ZAKŁAD FOTONIKI

Kierownik: prof. dr hab. Maciej BUGAJSKI
e-mail: bugajski@ite.waw.pl
tel. (0-22) 54 87 932, fax (0-22) 54 87 925

Zespół: prof. dr hab. inż. Bohdan Mroziewicz,
dr hab. Janusz Kaniewski, prof. nadzw. w ITE,
dr hab. Kamil Kosiel, prof. nadzw. w ITE,
dr hab. Jan Muszalski, prof. nadzw. w ITE,
dr hab. Kazimierz Regiński, prof. nadzw. w ITE,
dr inż. Agata Jasik, dr Ewa Papis-Polakowska,
dr inż. Dorota Pierścińska, dr inż. Kamil Pierściński,
dr Iwona Sankowska, dr inż. Michał Szymański,
dr Artur Trajnerowicz, dr inż. Anna Wójcik-Jedlińska,
mgr inż. Anna Filipowska, mgr inż. Artur Broda,
mgr inż. Piotr Gutowski, mgr Krzysztof Hejduk,
mgr inż. Jarosław Jureńczyk, mgr inż. Piotr Karbownik,
mgr inż. Justyna Kubacka-Traczyk, mgr inż. Leszek Ornoch,
mgr inż. Emilia Pruszyńska-Karbownik,
dr Maciej Sakowicz, dr inż. Anna Szerling,
mgr inż. Ewa Maciejewska, Małgorzata Nalewajk

1. Projekty badawcze realizowane w 2012 r.

W 2012 r. w Zakładzie Fotoniki realizowano następujące projekty:

- „Nanofotonika podczerwieni – badania nad emiterami i detektorami promieniowania w obszarze podczerwieni, wytwarzanymi ze związków półprzewodnikowych III-V” (projekt statutowy nr 1.01.063);
- „Opracowanie laserów kaskadowych do zastosowań w układach wykrywania śladowych ilości substancji gazowych” (nr zlecenia 11.01.008/MIRSENS, nr O R00 0053 12);
- „Zaawansowana fotodioda lawinowa InGaAs/InAlAs/InP monolitycznie zintegrowana z mikrooptyką refrakcyjną” (nr zlecenia 11.01.002, N R02 0025 06);
- „Półprzewodnikowe lasery dyskowe dla zastosowań teleinformatycznych” (nr 11.01.003, N R02 0023 06);
- „Opracowanie technologii wytwarzania heterostruktur dla laserów DW-VECSEL z AlGaAs/GaAs/InGaAs” (nr zlecenia 2.01.147, N N515 360636);
- „Analiza przestrzennego rozkładu natężenia pola w wiązce emitowanej przez kwantowe lasery kaskadowe” (nr zlecenia 2.01.155, N N515 524938);
- „Thermal Optimization of the Quantum Cascade Lasers by Complementary Application of Experimental Thermometric Techniques” (nr zlecenia 9.01.010 /POMOST/);

- „Opracowanie technologii epitaksji struktur laserów kaskadowych na pasmo 2–6 THz” (nr zlecenia 2.01.156, decyzja nr 5028/B/T02/2011/40);
- „Opracowanie i wykonanie lasera impulsowego Yb:KYW z półprzewodnikowym lustrem SDCM” (nr zlecenia 11.01.009, decyzja nr 0876/R/T02/2010/10);
- „Detektory średniej podczerwieni na bazie supersieci II rodzaju ze związków półprzewodnikowych InAs/GaSb” (nr zlecenia 53.01.001, decyzja nr 01/2011/PB-ITE/1);
- „Emitery i detektory podczerwieni nowej generacji do zastosowań w urządzeniach do detekcji śladowych ilości zanieczyszczeń gazowych” (nr zlecenia 17.01.001, nr umowy PBS1/B3/2/2012);
- „Jednomodowe lasery kaskadowe do zastosowań w spektroskopii molekularnej” (nr zlecenia 12.01.003, nr umowy LIDER/36/70/L-3/11/NCBR/2012);
- „Badania nad układami metal-półprzewodnik oraz ich zastosowaniem w inżynierii falowodów plazmonowych dla laserów kaskadowych emitujących promieniowanie z terahercowego zakresu częstotliwości TERAMY” (nr zlecenia 2.01.162, nr umowy UMO-2011/03/D/ST7/03146);
- „Badanie procesów termicznych w diodach laserowych na azotku galu przy wykorzystaniu spektroskopii teroodbiciowej. TR-GAN” (nr zlecenia 2.01.161, nr umowy UMO-2011/03/D/ST7/03093);
- „Charakteryzacja rentgenowska struktur supersieciowych i struktur laserów kaskadowych” (statutowy projekt badawczy dla młodych naukowców, nr zlecenia 15.01.004).

Zakład świadczył również usługi naukowo-badawcze:

- wykonanie metalizacji CrAu na podłożach kwarcowych (nr 6.01.661);
- wykonanie metalizacji CrAu na podłożach szafirowych (nr 6.01.662);
- wykonanie metalizacji CrAu na płytkach kwarcowych (nr 6.01.663);
- wykonanie metalizacji na płytkach szafirowych (nr 6.01.666);
- wykonanie metalizacji na podłożach kwarcowych (nr 6.01.667);
- opracowanie i wykonanie metalizacji Ti/Au oraz warstw dielektrycznych na płytkach szklanych” (nr 6.01.674).

2. Najważniejsze osiągnięcia naukowo-badawcze

Przedmiotem badań w 2012 r. były fotoniczne struktury niskowymiarowe ze związków półprzewodnikowych III-V wytwarzane metodą MBE.

Prace koncentrowały się na nowych typach laserów półprzewodnikowych, pompowanych optycznie laserach dużej mocy (VECSEL) i kaskadowych emiterach promieniowania bliskiej i średniej podczerwieni oraz detektorach na bazie antymonków.

Do najbardziej wartościowych wyników uzyskanych w 2012 r. należą:

- prace nad laserami VECSEL na pasmo 980 nm i osiągnięcie generacji na drugiej harmonicznej (emisja w zakresie niebieskim widma);
- dalsza poprawa parametrów laserów kaskadowych z GaAs/AlGaAs na zakres średniej podczerwieni. Prace nad laserami kaskadowymi zostały wyróżnione przez PARP nagrodą Polski Produkt Przyszłości w fazie przedwdrożeniowej;
- prace nad modelowaniem struktury pasmowej antymonkowych supersieci drugiego rodzaju i mechanizmów relaksacji nośników w kwantowych laserach kaskadowych.

2.1. Badania nad technologią wytwarzania struktur kwantowych laserów kaskadowych na zakres średniej i dalekiej podczerwieni

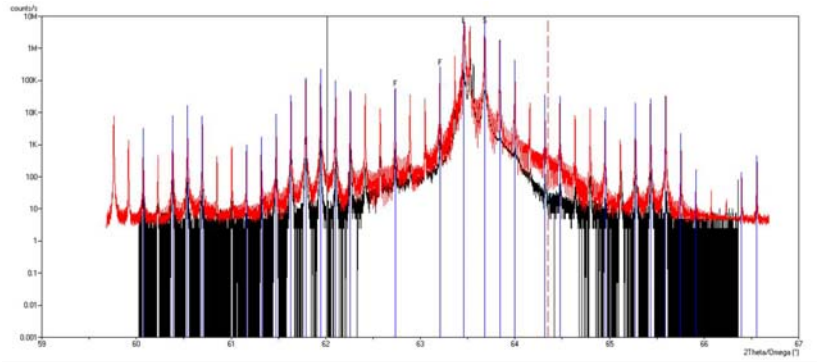
W 2012 r. rozpoczęto badania nad technologią struktur InGaAs/InAlAs osadzanych na podłożach InP. Ich celem było opracowanie technologii epitaksji struktur laserów emitujących falę z zakresu średniej podczerwieni o wysokiej mocy, rzędu kilkudziesięciu miliwatów, w modzie pracy ciągłej (CW) w temperaturze pokojowej. Lasery o tak wysokich parametrach termicznych wykonuje się w innym układzie materiałowym niż opracowany przez nas dotychczas układ Al(x)Ga(1-x)As/GaAs (x = 45%). Konieczne jest zastosowanie układu arsenkowych warstw trójskładnikowych osadzanych na podłożu z fosforku indu. Struktury takie mają kilka zalet, które decydują o ich przewadze nad układem AlGaAs/GaAs. Konieczność uzyskania dopasowania sieciowego warstw InGaAs/ /InAlAs do podłoża stanowi istotne utrudnienie technologiczne towarzyszące epitaksji na fosforku indu. O trudnościach wytwarzania takich struktur świadczy ich stopień złożoności (rys. 1).

substrat				substrat
200nm	InGaAs	780,1s	Si:1e20cm^{-3}	
400nm	InGaAs	1950,3s	Si:5e16cm-^{3}	core
3,64nm	InGaAs	14,2s		
1,44nm	InAlAs	5,0s		
3,53nm	InGaAs	13,8s		
1,34nm	InAlAs	4,7s		
3,42nm	InGaAs	13,3s	Si: 1,5e17 cm^{-3}	
1,54nm	InAlAs	5,4s	Si: 1,5e17 cm^{-3}	
3,31nm	InGaAs	12,9s	Si: 1,5e17 cm^{-3}	
1,96nm	InAlAs	6,8s	Si: 1,5e17 cm^{-3}	

3,21nm	InGaAs	12,5s		obszar aktywny x 50 sumarycznie 3,0555mm
2,37nm	InAlAs	8,3s		
3,1nm	InGaAs	12,1s		
2,57nm	InAlAs	9,0s		
3,1nm	InGaAs	12,1s		
3,92nm	InAlAs	13,7s		
1,86nm	InGaAs	7,3s	Qw1	
0,69nm	InAlAs	2,4s		
5,69nm	InGaAs	22,2s	Qw2	
0,88nm	InAlAs	3,1s		
5,59nm	InGaAs	21,8s	Qw3	
0,88nm	InAlAs	3,1s		
4,91nm	InGaAs	19,2s	QW4	
2,16nm	InAlAs	7,5s		
400nm	InGaAs	1560,2s	Si:5e16cm-^{3}	core
100nm	InGaAs	390,1s	Si:1e20cm^{-3}	
10nm	InAlAs	34,9s	Si:1e20cm^{-3}	etch stop
1mm	InGaAs	3900,6s	Si:1e20cm^{-3}	

Rys. 1. Schemat wykonanej heterostruktury lasera QCL; kierunek wzrostu heterostruktury: z góry na dół

Dyfraktogramy rentgenowskie 2θ/ω dla wykonanych struktur laserowych charakteryzowały się obecnością licznych pików satelitarnych, co świadczy o regularności supersieciowych obszarów aktywnych (rys. 2).



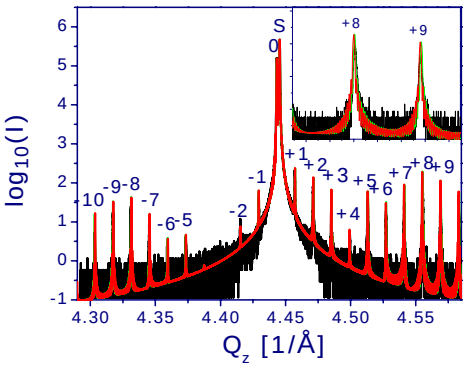
Rys. 2. Rentgenowska krzywa dyfrakcyjna 2θ/ω dla struktury lasera kaskadowego InGaAs/InAlAs/InP

Ponadto zainicjowano opracowywanie technologii wytwarzania struktur laserów emitujących w zakresie dalekiej podczerwieni, tj. w zakresie częstotliwości terahercowych. W przypadku kaskadowych laserów THz o pojedynczym obszarze aktywnym wykonywano struktury na bazie heterostruktur AlGaAs/GaAs.

2.2. Charakteryzacja rentgenowska struktur laserów kaskadowych AlGaAs/GaAs

Kontynuowano prace w dziedzinie charakteryzacji struktur periodycznych przy użyciu wysokorozdzielczej dyfraktometrii rentgenowskiej. Do badań wykorzystano wysokorozdzielczy dyfraktometr rentgenowski X'Pert PRO, firmy PANalytical. Uzyskane wyniki doświadczalne były analizowane przy użyciu oprogramowania X'Pert Epitaxy i X'Pert Reflectivity firmy PANalytical.

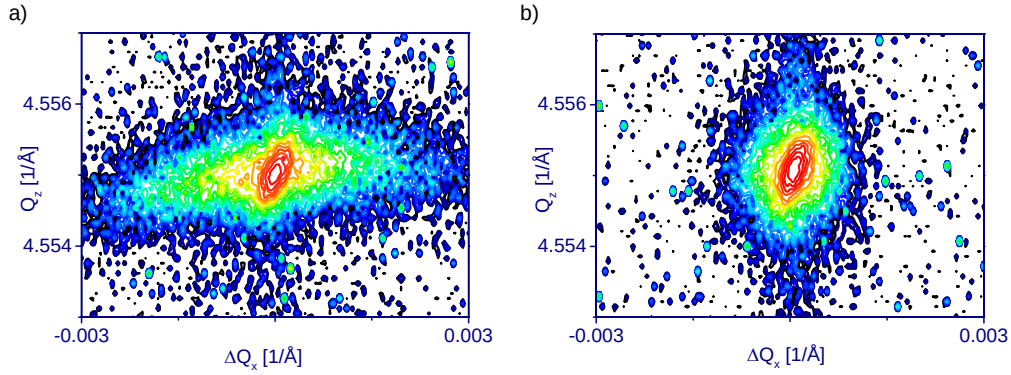
Przedmiotem badania było kompleksowa charakteryzacja obszaru aktywnego struktury lasera kaskadowego (rys. 3).



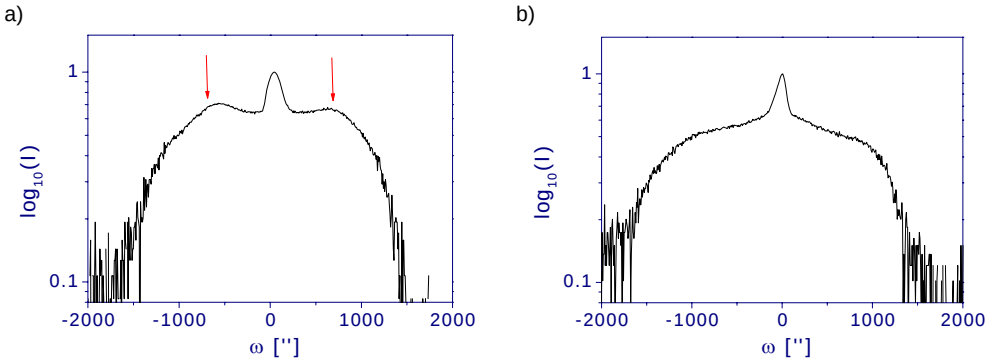
Rys. 3. Profil 2θ/ω planowanej struktury (krzywa czerwona), profil eksperymentalny (czarna krzywa oraz symulacja (czerwona krzywa).

Zmierzone mapy węzłów sieci odwrotnej dla refleksu (0 0 4) ujawniły silne rozpraszanie dyfuzyjne wokół pików satelitarnych w kierunku $[0\,\bar{1}\,1]$ (przykładowe mapy sieci odwrotnej są przedstawione na rys. 4). Takiego rozpraszania dyfuzyjnego nie zaobserwowano w kierunku $[0\,1\,1]$. Ta asymetria może być związana z silnym wygięciem próbki w jednym kierunku bądź z różnicą w korelacji i chropowatości interfejsów w obu kierunkach. Przeprowadzono szereg pomiarów, z których wynika, że promień krzywizny próbki w kierunku $[0\,\bar{1}\,1]$ wyniósł 40 m. Tak duży promień krzywizny nie może tłumaczyć obserwowanego rozpraszania dyfuzyjnego.

W celu sprawdzenia hipotezy o obecności różnego typu interfejsów na tym kierunku wykonano pomiary reflektometryczne rozpraszania dyfuzyjnego wokół piku reflektometrycznego (rys. 5). Wyraźnie widać różnice w rozpraszaniu dyfuzyjnym zmierzone dla obu badanych kierunków.



Rys. 4. a) Mapa sieci odwrotnej (0 0 4) +8 piku satelitarnego zmierzona w kierunku $[0\,\bar{1}\,1]$, b) mapa sieci odwrotnej (0 0 4) +8 piku satelitarnego zmierzona w kierunku $[0\,1\,1]$.



Rys. 5. a) Rozpraszanie dyfuzyjne w kierunku $[0\,\bar{1}\,1]$, b) rozpraszanie dyfuzyjne w kierunku $[0\,1\,1]$

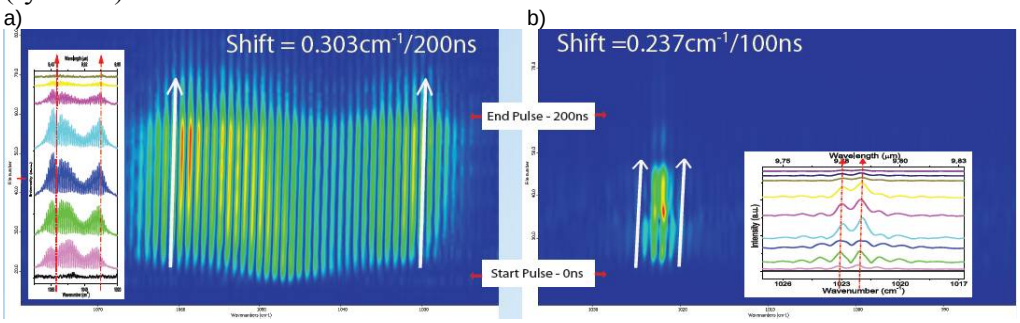
2.3. Rozwój spektroskopowych technik badania struktur supersieciowych i struktur laserów kaskadowych

Przedmiotem prac prowadzonych w laboratorium spektroskopii optycznej było doskonalenie pomiarów i technik eksperymentalnych opartych na spektroskopii fourierowskiej w zastosowaniu do charakteryzacji kwantowych laserów kaskadowych oraz struktur supersieciowych. Jednocześnie prowadzono pomiary charakterystyk (L-I-V) w funkcji temperatury oraz analizę procesów termicznych w laserach kaskadowych prowadząca do optymalizacji termicznej struktury. W tym celu została wykorzystana technika eksperymentalna – spektroskopia termoodbiciowa.

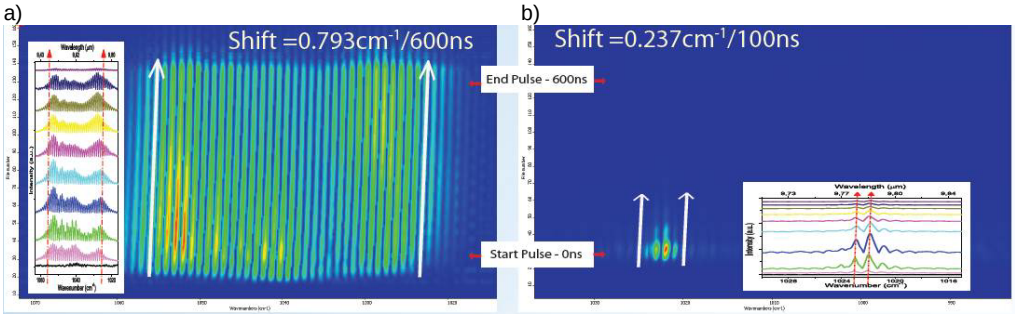
Pomiar charakterystyk spektralnych kwantowych laserów kaskadowych

Pomiary struktury modowej kwantowych laserów kaskadowych wykonano przy wykorzystaniu spektrometru fourierowskiego NICOLET 8700, wyposażonego w beamspliter KBr i detektor MCT chłodzony ciekłym azotem. Dzięki wyposażeniu spektrometru w przystawkę TRS (Time Resolved Spectroscopy)

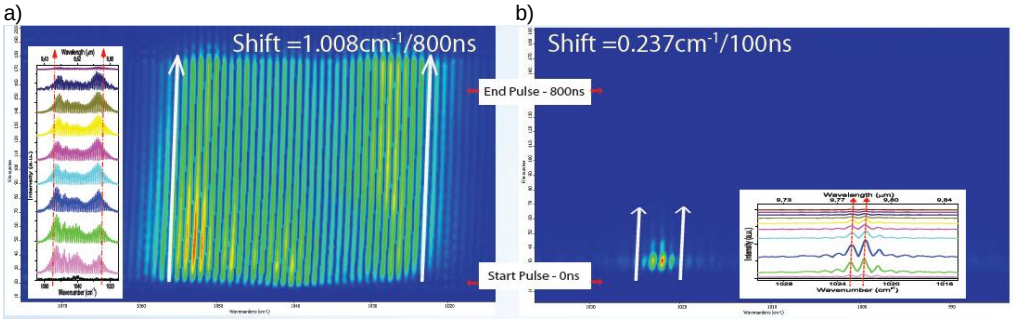
możliwe stało się wykonywanie czasowo rozdzielczych pomiarów widmowych (rys. 6–8).



Rys. 6. Czasowo rozdzielcze pomiary spektralne lasera QCL dla impulsu zasilającego τ = 200 ns zmierzone dla dwóch temperatur pracy: 80 K (a) oraz 250 K (b)



Rys. 7. Czasowo rozdzielcze pomiary spektralne lasera QCL dla impulsu zasilającego τ = 600 ns zmierzone dla dwóch temperatur pracy: 80 K (a) oraz 250 K (b)

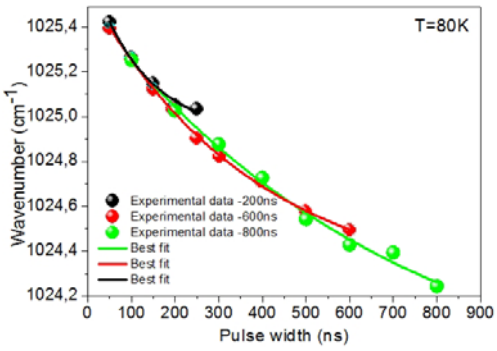


Rys. 8. Czasowo rozdzielcze pomiary spektralne lasera QCL dla impulsu zasilającego τ = 800 ns zmierzone dla dwóch temperatur pracy: 80 K (a) oraz 250 K (b)

Przeprowadzono badania mające na celu określenie możliwości zastosowania wytwarzanych w Zakładzie laserów kaskadowych w systemach spektroskopowych do wykrywania niebezpiecznych substancji przy pomocy analizy ich widma absorpcji. Ze względu na wielomodową strukturę emitowanego promieniowania badania przeprowadzono w warunkach umożliwiających zasilanie lasera prądem o wartości zbliżonej do wartości progowej. Analizowano strukturę widmową dla impulsów zasilających długości 200 ns (dc = 0,02%), 600 ns (dc = 0,06%) oraz 800 ns (dc = 0,08%) w dwóch różnych temperaturach pracy: 80 K i 250 K.

Dla impulsu laserowego o czasie trwania 200 ns uzyskano przestrajanie lasera rzędu 0,303 cm^{-1}/200 ns dla temperatury pracy wynoszącej 80 K oraz 0,237 cm^{-1}/100 ns dla temperatury pracy 250 K.

Dla impulsu laserowego o czasie trwania 600 ns uzyskano przestrajanie lasera rzędu 0,793 cm^{-1}/600 ns dla temperatury pracy wynoszącej 80 K oraz 0,237 cm^{-1}/ /100 ns dla temperatury pracy wynoszącej 250 K.

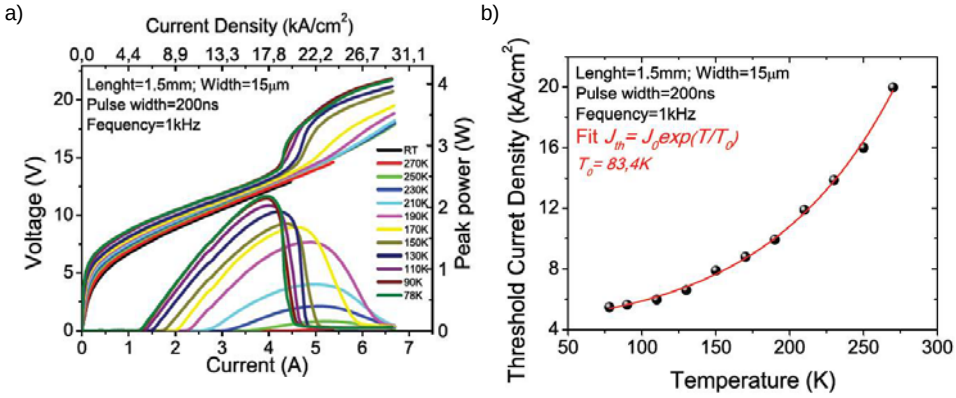


Rys. 9. Przestrajanie lasera QCL dla temperatury pracy 80 K dla impulsów zasilających 200 ns, 600 ns, 800 ns

Rysunek 9 przedstawia przestrajanie lasera dla temperatury pracy 80 K dla impulsów zasilających 200 ns, 600 ns oraz 800 ns. Dla temperatury pracy 250 K, niezależnie od długości trwania impulsu laserowego, przestrojenie wynosi 0,237 cm^{-1}/100 ns. Dodatkowo zaobserwowano, że w tej temperaturze pracy laser emituje tylko przez krótki czas trwania impulsu 100 ns.

Pomiar charakterystyk elektrooptycznych laserów kaskadowych

Charakteryzacja elektrooptyczna zmontowanych laserów kaskadowych obejmuje, w pierwszym rzędzie pomiary charakterystyk moc optyczna w funkcji prądu (L-I) oraz charakterystyk prądowo napięciowych (I-V) w funkcji temperatury (77 – 300 K). Pomiary te pozwalają wyznaczyć prąd progowy lasera QCL, temperaturę charakterystyczną T_0 oraz maksymalną temperaturę pracy. Rysunek 10a przedstawia charakterystyki L-I-V w funkcji temperatury chłodnicy. Na rys. 10b pokazano zależności gęstości prądu progowego od temperatury chłodnicy.



Rys. 10. Charakterystyki L-I-V w funkcji temperatury chłodnicy (a) oraz zależności gęstości prądu progowego od temperatury chłodnicy (b) badanego lasera QCL

Podstawowe parametry elektrooptyczne jednego z badanych kwantowych laserów kaskadowych są przedstawione w tab. 1.

Tabela 1. Parametry elektrooptyczne badanego lasera QCL

J_{th} (80K) (kA/cm^2)	T_0 (K)/T_1 (K)	α_w (cm^{-1}) / $g\Gamma$ (cm/kA)	WPE (%) Peak power (W)	Max op. T (K)
6.5	89/100	26 5.9	5 2.2	270

3. Badania nad technologią supersieci antymonowych dla optoelektroniki podczerwieni

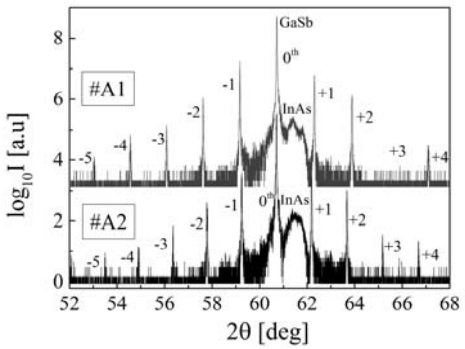
Kontynuowano prace nad zagadnieniami supersieci antymonkowych w dziedzinie technologii wykonania oraz charakteryzacji obszarów przejściowych (interfaces IFs) za pomocą wysokorozdzielczej dyfrakcji rentgenowskiej.

W celu wykorzystania wszystkich zalet zarówno materiałów antymonowych, jak i supersieci (SL) II rodzaju w konstrukcji detektorów pracujących w zakresie średniej podczerwieni należy przede wszystkim przeprowadzić w sposób niezwykle precyzyjny i powtarzalny proces krystalizacji struktur epitaksjalnych. Ze względu na bardzo restrykcyjne wymagania odnośnie periodyczności okresów w strukturze SL o grubości kilku mikrometrów epitaksja z wiązek molekularnych MBE (Molecular Beam Epitaxy), jak żadna inna technologia cienkowarstwowa, nadaje się do wytworzenia struktur detektorów na bazie SL II rodzaju. Warunkiem utrzymania stałej periodyczności w strukturze SL jest zbilansowanie naprężeń poprzez wprowadzenie skokowych obszarów międzyfazowych o kontrolowanym typie. Najlepszym narzędziem do kontroli wielkości i typów naprężeń w SL jest wysokorozdzielcza dyfraktometria rentgenowska (High Resolution X-Ray Diffraction HR XRD). Z położenia piku zerowego rzędu na dyfraktogramie ($2\theta/\omega$) można wnioskować o naprężeniu SL, natomiast z kształtu i położenia pików satelitarnych o jakości obszarów międzyfazowych, o chropowatości chemicznej i grubości całego periodu SL. Na mapach sieci odwrotnych rejestrowane jest rozpraszanie koherentne i dyfuzyjne. Rozpraszanie koherentne pochodzi od ściśle uporządkowanych warstw SL, natomiast dyfuzyjne od statystycznie rozłożonych defektów strukturalnych. Obszary międzyfazowe mogą być traktowane jako zaburzenie ściśle uporządkowanej sieci krystalicznej struktury supersieci.

Kontrola obszarów międzyfazowych obejmuje:

- pomiar dyfraktogram i analizę pod kątem zbilansowania naprężeń, obecności pików interferencyjnych i satelitów wysokich rzędów;
- pomiar map sieci odwrotnej wokół symetrycznych refleksów 004, analizę pod kątem obecności rozpraszania dyfuzyjnego skoncentrowanego wokół pików satelitarnych rozpraszania koherentnego.

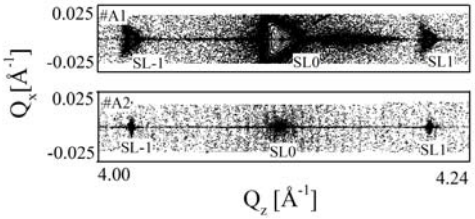
Kształt obszaru rozpraszania jest zależny od pola naprężeń wywołanego przez defekty w sieci. Jest właściwością danego systemu materiałowego, z którego jest złożona struktura supersieci. Na podstawie pomiaru sieci odwrotnej określa się stopień relaksacji struktury epitaksjalnej, jak również typ i gęstość defektów obecnych w badanej próbce. Istotne jest, aby precyzyjnie określić położenia węzłów sieci odwrotnej, ich kształt i wysokość.



Rys. 11 Dyfraktogramy struktur detektorów InAs/ /GaSb dwóch typów struktur: #A1, #A2

Jakość krystaliczną uzyskanych struktur sprawdzono za pomocą pomiaru krzywych dyfrakcyjnych (2θ/ω). Na rys. 11 przedstawione są dyfraktogramy struktur detektorów InAs/GaSb wytwarzanych w różnych warunkach technologicznych. Górna krzywa odpowiada typowej strukturze SL 9ML InAs/10ML GaSb otrzymanej w optymalnych warunkach technonologicznych. Dolna krzywa została zmierzona dla struktury wykrystalizowanej w warunkach zmiennych termicznie. Dla obydwu struktur pik zerowy pokrywa się z pikiem od GaSb, co potwierdza, że struktury mają zbilansowane naprężenia (niedopasowanie sieciowe określone dla kierunku prostopadłego do kierunku wzrostu jest mniejsze niż $\pm 2\cdot 10^{-4}$).

Obecność pików interferencyjnych (Pendelösung fringes) świadczy o wysokiej jakości krystalicznej struktur. Piki satelitarne wysokich rzędów świadczą o wysokiej precyzji wykonania struktur i w pierwszym przybliżeniu dowodzą zachowania periodyczności w obydwu strukturach. Potwierdzeniem periodyczności jest obecność rozpraszania dyfuzyjnego na mapach sieci odwrotnej wykonanych dla tych struktur. Na rys. 12 przedstawiono mapy sieci odwrotnej wykonanej wokół symetrycznego refleksu 004.



Rys. 12. Mapy sieci odwrotnej wykonane wokół symetrycznego refleksu 004 dla różnych struktur detektorów InAs/GaSb

Z przeprowadzonych badań wynika, że nie jest możliwe wykonanie SLs II rodzaju na bazie materiałów InAs/GaSb z periodycznymi obszarami międzyfazowymi za pomocą żadnej znanej techniki półprzewodnikowej. Przy tak dużych naprężeniach w strukturach, dużej liczbie granic międzyfazowych, które same z siebie stanowią defekt sieci, należy zakładać stałą modyfikację periodu wraz z grubością struktury. Z przeprowadzonych badań wynika, że najkorzystniejszy wariant wzrostu struktury SL to taki, w którym udaje się zachować powtarzalność grubości w kierunku normalnej do powierzchni. Nieuniknione są defekty w kierunku lateralnym. Przy takim założeniu potwierdzeniem wysokiej jakości obszarów międzyfazowych jest obecność rozpraszania

dyfuzyjnego na mapach sieci odwrotnej wykonanych za pomocą HR XRD. Drugą hipotezą wyjaśniającą obszary rozpraszania dyfuzyjnego mogą być skupiska dyslokacji w strukturze.

4. Współpraca międzynarodowa

W 2012 r. Zakład współpracował z następującymi ośrodkami zagranicznymi:

- Tyndall National Institute, Cork, Irlandia;
- École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Szwajcaria;
- University of Nottingham, Wielka Brytania;
- Fraunhofer Institut für Angewandte Festkörperphysik, Freiburg, Niemcy;
- Max-Born Institut, Berlin, Niemcy.

5. Uzyskane stopnie naukowe

- Dr Kamil Kosiel uzyskał stopień doktora habilitowanego nauk technicznych w zakresie elektroniki na podstawie rozprawy habilitacyjnej pt. „Technologia epitaksji struktur laserów kaskadowych z GaAs/AlGaAs".
- Mgr inż. Michał Kosmala uzyskał stopień doktora nauk technicznych na podstawie rozprawy pt. „Struktury zwierciadeł braggowskich z nasycalnym absorberem wytwarzane metodą epitaksji z wiązek molekularnych".

Publikacje'2012

[P1] BARAŃSKA A., SZERLING A., KARBOWNIK P., HEJDUK K., BUGAJSKI M., ŁASZCZ A., GOŁASZEWSKA-MALEC K., FILIPOWSKI W.: Ohmic Contacts for Room-Temperature AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Lasers (QCL). *Opt. Appl.* (złoż. do red.).

[P2] BARAŃSKA A., SZERLING A., KARBOWNIK P., BUGAJSKI M., HEJDUK K., ŁASZCZ A., GOŁASZEWSKA-MALEC K.: Kontakty omowe dla GaAs typu n^+ w zastosowaniu dla AlGaAs/GaAs QCL. Mat. konf. XII Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe". Szklarska Poręba, 9–12.05.2012 (złoż. do red.).

[P3] BUGAJSKI M., KOSIEL K., SZERLING A., KARBOWNIK P., PIERŚCIŃSKI K., PIERŚCIŃSKA D., HAŁDAŚ G., KOLEK A.: High Performance GaAs/AlGaAs Quantum Cascade Lasers: Optimization of Electrical and Thermal Properties. *Semiconductor Lasers and Laser Dynamics V*. [W] *Proc. of SPIE* 2012 vol. 8432 s. 84320I-1.

[P4] GUTOWSKI P., ORNOCH L.: AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Lasers Supplied by Current-Pulse Generation Technique. *Laser Technology 2012: Progress in Lasers*. [W] *Proc. of SPIE* (złoż. do red.).

[P5] JASIK A., SANKOWSKA I., REGIŃSKI K., MACHOWSKA-PODSIADŁO E., WAWRO A., WZOREK M., KRUSZKA R., JAKIEŁA R., KUBACKA-TRACZYK J., MOTYKA M., KANIEWSKI J.: MBE Growth of Type-II InAs/GaSb Superlattices for MWIR Detection. Chapter 3. [W] *Horizons in World Physics.* vol. 276. Nova Sci. Publ., New York, 2011, s. 101–144.

[P6] JASIK A., SANKOWSKA I., REGIŃSKI K., MACHOWSKA-PODSIADŁO E., WAWRO A., WZOREK M., KRUSZKA R., JAKIEŁA R., KUBACKA-TRACZYK J., MOTYKA M., KANIEWSKI J.: MBE Growth of Type-II InAs/GaSb Superlattices for MWIR Detection. Chapter 9 [W] *Crystal Growth: Theory, Mechanisms and Morphology*, Nova Sci. Publ. Inc., New York, 2011, s. 293–329.

[P7] JUREŃCZYK J., ŻAK D., KANIEWSKI J.: Influence of Charge Region on Operation of InGaAs/ /InAlAs/InP Avalanche Photodiodes. *Opt. Appl.* (złoż. do red.).

[P8] KANIEWSKI J., JUREŃCZYK J., ŻAK D., MUSZALSKI J.: Modeling of InGaAs/InAlAs/InP Avalanche Photodiodes with Undepleted Absorber. *18th Czech-Polish-Slovak Optical Conf. on Wave and Quantum Aspects on Contemporary Optics* [W] *Proc. of SPIE* 2012 vol. 8697 s. 869721-7.

[P9] KARBOWNIK P., BUGAJSKI M.: Self-Consistent Simulation of Mid-IR Quantum Cascade Lasers Based on Rate Equation Approach. *SPIE Photonics Europe* [W] *Proc. of SPIE* 2012 vol. 8432 s. 84321P-1.

[P10] KOLEK A., HAŁDAŚ G., BUGAJSKI M.: Nonthermal Carrier Distributions in the Subbands of 2-Phonon Resonance Mid-Infrared Quantum Cascade Laser. *Appl. Phys. Lett.* 2012 vol. 101 s.061110.

[P11] KOSIEL K.: Krótkofalowe lasery kaskadowe. Mat. konf. XI Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 11–14.06.2012, s. 676–677.

[P12] KOSIEL K., KUBACKA-TRACZYK J., SANKOWSKA I., SZERLING A., GUTOWSKI P., BUGAJSKI M.: Multi-Step Interrupted-Growth MBE Technology for GaAs/AlGaAs (9.4 mm) Room Temperature Operating Quantum-Cascade Lasers. *Opto-Electron. Rev.* 2012 vol. 20 nr 3 s. 239–246.

[P13] MACHOWSKA-PODSIADŁO E., SUJECKI S., BENSON T., JASIK A., BUGAJSKI M., PIERŚCIŃSKI K.: Optoelectronic Properties of InAs/GaSb Superlattices with Asymmetric Interfaces. *J. Phys.: Conf. Series* 2012 vol. 376 s. 012014.

[P14] MROZIEWICZ B.: Granice widma promieniowania laserów półprzewodnikowych – resumé po 50 latach rozwoju ich technologii. *Elektronika* 2012 vol. LIII nr 10 s. 81–114.

[P15] MUSZALSKI J., BRODA A., JASIK A., WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., TRAJNEROWICZ A., KUBACKA- -TRACZYK J., SANKOWSKA I.: VECSEL Emitting at 976 nm for Second Harmonic Generation to the Blue. *Proc. of SPIE* (złoż. do red.).

[P16] PAPIS-POLAKOWSKA E., KANIEWSKI J., SZADE J., RZODKIEWICZ W., JASIK A., JUREŃCZYK J., ORMAN Z., WAWRO A.: Sulfide Passivation of GaSb-Based Superlattice Structures. *Thin Solid Films* (złoż. do red.).

[P17] PAPIS-POLAKOWSKA E., KANIEWSKI J., SZADE J., RZODKIEWICZ W., JASIK A., REGIŃSKI K., WAWRO A.: Study of Interfaces Chemistry in Type II GaSb/InAs Superlattices Structures. *Phys. Proc.* 2012 vol. 32 s. 184–190.

[P18] PIERŚCIŃSKI K., PIERŚCIŃSKA D., BUGAJSKI M., MANZ C., RATTUNDE M.: Thermal Effects in 2.x mm Vertical-External-Cavity-Surface-Emitting Lasers. *J. Appl. Phys.* 2012 vol. 111 s. 053107.

[P19] PIERŚCIŃSKI K., PIERŚCIŃSKA D., IWIŃSKA M., KOSIEL K., SZERLING A., KARBOWNIK P., BUGAJSKI M.: Investigation of Thermal Properties of Mid-Infrared AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Lasers. *J. Appl. Phys.* 2012 vol. 112 s. 043112-12.

[P20] PIERŚCIŃSKA D., PIERŚCIŃSKI K., IWIŃSKA M., KOSIEL K., SZERLING A., KARBOWNIK P., BUGAJSKI M.: Electrical and Optical Characterisation of mid-IR GaAs/AlGaAs Quantum Cascade Lasers. *SPIE Photonics Europe* [W] *Proc. of SPIE* 2012 vol. 8432 s. 84321S-1.

[P21] PIERŚCIŃSKI K., PIERŚCIŃSKA D., IWIŃSKA M., KOSIEL K., SZERLING A., KARBOWNIK P., BUGAJSKI M.: Experimental Analysis of Thermal Properties of AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Lasers. *SPIE Photonics Europe* [W] *Proc. of SPIE* 2012 vol. 8432 s. 84320M-1.

[P22] PŁUSKA M., CZERWIŃSKI A., RATAJCZAK J., SZERLING A., KĄTCKI J.: Defect Detection in Semiconductor Layers with Built-In Electric Field with the Use Cathodoluminescence. *Phys. B* 2012 vol. 407 s. 2854–2857.

[P23] PŁUSKA M., CZERWIŃSKI A., RATAJCZAK J., SZERLING A., KĄTCKI J.: Cathodoluminescence and Electroluminescence of Semiconductor Structures in SEM. *Solid St. Phenom.* 2012 vol. 186 s. 20–23.

[P24] PRUSZYŃSKA-KARBOWNIK E., REGIŃSKI K., MROZIEWICZ B., SZYMAŃSKI M., KARBOWNIK P., KOSIEL K., SZERLING A.: Analysis of the Spatial Distribution of Radiation Emitted by MIR Quantum Cascade Lasers. *Proc. of SPIE* (złoż. do red.).

[P26] RATAJCZAK J., HEJDUK K., LIPIŃSKI M., PIOTROWSKI T., PŁUSKA M., ŁASZCZ A., CZERWIŃSKI A.: Study of Silicon Nanoparticles Formation in Silicon Nitride. Solid St. Phenom. 2012 vol. 186 s. 6669.

[P26] SANKOWSKA I., DOMAGAŁA J., YEFANOV O., JASIK A., KUBACKA-TRACZYK J., REGIŃSKI K., SEECK O. H.: Non-Periodicity of Peak-to-Peak Distances in X-Ray Diffraction Spectrums from Perfect Superlattices. *J. Appl. Phys.* (złoż. do red.).

[P27] SANKOWSKA I., JASIK A., KUBACKA-TRACZYK J., DOMAGAŁA J., REGIŃSKI K.: Role of Beryllium Doping in Strain Changes in II-Type InAs/GaSb Superlattice Investigated by High Resolution X-Ray Diffraction Method. *Appl. Phys. A* 2012 vol. 108 nr 2 s. 491–496.

[P28] SZCZYTKO J., ADOMAVIVIUS R., PAPIS E., BARAŃSKA A., WAWRO A., KROTKUS A., PIĘTKA B., ŁUSAKOWSKI J.: THz Time Domain Spectroscopy of Thin Gold and Titanium Layers on GaAs. *Acta Phys. Pol. A* 2012 vol. 122 nr 6 s. 1118–1120.

[P29] SZERLING A., KOSIEL K., KARBOWNIK P., BARAŃSKA A., MACIEJEWSKA E., TRAJNEROWICZ A., HEJDUK K., BUGAJSKI M.: Technologia wytwarzania laserów półprzewodnikowych. Mat. konf. XI Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 11–14.06.2012, s. 684–685.

[P30] SZERLING A., KOSIEL K., KARBOWNIK P., GUTOWSKI P., WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., PŁUSKA M., BUGAJSKI M.: Influence of the Mesa Performance on the Threshold Current and Slope Efficiency of AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Lasers. IEEE Proc. of NATO Advanced Research Workshop on D31etection of Explosives and CBRN (Using Terahertz). Cesme, Turcja, 3–6.11.2012 (złoż. do red.).

[P31] SZYMAŃSKI M., REGIŃSKI K., MROZIEWICZ B., PRUSZYŃSKA-KARBOWNIK E., KOSIEL K., KARBOWNIK P.: Calculation of Beam Divergence of a Quantum Cascade Laser by Effective Index Method. *Proc. of SPIE* (złoż. do red.).

[P32] SZCZYTKO J., ADOMAVIVIUS R., PAPIS E., BARAŃSKA A., WAWRO A., KROTKUS A., PIĘTKA B., ŁUSAKOWSKI J.: THz Time Domain Spectroscopy of Thin Gold and Titanium Layers on GaAs. *Acta Phys. Pol. A* 2012 vol. 122 nr 6 s. 1118–1120.

[P33] SZCZYTKO J., STOLAREK M., PIĘTKA B., ŁUSAKOWSKI J., BARAŃSKA A., PAPIS E., WAWRO A., ADOMAVIVIUS R., KROTKUS A., PAŁKA N., ZAGRAJEK P.: Terahertz Properties of Metallic Layers and Grids. Proc. of the 19th Int. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications. Warszawa, 21–23.05.2012, s. 271–275.

[P34] WESOŁOWSKI M., STRUPIŃSKI W., MOTYKA M., SĘK G., DUMISZEWSKA E., CABAN P., JASIK A., WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., PIERŚCIŃSKI K., PIERŚCIŃSKA D.: Study of MOCVD Growth of InGaAsSb/AlGaAsSb/GaSb Heterostructures Using Two Different Aluminium Precursors TMAl and DMEAAl. *Opto-Electron. Rev.* 2011 vol. 19 nr 2 s. 140–144.

[P35] ŻAK D., JUREŃCZYK J., KANIEWSKI J.: Influence of Zener Effect on Operation of InGaAs/InAlAs/InP Avalanche Photodiodes. *Opto-Electron. Rev.* (złoż. do red.).

Prezentacje'2012

[K1] BARAŃSKA A., SZERLING A., KARBOWNIK P., BUGAJSKI M., HEJDUK K., ŁASZCZ A., GOŁASZEWSKA-MALEC K.: Kontakty omowe dla GaAs typu n^+ w zastosowaniu dl AlGaAs/GaAs QCL. XII Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe". Szklarska Poręba, 9–12.05.2012 (kom.).

[K2] BUGAJSKI M.: High-Performance GaAs/AlGaAs Quantum Cascade Lasers: Design, Technology and Basic Properties. XII Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe". Szklarska Poręba, 9–12.05.2012 (ref. zapr.).

[K3] BUGAJSKI M.: Kwantowe lasery kaskadowe - unipolarne źródła światła spójnego w podczerwieni. 6th Conf. on Integrated Optics - Sensors, Sensing Structures and Methods. Szczyrk, 25.02–1.03.2012 (ref.).

[K4] BUGAJSKI M., KOSIEL K., SZERLING A., KARBOWNIK P., PIERŚCIŃSKI K., PIERŚCIŃSKA D., HAŁDAŚ G., KOLEK A.: High-Performance GaAs/AlGaAs Quantum Cascade Lasers: Optimization of Electrical and Thermal Properties. Photonics Europe 2012. Conf. on Semiconductor Lasers and Laser Dynamics. Bruksela, Belgia, 16–19.04.2012 (ref. zapr.).

[K5] GUTOWSKI P., ORNOCH L.: Technika impulsowego zasilania unipolarnych laserów kaskadowych wykonanych w technologii AlGaAs/GaAs. X Symp. Techniki Laserowej. Świnoujście, 24–28.09.2012 (plakat).

[K6] JASIK A., MUSZALSKI J., WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., SANKOWSKA I., KUBACKA-TRACZYK J., SOKÓŁ A., WASIAK M., CZYSZANOWSKI T.: Technologia MBE laserów DW-VECSEL. XI Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 11–14.06.2012 (ref. zapr.).

[K7] JASIK A., WASYLCZYK P., DEMS M., WNUK P., WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., HEJDUK K., MUSZALSKI J., ZINKIEWICZ Ł., BARAŃSKA A., KUBACKA-TRACZYK J., SANKOWSKA I.: Półprzewodnikowe lustra Bragga z kontrolowaną dyspersją dla laserów femtosekundowych. X Symp. Techniki Laserowej. Świnoujście, 24–28.09.2012 (kom.).

[K8] JUREŃCZYK J., ŻAK D., KANIEWSKI J.: Influence of Charge Region on Operation of InGaAs/InAlAs/InP Avalanche Photodiodes. XII Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe". Szklarska Poręba, 9–12.05.2012 (ref.).

[K9] KANIEWSKI J., JUREŃCZYK J., ŻAK D.: Modeling of InGaAs/InAlAs/InP Avalanche Photodiodes with Undepleted Absorber. XVIII Czech-Polish-Slovak Optical Conf.. Ostravice, Czechy, 3–7.09.2012 (ref.).

[K10] KARBOWNIK P., BUGAJSKI M.: Self-Consistent Simulation of Mid-IR Quantum Cascade Lasers Based on Rate Equation Approach. Photonics Europe 2012 Conf. on Semiconductor Lasers and Laser Dynamics. Bruksela, Belgia, 16-19.04.2012 (plakat).

[K11] KOSIEL K.: Krótkofalowe lasery kaskadowe. XI Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 11–14.06.2012 (ref. zapr.).

[K12] KOSIEL K., SZERLING A., GUTOWSKI P., KARBOWNIK P., WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., KUBACKA-TRACZYK J., SANKOWSKA I., PIERŚCIŃSKI K., PIERŚCIŃSKA D., PRUSZYŃSKA-KARBOWNIK E., BUGAJSKI M.: High-Power GaAs/AlGaAs Quantum Cascade Lasers. Int. Workshop of Opportunities and Challenges in Mid-Infrared Laser-Biased Gas Sensing. Wrocław, 18–20.10.2012 (ref.).

[K13] KUBACKA-TRACZYK J., SANKOWSKA I., KOSIEL K., BUGAJSKI M.: X-Ray Characterization of Mid-IR QCL Structures: Unusual Diffuse Features. The 11th Biennial Conf. on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging. St. Petersburg, Rosja, 14-20.09.2012 (plakat).

[K14] MACIEJEWSKA E., PAPIS-POLAKOWSKA E., TRAJNEROWICZ A., SZERLING A., KANIEWSKI J., JASIK A., REGIŃSKI K., WZOREK M., WAWRO A.: Dry Plasma and Wet Chemical Etching of

Antymonides-Based Structures. XII Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe". Szklarska Poręba, 9–12.05.2012 (plakat).

[K15] MROZIEWICZ B.: Lasery półprzewodnikowe: resumé po 50 latach ich obecności w nauce i technice. XI Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 11–14.06.2012 (ref. zapr.).

[K16] MUSZALSKI J., WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., JASIK A., GUTOWSKI P., BRODA A., TRAJNEROWICZ A., SANKOWSKA I., KUBACKA-TRACZYK J.: Pompowany optycznie dyskowy laser półprzewodnikowy. X Symp. Techniki Laserowej. Świnoujście, 24–28.09.2012 (kom.).

[K17] PIERŚCIŃSKA D., PIERŚCIŃSKI K., IWIŃSKA M., KOSIEL K., SZERLING A., KARBOWNIK P., BUGAJSKI M.: Electrical and Optical Characterisation of mid-IR GaAs/AlGaAs Quantum Cascade Lasers. Photonics Europe 2012 Conf. on Semiconductor Lasers and Laser Dynamics. Bruksela, Belgia, 16–19.04.2012 (plakat).

[K18] PIERŚCIŃSKA D., PIERŚCIŃSKI K., MIKOŁAJCZYK J., IWIŃSKA M., SZABRA D., NOWAKOWSKI M., BUGAJSKI M.: Analysis of Oprical and Electrical Parameters of Quantum Cascade Lasers. 6th Conf. on Integrated Optics – Sensors, Sensing Structures and Methods. Szczyrk, 25.02–01.03.2012 (plakat).

[K19] PIERŚCIŃSKI K., PIERŚCIŃSKA D., IWIŃSKA M., KOSIEL K., SZERLING A., KARBOWNIK P., BUGAJSKI M.: Thermal Characteristics and Power Roll-Over of GaAs/AlGaAs Quantum Cascade Lasers. XI Infrared Optoelectronics: Materials and Devices. Chicago, USA, 4–8.09.2012 (plakat).

[K20] PRUSZYŃSKA-KARBOWNIK E., REGIŃSKI K., MROZIEWICZ B., SZYMAŃSKI M., KARBOWNIK P., KOSIEL K., SZERLING A.: Analiza przestrzennego rozkładu natężenia promieniowania laserów kaskadowych emitujących w zakresie średniej podczerwieni. X Symp. Techniki Laserowej. Świnoujście, 24–28.09.2012 (kom.).

[K21] PIERŚCIŃSKI K., PIERŚCIŃSKA D., IWIŃSKA M., KOSIEL K., SZERLING A., KARBOWNIK P., BUGAJSKI M.: Thermal Characteristics and Power Roll-Over of GaAs/AlGaAs Quantum Cascade Lasers. XI Infrared Optoelectronics: Materials and Devices. Chicago, USA, 4–8.09.2012 (ref.).

[K22] PIERŚCIŃSKI K., PIERŚCIŃSKA D., IWIŃSKA M., KOSIEL K., SZERLING A., KARBOWNIK P., BUGAJSKI M.: Experimental Analysis of Thermal Properties of AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Lasers. Photonics Europe 2012 Conf. on Semiconductor Lasers and Laser Dynamics. Bruksela, Belgia, 16–19.04.2012 (ref.).

[K23] REGIŃSKI K.: Inverse Problems in Diagnostics of Laser Beams. The Sixth Int. Conf. "Inverse Problems: Modeling and Simulation". Antalya, Turcja, 21–26.05.2012 (ref. zapr.).

[K24] SANKOWSKA I., JASIK A., SHALIMOV A., KUBACKA-TRACZYK J., WZOREK M., MACIEJEWSKA E., REGIŃSKI K.: Diffuse X-Ray Scattering from a II-Type InAs/GaSb Superlattices. The 11th Biennial Conf. on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging. St. Petersburg, Rosja, 14–20.09.2012 (plakat).

[K25] SZCZYTKO J., ADOMAVIVIUS R., PAPIS E., BARAŃSKA A., WAWRO A., KROTKUS A., PIĘTKA B., ŁUSAKOWSKI J.: THz Time Domain Spectroscopy of Thin Gold and Titanium Layers on GaAs. 41st Jaszowiec Int. School and Conf. on the Physics of Semiconductor. Krynica Zdrój, 8–15.06.2012 (plakat).

[K26] SZCZYTKO J., STOLAREK M., BARAŃSKA A., PAPIS E., WAWRO A., ADOMAVIVIUS R., KROTKUS A., PAŁKA N., ZAGRAJEK P.: THz Properties of Metallic Layers and Grids. 19th Int. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications. Warszawa, 21–23.05.2012 (kom.).

[K27] SZERLING A., KOSIEL K., KARBOWNIK P., BARAŃSKA A., MACIEJEWSKA E., TRAJNEROWICZ A., HEJDUK K., BUGAJSKI M.: Technologia wytwarzania laserów półprzewodnikowych. XI Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 11–14.06.2012 (ref.).

[K28] SZERLING A., KOSIEL K., KARBOWNIK P., GUTOWSKI P., WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., PŁUSKA M., BUGAJSKI M.: Influence of the Mesa Performance on the Threshold Current and Slope Efficiency of AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Lasers. NATO Advanced Research Workshop on Detection of Explosives and CBRN (Using Terahertz). Cesme, Turcja, 3–6.11.2012 (ref.).

[K29] SZYMAŃSKI M., REGIŃSKI K., MROZIEWICZ B., PRUSZYŃSKA-KARBOWNIK E., KOSIEL K., KARBOWNIK P.: Analiza rozbieżności promieniowania kwantowego lasera kaskadowego metodą efektywnego współczynnika załamania. X Symp. Techniki Laserowej. Świnoujście, 24–28.09.2012 (plakat).

[K30] SZYMAŃSKI M., TEISSEYRE H., KOZANECKI A.: Analiza modów optycznych w laserze ZnO/ZnMgO emitującym promieniowanie o długości fali 380 nm. X Symp. Techniki Laserowej. Świnoujście, 24–28.09.2012 (plakat).

[K31] WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., MUSZALSKI J., JASIK A., GUTOWSKI P., TRAJNEROWICZ A., SANKOWSKA I., KUBACKA-TRACZYK J.: Wpływ warunków pompowania optycznego na temperaturę pracy lasera dyskowego. X Symp. Techniki Laserowej. Świnoujście, 24–28.09.2012 (kom.).

[K32] ŻAK D., JUREŃCZYK J., KANIEWSKI J.: Wpływ zjawiska Zenera na charakterystyki fotodiod lawinowych InGaAs/InAlAs/InP. XI Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 11–14.06.2012 (ref.).

Patenty'2012

[PA1] KARBOWNIK P., SZERLING A., WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., KOSIEL K., BARAŃSKA A., PRUSZYŃSKA-KARBOWNIK E., TRAJNEROWICZ A.: Sposób łączenia półprzewodnikowych struktur laserowych z radiatorami odprowadzającymi ciepło. Zgł. pat. nr P.397701 z dn. 3.01.2012.

[PA2] SZYMAŃSKI M., TEISSEYRE H., KOZANECKI A.: Struktura lasera półprzewodnikowego (AlO). Zgł. pat. nr P399454 z dn. 4.06.2012.

[PA3] SZYMAŃSKI M., TEISSEYRE H., KOZANECKI A.: Struktura lasera półprzewodnikowego (GaN). Zgł. pat. nr P399455 z dn. 6.06.2012.