

Analiza wpływu zmian konstrukcyjnych lasera azotkowego na możliwość zwiększenia jego wyjściowej mocy optycznej

Streszczenie. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki numerycznej analizy możliwości zwiększenia mocy wyjściowej uzyskiwanej z krawędziowego lasera azotkowego oraz zaprojektowanych na jego podstawie jednowymiarowych matryc laserowych poprzez zastosowanie wybranych zmian konstrukcyjnych. Dwuwymiarowy elektryczno-ciepły model numeryczny został skalibrowany dla danych eksperymentalnych otrzymanych dla lasera pracującego z falą ciągłą w temperaturze pokojowej wykonanego w laboratorium Instytutu Wysokich Ciśnień UNIPRESS Polskiej Akademii Nauk. Przeprowadzone obliczenia miały na celu określenie wpływu na optyczną moc wyjściową modelowanych przyrządów takich parametrów konstrukcyjnych, jak: szerokość chipu laserowego, grubość podłoża, grubość warstwy złota w kontakcie elektrycznym typu p, liczba i rozstawienie emiterów w matrycy laserowej.

Abstract. This paper presents calculation results of performance of III-N-based laser diode and its arrays (bars) with various package modifications. We adjusted our 2D thermal-electrical model to room-temperature continuous-wave operating characteristics of nitride-based edge-emitting laser fabricated in the Laboratory of Institute of High Pressure Physics. The impact of chip width, substrate thickness, thickness of p-type gold electrode, number of emitters and emitter-to-emitter distance on output power limits of nitride laser diode is investigated. **Computational analysis of output power limits of III-N-based laser diode with various package modifications**

Słowa kluczowe: GaN, laser półprzewodnikowy, matryca laserowa, modelowanie, oporność cieplna.

Keywords: GaN, semiconductor laser diode, laser array, simulation, thermal resistance.

doi:10.12915/pe.2014.09.17

Wstęp

Azotkowe lasery krawędziowe i ich jednowymiarowe matryce (linijki laserowe) znajdują zastosowanie m.in. w przechowywaniu danych Blu-Ray, wyświetlaczach [1], drukarkach [2], krystalizacji warstw [3], medycynie, ochronie środowiska [4], reprografii [5], fotolitografii [6] i obróbce laserowej [7]. Dla większości spośród wymienionych zastosowań wymagana jest duża moc wyjściowa oraz praca lasera z falą ciągłą CW (ang. *Continuous-Wave*) w temperaturze pokojowej RT (ang. *Room Temperature*). Otrzymanie dużej mocy optycznej z diod laserowych wymaga dostarczenia do przyrządu jeszcze większej mocy elektrycznej. Biorąc pod uwagę ograniczoną sprawność zamiany energii elektrycznej na optyczną w laserach azotkowych (<40%) prowadzącą do generacji dużej ilości ciepła w ich wnętrzu, moc wyjściową tych przyrządów można zwiększyć np. optymalizując ich konstrukcje montażowe, a co za tym idzie obniżając ich oporność cieplną. Innym sposobem jest konstruowanie matryc laserowych [3, 8–13]. Ze względu na duże trudności technologiczne występujące podczas ich wytwarzania, matryce laserów azotkowych są rozwijane od niedawna. Linijki laserowe pozwalają uzyskać wysoki próg zarówno dla efektu *thermal roll-over*, jak i dla efektu katastroficznego zniszczenia zwierciadeł COD (ang. *Catastrophic Optical Damage*). Przy ich projektowaniu należy uwzględnić obok oporności cieplnej również niekorzystny efekt wzajemnego oddziaływania cieplnego emiterów (ang. *thermal crosstalk*) [3, 11, 13].

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki samouzgodnionych obliczeń elektryczno-ciepłych dla pojedynczego lasera i dla zaprojektowanych na jego bazie jednowymiarowych matryc laserowych. Przeprowadzone obliczenia miały na celu określenie wpływu różnych zmian konstrukcyjnych w takich przyrządach na ich parametry wyjściowe, w tym na możliwość zwiększenia maksymalnej mocy wyjściowej. Dwuwymiarowy model został skalibrowany dla danych eksperymentalnych otrzymanych dla pracy w trybie CW RT azotkowego lasera krawędziowego wykonanego w Instytucie Wysokich Ciśnień UNIPRESS Polskiej Akademii Nauk. Dzięki znajomości szczegółów konstrukcji modelowanego lasera oraz jego charakterystyk możliwe było przeprowadzenie obliczeń pozwalających określić progową moc wyjściową dla zjawiska *thermal roll-over*. W obliczeniach nie uwzględniono

efektu COD, zakładając, że wystąpi on dla wyższych mocy optycznych niż moce otrzymane podczas symulacji. Przeanalizowano wpływ takich parametrów konstrukcyjnych jak: zmiana szerokości chipu laserowego, zmiana grubości podłoża, zmiana grubości warstwy złota w kontakcie typu p, zmiana liczby emiterów w matrycy i ich rozmieszczenie.

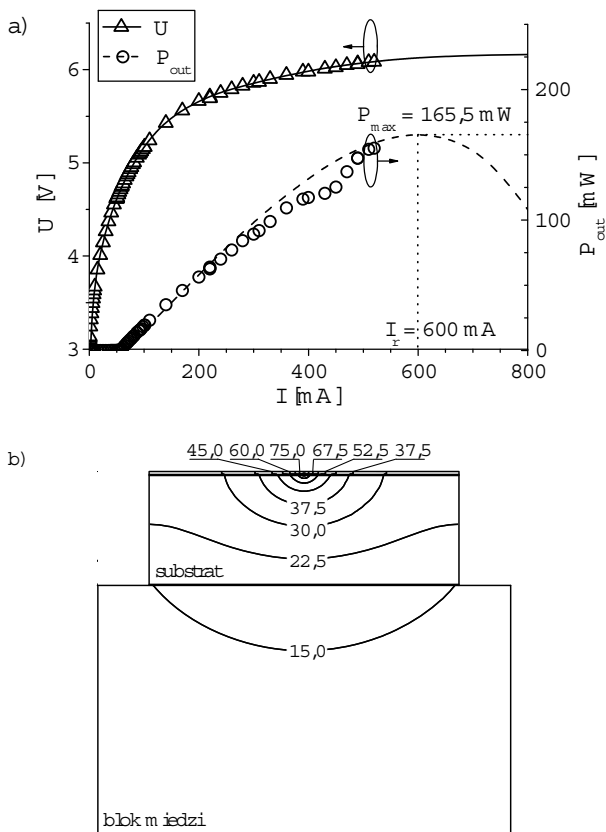
Model

Obliczenia zostały przeprowadzone przy użyciu dwuwymiarowego elektryczno-ciepłego modelu numerycznego skalibrowanego dla lasera wykonanego w laboratorium Instytutu Wysokich Ciśnień Unipress Polskiej Akademii Nauk. Model ten został wcześniej wykorzystany m.in. przy modelowaniu zjawisk elektryczno-ciepłych w laserach kaskadowych [14].

Tabela 1. Parametry elektryczne i cieplne poszczególnych warstw lasera wybranego do modelowania (N_{Si} i P_{Mg} – koncentracja domieszki krzemowej i magnezowej; t – grubość warstwy materiału; σ_{RT} i κ_{RT} – przewodność elektryczna i cieplna dla temperatury pokojowej (300 K); δ_o – współczynnik temperaturowy dla przewodności elektrycznej ($\sigma \sim T^{\delta_o}$); δ_x – współczynnik temperaturowy dla przewodności cieplnej ($\kappa \sim T^{\delta_x}$))

| Materiał | N_{Si}, P_{Mg} [10^{18} cm^{-3}] | t [μm] | σ_{RT} [S/m] | δ_o [–] | κ_{RT} [W/mK] | δ_x [–] |
|--|---|--------------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| Au | – | 2 | $4,4 \cdot 10^7$ | – | 317 | – |
| Ni/Au | – | 0,005 | 0,1 | – | 79 | – |
| ZrO ₂ | – | 0,2 | 10^{-5} | – | 1,5 | – |
| GaN | P_{Mg} (100) | 0,03 | 157 | 4,2 | 64 | –1,4 |
| Al _{0,05} Ga _{0,95} N | P_{Mg} (50) | 0,33 | 58 | 4,3 | 43 | –1,4 |
| Al _{0,05} Ga _{0,95} N | P_{Mg} (10) | 0,1 | 28 | 4,3 | 43 | –1,4 |
| GaN | P_{Mg} (10) | 0,15 | 70 | 4,2 | 88 | –1,4 |
| Al _x Ga _{1-x} N, x: 0–0,12 | P_{Mg} (50) | 0,28 | 142–36 | 4,4 | 37 | –1,4 |
| GaN | – | 0,01 | $2,7 \cdot 10^3$ | –0,2 | 61 | –1,4 |
| 3QW In _{0,1} Ga _{0,9} N | – | 0,047 | 1 | – | 5 | – |
| 4B In _{0,02} Ga _{0,98} N | N_{Si} (5) | | | | | |
| In _{0,02} Ga _{0,98} N | N_{Si} (5) | 0,04 | $4,7 \cdot 10^3$ | –0,2 | 30 | –1,4 |
| GaN | N_{Si} (5) | 0,1 | $1,6 \cdot 10^4$ | –0,2 | 79 | –1,4 |
| Al _{0,08} Ga _{0,92} N | N_{Si} (5) | 0,8 | $4,5 \cdot 10^3$ | –0,2 | 30 | –1,4 |
| Al _x Ga _{1-x} N, x: 0,03–0,08 | N_{Si} (5) | 0,02 | $6,1 \cdot 10^3$ | –0,2 | 40 | –1,4 |
| GaN | N_{Si} (50–100) | 120 | $1-2 \cdot 10^5$ | –0,2 | 132 | –1,4 |
| Ti/Au | – | 0,005 | 1 | – | 22 | – |
| Au | – | 0,5 | $4,4 \cdot 10^7$ | – | 317 | – |

Modelowany laser został wykonany w konfiguracji *p-up* oraz zamocowany do miedzianego bloku za pomocą eutektycznego lutu PbSn o przewodności cieplnej 50 W/mK i grubości 1 μm . Temperatura dolnej powierzchni miedzianego bloku była utrzymywana (za pomocą układu Peltier'a) w temperaturze otoczenia 293 K (20°C). Szerokość chipu lasera wynosi 0,3 mm, a jego długość 0,7 mm. Rozmiary poprzeczne bloku miedzi założone podczas modelowania to $3 \times 10 \text{ mm}^2$. Tabela 1 przedstawia szczegóły konstrukcyjne oraz parametry elektryczne i ciepłe poszczególnych warstw modelowanego lasera otrzymane na podstawie opracowanych zależności przedstawionych w pracy [13]. Oporność elektryczna kontaktu typu *n* założona w obliczeniach wynosiła $5 \cdot 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$, zaś oporność elektryczna kontaktu typu *p* była o rząd wielkości wyższa i dla prądu progowego modelowanego lasera wynosiła $5 \cdot 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$.



Rys.1. a) Charakterystyki eksperymentalne (punkty) dla pracy modelowanej diody laserowej w trybie CW RT (P_{out} – moc wyjściowa, I – prąd, U – napięcie) oraz wyniki obliczeń uzyskane ze skalibrowanego modelu numerycznego (linia ciągła dla charakterystyki $U(I)$ oraz linia przerywana dla $P_{out}(I)$); b) Rozkład przyrostu temperatury ΔT ponad temperaturę otoczenia 293 K w modelowanym laserze i fragmencie jego układu montażowego podczas emisji maksymalnej mocy $P_{max} = 165,5 \text{ mW}$. Maksymalny przyrost temperatury w obszarze czynnym wynosi $\Delta T_{A,max} = 87,4 \text{ K}$

Optyczną moc wyjściową lasera wyznaczono korzystając z założenia, że jest ona proporcjonalna do różnicy prądu zasilania i prądu progowego lasera dla tych warunków zasilania [15]. Wartość prądu progowego lasera j_{th} w zależności od temperatury T_A jego obszaru czynnego można obliczyć z wzoru:

$$(1) \quad j_{th} = j_{th,0} \cdot \exp\left(\frac{T_A - T_{A,0}}{T_0}\right)$$

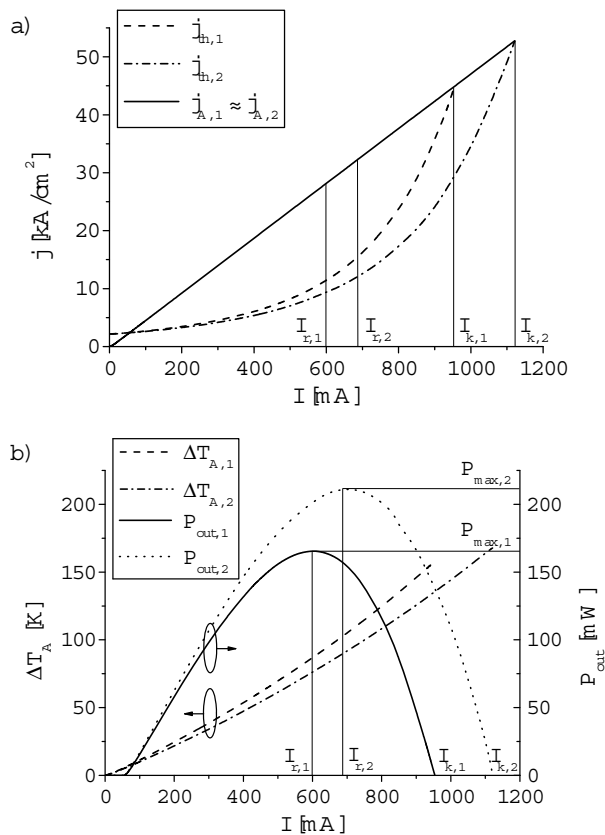
gdzie $j_{th,0}$ to prąd progowy lasera w temperaturze $T_{A,0}$ (odpowiadającej np. warunkom progowym uzyskania akcji

laserowej), a T_0 parametr charakterystyczny (ang. *characteristic temperature*) dla danego lasera. Temperaturę obszaru czynnego można z kolei powiązać z opornością cieplną lasera. Oporność cieplna przyrządu zdefiniowana jest jako stosunek maksymalnego przyrostu temperatury w jego obszarze czynnym ponad temperaturę otoczenia do wydzielonej w nim mocy cieplnej (różnicy pomiędzy elektryczną mocą dostarczoną i wypromieniowaną mocą optyczną).

Na rysunku 1a przedstawiono porównanie wyników obliczeń numerycznych z wynikami eksperymentalnymi, natomiast na rysunku 1b obliczony rozkład przyrostu temperatury w laserze i jego układzie montażowym ponad temperaturę otoczenia (293 K) dla jego pracy w trybie CW RT podczas emisji maksymalnej mocy wyjściowej.

Wyniki

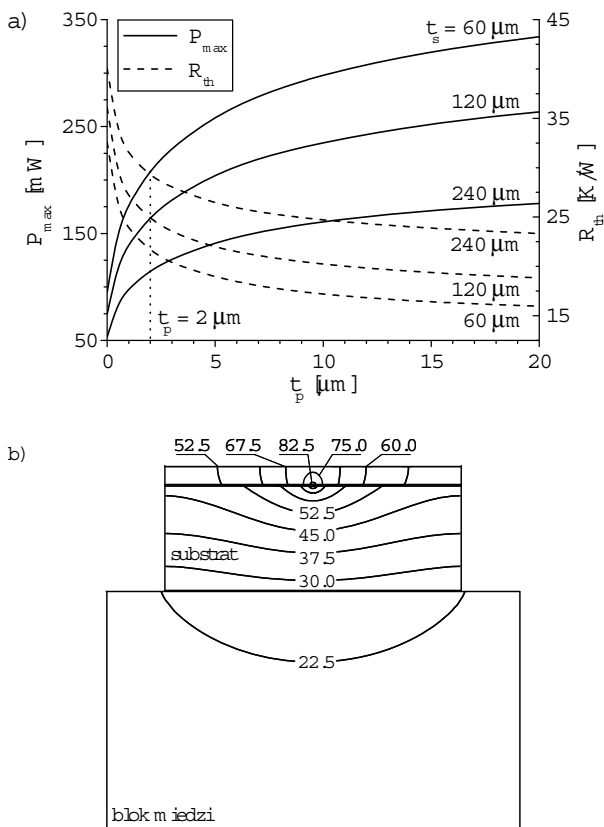
Rysunek 2 przedstawia wyniki obliczeń dla dwóch laserów 1, 2 różniących się grubością warstwy złota t_p w kontakcie elektrycznym typu *p* ($t_{p,1} = 2 \mu\text{m}$, $t_{p,2} = 5 \mu\text{m}$).



Rys.2. a) Progowe gęstości prądu j_{th} , maksymalne gęstości prądu j_A i b) maksymalne przyrosty temperatury ΔT_A w obszarach czynnych oraz moce wyjściowe P_{out} , w funkcji prądu zasilającego I dla dwóch (1, 2) pracujących w trybie RT CW laserów różniących się grubością warstwy złota t_p w kontakcie elektrycznym typu *p* ($t_{p,1} = 2 \mu\text{m}$, $t_{p,2} = 5 \mu\text{m}$). Na rysunku zaznaczono wartości prądów, przy których lasery przestają świecić $I_{k,1} = 954 \text{ mA}$, $I_{k,2} = 1127 \text{ mA}$ oraz wartości, przy których występuje zjawisko *thermal roll-over* $I_{r,1} = 600 \text{ mA}$, $I_{r,2} = 693 \text{ mA}$ i lasery osiągają maksymalne wartości mocy wyjściowej $P_{max,1} = 165,5 \text{ mW}$, $P_{max,2} = 205 \text{ mW}$

Obliczony maksymalny przyrost temperatury ΔT_A (rys. 2a) rośnie szybciej dla lasera 1, co oznacza, że jego oporność cieplna jest wyższa od oporności cieplnej lasera 2 z grubszą warstwą złota. Dla maksymalnych mocy osiąganych przez lasery 1, 2 równych odpowiednio $P_{max,1} = 165,5 \text{ mW}$, $P_{max,2} = 205 \text{ mW}$ wartości oporności cieplnych wynoszą $R_{th,1} = 24,8 \text{ K/W}$, $R_{th,2} = 21,9 \text{ K/W}$. Szybszy przyrost temperatury $\Delta T_{A,1}$ w obszarze czynnym

lasera 1 w porównaniu do tempa przyrostu temperatury dla lasera 2 $\Delta T_{A,2}$ podczas wzrostu prądu zasilającego I , to również nieliniowy wzrost gęstości prądu potrzebnego dla osiągnięcia progu laserowania $j_{th,1}$, szybszy niż tempo wzrostu wartości $j_{th,2}$ (rys. 2b). Obserwowane na rysunku 2b „zagięcia” charakterystyk $P_{out}(I)$ ograniczające maksymalną moc wyjściową $P_{max,1}(I_{r,1})$, $P_{max,2}(I_{r,2})$ dla laserów 1, 2 odpowiadają występowaniu efektu *thermal roll-over*, który można wytłumaczyć analizując rysunek 2a przedstawiający zmiany ich gęstości prądów progowych $j_{th,1}$, $j_{th,2}$ oraz maksymalnych osiąganych gęstości prądów w ich obszarach czynnych $j_{A,1}$, $j_{A,2}$.



Rys.3. a) Maksymalna moc wyjściowa P_{max} oraz odpowiadająca jej oporność cieplna R_{th} obliczone dla pracy w trybie RT CW lasera przy różnych grubościach warstwy złota t_p w kontakcie elektrycznym po stronie p oraz przy różnych grubościach substratu t_s . Na rysunku zaznaczono $t_p = 2 \mu m$ dla bazowej konstrukcji lasera; b) Rozkład przyrostu temperatury ΔT ponad temperaturę otoczenia 293 K w laserze ($t_p = 20 \mu m$, $t_s = 120 \mu m$) i fragmencie jego chłodnicy podczas emisji maksymalnej mocy wyjściowej $P_{max} = 264 mW$. Maksymalny przyrost temperatury w obszarze czynnym wynosi $\Delta T_{A,max} = 100,3 K$

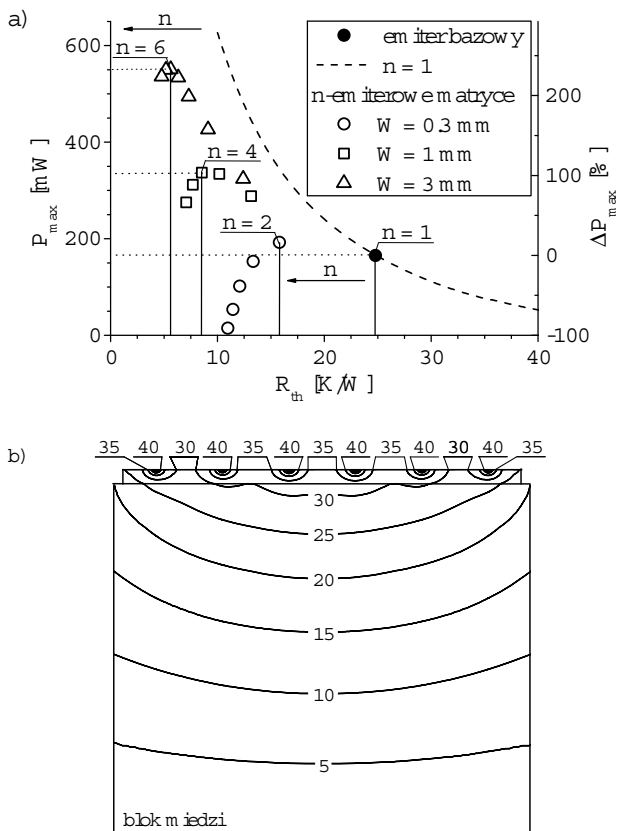
Dla obu laserów gęstość prądu w ich obszarach czynnych j_A rośnie liniowo i w przybliżeniu w takim samym tempie wraz ze wzrostem prądu zasilającego tj. $j_{A,1}(I) \approx j_{A,2}(I)$, zaś progowe wartości $j_{th,1}(I) > j_{th,2}(I)$ rosną tym szybciej im większa jest oporność cieplna konstrukcji $R_{th,1} > R_{th,2}$. Gdy gęstość prądu w obszarze czynnym danego lasera zrówna się z wymaganą gęstością prądu progowego ($j_A = j_{th}$) wtedy zaczyna on (próg akcji laserowej) lub przestaje świecić. Powyżej progu laserowania wraz ze wzrostem prądu zasilającego rośnie różnica pomiędzy wartościami j_A oraz j_{th} , której towarzyszy wzrost mocy wyjściowej. Oba lasery 1, 2 osiągają maksymalną moc wyjściową $P_{max,1}$, $P_{max,2}$ dla zjawiska *thermal roll-over* odpowiednio dla prądów $I_{r,1}$, $I_{r,2}$, (rys. 2a). Od tego momentu nadwyżka prądu j_A nad prądem progowym j_{th} przestaje

rosnąć wraz ze wzrostem I , a zaczyna maleć. Prowadzi to do spadku mocy lasera. Spadek ten związany jest z szybszym wzrostem temperatury w obszarach czynnych laserów, zależnym od oporności cieplnej R_{th} każdego z nich.

Rysunek 3a przedstawia wpływ grubości warstwy złota t_p oraz grubości substratu t_s na oporność cieplną R_{th} lasera z pojedynczym emiterem, przez co również i na obliczoną maksymalną moc wyjściową P_{max} . Niezależnie od t_s wzrost t_p powoduje nieliniowy spadek oporności cieplnej przyrządu. Dla $t_s = 120 \mu m$ wzrost t_p z $2 \mu m$ do $20 \mu m$ powoduje spadek R_{th} z $23,8 K/W$ do $18,8 K/W$ (spadek o 24%) i jednocześnie nieliniowy wzrost mocy P_{max} z $165,5 mW$ do $264 mW$ (wzrost o ok. 60%). Rozkład temperatury w takiej konstrukcji ($t_p = 20 \mu m$, $P_{max} = 264 mW$) przedstawia rysunek 3b. Niezależnie od wartości t_p zmniejszenie wartości t_s powoduje nieliniowy spadek oporności cieplnej R_{th} , przez co również wzrost maksymalnej mocy P_{max} . Odległość pomiędzy krzywymi $R_{th}(t_p)$ i $P_{max}(t_p)$ dla różnych wartości t_s rośnie wraz ze wzrostem wartości t_p , co wskazuje na to, że oba rozwiązania się uzupełniają, dając większy spadek R_{th} . Dla $t_s = 60 \mu m$, $t_p = 20 \mu m$ wartości R_{th} i P_{max} wynoszą odpowiednio $16,0 K/W$ i $334 mW$ (2-krotny wzrost mocy względem lasera bazowego).

Dla lasera z pojedynczym emiterem z różnymi zmianami konstrukcyjnymi obliczone wartości maksymalnej mocy wyjściowej P_{max} i odpowiadające tej mocy wartości oporności cieplnej R_{th} układają się na krzywej przedstawionej na rysunku 4a. Wśród analizowanych zmian wprowadzanych niezależnie, które pozwoliły zwiększyć wartość P_{max} względem emitera bazowego można wymienić m.in. 10-krotne zwiększenie szerokości chipu ($R_{th} = 23,8 K/W$, $P_{max} = 178 mW$ – wzrost mocy o 10% względem maksymalnej mocy emitera bazowego), pocienienie substratu do połowy grubości początkowej ($R_{th} = 21,9 K/W$, $P_{max} = 206 mW$ – wzrost o 25%), 10-krotne zwiększenie t_p ($R_{th} = 18,8 K/W$, $P_{max} = 264 mW$ – wzrost o 60%), umieszczenie na szczycie chipu nakładki wykonanej z naturalnego diamentu ($2000 W/mK$) o grubości $t_n = 50 \mu m$ ($R_{th} = 17,0 K/W$, $P_{max} = 309 mW$ – wzrost o 90%). Powyższe rozwiązania uzupełniają się. Na przykład 10-krotne zwiększenie szerokości chipu, pocienienie substratu do połowy i zastosowanie diamentowej nakładki ($t_n = 150 \mu m$) spowodowało spadek wartości R_{th} z $23,8 K/W$ do $10,1 K/W$, przez co maksymalna moc wzrosła o ponad 270% (z $165,5 mW$ do $617 mW$).

Podobne analizy wykonano dla matryc laserowych. Okazało się, że oporność cieplna modelowanych matryc laserowych maleje zarówno wraz ze wzrostem szerokości chipu, jak również po zwiększeniu liczby emiterów n w matrycy (patrz rysunek 4a). Efekt *thermal crosstalk* rośnie wraz ze spadkiem wzajemnej odległości emiterów, co ma miejsce podczas zwiększania ich liczby n w chipie o ustalonej szerokości W . Dla matryc o niedużej szerokości (np. $0,3 mm$) w odróżnieniu od laserów z pojedynczym emiterem, obliczone wartości P_{max} w zależności od R_{th} nie układają się na jednej krzywej. Sytuacja zmienia się po zwiększeniu W i rozmieszczeniu emiterów w większej odległości, przy której działają one w przybliżeniu niezależnie (efekt *thermal crosstalk* ma mały wpływ na ich pracę). Dla szerokich matryc (np. $3 mm$) wartości P_{max} w funkcji R_{th} zależnej od n w pewnych granicach układają się podobnie, jak dla pojedynczego emitera. Dla każdej wartości W można dobrać taką liczbę n , aby uzyskana moc P_{max} była największa. Najwyższe wartości P_{max} dla matryc uzyskano dla $n = 2$ ($W = 0,3 mm$, $P_{max} = 192 mW$ – wzrost o 16%), $n = 4$ ($W = 1 mm$, $P_{max} = 337 mW$ – 2-krotny wzrost) oraz $n = 6$ ($W = 3 mm$, $P_{max} = 551 mW$ – 3,33-krotny wzrost mocy).



Rys.4. a) Maksymalna moc wyjściowa P_{max} oraz jej procentowa zmiana względem wartości dla emitera bazowego $P_{max} = 165,5$ mW ($R_{th} = 24,8$ K/W, niebieska kropka) w funkcji odpowiadającej tej mocy oporności cieplnej R_{th} obliczonej dla pracy w trybie RT CW dla przyrządów z różną liczbą emiterów n , w tym dla lasera z pojedynczym emiterem ($n=1$) z różnymi zmianami konstrukcyjnymi (linia przerywana) i n -emiterowych linijek laserowych o różnej szerokości chipu W (symbole otwarte). Na rysunku zaznaczono strzałkami kierunek wzrostu liczby emiterów n w linijkach; b) Rozkład przyrostu temperatury ΔT ponad temperaturę 293 K w 6-emiterowej linijce ($W = 3$ mm) oraz fragmente jej układu montażowego dla pracy w trybie RT CW z mocą $P_{max} = 551$ mW ($R_{th} = 5,6$ K/W). Maksymalny przyrost temperatury w obszarze czynnym wynosi $\Delta T_{A,max} = 79,9$ K

Wnioski

Możliwy do uzyskania zysk mocy wyjściowej w emiterach azotkowych oraz wybór zmian konstrukcyjnych, które mogą do tego prowadzić zależą przede wszystkim od szerokości chipu laserowego. Dla przyrządów z chipem o niewielkiej szerokości (np. 0,3 mm) w celu zwiększenia P_{max} lepszym rozwiązaniem niż zwiększanie liczby emiterów wydaje się być zastosowanie zmian konstrukcyjnych usprawniających odprowadzanie ciepła z obszaru czynnego pojedynczego emitera, takich jak np. pocienienie podłoża, zwiększenie grubości warstwy złota po stronie p lub zastosowanie diamentowej nakładki. Dla przyrządów z szerszym chipem (przynajmniej 1 mm) dobranie liczby emiterów może być lepszym rozwiązaniem niż wprowadzanie zmian konstrukcyjnych podobnych jak w przypadku przyrządu z pojedynczym emiterem. W celu wykorzystania bardzo szerokiego chipu (np. 3 mm) dla znaczącego zwiększenia optycznej mocy użytecznej przyrządu zaproponowano dwa rozwiązania tj. zastosowanie diamentowej nakładki o bardzo dobrych

parametrach cieplnych i odpowiedniej grubości (dla przyrządu z pojedynczym emiterem) lub zwiększenie liczby emiterów regularnie rozstawionych w konstrukcji linijki laserowej. Drugie z proponowanych rozwiązań jest bardzo często spotykane w literaturze i to zarówno w przyrządach konstruowanych na bazie materiałów azotkowych [3, 8–13], jak i wykonywanych z innych materiałów grupy III-V [11].

Praca częściowo finansowana z projektu badawczego nr UDA-POIG.01.03.01-00-159/08 (InTechFun).

LITERATURA

- [1] Kozaki T., Nagahama S.-I., Mukai T., Recent progress of high-power GaN-based laser diodes, *Proc. SPIE*, 6485, (2007) 648503
- [2] Uchida S., Takeya M., Ikeda S., Mizuno T., Fujimoto T., Matsumoto O., Goto S., Tojyo T., Ikeda M., Recent Progress in High-Power Blue-Violet Lasers, *IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron.*, 9, (2003), n. 5, 1252-1259
- [3] Suzuki N., Morimoto K., 10 W CW blue-violet diode laser array on the micro-channel cooler, *Proc. SPIE*, 8241 (2012) 82410J
- [4] Lutgen S., Schmitt M., Blue Laser diodes, *Optik & Photonik*, 4, (2009), n. 2, 7-39
- [5] Nagahama S.I., Sugimoto Y., Kozaki T., Mukai T., Recent progress of AlInGaN laser diodes, *Proc. SPIE*, 5738, (2005), 57-62
- [6] Miyoshi T., Masui S., Okada T., Yanamoto T., Kozaki T., Nagahama S.I., Mukai T., InGaN-based 518 and 488 nm laser diodes on c-plane GaN substrate, *Phys. Status Solidi A*, 207, (2010), n. 6, 1389-1392
- [7] Kawaguchi M., Kasugai H., Samonji K., Hagino H., Orita K., Yamanaka K., Yuri M., Takigawa S., Catastrophic-Optical-Damage-Free InGaN Laser Diodes With Epitaxially Formed Window Structure, *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, 17, (2011), n. 5, 1412-1416
- [8] Sobczak G., Kierunki rozwoju sprzężonych fazowo matryc krawędziowych diod laserowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 4, (2013), 53
- [9] Goto S., Ohta M., Yabuki Y., Hoshina Y., Naganuma K., Tamamura K., Hashizu T., Ikeda M., Super high-power AlGaInN-based laser diodes with a single broad-area stripe emitter fabricated on a GaN substrate, *Phys. Status Solidi A*, 200, (2003), n. 1, 122-125
- [10] Perlin P., Marona L., Holc K., Wisniewski P., Suski T., Leszczynski M., Czernecki R., Najda S., Zajac M., Kucharski R., InGaN Laser Diode Mini-Arrays, *Appl. Phys. Exp.*, 4, (2011), n. 6, 062103
- [11] Injeyan H., Goodno G. D., High-Power Laser Handbook, McGraw-Hill Companies, Inc., (2011)
- [12] Stanczyk S., Kafar A., Targowski G., Wisniewski P., Makarowa I., Suski T., Perlin P., Thermal properties of InGaN Laser Diodes and Arrays, *Proc. SPIE*, 8625, (2013), 862521
- [13] Kuc M., Sarzała R.P., Nakwaski W., Thermal crosstalk in arrays of III-N-based Lasers, *Mater. Sci. Eng., B*, 178, (2013), n. 20, 1395-1402
- [14] Sarzała R.P., Wasiak M., Modelowanie zjawisk elektryczno-cieplnych w laserach kaskadowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 10, (2011), 177
- [15] Howard S.S., Liu Z., Gmachl C.F., Thermal and Stark-Effect Roll-Over of Quantum-Cascade Lasers, *IEEE J. Quantum Electron.*, 44, (2008), 319-323

Autorzy: mgr inż. Maciej Kuc, dr hab. inż. Robert Piotr Sarzała, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, E-mail: maciej.kuc@p.lodz.pl, robert.sarzała@p.lodz.pl; prof. dr hab. Piotr Perlin, Instytut Wysokich Ciśnień UNIPRESS Polskiej Akademii Nauk, Al. Prymasa Tysiąclecia 98, 01-142 Warszawa, E-mail: piotr@unipress.waw.pl.