

Modelowanie i optymalizacja antymonkowych laserów typu VCSEL

Streszczenie. W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki komputerowej symulacji progowej pracy antymonkowego lasera o emisji powierzchniowej z pionową wnęką rezonansową z wykorzystaniem samouzgodnionego modelu lasera opisującego zjawiska elektryczne, termiczne, rekombinacyjne i optyczne. Obliczenia wykonano dla struktury dostosowanej do emisji promieniowania o długości fali 2,6 μm . Pokazane zostały zalety wprowadzenia ograniczenia dla rozptyłu prądu w postaci złącza tunelowego oraz zbadano wpływ przesunięcia warstw powstałego na skutek jego wytworzenia na ograniczanie wzbudzenia się modów wyższego rzędu. Zmniejszanie przesunięcia, o wartości początkowej wynoszącej 55 nm, o 35 nm spowodowało wzrost strat dla modów LP_{11} i LP_{21} odpowiednio 7 i 25 razy przy wzroście prądu progowego jedynie o 10%. Dalsza redukcja przesunięcia przyczynia się do wyraźnego wzrostu prądu progowego: 20% dla 40 nm oraz 50% dla 45 nm.

Abstract. In this work results of the threshold operation of antimonide-based vertical-cavity surface-emitting laser have been presented with the aid of the comprehensive fully self-consistent optical-electrical-thermal-recombination numerical model. Calculations have been carried out for the structure emitting at 2.6 μm . The advantages of incorporating the tunnel junction for current confinement have been shown and the influence of a layer shift caused by presence of the tunnel junction on the mode selectivity has been examined. It was shown that reducing the layer shift, with initial height equal to 55 nm, by the 35 nm leads to 7 and 25 times higher mode losses for LP_{11} and LP_{21} modes, respectively, and only 10% higher threshold current for the LP_{01} mode. Further reduction of the layer shift leads to high increment of the threshold current value: 20% for 40 nm reduction and 50% for 45 nm one. (**Modelling and optimisation of the antimonide-based VCSELs**).

Słowa kluczowe: przyrządy półprzewodnikowe, lasery typu VCSEL, model numeryczny, obszar czynny GaInAsSb/GaSb, średnia podczerwień.

Keywords: semiconductor devices, VCSELs, numerical model, GaInAsSb/GaSb active region, mid-infrared radiation.

Wprowadzenie

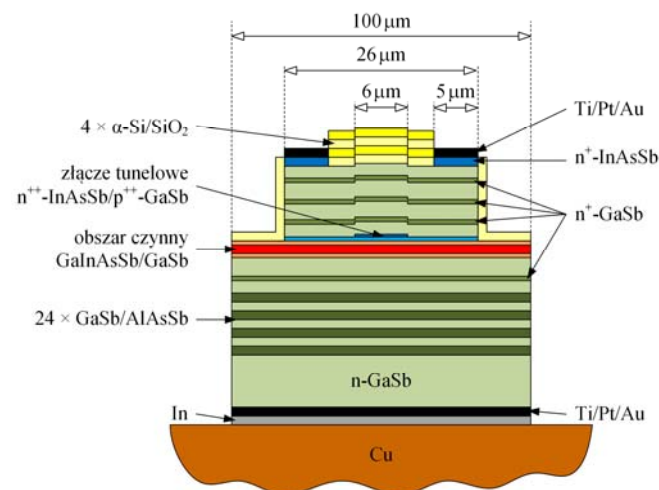
Lasery półprzewodnikowe emitujące promieniowanie z zakresu średniej podczerwieni (2,0-5,5 μm) cieszą się coraz większym zainteresowaniem fizyków i technologów z uwagi na dużą liczbę potencjalnych zastosowań, do których zalicza się m.in.: bezprzewodową komunikację optyczną i zdalny monitoring zanieczyszczeń powietrza. Od laserów dedykowanych dla spektroskopii laserowej, będącej jedną z metod badania zanieczyszczeń, wymaga się pracy jednomodowej oraz przestrajalności fali podczas ich pracy z falą ciągłą [1]. Idealnymi kandydatami są tu lasery typu VCSEL (ang. *Vertical Cavity Surface-Emitting Laser* – laser o emisji powierzchniowej z pionową wnęką rezonansową). Do najważniejszych zalet tych przyrządów zaliczane są: praca na pojedynczym modzie podłużnym, mała rozbieżność kąta wiązki, łatwość sprzęgania w pionie z innymi układami optoelektronicznymi oraz niski koszt przy masowej produkcji. Do tej pory największa długość fali jaką uzyskano dla lasera typu VCSEL pracującego z falą ciągłą w temperaturze pokojowej wynosi 2,62 μm [2]. W niniejszej pracy przeprowadzono obliczenia dla podobnej struktury, koncentrując się na skutkach wprowadzenia ograniczenia dla rozptyłu prądu w postaci złącza tunelowego oraz możliwościach ograniczenia wzbudzenia się modów wyższego rzędu.

Model numeryczny

W celu przeprowadzenia analizy numerycznej struktury laserowej przedstawionej na rysunku 1. posłużono się samouzgodnionym trójwymiarowym modelem obejmującym zjawiska termiczne, elektryczne, optyczne oraz wzmocnienie opracowanym w Zespole Fotoniki Instytutu Fizyki Politechniki Łódzkiej. Model ten w sposób samouzgodniony uwzględnia wszystkie istotne powiązania pomiędzy zjawiskami fizycznymi zachodzącymi w przyrządach półprzewodnikowych – przykładowo:

- wpływ temperatury i koncentracji nośników na przewodności elektryczne,
- zależność przewodności termicznych od temperatury,
- wpływ temperatury i naprężeń na wartości przerw energetycznych, nieciągłości pasm, położenia

- poziomów kwantowych w studniach oraz obsadzenie poziomów kwantowych przez nośniki,
 - zależność wzmocnienia optycznego od temperatury, koncentracji nośników i długości fali,
 - wpływ temperatury, koncentracji nośników i długości fali na wartości współczynników załamania,
 - zależność współczynników absorpcji promieniowania od temperatury, koncentracji nośników i długości fali.
- Więcej informacji na temat modelu można znaleźć w pracach [3] i [4].



Rys. 1. Schematycznie przedstawiona konstrukcja antymonkowego lasera typu VCSEL

Struktura i parametry materiałowe

Struktura modelowanego lasera (rys. 1) jest podobna do lasera zaprezentowanego w pracy [5]. Jest to laser typu VCSEL z obszarem czynnym składającym się z siedmiu naprężonych ($\epsilon = -1,6\%$) studni kwantowych $\text{Ga}_{0,57}\text{In}_{0,43}\text{As}_{0,15}\text{Sb}_{0,85}$ rozdzielonych barierami wykonanymi z GaSb. Po obu stronach obszaru czynnego znajdują się warstwy AlGaAsSb o zmiennym składzie ograniczające ruch nośników. Nad obszarem czynnym umieszczono

złącze tunelowe składające się z silnie domieszkowanych warstw p-GaSb/n-InAs_{0,91}Sb_{0,09}. Położenie złącza tunelowego przypada na węzeł fali stojącej, która powstaje w rezonatorze. Również w węzłach fali stojącej umieszczone zostały cztery silnie domieszkowane warstwy GaSb typu n ułatwiające rozptył prądu w rezonatorze. Długość optyczna rezonatora równa jest 3-λ, natomiast przesunięcie warstw obserwowane powyżej złącza tunelowego spowodowane wytrawieniem obszarów położonych powyżej 3 μm od osi symetrii lasera wynosi 55 nm. Z obu stron wnęki rezonansowej znajdują się zwierciadła braggowskie. Zwierciadło dolne składa się z 24 par warstw GaSb/AlAs_{0,08}Sb_{0,92} typu n (skład AlAsSb został wybrany tak, aby warstwy te były dopasowane sieciowo do

podłoża wykonanego z GaSb). Zwierciadło górne, przez które emitowane jest promieniowanie, stanowią 4 pary warstw utworzonych z materiałów dielektrycznych α-Si/SiO₂. Dolna warstwa metalizowana znajduje się pomiędzy podłożem a lutem indowym umożliwiającym przytwierdzenie struktury lasera do bloku miedzianego, natomiast górna wykonana została w postaci pierścienia umieszczonego na silnie domieszkowanej warstwie podkontaktowej wykonanej z InAs_{0,91}Sb_{0,09} typu n dopasowanego sieciowo do GaSb. Grubości i domieszkowanie warstw składających się na modelowaną strukturę podano w tabeli 1. W tej samej tabeli, a także w tabelach 2 i 3 podano przykładowe (dla temperatury pokojowej) wartości parametrów stosowanych w symulacji.

Tabela 1. Grubości warstw d modelowanego lasera, koncentracje domieszek N , oraz wartości parametrów stosowanych w modelowaniu wyznaczone dla 300 K [6, 7]: σ – przewodność elektryczna, k – przewodność termiczna, n_R – fazowy współczynnik załamania, α – współczynnik absorpcji

warstwa	d (nm)	N (1/cm ³)	σ (1/Ωm)	k (W/mK)	n_R	α (1/cm)
α-Si	187	–	0,1	1,61	3,485	24,8
SiO ₂	455	–	10 ⁻¹³	1,29	1,428	0,1
n ⁺⁺ -InAsSb (warstwa podkont.)	100	1·10 ²⁰	1,02·10 ⁵	9,09	2,742	295
n ⁺ -GaSb	60	2·10 ¹⁸	35705	36	3,794	39,1
n-GaSb	140/280/280/260	2·10 ¹⁷	10975	36	3,830	11,5
n-GaSb (nad zł. tunelowym)	25	2·10 ¹⁷	10975	36	3,830	11,5
n-Ga _x In _{1-x} As _y Sb _{1-y} (nad zł. tun.)	10	2·10 ¹⁷	10 ⁴	2,27	3,4	100
n ⁺⁺ -InAsSb (złącze tunelowe)	20	2·10 ¹⁹	6,57·10 ⁵	9,09	2,968	137
p ⁺⁺ -GaSb (złącze tunelowe)	32	2·10 ¹⁹	5,24·10 ⁴	36	3,708	3053
p-Al _x Ga _{1-x} As _{0,01} Sb _{0,99}	60	5·10 ¹⁷	2587	13,2	3,698	361
Ga _{0,57} In _{0,43} As _{0,15} Sb _{0,85} (studnia)	10	–	–	3,02	4,0	–
GaSb (bariera)	8	–	–	36	3,828	35,7
n-Al _x Ga _{1-x} As _{0,01} Sb _{0,99}	60	5·10 ¹⁷	3806	13,2	3,687	10,0
n-GaSb	341/140	2·10 ¹⁷	10975	36	3,830	11,5
n-GaSb (dolne zwierciadło)	170	5·10 ¹⁷	19484	36	3,821	20,0
n-AlAsSb (dolne zwierciadło)	206	5·10 ¹⁷	721	11,9	3,154	6,4
n-GaSb (podłoże)	500 000	5·10 ¹⁷	19484	36	3,821	20,0

Tabela 2. Wartości parametrów występujących w równaniu dyfuzji wyznaczone dla 300 K [8]

parametr	A (1/s)	B (cm ² /s)	C (cm ⁶ /s)	D (cm ² /s)
wartość	2·10 ⁷	1·10 ⁻¹⁰	7,3·10 ⁻²⁸	10

Tabela 3. Wartości parametrów stosowanych w modelu wzmocnienia wyznaczone dla 300 K [6, 9]: E_g – przerwa energetyczna, m_e , m_{hh} , m_{lh} – efektywne masy elektronu, ciężkiej i lekkiej dziury, Δ_{so} – odległość pasma odszczepionego, Q_c – nieciągłość w paśmie przewodnictwa, τ – czas życia emisji wymuszonej

parametr	E_g (eV)	m_e (m_0)	m_{hh} (m_0)	m_{lh} (m_0)	Δ_{so} (eV)	Q_c (%)	τ (ps)
studnia kwantowa	0,359	0,026	0,239	0,034	0,583	86	0,05
bariera	0,727	0,039	0,220	0,045	–		

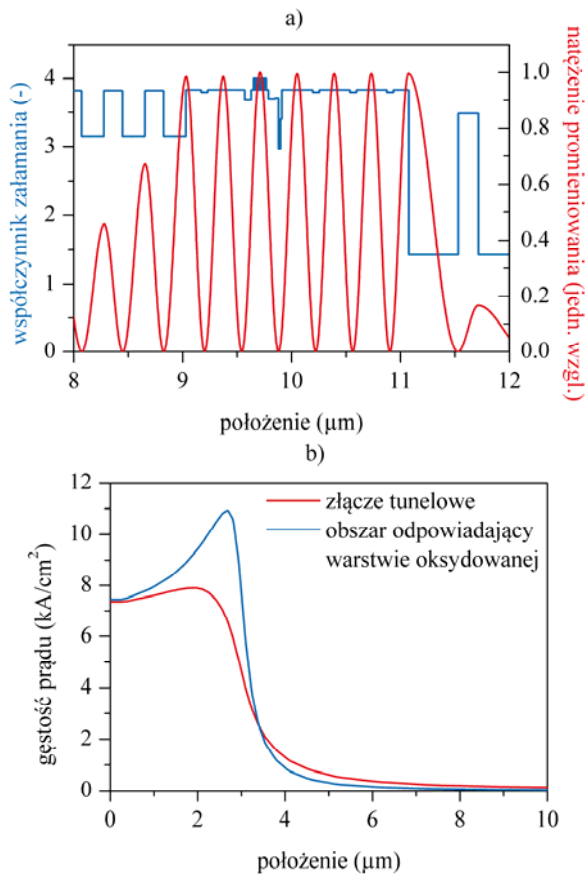
Wyniki

W przypadku laserów typu VCSEL wykonywanych w technologii antymonkowej najczęściej stosowanym ograniczeniem dla rozptyłu prądu jest złącze tunelowe. Umożliwia ono ograniczenie występowania materiałów typu p, charakteryzujących się większym współczynnikiem absorpcji względem materiałów typu n [10], do cienkiej (kilkadziesiąt nanometrów) warstwy znajdującej się pomiędzy obszarem czynnym lasera a złączem tunelowym. Warstwy tworzące złącze tunelowe są silnie domieszkowane, co skutkuje dużymi wartościami współczynnika absorpcji promieniowania. Jest to szczególnie istotne w laserach emitujących promieniowanie w zakresie podczerwieni, gdyż współczynnik absorpcji na swobodnych nośnikach zależy nie tylko od ich koncentracji, ale i długości fali [7].

W celu ograniczenia absorpcji promieniowania w obszarach składających się na złącze tunelowe lasery typu VCSEL projektuje się tak, aby położenie złącza przypadało na węzeł fali stojącej powstającej w rezonatorze (rys. 2a). Dodatkowo, z uwagi na różne wartości absorpcji w silnie domieszkowanych warstwach, odpowiednio dobrana różnica pomiędzy miejscem styku tych warstw a

położeniem węzła fali stojącej przyczyni się do polepszenia charakterystyk przyrządu.

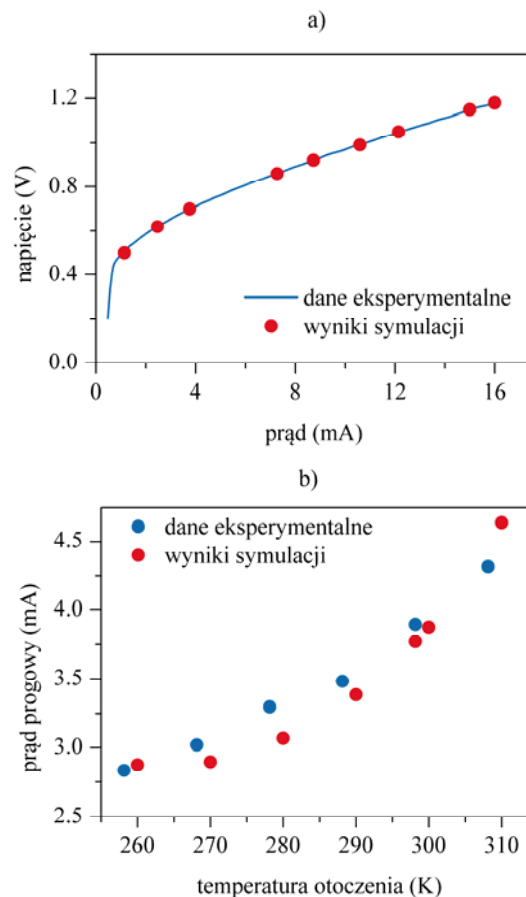
Poza ograniczeniem absorpcji ze stosowaniem złącza tunelowego wiąże się także inne korzystne rozwiązanie, jakim jest ujednoczenie gęstości prądu wstrzykiwanego do obszaru czynnego (rys. 2b). Rozkład gęstości prądu w obszarze czynnym lasera przekłada się bezpośrednio na profil koncentracji nośników, i w rezultacie na wzmocnienie. W przypadku, gdy pożądana jest praca lasera typu VCSEL na modzie LP₀₁, dla którego maksymalna wartość natężenia promieniowania przypada na oś symetrii struktury, należy zadbać o to by maksymalna koncentracja nośników również była w osi lasera. Na rysunku 2b porównano, dla takiego samego napięcia zasilającego laser, rozkłady gęstości prądu w dwóch strukturach: ze złączem tunelowym oraz z obszarem odpowiadającym warstwie oksydowanej. Wyniki dla drugiego przypadku mają charakter wyłącznie poglądowy (w obliczeniach w miejsce złącza tunelowego wprowadzono GaSb typu n i otoczono go pierścieniem o przewodności elektrycznej Al_xO_y) i pokazują, że ewentualne ograniczenie prądowe powstałe w wyniku oksydacji będzie przyczyniać się do wzbudzenia modów wyższego rzędu nawet dla niewielkich rozmiarów apertury.



Rys. 2. Rozkłady a) współczynnika załamania i fali elektromagnetycznej w rezonatorze modelowanego lasera, b) gęstości prądu w obszarze czynnym lasera dla różnych sposobów ograniczenia rozplywu prądu: z wykorzystaniem złącza tunelowego oraz warstwy o przewodności elektrycznej odpowiadającej obszarowi poddanemu oksydacji

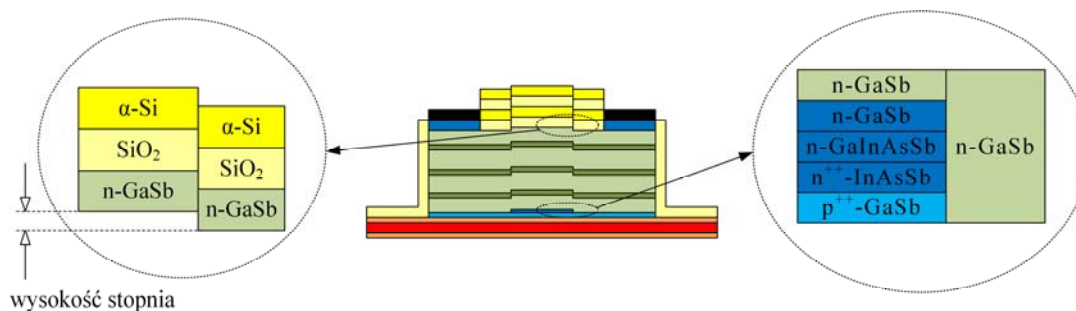
Obliczenia przeprowadzone w ramach niniejszej pracy poprzedzone zostały nie tylko selekcją parametrów materiałowych zebranych w tabelach 1-3, ale także doбором parametrów elektrycznych opisujących zarówno obszar czynny, jak i złącze tunelowe. Na rysunku 3 pokazane zostały wyniki kalibracji modelu numerycznego w oparciu o dane eksperymentalne pochodzące z pracy [5]. W przypadku charakterystyki prądowo-napięciowej (rys. 3a) otrzymano bardzo dobrą zgodność, natomiast zauważalne są niewielkie różnice pomiędzy zależnościami prądu progowego od temperatury otoczenia (rys. 3b). Wynika to między innymi z faktu, że w obliczeniach przyjęto identyczne rozkłady koncentracji nośników dla każdej ze studni, podczas gdy w rzeczywistości do każdej ze studni trafia inna ich ilość. Dodatkowo w strukturze eksperymentalnej każda ze studni może mieć nie tylko nieco inny skład, ale i grubość, co prowadzi m.in. do

poszerzenia spektrum wzmocnienia i w rezultacie innej zależności prądu progowego od temperatury otoczenia.

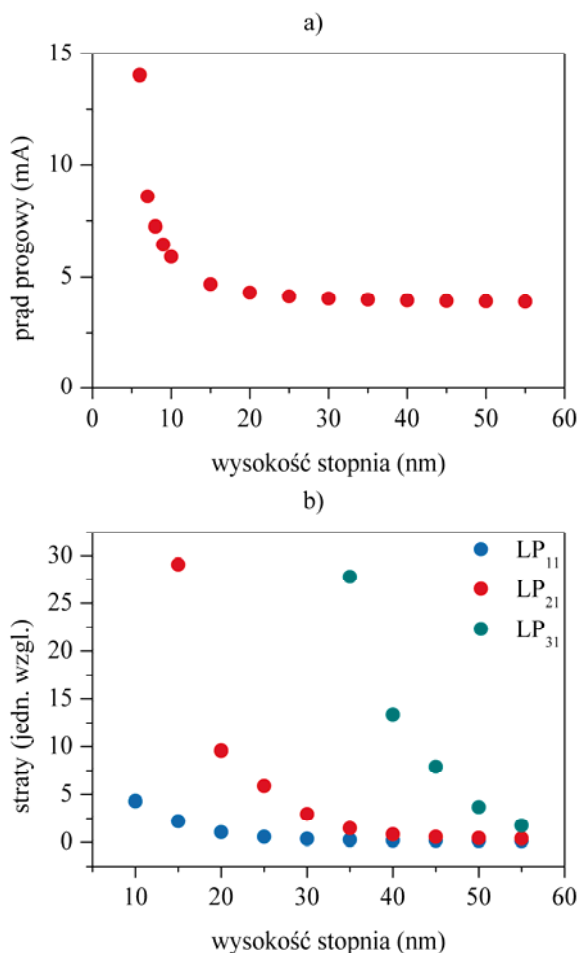


Rys. 3. Porównanie wyników modelowania z charakterystykami eksperymentalnymi: a) zależność prądu płynącego przez strukturę od przyłożonego napięcia, b) zależność prądu progowego od temperatury otoczenia

Wytwarzając złącze tunelowe poprzez trawienie warstw położonych dalej od osi lasera niż założony promień tego złącza, wprowadza się do struktury lasera przesunięcie pomiędzy warstwami położonymi nad złączem (rys. 4). W rezultacie w wybranych miejscach struktury pojawia się skok współczynnika załamania w kierunku radialnym. W przypadku modelowanego lasera istotne są dwa takie miejsca, które przypadają na okolice złącza tunelowego oraz styk rezonatora i górnego zwierciadła (niewielki skok współczynnika załamania w sąsiedztwie trzech silnie domieszkowanych warstw n⁺-GaSb można zaniedbać).



Rys. 4. Obszary modelowanego lasera, w których występują różnice w wartości współczynnika załamania w kierunku radialnym



Rys. 5. Zależności a) prądu progowego dla modu LP₀₁ oraz b) strat dla modów wyższego rzędu od wysokości stopnia (patrz rys. 4)

Przeprowadzone obliczenia pokazały, że wysokość stopnia (rys. 4), ma istotny wpływ na pracę przyrządu. Zmniejszając przesunięcie można ograniczyć wzbudzenie się modów wyższego rzędu (LP₁₁, LP₂₁, LP₃₁) nie powodując jednocześnie zauważalnych zmian w wartości prądu progowego dla modu LP₀₁ (rys. 5). W przypadku modelowanej struktury początkowa wysokość stopnia wynosiła 55 nm i zmniejszenie jej o 35 nm spowodowało wzrost strat dla modów LP₁₁ i LP₂₁ odpowiednio 7 i 25 razy przy wzroście prądu progowego zaledwie o 10%. Dalsza redukcja stopnia przyczynia się do wyraźnego wzrostu prądu progowego: 20% dla 40 nm oraz 50% dla 45 nm (wartości podano względem struktury bazowej).

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki symulacji komputerowej dla antymonkowego lasera typu VCSEL emitującego promieniowanie o długości fali 2,6 μm . Analizą objęto szereg zjawisk fizycznych (elektryczne, termiczne, optyczne, wzmocnienie) mających miejsce podczas pracy lasera i zbadano możliwość ograniczenia wzbudzenia się modów wyższego rzędu przy możliwie jak najmniejszych zmianach prądu progowego. Obliczenia pokazały, że zmniejszenie przesunięcia warstw w górnej części lasera

(powstałego w wyniku wytworzenia złącza tunelowego) o 35 nm spowodowało wzrost strat dla modów LP₁₁ i LP₂₁ odpowiednio 7 i 25 razy przy wzroście prądu progowego zaledwie o 10%. Dalsza redukcja przesunięcia przyczynia się do wyraźnego wzrostu prądu progowego: 20% dla 40 nm oraz 50% dla 45 nm.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2012/07/D/ST7/02581 oraz przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej w ramach programu IMPULS.

LITERATURA

- [1] Werle P., Slemr F., Maurer K., Kormann R., Mücke R., Jänker B., Near- and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis, *Opt. Lasers Eng.*, vol. 37, 101-114, 2002
- [2] Arafin S., Bachmann A., Vizbaras K., Amann M.-C., Large-aperture single-mode GaSb-based BTJ-VCSELS at 2.62 μm , *Proceedings of the 22nd IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC)*, 26-30 Sept. 2010, Kyoto (Japan), 47-48, 2010
- [3] Sarzała R.P., Czyszanowski T., Wasiak M., Dems M., Piskorski Ł., Nakwaski W., Panajotov K., Numerical self-consistent analysis of VCSELS, *Adv. Opt. Tech.*, vol. 2012, id. 689519, 17 pp., 2012
- [4] Piskorski Ł., Frasunkiewicz L., Sokół A.K., Sarzała R.P., A possibility to achieve emission in the mid-infrared wavelength range from semiconductor laser active regions, *Conference Proceedings of the 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 6–10 July 2014, Graz (Austria), paper We.P.9, 4 pp., 2014
- [5] Arafin S., Bachmann A., Kashani-Shirazi K., Amann M.-Ch., Continuous-wave electrically-pumped GaSb-based VCSELS at $\sim 2.6 \mu\text{m}$ operating up to 50°C, *Proceedings of the 22nd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society (LEOS)*, 4-8 Oct. 2009, Belek-Antalya, Turkey, pp. 837-838, 2009
- [6] Adachi S., *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors*, John Wiley & Sons, Chichester, 2009
- [7] Chandola A., Pino R., Dutta P.S., Below bandgap optical absorption in tellurium-doped GaSb, *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 20, 886-893, 2005
- [8] Joullié A., Christol P., Baranov A.N., Vicet A., Mid-Infrared 2–5 μm Heterojunction Laser Diodes, *Top. Appl. Phys.*, vol. 89, 1-61, 2003
- [9] Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R., Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys, *J. Appl. Phys.*, vol. 89, 5815-5875, 2001
- [10] Prineas J.P., Reddy M., Olesberg J.T., Cao C., Veerasamy S., Flatté M.E., Koerperick E., Boggess T.F., Santilli M.R., Olafsen L.J., Quaternary GaInAsSb 2.0-2.5 micron back-illuminated focal plane array for blood glucose monitoring, *Proc. SPIE*, vol. 5726, 113-121, 2005

Autorzy: dr inż. Łukasz Piskorski, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczajska 219, 90-924 Łódź, E-mail: lukasz.piskorski@p.lodz.pl; mgr inż. Jarosław Walczak, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczajska 219, 90-924 Łódź; dr inż. Maciej Dems, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczajska 219, 90-924 Łódź, mgr inż. Piotr Beling, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczajska 219, 90-924 Łódź; dr hab. inż. Robert P. Sarzała, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczajska 219, 90-924 Łódź, E-mail: robert.sarzaala@p.lodz.pl.