

Innowacyjne konstrukcje laserów z pionową wnęką rezonansową

Streszczenie. Praca prezentuje najnowsze modyfikacje konstrukcji laserów emitujących powierzchniowo z pionową wnęką rezonansową. Modyfikacje te mają na celu dalszą miniaturyzację tego typu przyrządów, a także poprawę ich sprawności i niezawodności. Kluczową kwestią w tych dążeniach jest wyeliminowanie ze struktury epitaksjalnej laserowej wielowarstwowych zwierciadeł Bragga, które znacznie zwiększają stopień jej złożoności, a ponadto hamują odbiór ciepła z obszaru aktywnego, obniżając tym samym efektywność generacji promieniowania. W pracy przedstawiono wybrane, alternatywne konstrukcje laserów, w których zwierciadła Bragga zostały zastąpione innymi elementami o zbliżonych własnościach optycznych. Zasadność zaproponowanych innowacji potwierdzają wyniki badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych. Wszystkie prezentowane wyniki zostały uzyskane w ramach prac nad laserami emitującymi powierzchniowo, prowadzonych w Instytucie Technologii Elektronowej oraz Instytucie Fizyki Politechniki Łódzkiej.

Abstract. In this paper we present selected modifications of vertical-cavity surface-emitting lasers, aimed at their further miniaturization, as well as at improvement of their efficiency and reliability. The key issue is to eliminate semiconductor Bragg mirrors from the laser structure. These multi-layer components not only significantly increase complexity of the laser chip, but also limit heat flow within the structure, hindering effective cooling of the active region and thereby decreasing efficiency of lasing. In the discussed here, alternative constructions of surface emitting lasers the Bragg mirrors have been replaced by other optical elements of similar properties. In the first case an internal cavity of the laser is enclosed by high-contrast sub-wavelength gratings, in the second one - by heat-spreading diamond plates. The proposed innovations have been validated by numerical calculations and confirmed experimentally. All presented results were obtained as a part of research on vertical-cavity surface-emitting lasers, conducted jointly by Institute of Electron Technology and Institute of Physics of Technical University of Lodz. (**Innovative architectures of vertical-cavity surface-emitting lasers**).

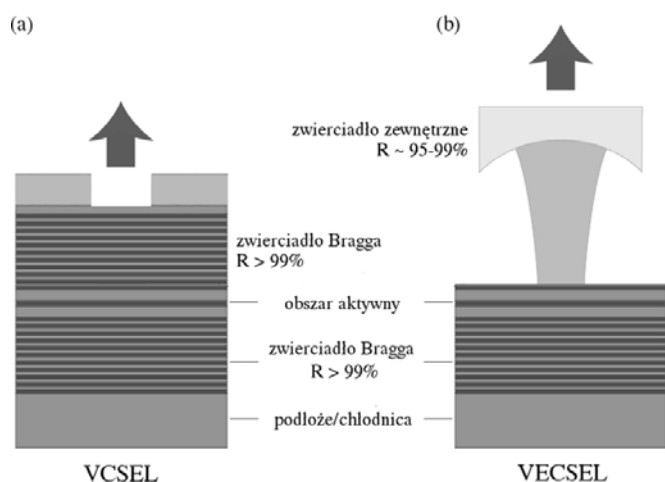
Słowa kluczowe: laser półprzewodnikowy, monolityczny laser o emisji powierzchniowej, VECSEL, VCSEL, podfalowe siatki dyfrakcyjne, HCG

Keywords: semiconductor laser, monolithic surface-emitting laser, VECSEL, VCSEL, subwavelength high-contrast grating, HCG

Wprowadzenie

Postęp technologiczny ostatnich lat jest warunkowany innowacyjnymi rozwiązaniami w zakresie elektroniki i fotoniki. Prace prowadzone w ośrodkach badawczych na całym świecie mają na celu podniesienie szybkości i wydajności konstruowanych przyrządów, a także miniaturyzację elementów optoelektronicznych, a co za tym idzie, zwiększenie stopnia ich upakowania. Aby to osiągnąć konieczne jest rozwiązanie wielu problemów, zarówno o charakterze technologicznym, jak i naukowym, m.in. z zakresu fizyki kwantowej. Istotną kwestią stanowią zagadnienia związane z przepływem ciepła w wielowarstwowych strukturach półprzewodnikowych [1] oraz ze sposobem jego odprowadzenia z elementów aktywnych, co ma bezpośrednie przełożenie na stabilność i niezawodność pracy przyrządu.

Obecnie najpowszechniej stosowanymi źródłami światła spójnego są lasery o emisji powierzchniowej z pionową wnęką rezonansową (ang. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, VCSELs) [2, 3]. Mają one rozmiary rzędu kilkudziesięciu mikrometrów i charakteryzują się specyficzną konstrukcją wnęki rezonansowej: emisja promieniowania zachodzi w kierunku prostopadłym do podłoża, dzięki czemu możliwe jest łączenie pojedynczych czipów laserowych w dwuwymiarowe matryce. Te cechy w połączeniu z bardzo dobrą jakością emitowanej wiązki sprawiają, że lasery VCSEL znajdują szerokie zastosowanie, zarówno w przedmiotach codziennego użytku, takich jak myszy komputerowe, drukarki laserowe, czy czytniki DVD i Blu-Ray, jak i w zaawansowanych systemach do telekomunikacji optycznej, urządzeniach do detekcji gazów, czy w zegarach optycznych.



Rys.1. Schemat dwóch klasycznych konstrukcji laserów z pionową wnęką rezonansową: (a) – laser typu VCSEL, w którym wnęką rezonansową tworzą dwa zwierciadła Bragga; (b) – laser typu VECSEL, bez górnego zwierciadła DBR, wnęką rezonansową zamyka zwierciadło zewnętrzne, oddalone od struktury na odległość rzędu kilku centymetrów

Wnęka rezonansowa w klasycznym laserze VCSEL jest utworzona przez dwa zwierciadła braggowskie (ang. Distributed Bragg Reflector, DBR), składające się z kilkadziesiątu naprzemiennie ułożonych warstw materiału o dużym kontraście współczynnika załamania (rys. 1a). Zwierciadła tego typu charakteryzują się dochodzącą do 100% odbijalnością, jednak znacząco zwiększają stopień skomplikowania struktury, a co za tym idzie, ograniczają możliwość miniaturyzacji przyrządu. Ponadto, ze względu na swoją wielowarstwową budowę i duże zagęszczenie międzypowierzchni stanowiących barierę dla fononów, zwierciadła DBR mają bardzo niską przewodność termiczną. Ciepło generowane w trakcie pracy lasera zostaje „uwięzione” w obszarze aktywnym struktury obniżając sprawność przyrządu oraz przyspieszając procesy degradacji. Osobny problem stanowią zwierciadła DBR dla laserów azotkowych i fosforkowych. Niewielki kontrast współczynników załamania tych materiałów oraz ich duże niedopasowanie sieciowe uniemożliwiają wytworzenie sprawnie działających laserów VCSEL, emitujących promieniowanie w zakresie ultrafioletu i światła widzialnego (350 - 550 nm) oraz w bliskiej podczerwieni (1300 - 2000 nm).

Drugą istotną grupą laserów o emisji powierzchniowej są pompowane optycznie półprzewodnikowe lasery dyskowe z zewnętrzną wnęką rezonansową (ang. Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Lasers, VECSELs). Główna różnica konstrukcyjna pomiędzy laserami VCSEL i VECSEL polega na zastąpieniu w tych drugich górnego zwierciadła DBR innym zwierciadłem wysokoodbiciowym, które jest oddalone od czypa laserowego na odległość rzędu kilku centymetrów (rys.1b). Powstała w ten sposób „otwarta” wnęka rezonansowa pozwala na zastąpienie stosowanego w przypadku laserów VCSEL zasilania elektrycznego bardziej efektywnym i jednorodnym pompowaniem optycznym – struktura półprzewodnikowa jest pobudzana przy użyciu skupionej wiązki laserowej o energii większej od energii promieniowania wzbudzanego. Pompowanie optyczne umożliwia m.in. wysokoczęstotliwościową modulację emisji, indukowaną modulacją źródła pobudzenia. Ponadto moc wyjściowa laserowania jest skalowalna – rośnie wraz ze wzrostem mocy pompy i powierzchnią pobudzanego obszaru. Lasery VECSEL mogą osiągać nawet 100 W w pracy ciągłej, przy czym, niezależnie od mocy generowanego promieniowania, zachowana zostaje doskonała jakość wiązki (parametr $M^2 \approx 1$). Z tego względu lasery te znajdują zastosowanie w komunikacji w otwartej przestrzeni, spektroskopii, czy w systemach detekcyjnych. Ponadto, dzięki możliwości umieszczenia dodatkowych elementów optycznych bezpośrednio we wnętrzu rezonatora laserowego, można modyfikować długość fali emitowanego promieniowania, czy generować drugą harmoniczną [4, 5]. Takie kompaktowe, wysokowydajne i modulowalne źródła światła spójnego mogą z powodzeniem zastąpić lasery gazowe, czy przestrajalne lasery na ciele stałym.

Czynnikami ograniczającym wydajność, a co za tym idzie, stosowność laserów VECSEL jest ciepło indukowane w czipie laserowym w trakcie pompowania. Bez względu na lokalny wzrost temperatury, wywołany oddziaływaniem skupionej wiązki laserowej, może wynosić nawet 200°, co powoduje wzrost rekombinacji niepromienistej w strukturze i silne osłabienie emisyjności przyrządu. W celu zminimalizowania efektów termicznych z reguły stosuje się dwie techniki. Pierwsza polega na usunięciu ze struktury półprzewodnikowej podłoża, które stanowi barierę dla przepływu ciepła do chłodnicy. Część struktury zawierająca jedynie warstwy epitaksjalne jest montowana bezpośrednio na radiatorze, co zapewnia

bardziej efektywne chłodzenie obszaru aktywnego. Druga technika to zastosowanie na powierzchni chipa laserowego przezroczystej płytki, wykonanej z materiału o dużej przewodności cieplnej, której zadaniem jest szybkie rozproszczenie wygenerowanego ciepła w większej objętości. W wielu przypadkach obie techniki są stosowane łącznie, co jednak nadal nie redukuje zupełnie problemu. Struktura epitaksjalna, nawet pozbawiona grubego podłoża, nadal nie sprzyja odprowadzaniu ciepła z obszaru aktywnego, ze względu na znajdujące się na jej spodzie wielowarstwowe zwierciadło DBR. Dlatego, podobnie jak w przypadku laserów VCSEL, w celu zapewnienia dalszego rozwoju półprzewodnikowych laserów dyskowych konieczne jest opracowanie zupełnie nowych rozwiązań konstrukcyjnych.

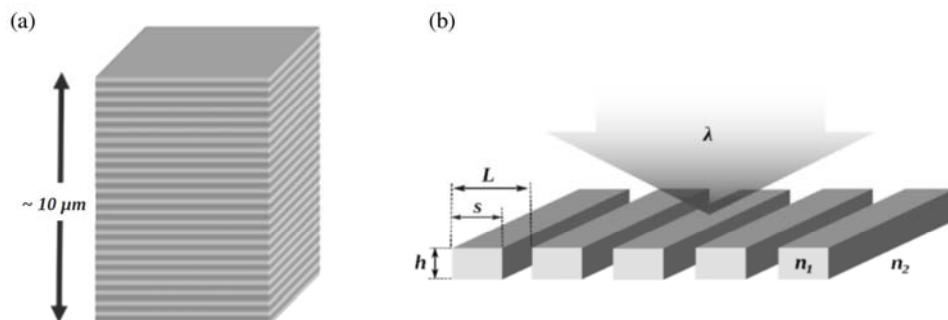
Nowe konstrukcje

a. podfalone siatki dyfrakcyjne jako zwierciadła laserowe
W obliczu przedstawionych trudności, w ostatnim czasie podejmuje się próby zastąpienia zwierciadeł DBR innymi elementami optycznymi o zbliżonych własnościach lub też zupełnie ich wyeliminowania ze struktury laserowej. Bardzo interesującą alternatywą stały się tzw. podfalone siatki dyfrakcyjne (ang. High Contrast Grating, HCG) [6-8]. Są to struktury planarne, mające postać pasków wykonanych z materiału o wysokim współczynniku załamania, rozłożonych periodycznie w ośrodku o niższym współczynniku załamania (rys.2b). Jeżeli pomiędzy materiałami pasków a ośrodkiem je otaczającym występuje odpowiednio duży kontrast optyczny, tj. $n_1 \gg n_2$, to struktura taka może działać jak wysokiej jakości zwierciadło. Wzrost odbijalności silnie zależy od polaryzacji padającego światła i jest obserwowany w szerokim zakresie spektralnym ($\Delta\lambda/\lambda > 30\%$), a współczynnik odbicia dla wiązki padającej prostopadle na powierzchnię siatki sięga 99%, co w zupełności wystarcza do skonstruowania rezonatora laserowego. Jednocześnie grubość siatki HCG jest porównywalna z połową długości fali promieniowania, na które została zaprojektowana, czyli jest kilkadziesiąt razy mniejsza, niż w przypadku typowego zwierciadła DBR. Użycie tego typu struktur jako zwierciadeł w laserach emitujących powierzchniowo może znacząco uprościć ich budowę, a ponadto zminimalizować problemy związane z odprowadzaniem ciepła z obszaru aktywnego. Ponadto, ponieważ zakres spektralny wysokiej odbijalności siatek HCG zależy od ich parametrów geometrycznych, a nie materiałowych, stają się one idealnymi kandydatami na zwierciadła w azotkowych i fosforkowych laserach VECSEL.

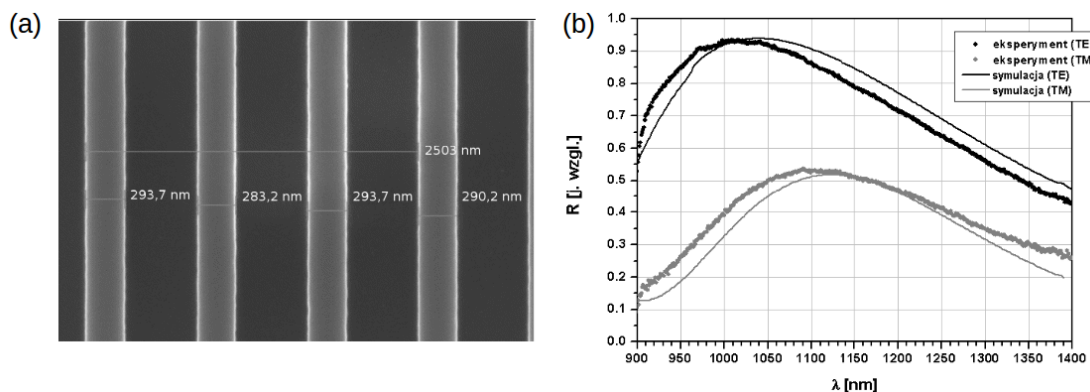
Należy podkreślić, że o stosowności tego typu struktur decyduje przede wszystkim dokładność ich wykonania. Nawet niewielkie rozbieżności pomiędzy projektowanym a rzeczywistym kształtem siatki wpływają w istotny sposób na jej odbijalność. Dlatego na wstępnym etapie opracowywania przyrządu bardzo istotne jest wykonanie charakterystyki optycznej. Rysunek 3 przedstawia przykładowe widma odbicia monolitycznej siatki HCG, zaprojektowanej na zakres 1040 nm i wykonanej na płytce niedomieszkowanego GaAs metodą elektronolitografii i trawienia jonowego. Przed pomiarem, w celu zminimalizowania strat na granicy dwóch ośrodków, podłoże, na którym wykonano siatkę zostało wypolerowane i pokryte warstwą antyrefleksyjną. Ze względu na niewielkie wymiary badanej struktury pomiary tego typu wykonuje się w układzie bazującym na optyce mikroskopowej. W tym przypadku zarejestrowano widma odbicia światła spolaryzowanego liniowo, dla dwóch różnych kierunków polaryzacji: równoległego (TE) oraz prostopadłego (TM) do prążków siatki. Dla polaryzacji TE maksimum odbijalności

sięga 95% i przypada na ok. 1020 nm. Maksymalne odbicie dla światła o polaryzacji TM jest obserwowane przy 1100 nm i nie przekracza 55%. Taki wynik w znacznym stopniu zgadza się z wynikami obliczeń i potwierdza, że

jakość wykonanej siatki HCG spełnia wymagania konstrukcyjne lasera.



Rys.2. Porównanie dwóch typów zwierciadeł stosowanych w konstrukcji laserów VCSEL: (a) rozwiązanie klasyczne - wielowarstwowe zwierciadło Bragga, (b) rozwiązanie alternatywne - wysokoodbiciowa, podfalowa siatka dyfrakcyjna o grubości kilkuset nanometrów

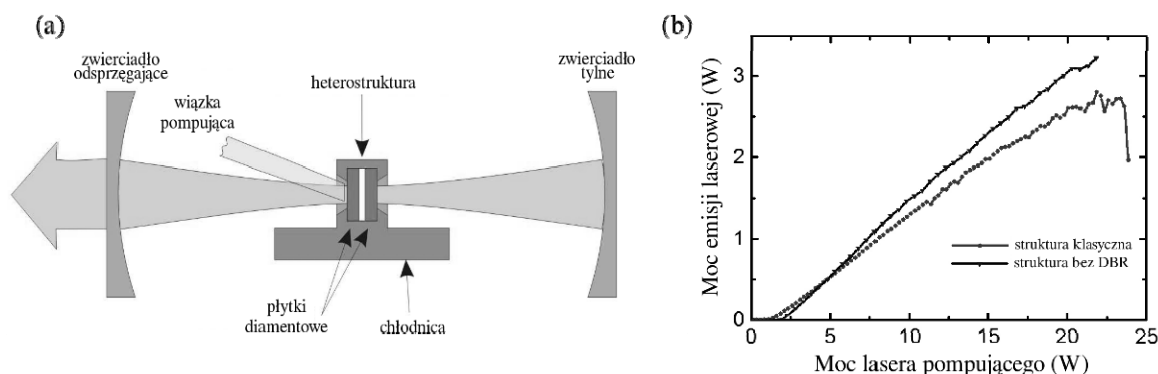


Rys.3. Siatka HCG zaprojektowana na długość fali 1040 nm i wykonana na płytce GaAs: (a) zdjęcie fragmentu siatki wykonane pod mikroskopem skaningowym; (b) wyznaczone eksperymentalnie widma odbicia światła spolaryzowanego równolegle (TE) oraz prostopadłe (TM) do prążków siatki; liniami ciągłymi przedstawiono odpowiednie przebiegi wyznaczone numerycznie

b. lasery o emisji powierzchniowej bez zwierciadeł DBR
 Modyfikacją, która istotnie poprawia parametry emisji pompowanych optycznie laserów dyskowych jest całkowite usunięcie z ich konstrukcji zwierciadeł DBR. W tym przypadku półprzewodnikowa struktura laserowa, stanowiąca medium aktywne przyrządu, składa się jedynie ze studni kwantowych. Po wzroście epitaksjalnym heterostruktura jest oddzielana od podłoża, umieszczana między dwiema rozpraszającymi ciepło diamentowymi płytkami i montowana na chłodnicy, skonstruowanej tak, aby zapewnić dostęp do obu powierzchni czipa laserowego. Całość znajduje się w centrum zewnętrznego rezonatora, utworzonego przez dwa zwierciadła wklęsłe, równo oddalone od heterostruktury (rys.4a). Promieniowanie generowane w strukturze półprzewodnikowej pod wpływem pompowania optycznego jest wzmacniane w zewnętrznym rezonatorze, a nadmiar ciepła zgromadzony w obszarze oddziaływania wiązki pompującej jest rozpraszany w płytkach diamentowych i odbierany przez stabilizowaną termicznie chłodnicę lasera. Taki układ zapewnia bardzo wysoką stabilność termiczną przyrządu.

Na rysunku 4b porównano charakterystyki pracy

klasycznego lasera VECSEL oraz lasera bez zwierciadeł DBR, zawierającego ten sam typ obszaru aktywnego: układ 8 studni kwantowych InGaAs/GaAs o grubości 8 nm i zawartości indu dopasowanej do emisji promieniowania o długości fali 970 nm. Próg laserowania w laserze o zmodyfikowanej konstrukcji występuje przy nieco wyższej mocy pompowania ($P_{th1} = 2,5 \text{ W}$), niż w przypadku lasera o konstrukcji konwencjonalnej ($P_{th2} = 1,5 \text{ W}$). W drugim przypadku emisja jest wstępnie wzmacniana już wewnątrz struktury półprzewodnikowej, w mikrorezonatorze wytworzonym pomiędzy zwierciadłem DBR a górną powierzchnią heterostruktury. Efektywność generacji promieniowania w obu laserach jest zbliżona, jednak w przypadku konstrukcji klasycznej przy ok. 22 W mocy pompy obserwuje się charakterystyczne załamanie laserowania, będące skutkiem kumulacji ciepła w czipie laserowym. W przypadku lasera bez zwierciadeł DBR moc wyjściowa przyrządu jest ograniczona praktycznie tylko mocą lasera pompującego, co otwiera szereg nowych możliwości aplikacyjnych dla tego typu przyrządów.



Rys.4. (a) schemat lasera VECSEL z heterostrukturą bez zwierciadeł DBR; (b) porównanie charakterystyk emisji lasera VECSEL bez zwierciadeł DBR i o klasycznej konstrukcji heterostrukury [9]

Podsumowanie

W opracowywaniu nowych konstrukcji laserów półprzewodnikowych z pionową wnęką rezonansową dominuje dążenie do wyeliminowania z ich struktury wielowarstwowych zwierciadeł Bragga, które ze względu na swoją grubość i stopień skomplikowania nastrożają szereg trudności technologicznych. W artykule omówiono dwie możliwe modyfikacje konstrukcyjne. Pierwszą propozycją jest zastąpienie zwierciadeł braggowskich znacznie cieńszymi podfalowymi siatkami dyfrakcyjnymi. Teoria pokazuje, że struktury te, przy odpowiednim doborze parametrów geometrycznych siatki mogą osiągać blisko stu procentową odbijalność dla fal z szerokiego zakresu spektralnego. Własność tę potwierdzają badania eksperymentalne. W artykule przytoczono wyniki pomiarów widm odbicia monolitycznych podfalowych siatek GaAs, które wykazują bardzo dobrą zgodność z przewidywaniami teoretycznymi. Druga zaproponowana modyfikacja dotyczy pompowanych optycznie laserów VECSEL i polega na całkowitym usunięciu z ich struktury półprzewodnikowej wielowarstwowych zwierciadeł Bragga. Taka konstrukcja umożliwia optymalne chłodzenie czypa laserowego i poprawia efektywność generacji promieniowania. Obie zaprezentowane zmiany konstrukcyjne znacząco upraszczają budowę wewnętrzną przyrządów, co przekłada się nie tylko na skrócenie procesów technologicznych, ale również na poprawę sprawności, stabilności i niezawodności emiterów z pionową wnęką rezonansową.

Autorzy dziękują Narodowemu Centrum Nauki za wsparcie finansowe. Wyniki prezentowane w niniejszej pracy uzyskano w ramach projektów badawczych: 2014/15/B/ST7/05258 pt.: „Monolityczne lasery o emisji powierzchniowej na bazie GaN i GaAs” oraz 2014/15/N/ST7/04742 pt.: „Badanie warunków i konwersji częstotliwości w dwubarwnych przełączalnych laserach półprzewodnikowych z pionową wnęką rezonansową o emisji powierzchniowej”.

Autorzy: dr inż. Anna Wójcik-Jedlińska¹, mgr inż. Artur Broda¹, dr hab. Jan Muszalski¹, dr inż. Anna Szerling¹, prof. dr hab. Maciej Bugajski¹, mgr inż. Marcin Gębski², dr hab. Tomasz Czyszanowski², E-mail: abroda@ite.waw.pl, muszal@ite.waw.pl, bugajski@ite.waw.pl, marcin.gebski@p.lodz.pl, tomasz.czyszanowski@p.lodz.pl.
¹Instytut Technologii Elektronowej, aleja Lotników 23/46, 02-668 Warszawa, ²Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź.

LITERATURA

- [1] Szymański M., Kozłowska A., Małąg A., Szerling A., Two-dimensional model of heat flow in broad-area laser diode mounted to a non-ideal heat sink, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 40 (2007), 924–929
- [2] Iga K., Surface-Emitting Laser - Its Birth and Generation of New Optoelectronics Field, *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*, vol. 6 (2000), 1201-1215
- [3] Michalzik R. (ed.), VCSELs. Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, ISBN 978-3-642-24986-0, Springer 2013
- [4] Muszalski J., Broda A., Jasik A., Wójcik-Jedlińska A., Sankowska I., Kubacka-Traczyk J., Trajnerowicz A., Półprzewodnikowe lasery dyskowe - korzyści z inżynierii przerwy zabronionej, Materiały konferencyjne XIV Krajowej Konferencji Elektroniki, Dąbrowka Wschodnie, 8-12.06.2015
- [5] Hopkins J.M., Calvez S., Kemp A.J., Hastie J.E., Smith S.A., Maclean A.J., Burns D., Dawson M.D., High-power vertical external-cavity surface-emitting lasers, *Phys. Status Solidi (c)*, 3: 380–385 (2006)
- [6] Chang-Hasnain C., Yang W., High-contrast gratings for integrated optoelectronics, *Adv. Opt. Photonics* vol. 4 (2012), 379-440
- [7] Gębski M., Kuzior O., Wasiak M., Szerling A., Wójcik-Jedlińska A., Pałka N., Dems M., Xie Y.Y., Xu Z.J., Wang Q.J., Zhang D.H., Czyszanowski T., High-Contrast Grating Reflectors for 980 nm Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, *High Contrast Metastructures IV, Proceedings of SPIE*: tom 9372, 2015
- [8] Gębski M., Dems M., Szerling A., Motyka M., Marona Ł., Kruszka R., Urbańczyk D., Walczakowski M., Pałka N., Wójcik-Jedlińska A., Wang Q.J., Zhang D.H., Bugajski M., Wasiak M., Czyszanowski T., Monolithic High-Index Contrast Grating: a Material Independent High-Reflectance VCSEL Mirror, *Optics Express*, vol. 23, 2015
- [9] Broda A., Kuźmich A., Rychlik G., Chmielewski K., Wójcik-Jedlińska A., Sankowska I., Michalak K., Gołaszewska-Malec K., Muszalski J., Highly efficient heat extraction by double diamond heat-spreaders applied to Vertical External Cavity Surface Emitting Laser, *Optics Express – złożona do redakcji*