

Charakterystyki mocy lasera VECSEL w funkcji relaksacji sieci krystalicznej

Streszczenie. W artykule przedstawione zostały wyniki badań wpływu naprężenia sieci struktury lasera z pionową wnęką rezonansową VECSEL (vertical external cavity surface emitting laser) na jego własności. Badane były struktury z różną liczbą studni kwantowych w obszarze aktywnym. Pozostałe parametry były stałe. Naprężenie w strukturze określano na podstawie pomiarów map węzłów sieci odwrotnej wykonanych wokół dwóch refleksów: 004 i -2-24. Stwierdzono, że stopień relaksacji sieci w zależności od liczby studni kwantowych można opisać za pomocą funkcji liniowej. Z porównania wyników numerycznych i eksperymentalnych wynika, że dyslokacje niedopasowania są źródłem rekombinacji niepromienistej, silnie wpływającym na redukcję mocy wyjściowej z lasera. Biorąc za kryterium oceny jakości lasera moc zewnętrzną, określiliśmy optymalną liczbę studni kwantowych w obszarze aktywnym równą 12, co jest związane z relaksacją sieci równą 27%. Stosując diament jako medium rozpraszające ciepło, uzyskaliśmy maksymalną moc równą 4,5 W.

Abstract. We have investigated the influence of strain built into the periodic gain structure of Vertical External Cavity Surface-Emitting Lasers on the laser properties. Laser structures with different numbers of quantum wells (QWs) in the active region were grown using molecular beam epitaxy. The strain was analyzed by reciprocal space maps taken around two reflections of 004 and -2-24. It was found that the dependence of strain relaxation caused by misfit dislocation on the number of quantum wells can be described by a linear function. Fitting the numerical simulations to the experimentally-obtained output power characteristics revealed that misfit dislocations are the non-radiative recombination defects and are responsible for suppressing output power. Taking as a criterion the output power, we determined the optimal number of QWs as 12 and the maximal tolerable relaxation value as 0.27 for InGaAs/GaAs VECSEL structures with uniformly distributed quantum wells in a microcavity. Using diamond heat spreader bonded to the laser surface we obtained output power of 4.5 W. (VECSEL - laser power vs strain relaxation).

Słowa kluczowe: VECSEL, epitaksja MBE, relaksacja sieci, MDs.

Keywords: VECSEL, MBE epitaxy, strain relaxation, MDs.

Wprowadzenie

Półprzewodnikowe lasery z zewnętrzną wnęką rezonansową typu VECSEL (Vertical External Cavity Surface-Emitting Lasers) cieszą się nieustannie zainteresowaniem ze względu na doskonałą jakość wiązki światła i dużą moc zewnętrzną. Generują promieniowanie w bardzo szerokim zakresie od 660 nm do ponad 2,0 μm , który to zakres może zostać dodatkowo rozszerzony dzięki podwajaniu częstości w kryształach nieliniowych umieszczonych wewnątrz wnęki [1, 2]. Ponadto mogą pracować w reżimie impulsowym [3]. Własności emisyjne lasera zależą od: schematu heterostruktury półprzewodnikowej, parametrów wzrostu epitaksjalnego i przede wszystkim od efektywności odbioru ciepła ze struktury lasera [4].

Typowy, pompowany optycznie VECSEL składa się z lustra Bragga o wysokim współczynniku odbicia, obszaru aktywnego zawierającego studnie kwantowe (QW, ang. Quantum Wells) rozdzielone barierami oraz warstwy tzw. okna optycznego. Zasadniczą część promieniowania pompy jest absorbowana w barierach w obszarze aktywnym. W dłuższym obszarze aktywnym zostanie zaabsorbowane więcej promieniowania pompy, co przekłada się na większą efektywność pompowania lasera. Pożądane jest zwiększenie liczby QW w celu ograniczenia długości drogi dyfuzji nośników generowanych w obszarze barier. Również ze względu na logarytmiczny charakter zależności wzmocnienia od koncentracji nośników, zwiększenie liczby studni skutkuje zmniejszeniem progowej koncentracji nośników. Jednakże w przypadku naprężonych QWs, do sieci heterostruktury wprowadzane są naprężenia. Po przekroczeniu grubości krytycznej, naprężenie może relaksować poprzez generację dyslokacji niedopasowania MDs (ang. misfit dislocations). Dyslokacje są centrami rekombinacji niepromienistej w materiale, co może prowadzić do zwiększenia mocy progowej bądź nawet stłumienia laserowania. Aby uzyskać maksymalną moc emisji, konieczne jest znalezienie kompromisu pomiędzy liczbą studni i stopniem relaksacji struktury. Jest to możliwe

tylko na drodze doświadczalnej, ponieważ zależy od warunków krystalizacji w procesie epitaksjalnym.

W tej pracy przedstawiamy właściwości emisyjne dla struktur lasera VECSEL różniące się między sobą liczbą studni kwantowych i wynikającym z tego rozmiarem obszaru aktywnego. Celem było określenie optymalnej liczby QW w obszarze aktywnym lasera bez stosowania w nim warstw odprężających o przeciwnym do studni typie naprężeń. Za kryterium oceny przyjęto maksymalną moc wyjściową lasera oraz prostotę jego konstrukcji.

Eksperyment

Struktury lasera składały się z lustra Bragga osadzonego na podłożu GaAs i obszarze aktywnego. Lustro Bragga o teoretycznym współczynniku odbicia równym 99,99% zawierało 29,5 par warstw AlAs/GaAs. Periodyczny obszar aktywny złożony z MQW osadzony był bezpośrednio na lustrze DBR. Studnie kwantowe $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$ o ściskającym typie naprężeń zostały umieszczone w strzałkach fali stojącej. Studnie kwantowe zostały tak zaprojektowane, aby w temperaturze 300 K emitować długość fali równą ok. 970 nm. W ten sposób uwzględniono przesunięcie długości fali w dłuższy ich zakres na skutek grzania się struktury pod wpływem absorpcji promieniowania pompy. Strukturę lasera kończyła warstwa $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ o grubości 150 nm przezroczysta dla promieniowania zarówno emitowanego jak i pompy, zapobiegająca dyfuzji i rekombinacji nośników na powierzchni i zabezpieczona przed utlenieniem warstwą GaAs o grubości 10 nm.

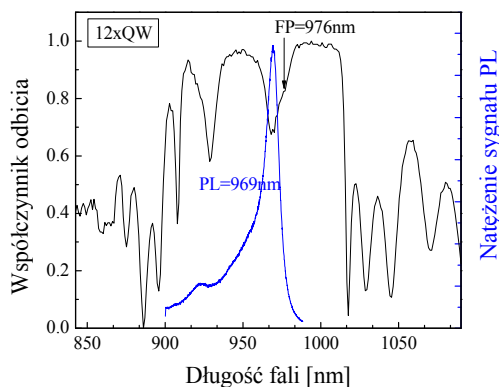
Struktury zostały wykryształizowane metodą epitaksji z wiązek molekularnych MBE w urządzeniu Riber 32P. Urządzenie wyposażone jest w klasyczne komórki efuzyjne do pierwiastków z gr. III i komórki krakerowe z zaworem do pierwiastków z gr. V. Temperatura kontrolowana była za pomocą pirometru IRCON MODLINE. Temperatura wzrostu, stała w całym procesie krystalizacji, wynosiła 530°C. Wzrost struktur przyrządowych poprzedzony został testowymi procesami MQW i DBR mającymi na celu

precyzyjne ustalenie szybkości wzrostu poszczególnych warstw, co umożliwiło powtarzalne wytworzenie laserów różniących się liczbą QW: 4×QW, 8×QW, 12×QW i 16×QW. Powtarzalne wytworzenie heterostruktur laserów było warunkiem niezbędnym do osiągnięcia postawionego celu: określenia liczby studni z uwzględnieniem stopnia relaksacji struktury lasera, która pozwoli otrzymać generację promieniowania o maksymalnej mocy wyjściowej.

Wyniki charakteryzacji struktur laserów VECSEL

Struktury laserów były charakteryzowane za pomocą spektroskopii odbiciowej, mikro-fotoluminescencji oraz dyfrakcji rentgenowskiej. Spektralne zależności współczynnika odbicia pokazują szerokie plateau (ang. *stop-band*) z charakterystycznymi wgłębieniami, które są wynikiem absorpcji światła próbki w studniach oraz rezonansów Fabry-Perot w mikro-wnęce utworzonej pomiędzy lustrem Bragga a granicą półprzewodnik – powietrze (rys. 1).

W przypadku długiej wnęki ($13 \times \lambda/2$, $17 \times \lambda/2$) warunki rezonansu spełnione są dla co najmniej dwóch długości fali z zakresu wyznaczonego przez plateau wysokiego współczynnika odbicia zwierciadła Bragga. Położenie spektralne rezonansu pozwala precyzyjnie wyznaczyć grubość wnęki. Widmo PL zmierzone od strony powierzchni struktury jest silnie zmodyfikowane przez rezonanse w mikro-wnęce. Posiłkując się widmem luminescencji zmierzonym z krawędzi struktury (niebieska krzywa) można wnioskować o wzajemnym dostrojeniu pomiędzy położeniem spektralnym studni a długością fali rezonansu.



Rys. 1. Spektralna zależność współczynnika odbicia i natężenia PL zmierzona dla struktury lasera VECSEL z długą mikrownąką złożoną z 12 studni kwantowych

W tabeli 1 zebrano wartości spektralnego położenia rezonansów i długość fali emisji z QW dla wszystkich struktur VECSEL. Różnica pomiędzy nimi wynosi dla wszystkich próbek ok. 5-7 nm. Świadczy to o szczególnie wysokiej powtarzalności wzrostu epitaksjalnego.

Tabela 1. Parametry struktur laserów VECSEL

Nr	n×QWs	długość mikrownęki	QW [nm]	rezonans FP [nm]	stopień relaksacji [%]
#s_DBR	AlAs/GaAs	30 periods	-	980	10.0%
#s_MQW	12	$13 \times \lambda/2$	-	978	1.3%
#s1	4	$5 \times \lambda/2$	970	975	15%
#s2	8	$8 \times \lambda/2$	970	977	25%
#s3	12	$13 \times \lambda/2$	969	976	27%
#s4	16	$17 \times \lambda/2$	969	977	33%

Struktury laserowe były niedopasowane sieciowo do podłoża GaAs, co skutkuje ich częściową relaksacją.

Stopień relaksacji R_{relax} rozumiany jest jako:

$$(1) \quad R_{relax} = \frac{(a_L^* - a_S)}{(a_L - a_S)} \times 100\%$$

gdzie: a_L^* – równoległa stała sieci warstwy wyznaczona z pomiarów rentgenowskich, a_S – stała sieci podłoża, a_L – stała sieci warstwy całkowicie zrelaksowanej.

Stopień relaksacji określono na podstawie analizy map węzłów sieci odwrotnej zmierzonych metodą wysokorozdzielczej dyfraktometrii rentgenowskiej HR XRD wokół dwóch refleksów 004 i -2-24. Uzyskane wartości zamieszczono w tabeli 1. Zależność stopnia relaksacji od liczby QW ma charakter liniowy i można ją opisać następująco:

$$(2) \quad R_{relax} = 1.45 \times N_{QW} + 10.4$$

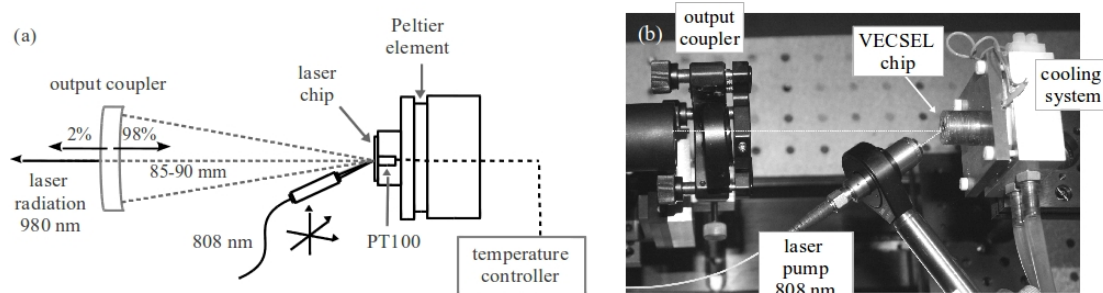
gdzie: R_{relax} [%] – stopień relaksacji, N_{QW} – liczba QW.

Warto podkreślić są dwa aspekty: duża relaksacja naprężeń w strukturze DBR (10%) i mała w strukturze MQW 12×QW (1,3%) oraz bardzo duża różnica pomiędzy stopniem relaksacji sieci w strukturach zawierających 12×QW, które zostały osadzone na podłożu GaAs (1,3%) i na DBR (27%). W przypadku DBR mamy małe niedopasowanie sieciowe AlAs do podłoża GaAs ($1,4 \times 10^{-3}$), jednakże bardzo grubą sumarycznie warstwę (ok. 2,5 μm), która pięciokrotnie przekroczyła grubość krytyczną równą 500 nm – wartość wyliczona ze wzoru Mathewsa-Blakeslee [5]. W przypadku 12×QW z $In_{0,18}Ga_{0,82}As$, grubość sumaryczna wynosi 96 nm i jest 2,5 razy większa od grubości krytycznej równej 37 nm [5]. To oznacza, że zmierzone wartości stopnia relaksacji dla DBR i 12×QW są uzasadnione. Bardzo duża różnica pomiędzy 12×QW osadzonymi na podłożu GaAs i na DBR wynika z gęstości defektów w materiale, na którym wzrastają studnie (tj. w podłożu GaAs lub w DBR). Nasza hipoteza zakłada, że obszary międzyfazowe (ang. *interfaces*) można rozpatrywać jak zaburzenie sieci, a dokładniej jak defekty rozciągłe. Jeśli gęstość defektów w materiale jest większa, w większym stopniu nastąpi w nim relaksacja sieci niż w materiale o mniejszej gęstości defektów.

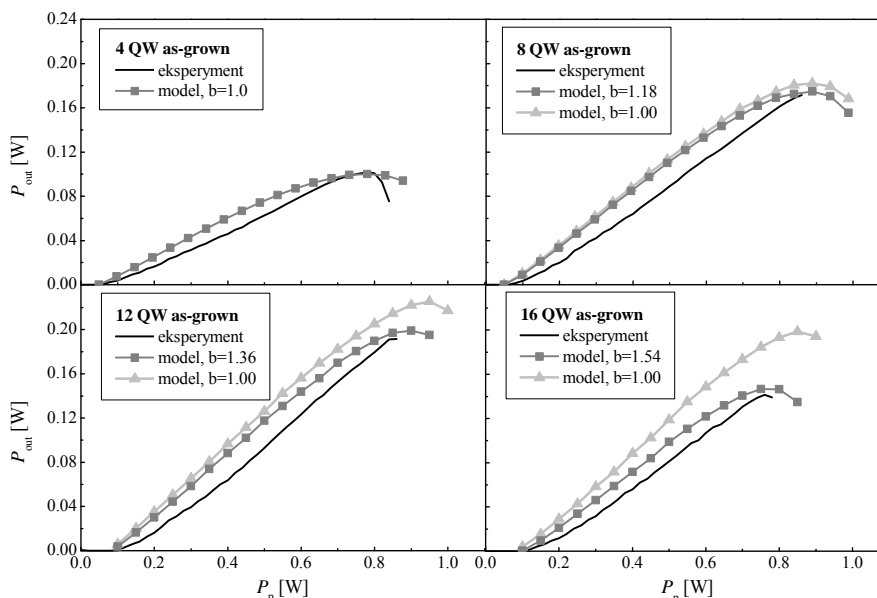
Powyższe dane pokazują, że relaksacja sieci w strukturze lustra DBR pełni rolę akceleratora relaksacji w strukturach MQW. To oznacza, że badania powinny być prowadzone raczej w kierunku redukcji gęstości dyslokacji niedopasowania (w strukturach DBR niż w MQW).

Wyniki charakteryzacji laserów VECSEL

Do badania własności emisyjnych laserów działających w oparciu o omawiane heterostruktury zbudowany został liniowy rezonator (rys. 2). Zewnętrzną wnęką utworzono pomiędzy lustrem Bragga w strukturze lasera VECSEL i zewnętrznym wklęsłym zwierciadłem odsprężającym (ang. *output coupler* OC). Krzywizna zwierciadła zewnętrznego wynosiła 90 mm, natomiast transmisja 2%. Do pompowania lasera wykorzystana została dioda laserowa (ang. *laser diode* LD) wysokiej mocy emitująca promieniowanie na długości fali 808 nm. Wiązka światła z LD była kierowana na VECSEL pod kątem 30° do osi optycznej wnęki lasera i koncentrowana na jego powierzchni do plamki o średnicy 60 μm. Długość wnęki zmieniała się od 85 do 90 nm aby dopasować wymiar modu do wymiaru plamki pompującej. Chip laserowy został zamontowany na miedzianej chłodnicy stabilizowanej chłodziarką Peltier. Chłodzenie wodne pozwalało odprowadzać nadmiar ciepła z chłodnicy.



Rys. 2. Schemat wnętrza lasera VECSEL (a) i zdjęcie układu pomiarowego (b)



Rys. 3. Charakterystyki mocy zmierzone dla badanych struktur as-grown. Symbol b oznacza mnożnik w formule $A = b \cdot 10^8 (T/300)^4 \text{ s}^{-1}$ dla materiału $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}/\text{GaAs}$

Zmierzone charakterystyki mocy dla wszystkich analizowanych struktur zostały zamieszczone na rysunku 3. Ponieważ wszelkie operacje technologiczne prowadzone na strukturze (pocienianie podłoża, montaż pocienionej struktury do chłodnicy, ang. *liquid bonding*) modyfikują jej stan naprężenia, badania wpływu stopnia relaksacji na moc zewnętrznej lasera wykonano na strukturach as-grown. Największą moc uzyskano dla struktury zawierającej 12 studni kwantowych, w której stopień relaksacji wynosił 27%. Porównywalny wynik otrzymano dla struktury z 8 studniami.

Do obliczeń zależności mocy wyjściowej laserów od mocy pompującej użyto samouzgodnionego (ang. *self-consistent*) modelu numerycznego. Składa on się ze ściśle powiązanych modułów przeznaczonych do obliczania wzmocnienia, temperatury, rozkładu pola i transportu nośników. Model ten stanowi rozwinięcie modelu opisanego wcześniej w pracach [6, 7]. W obliczeniach parametrów transportowych jedynym zmiennym parametrem był monomolekularny współczynnik rekombinacji niepromienistej, opisany zależnością (oszacowaną numerycznie): $A = b \cdot 10^8 \cdot (T/300)^4 \text{ s}^{-1}$, gdzie b oznacza mnożnik. Współczynnik A zależy od gęstości centrów rekombinacji niepromienistej, a w omawianym przypadku – od stopnia relaksacji sieci związanego z liczbą studni kwantowych w obszarze aktywnym lasera.

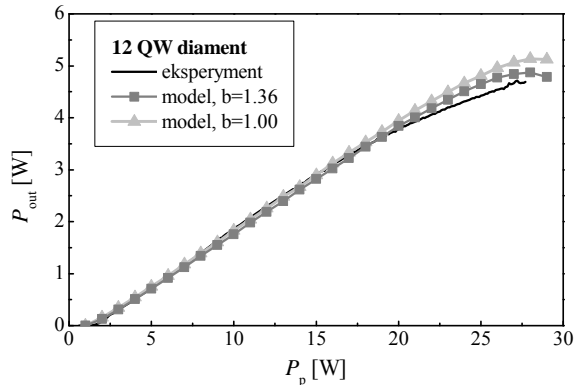
Kiedy założymy, że gęstość centrów rekombinacji niepromienistej opisywanych przez współczynnik A jest stała we wszystkich strukturach (A stały i równy $1,0 \cdot 10^8 (T/300)^4 \text{ s}^{-1}$) i niezależna od stopnia relaksacji struktur, wówczas nie otrzymamy zgodności pomiędzy policzonymi (symbol trójkąta na krzywej) i zmierzonymi

(krzywa bez symbolu) charakterystykami mocy. Jeśli założymy, że wartość współczynnika A rośnie wraz z liczbą studni, wówczas można otrzymać lepszą zgodność wyliczonych (krzywa z symbolem kwadratu) i eksperymentalnych danych. To oznacza, że dłuższy obszar aktywny o większej liczbie QW charakteryzuje się silniejszą rekombinacją niepromienistą, co wiążemy z większą gęstością dyslokacji niedopasowania.

Jeśli założyć, że możliwa jest redukcja stopnia relaksacji struktury do poziomu takiego, jaki jest dla struktury z 4×QW poprzez zastosowanie warstw barierowych o przeciwnym typie naprężenia (np. GaAsP), wówczas należy się spodziewać wzrostu mocy wyjściowej dla struktur z 12×QW i 16×QW. Ilustrują to krzywe teoretyczne, przedstawione na rysunku 3. Dla 12×QW zysk mocy wynosi 13%, natomiast dla struktury 16×QW – 36%, przy czym struktura 12×QW będzie nadal optymalną konstrukcją pod względem możliwości uzyskania maksymalnej mocy, uwarunkowanej przez liczbę QW z jednej strony (decydującą o wzmocnieniu) i stopniem relaksacji struktury z drugiej strony (decydującym o rekombinacji niepromienistej). Dla struktur z krótką wnęką 4×QW i 8×QW nie zaobserwowano poprawy charakterystyk mocy na skutek zmniejszenia stopnia relaksacji. Dla dwóch wartości współczynnika A , przebieg krzywych teoretycznych jest zbliżony.

Po zwiększeniu sprawności ekstrakcji ciepła poprzez zastosowanie przezroczystej chłodnicy diamentowej od strony powierzchni heterostruktury dla VECSELa z 12×QW, uzyskaliśmy ponad 20-krotny wzrost mocy wyjściowej – 4,5 W zamiast ok. 200 mW dla struktury as-grown (rys. 4).

W tym przypadku (konstrukcji z diamentem) różnica pomiędzy strukturą o małej gęstości MDs ($A = 1,0 \cdot 10^8 (T/300)^4 \text{ s}^{-1}$) a strukturą częściowo zrelaksowaną ($A = 1,36 \cdot 10^8 (T/300)^4 \text{ s}^{-1}$) jest jeszcze mniejsza niż dla struktury as-grown. To potwierdza wcześniejszy wniosek o celowości wysiłków ukierunkowanych raczej na zredukowanie naprężeń w DBR niż w MQW, co wydaje się być trudniejsze.



Rys. 4. Charakterystyki mocy zmierzone dla lasera VECSEL z 12×QW z przezroczystą diamentową chłodnicą przytwierdzoną na powierzchni struktury

Podsumowanie

W pracy zaprezentowano wyniki badań laserów VECSEL o różnej liczbie studni kwantowych w obszarze aktywnym. Opisano liniową zależność stopnia relaksacji struktur od liczby QWs. Na drodze symulacji numerycznych dla każdej z badanych struktur określono zależny od gęstości defektów w sieci krystalicznej monomolekularny współczynnik rekombinacji niepromienistej. Współczynnik ten jest większy dla struktur charakteryzujących się większym stopniem relaksacji sieci, co jest związane z większą gęstością dyslokacji niedopasowania. Stwierdzono, że poprawę mocy zewnętrznej na skutek zbilansowania naprężeń w strukturze można uzyskać w laserze z długą mikrowętką zawierającą 16×QW. Wyodrębniono optymalną konstrukcję lasera, której obszar aktywny zawiera 12 studni kwantowych rozłożonych równomiernie w kolejnych strzałkach fali stojącej. Maksymalna moc promieniowania uzyskana przez nas dla takiego lasera wynosi 4,5 W.

Autorzy dziękują p. Lechowi Rządcy za wsparcie techniczne. Powyższe badania były realizowane dzięki grantom przyznanych przez NCN N N515 360636 i NCBiR 02002306.

LITERATURA

- [1] Calvez S., Hastie J.E., Guina M., Okhotnikov O.G., and Dawson M., Semiconductor disk lasers for the generation of visible and ultraviolet radiation, *Laser Photon. Rev.*, vol. 3, 407-434, 2009
- [2] Chilla J.L.A., Zhou H., Weiss E., Caprara A.L., Shou Q., Govorkov S.V., Reed M.K., Spinelli L., Blue and green optically pumped semiconductor lasers for display, *Proc. SPIE*, vol. 5740, 41-47, 2005
- [3] Wilcox K.G., Quarterman A.H., Beere H., Ritchie D.A. and Tropper A.C., High peak power femtosecond pulse passively mode-locked vertical-external-cavity surface-emitting laser, *IEEE Photon. Techn. Letters*, vol. 22(14), 1021-1023, 2010
- [4] Chernikov A., Herrmann J., Koch M., Kunert B., Stolz W., Chatterjee S., Koch S.W., Wang T.-L., Kaneda Y., Yarborough J.M., Hader J., and Moloney J.V., Heat Management in High-Power Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Lasers, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, vol. 17, 1772-1778, 2011
- [5] Matthews J.W., Blakeslee A.E., Defects in epitaxial multilayers: I. Misfit dislocations, *J. Cryst. Growth*, vol. 27, 118-125, 1974
- [6] Sokół A.K., and Sarzała R.P., Numerical analysis of optically pumped VECSELS, *Proc. SPIE*, vol. 8702 p. 870209, 2013
- [7] Sokół A.K., and Sarzała R.P., Influence of Pumping Beam Width on VECSEL Output Power, *Intl. J. Elec. & Tele.*, vol. 60, 239-245, 2014

Autorzy: dr inż. Agata Jasik, Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-660 Warszawa, E-mail: ajasik@ite.waw.pl; dr Iwona Sankowska, Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-660 Warszawa; mgr inż. Artur Broda, Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-660 Warszawa; mgr inż. Justyna Kubacka-Traczyk, Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-660 Warszawa; dr Artur Trajnerowicz, Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-660 Warszawa; dr inż. Anna Wójcik-Jedlińska, Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-660 Warszawa; dr hab. Jan Muszański, Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-660 Warszawa, E-mail: musza@ite.waw.pl; Idr inż. Michał Wasiak, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, E-mail: michal.wasiak@p.lodz.pl; mgr inż. Adam K. Sokół, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, E-mail: adam.sokol@p.lodz.pl.