

## Półprzewodnikowe lasery dyskowe – korzyści z inżynierii przerwy wzbronionej

**Streszczenie.** Półprzewodnikowe lasery dyskowe, dzięki połączeniu osiągnięć w dziedzinie konstrukcji otwartych rezonatorów właściwych dla laserów na ciele stałym i współczesnych technologii półprzewodnikowych, pozwalają na konstrukcję emiterów o unikatowych właściwościach. Doskonała jakość wiązki gaussowskiej, praca na pojedynczym modzie podłużnym, duża moc, od kilku do kilkudziesięciu watów, i jednocześnie elastyczność inżynierii przerwy wzbronionej determinującej długość fali emisji czynią lasery te szczególnie atrakcyjnymi źródłami emisji koherentnej. W artykule przedstawione zostały właściwości półprzewodnikowych laserów dyskowych i wyniki prac badawczych prowadzonych w Instytucie Technologii Elektronowej.

**Abstract.** Semiconductor Disc Lasers profit both from know-how of the solid state laser resonator set-ups and modern semiconductor epitaxial technology. Excellent optical quality of emitted Gaussian beams, single mode operation, high power ranging from single to tenths of Watts and the flexibility of the band gap engineering of the emission wavelength makes them particularly suitable in very demanding applications where no other source exists. In his paper a review on the Semiconductor Disc laser will be provided and the experimental data of the research carried on in Institute of Electron Technology will be presented. (*Semiconductor Disc Laser – advantages of band-gap engineering*).

**Słowa kluczowe:** lasery półprzewodnikowe, lasery dyskowe, VECSEL, epitaksja.

**Keywords:** semiconductor lasers, disc laser, VECSEL, epitaxy.

### Wprowadzenie

Szczególnym typem lasera dyskowego jest półprzewodnikowy laser dyskowy, VECSEL (ang. *Vertical External Cavity Surface-Emitting Laser*). Jest to laser, w którym otwarty rezonator domknięty jest przez tak zwane aktywne zwierciadło półprzewodnikowe: epitaksjalną heterostrukturę zawierającą zwierciadło Bragga i obszar czynny w postaci jam kwantowych. Obszar czynny jest zaprojektowany by umożliwić efektywne pompowanie optyczne. Do tego celu wykorzystywane są półprzewodnikowe lasery krawędziowe dużej mocy.

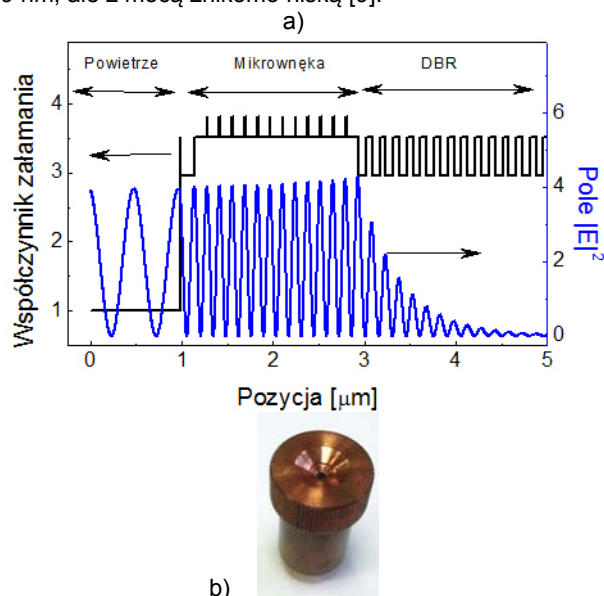
Zastosowanie zewnętrznego rezonatora i pompowania optycznego umożliwia jednorodną ekscytację dużej powierzchni, której średnica może przekraczać setki mikrometrów. Pozwala to na obniżenie zarówno gęstości mocy optycznej na powierzchni heterostruktury jak i gęstości strumienia ciepła odbieranego przez chłodnicę. Tym samym spełniony jest warunek konieczny emisji promieniowania z dużą mocą. Jednocześnie poprzez dobór geometrii zewnętrznego rezonatora utworzonego przez przynajmniej jedno zwierciadło dielektryczne możliwa jest dyskryminacja modów bocznych wyższego rzędu generowanych przez laser. W konsekwencji konstrukcja VECSEL pozwala na emisję z dużą mocą (przekraczającą 100 W [1]) w wiązce gaussowskiej [2]. Poprzez zastosowanie wewnątrz rezonatorowych elementów optycznych możliwe jest osiągnięcie generacji na pojedynczym modzie podłużnym [3] spektralnie wąskiej linii w zakresie kHz [4].

Tak doskonałe parametry wiązki przy jednoczesnej dużej mocy emisji konstrukcja VECSEL umożliwia jako jedyną spośród laserów półprzewodnikowych.

Użycie w laserze heterostruktury półprzewodnikowej pozwala na zaprojektowanie go na emisję w bardzo szerokim zakresie spektralnym – od 630 do 1200 nm [5] i powyżej 2000 nm. Swobodny dostęp do otwartego rezonatora, poprzez wykorzystanie optycznych elementów optyki nieliniowej, poszerza zakres emisji na pasmo widzialne. Tym samym pozwala na tworzenie koherentnych źródeł promieniowania w zakresie emisji od barwy niebieskiej, poprzez zieloną, żółtą do czerwonej [6].

W szczególności zakres barwy zielono-żółtej dotychczas jest dość słabo spenetrowany przez lasery na ciele stałym

[7]. Tymczasem, w tym zakresie spektralnym został z sukcesem ostatnio zademonstrowany laser VECSEL zdolny do emisji 20 W w wiązce gaussowskiej o parametrze  $M^2 < 1,5$  [8]. Ten zakres spektralny w przypadku laserów półprzewodnikowych jest nazywany obszarem *zielonej przerwy*. Półprzewodnikowe lasery o emisji krawędziowej w przypadku technologii azotków (InGaN/GaN) są zdolne do emisji z mocą maksymalną 1 W na długości fali co najwyżej 520 nm. Z kolei technologia oparta o związki arsenu i fosforu (InGaAlP//GaAs) w minionym roku umożliwiła laboratoryjną demonstrację emisji na rekordowo krótkiej fali 599 nm, ale z mocą znikomo niską [9].



Rys. 1. Przestrzenny rozkład współczynnika załamania i obliczone natężenie pola elektromagnetycznego dla heterostruktury lasera VECSEL (a), zmontowany w uchwycie miedzianym chip lasera VECSEL wytworzony w ITE (b)

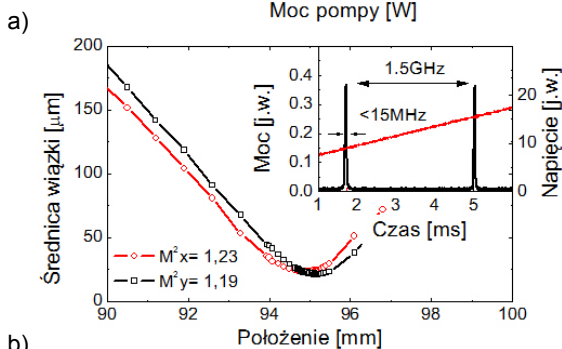
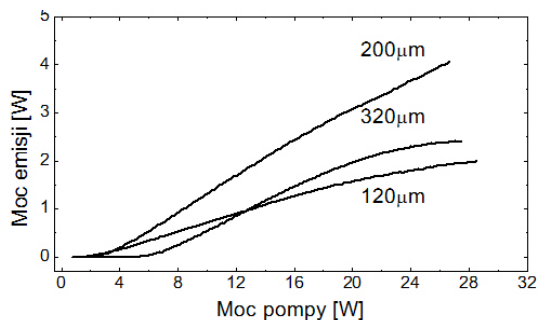
Dodatkowym atrybutem laserów VECSEL jest możliwość strojenia. Jest tak z uwagi na spektralnie szerokie pasmo wzmocnienia materiałów półprzewodnikowych i możliwość stosowania wewnątrz

rezonatorowych elementów optycznych np. filtru Lyota. Zakres strojenia to nawet kilkanaście nanometrów.

Możliwość strojenia laserów wraz z ich zdolnością do emisji wąskich spektralnie linii czyni lasery VECSEL szczególnie atrakcyjnym źródłem promieniowania koherentnego w zastosowaniach spektroskopowych.

Materiały półprzewodnikowe w porównaniu z materiałami typowych laserów na ciele stałym charakteryzują się krótkim nanosekundowym czasem życia nośników w stanie wzbudzonym. Jednocześnie zastosowanie zewnętrznego rezonatora o co najmniej centymetrowych rozmiarach wnęki rezonansowej i zwierciadeł o wysokim współczynniku odbicia typowo 97-99% powoduje zwiększenie czasu życia fotonu. W konsekwencji lasery VECSEL są źródłami typu A, tzn. pozbawionymi oscylacji relaksacyjnych [10]. Mogą zatem być bezpośrednio modulowane ze stałą czasową zaledwie ułamków mikrosekund [11].

Krótki czas życia nośników w stanie wzbudzonym pozwolił ostatnio zademonstrować dla tych laserów rekordową częstość repetycji (w reżimie fazowej synchronizacji modów) przekraczającą 200 GHz przy pikosekundowej długości impulsu [12]. Należy jednak zaznaczyć, że tradycyjne lasery na ciele stałym mają jednak przewagę nad laserami VECSEL w przypadku generacji wysokich mocy w zakresie kW, a także w przypadku generacji impulsów wysokoenergetycznych.



Rys. 2. Konwersja mocy lasera VECSEL w funkcji średnicy ogniska, praca wielomodowa (a). Emisja na pojedynczym modzie: pomiar  $M^2$  - średnica wiązki w funkcji położenia detektora (b) i z użyciem interferometru Fabry-Perot (wstawka w rys. b)

### Elastyczność spektralna laserów VECSEL

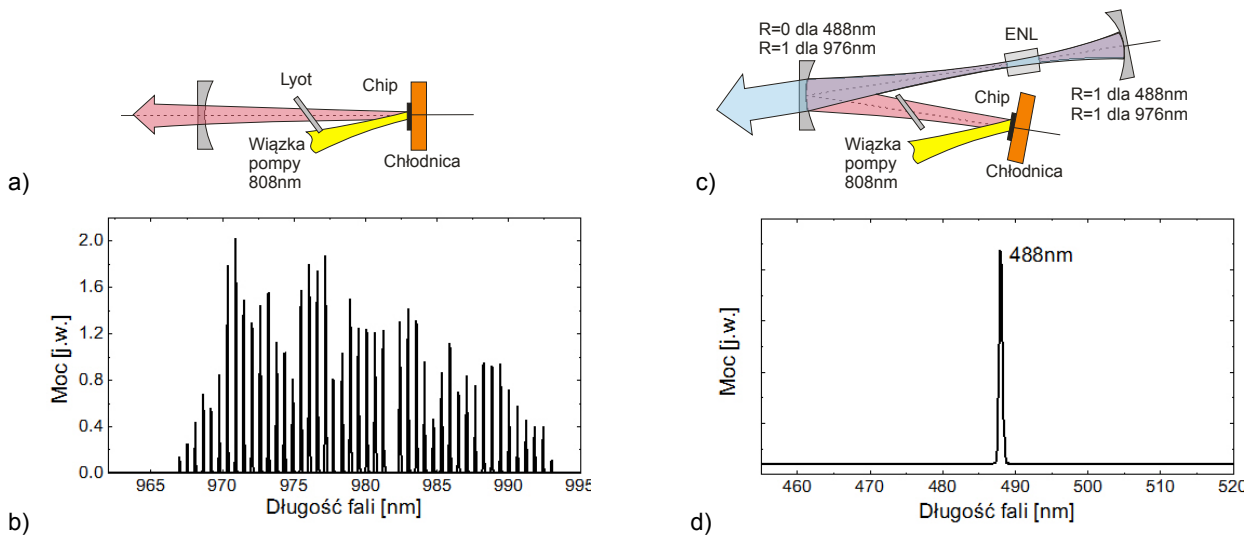
Z uwagi na unikatowe cechy lasery VECSEL są od lat konstruowane i badane w Instytucie Technologii Elektronowej w Warszawie [13, 14]. Typowa heterostruktura wytwarzana metodą epitaksji z wiązek molekularnych (ang. *Molecular Beam Epitaxy*, MBE) składała się z zwierciadła Bragga (ang. *Distributed Bragg Reflector* DBR) i bezpośrednio na nim osadzonego obszaru czynnego – jam kwantowych, które wraz z barierami tworzą mikrownękę (rys. 1). DBR składa się z 27 par warstw o AlAs/GaAs o grubościach odpowiadających ćwiartce długości fali w materiale. Jamy kwantowe były wykonywane z InGaAs (8

nm) i rozdzielane warstwami barier z GaAs o grubościach odpowiadających połowie długości fali (~130 nm). Dzięki temu każda jama kwantowa znajdowała się w miejscu odpowiadającym strzałce fali stojącej generowanej przez laser (rys. 1). Warstwy barier zapewniały jednocześnie barierę potencjału dla nośników zgromadzonych w jamach kwantowych jak również obszar wysokiej absorpcji promieniowania pompy. Jako pompy używano liniiki laserów półprzewodnikowych emitujących na fali ciągłej 808-810 nm. W przypadku 12 jam kwantowych całkowita grubość obszaru czynnego stanowiącego mikrownękę wynosiła  $13/2\lambda$ , co odpowiada w przybliżeniu 1,8  $\mu\text{m}$ , co z kolei zapewnia ok. 90% wydajność absorpcji promieniowania przy jednokrotnym przejściu wiązki z lasera pompy. Z uwagi na niedopasowanie stałych sieci InGaAs i GaAs dla kompensacji naprężeń w wybranych heterostrukturach zostały dodane dodatkowe warstwy GaAsP o mniejszej stałej sieci. Warstwy GaAsP były osadzone bezpośrednio przed i po warstwie InGaAs. Od strony powierzchni obszar czynny był każdorazowo ograniczany warstwą AlGaAs stanowiącą barierę dla dyfuzji nośników skutecznie zabezpieczającą przed rekombinacją niepromienistą poprzez stany powierzchniowe. Dodatkowo warstwa bariery z uwagi na wysoką zawartość glinu była chroniona przed utlenianiem 10 nm warstwą GaAs.

Duża elastyczność oferowana przez MBE pozwala na wytwarzanie wielu wariantów opisanej powyżej heterostruktury. Osadzenie dwóch rodzajów jam kwantowych w jednym obszarze czynnym pozwala na wytwarzanie laserów VECSEL zdolnych do jednoczesnej emisji na dwóch długościach fali. Podobnie niewielka zmiana grubości warstw barier skutkuje spektralnym przesunięciem modu mikrownęki z pozycji centralnej plateau wysokiego współczynnika odbicia zwierciadła Bragga, tym samym dla dostatecznie szerokiej mikrownęki np.  $13/2\lambda$  w obszarze plateau są dwa mody Fabry-Perot mikrownęki. Powoduje to, że emisja lasera może być przełączana między dwiema długościami fali.

Niezależnie od konstrukcji heterostruktury lasera półprzewodnikowego, dla optymalnego działania lasera konieczne jest zapewnienie efektywnego odbioru ciepła z heterostruktury. W tym celu po wylupaniu z płytki epitaksjalnej, chip o wymiarach 3x3 mm był montowany w specjalnie do tego celu przygotowanym uchwycie miedzianym (rys. 1b). Dla zapewnienia wysoko wydajnej ekstrakcji ciepła do powierzchni heterostruktury był przyciśnięty syntetyczny diament o wysokiej jakości krystalicznej i optycznej. Diament charakteryzuje się najwyższym, ze znanych materiałów, współczynnikiem przewodnictwa cieplnego (~2000 W/mK). Obecnie są dostępne komercyjnie syntetyczne diamenty o gładkiej powierzchni (RMS = 0,5 nm) i wysokiej jakości optycznej tzn. niskiej absorpcji, niskiej dwójłomności. Zastosowanie diamentu od strony powierzchni heterostruktury zwiększa moc emisji, typowo ponad dziesięciokrotnie.

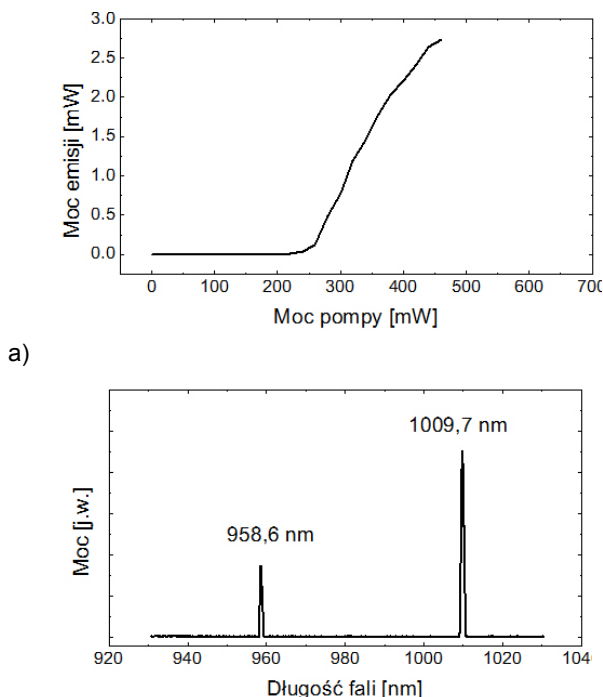
Tak zmontowane heterostruktury były montowane do układu rezonatora. Utworzony rezonator liniowy z jednej strony był domknięty przez DBR stanowiący część heterostruktury, a z drugiej strony przez zwierciadło dielektryczne (rys. 3a). Typowe zwierciadło dielektryczne miało promień krzywizny równy 90 mm i współczynnik odbicia 96-99%. Tak dobrane zwierciadło dielektryczne pozwalało na regulację średnicy modu podstawowego w zakresie od 50 do 320  $\mu\text{m}$ . Zmiana średnicy modu podtrzymywanego przez rezonator skutkowałą każdorazowo zmianą mocy maksymalnej (rys. 2a).



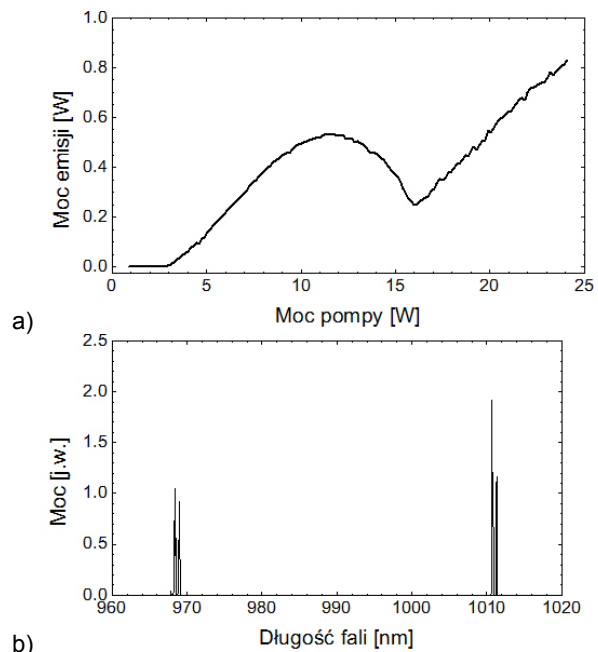
Rys. 3. Elastyczność spektralna laserów VECSEL. Strojenie długości fali emisji w zakresie ponad 20 nm za pomocą filtra Lyota w rezonatorze liniowym (a), (b). Rezonator typu V wykorzystywany do wzbudzenia emisji o częstotliwości drugiej harmonicznej użyciem Elementu Optyki Nieliniowej ELN (c), zarejestrowane widmo na fali 488 nm (d)

Dla średnicy pobudzenia 200  $\mu\text{m}$  VECSEL w reżimie pracy wielomodowej zaobserwowano emisję promieniowania z mocą maksymalną równą 5,7 W. Po wyjustowaniu rezonatora do pracy na pojedynczym modzie bocznym parametr wiązki  $M^2$  był równy 1,2 (rys. 2b). Z kolei po włożeniu do wnętrza rezonatora filtra Lyota lasery VECSEL generowały na pojedynczym modzie, przy czym szerokość spektralna linii była poniżej 15 MHz, rozdzielczości dostępnego rezonatora Fabry-Perota. Laser VECSEL z filtrem Lyota mógł być strojony w zakresie przekraczającym 20 nm (rys. 3a,b).

Po zmianie geometrii rezonatora z liniowego na typu V dodatkowe przewężenie wiązki gaussowskiej w ramieniu utworzonym przez zwierciadła dielektryczne pozwoliło na efektywną konwersję promieniowania z użyciem elementów optyki nieliniowej (rys. 3c,d). Stosując kryształy LBO i BiBO, promieniowanie pierwotne o długości 976 nm mogło być konwertowane do 488 nm. Rozmiary geometryczne rezonatora V wynosiły zaledwie 100 x 70 mm. Laser taki jest nie tylko wygodnym substytutem lasera argonowego, ale dzięki funkcji strojenia przewyższa jego przydatność w wielu zastosowaniach.



Rys. 4. Charakterystyka konwersji mocy lasera emitującego promieniowanie jednocześnie na dwóch długościach fali, ograniczenie mocy do mW wynika z monażu bez użycia diamentu (a), widmo emisji (b)



Rys. 5. Charakterystyka konwersji mocy dla przełączalnego lasera VECSEL, zagięcie charakterystyki odpowiada przełączeniu emisji promieniowania z długości fali 968 nm na 1011 nm (a). Widmo emisji przełączalnego lasera VECSEL zarejestrowane dla mocy pompy 12 i 20 W (b)

Elastyczność emisji laserów VECSEL została przetestowana poprzez wykonanie heterostruktury z dwoma rodzajami jam kwantowych. Tak skonstruowany laser

pozwalal na emisję jednocześnie dwóch długości fali (rys. 4). W tym przypadku dla zapewnienia dostatecznie wysokiego współczynnika wzmocnienia w miejscach odpowiadających położeniu strzałek fal stojących umieszczono podwójne studnie kwantowe. Ponadto, w celu zapobieżenia rekombinacji nośników w jamach o dłuższej fali emisji, tzn. o mniejszej energii promieniowania, obszar mikrownęki został przedzielany na dwie części przez barierę potencjału zapobiegającą dyfuzji nośników. Otrzymana moc dla tego lasera była niska z uwagi na to, że w tym przypadku heterostruktura była zmontowana bez użycia diamentu.

Innym przykładem unikatowych możliwości laserów VECSEL jest laser zdolny do emisji na dwóch przełączalnych długościach fali. Heterostruktura takiego lasera powstała poprzez nieznaczne zwiększenie grubości barier oddzielających poszczególne jamy kwantowe. W konsekwencji w obszarze spektralnym plateau wysokiego współczynnika odbicia DBR były dwa mody podłużne mikrownęki. Poprzez zwiększanie mocy pompy wskutek silnego termicznego dryfu spektralnego wzmocnienia uzyskiwano zjawisko przełączania pomiędzy dwiema długościami fali (rys. 5). Proces przełączania zachodził szybko, numeryczne obliczenia wskazują, że jest możliwe przełączanie w zakresie 1 kHz [14].

### Podsumowanie

W pracy zaprezentowano lasery VECSEL zdolne do emisji promieniowania koherentnego. Długość fali emisji po wstępnym zdefiniowaniu w procesie epitaksji może być strojona w zakresie kilkunastu nanometrów przy zachowaniu generacji na pojedynczym modzie. Promieniowanie z zakresu bliskiej podczerwieni poprzez użycie elementów optyki nieliniowej może być transformowane do pasma widzialnego. Przykładem jest emisja promieniowania na długości fali 488 nm odpowiadająca linii emisyjnej lasera argonowego. Wprowadzone na etapie epitaksji drobne zmiany grubości lub składu chemicznego poszczególnych warstw pozwalają na całkowicie nowe zastosowania laserów VECSEL do generacji dwóch długości fali zarówno w modzie generacji jednoczesnej jak i w trybie przełączalnym.

*Autorzy pragną podziękować panu Lechowi Rządcy za pomoc, rady i wsparcie techniczne. Powyższe badania były realizowane dzięki grantom przyznanych przez NCBiR NR 02 0023 06 i NCN N N515 360 636.*

### LITERATURA

- [1] Wang T.-L., Heinen B., Hader J., Dineen C., Sparenberg M., Weber A., Kunert B., Koch S.W., Moloney J.V., Koch M., Stolz W., Quantum design strategy pushes high-power verticalexternal-cavity surface-emitting lasers beyond 100W, *Laser Photonics Rev.* 6, No. 5, L12–L14 (2012)
- [2] Rudin B., Rutz A., Hoffmann M., Maas D.J.H.C., Bellancourt A.-R., Gini E., Südmeyer T., and Keller U., Highly efficient optically

- pumped vertical-emitting semiconductor laser with more than 20 W average output power in a fundamental transverse mode, *Optics Lett.* 33(22), 2719, (2008)
- [3] Laurain A., Mart C., Hader J., Moloney J.V., Kunert B., and Stolz W., 15W Single Frequency Optically Pumped Semiconductor Laser With Sub-Megahertz Linewidth, *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 26(2), 131, (2014)
  - [4] Rantamäki A., Chamorovskiy A., Lyytikäinen J., and Okhotnikov O., 4.6-W Single Frequency Semiconductor Disk Laser With <75-kHz Linewidth, *Photonics Technol. Lett. IEEE* 24, pp. 1378, (2012)
  - [5] Okhotnikov O., *Semiconductor Disk Lasers*, Wiley-VCH, (2010)
  - [6] Calvez S., Hastie J.E., Guina M., Okhotnikov O.G., Dawson M.D., Semiconductor disk lasers for the generation of visible and ultraviolet radiation, *Laser & Photon. Rev.* 3, No. 5, 407-434 (2009)
  - [7] Yao Y., Zheng Q., Qu D.P., Zhou K., Liu Y., and Zhao L., All-solid-state continuous-wave frequency doubled Nd:YAG/LBO laser with 1.2 W output power at 561 nm, *Laser Phys. Lett.* 7(2), 112-115 (2010)
  - [8] Kantola E., Leinonen T., Ranta S., Tavast M., and Guina M., High-efficiency 20 W yellow VECSEL, *Optics Express*, Vol. 22, Issue 6, 6372-6380 (2014)
  - [9] Toikkanen L., Härkönen A., Lyytikäinen J., Leinonen T., Laakso A., Tukiainen A., Viheriälä J., Bister M., and Guina M., Optically pumped edge-emitting GaAs-based laser with direct orange emission, *Photon. Technol. Lett.* 26(4), 384–386 (2014). <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2013.2294726>
  - [10] Baili G., Alouini M., Malherbe T., Dolfi D., Sagnes I. and Bretenaker F., Direct observation of the class-B to class-A transition in the dynamical behavior of a semiconductor laser, *EPL* 87 (2009) 44005
  - [11] Hempler N., Hopkins J.-M., Kemp A.J., Schulz N., Rattunde M., Wagner J., Dawson M.D., Burns D., Pulsed pumping of semiconductor disk lasers, *Opt. Express* 15, 3247-3256 (2007)
  - [12] Saarinen E.J., et al., *Electronics Letters*, 48(21), 1355-1357, (2012)
  - [13] Muszalski J., Broda A., Jasik A., Wójcik-Jedlińska A., Trajnerowicz A., Kubacka-Traczyk J., Sankowska I., VECSELS emitting at 976nm designed for second harmonic generation in the blue wavelength region, *Proc. SPIE* 8702, Laser Technology 2012: Progress in Lasers, 87020A (22 January 2013)
  - [14] Muszalski J., Broda A., Trajnerowicz A., Wójcik-Jedlińska A., Sarzala R.P., Wasiak M., Gutowski P., Sankowska I., Kubacka-Traczyk J., Golaszewska-Malec K., Switchable double wavelength generating vertical external cavity surface-emitting laser, *Optics Express*, 22(6), 6447 (2014)

**Autorzy:** dr hab. Jan Muszalski, Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-660 Warszawa, E-mail: [muszal@ite.waw.pl](mailto:muszal@ite.waw.pl); mgr inż. Artur Broda, Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-660 Warszawa; dr inż. Agata Jasik, Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-660 Warszawa, E-mail: [ajasik@ite.waw.pl](mailto:ajasik@ite.waw.pl); dr inż. Anna Wójcik-Jedlińska, Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-660 Warszawa; dr Iwona Sankowska, 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.