) emiterów. Współrzędna x odpowiada środkom emiterów

Wspomniana wyżej niejednorodność rozkładu temperatury w matrycy skończonej jest dobrze widoczna na Rysunku 4. Przedstawiono tam rozkłady temperatury w przekroju xz przechodzącym przez środek obszaru czynnego 196-elementowej matrycy laserów VCSEL. Promień apertury obszaru czynnego pojedynczego emitera

założono na 5 μm , a moc źródła ciepła na emiter 10 mW. Rysunek wykonano dla odległości między emiterami wynoszącej 30 μm . Widzimy, że bliskie ułożenie emiterów powoduje silne oddziaływanie cieplne między nimi, zwiększając maksymalną temperaturę w matrycy. Z dalszych obliczeń wynika, że po rozsunięciu emiterów na odległość 70 μm efekt cieplnego oddziaływania między emiterami jest nadal zauważalny, jednak w ten sposób możemy obniżyć maksymalny przyrost temperatury w strukturze o około 69%.



Rys.4. Rozkład temperatury w przekroju xz na wysokości środka obszaru czynnego matrycy 14×14 laserów VCSEL otrzymany przy warunkach zamieszczonych na rysunku

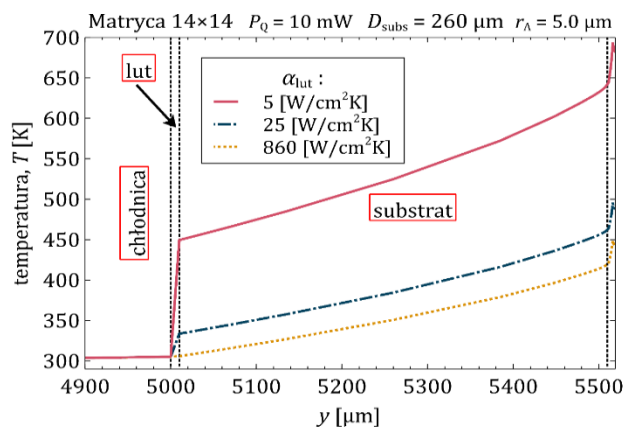


Rys.5. Maksymalny przyrost temperatury ponad temperaturę 300 K w funkcji rozmiaru substratu w zależności od wartości współczynnika przenikania ciepła lutu dla matrycy 14×14 laserów VCSEL

Kolejnym istotnym parametrem decydującym o warunkach cieplnych panujących w matrycy laserowej jest jakość termiczna kontaktu między strukturą półprzewodnikową a chłodnicą. Dlatego dla analizowanych wcześniej struktur przeprowadzono obliczenia, w których przyjęto różne wartości współczynnika przenikania ciepła kontaktu termicznego – α_{lut} . Współczynnik ten określa ilość ciepła, jaka przeniknie przez barierę o jednostkowym polu powierzchni, gdy różnica temperatur pomiędzy obiema jej stronami wynosi 1 K. Zbadano trzy wartości współczynnika α_{lut} : 860 $\text{W}/(\text{cm}^2\text{K})$, 25 $\text{W}/(\text{cm}^2\text{K})$ oraz 5 $\text{W}/(\text{cm}^2\text{K})$. Zgodnie z danymi literaturowymi największa badana wartość – 860 $\text{W}/(\text{cm}^2\text{K})$ opisuje sytuację idealną, kiedy to styk lut-chłodnica oraz styk lut-półprzewodnik nie stanowią żadnej bariery dla ciepła, które swobodnie przez nie przepływa. Z kolei wartość 25 $\text{W}/(\text{cm}^2\text{K})$ odpowiada bardziej rzeczywistemu kontaktowi termicznemu dla lutu indowego.

Ostatnia wartość 5 $\text{W}/(\text{cm}^2\text{K})$ odpowiada już dość słabemu kontaktowi termicznemu.

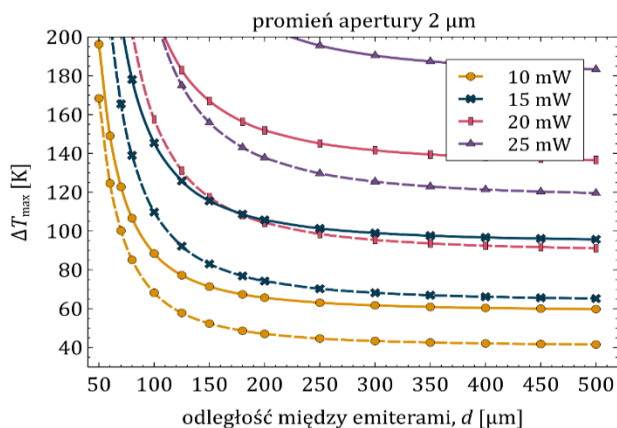
Przedstawione do tej pory wyniki wykonano przy założeniu, że różnej wielkości matryce laserowe wykonane są na podłożu (substrat), którego rozmiar jest stały, a połowa jego boku w kierunkach x i z wynosiła $D_{\text{subs}} = 2500$ μm . Postanowiono sprawdzić, jak zmniejszanie rozmiarów substratu aż do osiągnięcia wartości równej rozmiarowi matrycy, wpłynie na nagrzewanie się matryc. Przyjęto przy tym promień apertury obszaru czynnego emitera 5 μm , moc źródła ciepła wynoszącą 10 mW na emiter oraz odległość między środkami emiterów 30 μm . Zależność maksymalnego przyrostu temperatury ponad temperaturę 300 K od rozmiaru podłoża dla przypadku matryce 14×14 emiterów przedstawiono na Rysunku 5. Dla wszystkich badanych wartości współczynnika przenikania ciepła lutu indowego i rozmiarów matryc zmniejszanie rozmiaru podłoża do 1000 μm nie wpłynęło znacząco na maksymalny przyrost temperatury w strukturze. Jednakże dalsze zmniejszanie wymiarów podłoża powoduje, że temperatura w strukturze zaczyna rosnąć – tym intensywniej, im więcej emiterów w matrycy oraz im niższa jakość połączenia termicznego. Wyniki pokazują, że niezależnie od rozmiaru matrycy, przy najmniejszej badanej wartości współczynnika kontaktu cieplnego struktury z chłodnicą, tzn. 5 $\text{W}/(\text{cm}^2\text{K})$, zmniejszenie połowy długości boku podłoża w kierunkach x i z od 2500 μm do wartości odpowiadającej rozmiarowi samej matrycy powoduje, że maksymalny przyrost temperatury ponad temperaturę 300 K zwiększa się o ponad 300%. Dla obliczeń wykorzystujących idealne połączenie termiczne ($\alpha_{\text{lut}} = 860 \text{ W}/(\text{cm}^2\text{K})$) obserwuje się wzrost ΔT_{max} o około 100%. Ponadto można zaobserwować, że obliczenia dla współczynnika przenikania ciepła równego 25 $\text{W}/(\text{cm}^2\text{K})$ dają wyniki zbliżone do wyników uzyskanych dla idealnego połączenia termicznego.



Rys.6. Rozkład temperatury w kierunku y w centralnym emiterze matrycy 14×14 laserów VCSEL umieszczonej na podłożu o rozmiarze samej matrycy w zależności od zadanej wartości współczynnika przenikania ciepła lutu indowego

Rysunek 6 przedstawia rozkład temperatury w kierunku y w środku centralnego emitera 196-elementowej matrycy laserów VCSEL, w której wymiar substratu w kierunkach x i z to $D_{\text{subs}} = 260$ μm . Gdy jakość połączenia termicznego jest idealna (860 $\text{W}/(\text{cm}^2\text{K})$), ciepło bez większych problemów przepływa przez lut do substratu do chłodnicy, co uwidacznia się w bardzo nieznacznym spadku temperatury na warstwie lutu. Dla dwóch pozostałych badanych wartości współczynnika przenikania ciepła lutu indowego, które wynoszą 25 $\text{W}/(\text{cm}^2\text{K})$ oraz 5 $\text{W}/(\text{cm}^2\text{K})$, ze względu na utrudnione przewodzenie ciepła do chłodnicy, w folii indowej pojawia się duży skok temperatury, który wpływa też na intensywniejsze nagrzewanie się warstw położonych

powyżej. Dla najgorszej badanej jakości połączenia termicznego między strukturą a chłodnicą, skok temperatury na połączeniu substratu z chłodnicą wynosi około 150 K, a dla wartości współczynnika $\alpha_{\text{lut}} = 25 \text{ W}/(\text{cm}^2\text{K})$ około 40 K. Z kolei porównując temperatury w okolicach obszaru czynnego można zaobserwować, że różnica pomiędzy wynikami dla struktury o idealnej jakości połączenia termicznego, a struktury, dla której współczynnik przenikania ciepła lutu wynosi $25 \text{ W}/(\text{cm}^2\text{K})$ to około 50 K. Natomiast porównując idealne połączenie termiczne oraz takie, dla którego współczynnik przenikania ciepła to $5 \text{ W}/(\text{cm}^2\text{K})$, okazuje się, że różnica ta może wynosić nawet około 200 K. Na podstawie uzyskanych wyników można wnioskować, że wykonanie kontaktu cieplnego o jak najwyższej jakości połączenia termicznego pomiędzy chłodnicą a podłożem jest niezbędne, aby utrzymać możliwie minimalną temperaturę w matrycy skończonej arsenkowych laserów VCSEL.



Rys.7. Maksymalny przyrost temperatury w matrycy nieskończonej w zależności od wydzielonej mocy w pojedynczym emiterze o promieniu apertury obszaru czynnego $2 \mu\text{m}$. Linie ciągłe odpowiadają sytuacji gdy źródła ciepła były skupione w obszarze czynnym, a linie przerywane dla przypadku gdy uwzględniono rozkład źródeł ciepła wynikający z modelu elektryczno-cieplnego

Na rysunku 7 pokazano przykładowe przyrosty temperatury w matrycy uzyskany w przypadku rozłożenia źródeł ciepła w emiterze matrycy laserowej, wynikający z obliczeń termiczno-elektrycznych takiego emitera i dla przypadku, gdy założono tylko jedno główne źródło ciepła znajdujące się w obszarze czynnym emitera. Jak widać w tym pierwszym przypadku możemy dostać niższą temperaturę w matrycy nawet do około 30% dla matryc składających się z emiterów o małych aperturach obszarów czynnych ($4 \mu\text{m}$) i do 20% w przypadku analogicznych matryc z emiterami o szerszych aperturach ($10 \mu\text{m}$).

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki analizy termicznej matryc arsenkowych laserów VCSEL z aperturą elektryczną wykonaną w postaci warstwy utlenionej. Przyrządy były projektowane na emisję fali około 850 nm , jednak uzyskane wyniki mają charakter bardziej ogólny. W szczególności pokazano liniowy wzrost temperatury w matrycy podczas zwiększania jej rozmiarów z 2×2 do 14×14 emiterów. Wzrost ten w tym przypadku sięga około 100% (w przypadku dużych podłoży). Niejednorodność rozkładu temperatury w matrycy w dużej mierze zależy od jej wielkości jak i od wzajemnej odległości między emiterami matrycy. Może on wynosić nawet 30-40% porównując ze sobą centralny i skrajny emiter matrycy. Jednorodność tego rozkładu można znacznie poprawić (nawet o prawie 70%) zwiększając dystans między poszczególnymi emiterami

matrycy. W celu wyrównania różnic temperatury pomiędzy emiterami w matrycy laserowej można zmniejszyć wymiary podłoża na którym ona spoczywa do rozmiaru matrycy. Spowoduje to, że wartość temperatury w poszczególnych emiterach będzie bardziej zbliżona, jednak maksymalny przyrost temperatury zwiększy się o około: 100%, gdy $\alpha_{\text{lut}} = 860 \text{ W}/(\text{cm}^2\text{K})$; 150%, gdy $\alpha_{\text{lut}} = 25 \text{ W}/(\text{cm}^2\text{K})$; 370%, gdy $\alpha_{\text{lut}} = 5 \text{ W}/(\text{cm}^2\text{K})$. Natomiast w przypadku dużego podłoża zastąpienie idealnego połączenia cieplnego ($\alpha_{\text{lut}} = 860 \text{ W}/(\text{cm}^2\text{K})$) połączeniem rzeczywistym prowadzi do zwiększenia maksymalnego przyrostu temperatury ponad temperaturę otoczenia o około: 30%, gdy $\alpha_{\text{lut}} = 25 \text{ W}/(\text{cm}^2\text{K})$; 165%, gdy $\alpha_{\text{lut}} = 5 \text{ W}/(\text{cm}^2\text{K})$. Zaprezentowane wyniki mogą służyć jako zestaw wskazówek dla zespołów projektujących i wytwarzających matryce laserowe pomagając w ich optymalizacji oraz w celu oszacowania ich niezawodności i sprawności.

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

Literatura i autorzy

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] Minseong Park, Yongmin Baek, Mesgana Dinare, Daeon Lee, Kyung-Ho Park, Jungho Ahn, Dahee Kim, Joseff Medina, Won-Jin Choi, Sihwan Kim, Changjie Zhou, Junseok Heo and Kyusang Lee, "Hetero-integration enables fast switching time-of-flight sensors for light detection and ranging", *Scientific Reports* (2020) 10:2764, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59677-x>
- [2] 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
- [3] N. Ledentsov Jr., L. Chorchos, O. Yu. Makarov, M. Bou Sanayeh, J.-R. Kropp, I. E. Titkov, V. A. Shchukin, V. P. Kalosha, J. P. Turkiewicz, and N. N. Ledentsov, "Advances in design and application of compact VCSEL arrays: from multicore fiber to optical wireless and beyond", *Proc. SPIE* 12020, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXVI, 1202008 (2 March 2022); <https://doi.org/10.1117/12.2607878>
- [4] Hao-Tien Cheng, Yun-Cheng Yang, Te-Hua Liu and Chao-Hsin Wu, "Recent Advances in 850 nm VCSELs for High-Speed Interconnects", *Photonics* (2022), 9, 107. <https://doi.org/10.3390/photonics9020107>
- [5] Dongyue Jin, Shaomeng Yang, Feng Zhang, Ling Wu, Baolu Guan, Yingqi Yang, and Wanrong Zhang, "Thermal Design of VCSEL Arrays for Optical Output Power Improvement", *IEEE Transactions On Electron Devices*, VOL. 69, No. 7, (2022) 3761-3767
- [6] 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
- [7] 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
- [8] Robert Sarzała, Tomasz Czyszanowski, Michał Wasiak, Maciej Dems, Łukasz Piskorski, Włodzimierz Nakwaski, Krassimir Panajotov, "Numerical self-consistent analysis of VCSELs", *Advances in Optical Technologies*, Volume 2012 (2012), Article ID 689519, 17 pages, pp.1-17
- [9] Robert P. Sarzała, Julita Poborska, "Analiza termiczna dwuwymiarowych matryc laserów VCSEL", *Przegląd Elektrotechniczny*, R.98, Nr 9 (2022), pp. 167-169, doi:10.15199/48.2022.09.3