



Kierownik: prof. dr hab. Maciej BUGAJSKI
e-mail: bugajski@ite.waw.pl
tel. (0-prefiks-22) 548 79 32, fax 548 79 25

Zespół: prof. dr hab. inż. Bohdan Mroziewicz, dr hab. Kazimierz Regiński,
dr hab. Jan Muszalski, dr Janusz Kaniewski, dr Kamil Kosiel,
dr Tomasz Ochalski, dr Tomasz Przesławski, dr inż. Michał Szymański,
mgr inż. Marianna Górską, mgr Krzysztof Hejduk,
mgr inż. Michał Kosmała, mgr inż. Emil Kowalczyk,
mgr inż. Leszek Ornoch, mgr inż. Dorota Pierścińska,
mgr inż. Kamil Pierściński, mgr inż. Tomasz Piwoński,
mgr inż. Anna Szerling, mgr inż. Anna Wójcik-Jedlińska,
mgr inż. Dorota Wawer, mgr inż. Hanna Wrzeńska

1. Realizowane projekty badawcze

W 2005 r. w Zakładzie Fizyki i Technologii Struktur Niskowymiarowych realizowano następujące projekty:

- „Badania nad strukturami niskowymiarowymi ze związków półprzewodnikowych III-V i przyrządami optoelektronicznymi wytwarzanymi z tych struktur” (temat statutowy nr 1.01.030),
- „Detektory podczerwieni z optyczną wnęką rezonansową na pasmo 1,55 μm (projekt badawczy nr 2.01.103, 4T11B 015 25),
- „Półprzewodnikowy czujnik mikroprzepływów” (projekt badawczy nr 2.01.108, 3T11B 016 26),
- „Zastosowanie technik spektroskopowych z wykorzystaniem analizy fourierowskiej do badań rezonatorów krawędziowych laserów półprzewodnikowych” (projekt badawczy nr 2.01.110, 3T11B 045 27),
- „Badanie mechanizmów degradacji zwierciadeł w laserach półprzewodnikowych dużej mocy metodą przestrzennie rozdzielczej spektroskopii termoodbiciowej” (projekt badawczy nr 2.01.114, 3T11B 031 28),
- „Analiza procesów termicznych na powierzchni zwierciadeł laserów półprzewodnikowych” (projekt badawczy promotorski nr 2.01.119, 1536T11 2005 29),
- „Elementy i moduły optoelektroniczne do zastosowań w medycynie, przemyśle, ochronie środowiska i technice wojskowej” (PBZ nr 3.01.011, PBZ-Min 009/T11/2003),
- Centrum Doskonałości “Fizyka i Technologia Nanostruktur dla Fotoniki” CEPHONA (projekt badawczy finansowany przez UE nr 5.01.024, G5MA-CT-2002-72100).

Zakład świadczył także usługi naukowo-badawcze:

- „Opracowanie technologii i wykonanie kontaktów metalicznych Cr na 16 podkładkach BK 7” (nr 6.01.531),
- „Wykonanie elektrod ze złota na powierzchniach sferycznych kształtek piezoceramicznych” (nr 7.01.116, nr 7.01.119, 7.01.123).

2. Najważniejsze osiągnięcia naukowo-badawcze

W Zakładzie prowadzone są prace nad strukturami niskowymiarowymi ze związków półprzewodnikowych III-V i przyrządami optoelektronicznymi wytwarzanymi z tych struktur. Nowoczesne przyrządy półprzewodnikowe są wykonywane metodą epitaksji z wiązek molekularnych (Molecular Beam Epitaxy MBE) w reaktorze RIBER 32P. Typowymi materiałami wytwarzanymi tą metodą są takie związki podwójne, jak GaAs, AlAs, InAs oraz ich związki potrójne InGaAs, AlGaAs i poczwórne InGaAlAs.

Badania prowadzone w 2005 r. dotyczyły laserów półprzewodnikowych dużej mocy, fotodetektorów z wnęką rezonansową oraz zawansowanych technik charakteryzacji struktur optoelektronicznych. Główne kierunki badań obejmowały następujące zagadnienia:

- elementy technologii wytwarzania laserów,
- efekty termiczne w strukturach laserowych,
- zjawiska w strukturach półprzewodnikowych z dwuwymiarowym gazem elektronowym,
- opracowanie fotodetektora InGaAs/InAlAs/InP z wnęką rezonansową.

Dzięki prowadzonym pracom uzyskano wiele wartościowych wyników o charakterze poznawczym i praktycznym.

2.1. Elementy technologii wytwarzania laserów

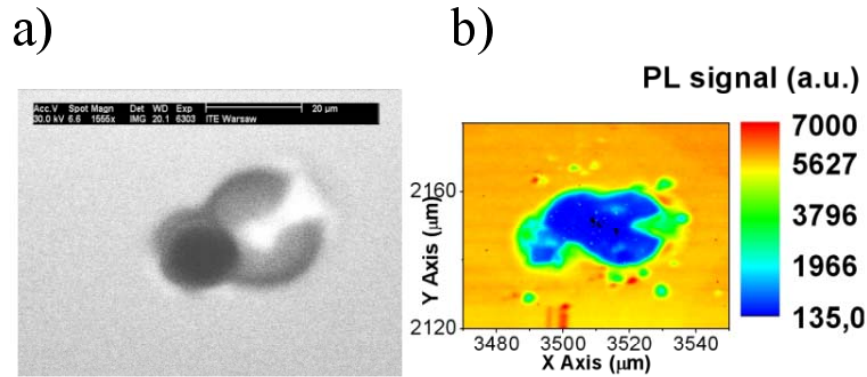
2.1.1. Defekty owalne w strukturach epitaksjalnych

Defekty owalne stanowią z reguły duże trójwymiarowe wyspy, obserwowane na powierzchni materiałów epitaksjalnych, o rozmiarach do kilkudziesięciu mikronów i charakterystycznym, owalnym kształcie podstawy, wydłużone w kierunku krystalograficznym (110). Do grupy defektów owalnych zaliczane są także przez niektórych autorów zagłębienia w powierzchni materiałów epitaksjalnych o wspomnianych rozmiarach i typowym kształcie.

W ramach prowadzonych prac badano defekty owalne powstające w homoepitaksjalnych warstwach GaAs oraz w strukturach zawierających heteroepitaksjalne warstwy AlGaAs lub InGaAs. Do badań zastosowano skaningową mikro-

skopię elektronową (SEM), katodoluminescencję (CL) monochromatyczną i panchromatyczną oraz fotoluminescencję przestrzennie rozdzielczą (SRPL).

Rozkład intensywności katodoluminescencji niektórych defektów znajdujących się na powierzchni warstwy homoepitaksjalnej GaAs różni się od rozkładu intensywności fotoluminescencji tych samych defektów (rys. 1). Na przykład fragment defektu słabo świecący na obrazie fotoluminescencji (rys. 1b) bardzo



Rys. 1. Rozkład intensywności defektu owalnego CL i SRPL w GaAs/GaAs

silnie świeci na obrazie katodoluminescencji (rys. 1a) dla długości fali charakterystycznej dla GaAs (870 nm), a zarazem fragment wygaszony na obrazie katodoluminescencji wydaje się być częściowo zdegradowany na obrazie fotoluminescencji. Różnice w obrazie SRPL i monochromatycznej CL $\lambda = 870$ nm mogą być wynikiem różnej głębokości wnikania d_w wiązek fotonów ($d_w = 0,3$ μm) i elektronów ($d_w = 6$ μm), stosowanych dla tych dwóch mechanizmów wzbudzenia. Na rys. 1a można zaobserwować, że intensywność luminescencji związana z fragmentami defektu owalnego jest silniejsza albo słabsza od luminescencji pochodzącej z otaczającej defekt warstwy epitaksjalnej. Wszelkie zmiany w intensywności luminescencji zinterpretowano jako wynik obecności defektów punktowych lub dyslokacji. Dyslokacje są centrami rekombinacji bezpromienistej, lecz mogą też stanowić centra przyciągające domieszki lub zanieczyszczenia, co powoduje wzmocnienie efektu rekombinacji promienistej w obszarze wokół dyslokacji.

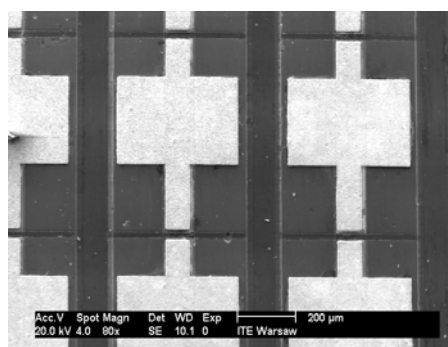
Podsumowując przeprowadzone badania można stwierdzić, że:

- źródłem większości defektów owalnych występujących w warstwach epitaksjalnych jest galowa komórka efuzyjna;
- badania emisji promieniowania ujawniły szczególną, pierścieniową strukturę defektów owalnych powstających w warstwach $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$;
- w przypadku niektórych defektów owalnych obecnych w warstwach epitaksjalnych GaAs stwierdzono jakościową różnicę między rozkładem intensywności katodoluminescencji i fotoluminescencji.

2.1.2. Optymalizacja procesu wytwarzania lasera na pasmo 940 – 980 nm

W 2005 r. kontynuowano prace nad optymalizacją tych elementów technologii laserów na pasmo 940 – 980 nm, które znacząco wpływają na ich parametry elektryczne. Skupiono uwagę na trzech operacjach technologicznych: trawieniu masy, wytwarzaniu kontaktu omowego oraz lutowaniu struktur laserowych do miedzianych chłodnic.

Celem prób było uzyskanie masy o gładkiej powierzchni. Istotny wpływ na gładkość masy ma linia brzegowa maski (SiO_2), jej sposób trawienia oraz kierunek krystalograficzny płytki (rys. 2).



Rys. 2. Fragment płytki ze strukturami laserowymi po optymalizacji procesu technologicznego

Określono warunki procesu trawienia heterostruktur. Masę trawiono w mieszance $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:1:38$, a rowki oddzielające poszczególne linijki laserowe w mieszance $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 20:7:73$. Maskę SiO_2 w obu przypadkach trawiono plazmowo.

Przeprowadzone badania nad optymalizacją metalizacji wykazały, że najmniejszą rezystancję uzyskano dla metalizacji $10\text{nmPt}/20\text{nmTi}/30\text{nmPt}/150\text{nmAu}$ wygrzewanej w temperaturze 460°C przez 5 min.

W technologii lutowania laserów została wprowadzona istotna zmiana, polegająca na lutowaniu laserów do chłodnic miedzianych pokrytych złotem poprzez warstwę indu (In) grubości ok. $7\ \mu\text{m}$. Proces lutowania prowadzono w rurze kwarcowej w atmosferze azotu. Ustalono następujące warunki lutowania: temperatura lutowania 310°C , czas lutowania 18 min., przepływ azotu 5 l/min.

2.2. Efekty termiczne w strukturach laserowych

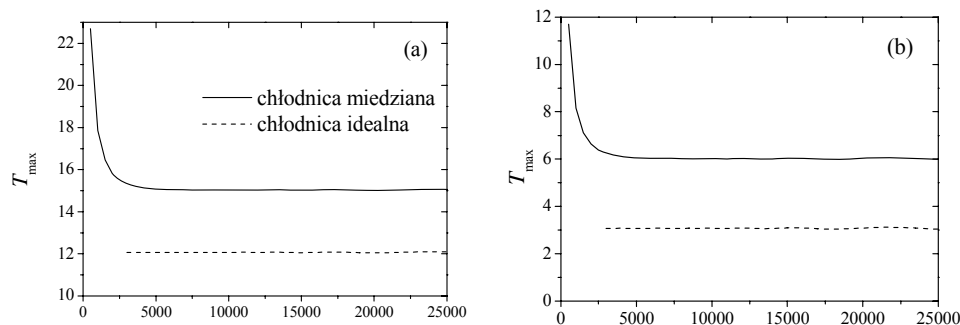
2.2.1. Model rozptywu ciepła w laserach

Opracowano analityczną metodę obliczania rozkładu temperatury w przekroju poprzecznym krawędziowego lasera półprzewodnikowego oraz chłodnicy. Metoda ta bazuje na modelu stworzonym dla chłodnicy doskonałej, tj. cechującej się

nieskończenie dużą przewodnością cieplną. Zasadnicze założenia modelu są następujące:

- krawędziowy laser półprzewodnikowy jest nieskończonym prętem o przekroju prostokątnym składającym się z warstw o różnej grubości i przewodności cieplnej;
- transfer ciepła przez ściany boczne oraz górny kontakt nie występuje, natomiast podstawa utrzymywana jest w stałej temperaturze;
- warstwa aktywna jest jedynym źródłem ciepła w laserze i jest reprezentowana przez nieskończenie cienki pasek położony między warstwami falowodowymi.

Dla lasera zamontowanego kontaktem typu p do dołu, gdzie warstwa aktywna (będąca najwydajniejszym źródłem ciepła) znajduje się bardzo blisko chłodnicy, błąd obliczenia maksymalnej temperatury w laserze sięga 50%. Nieco mniejszy



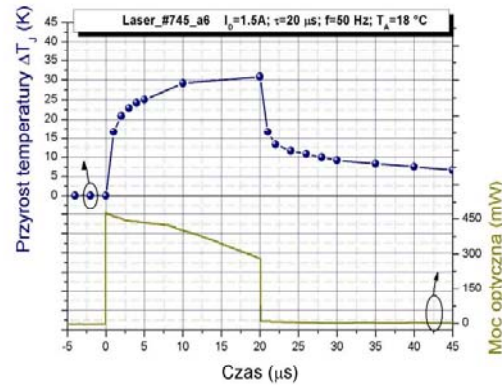
Rys. 3. Obliczenia wykonane dla lasera zamontowanego kontaktem typu p do góry (a) oraz do dołu (b) błąd (ok. 20%) popełnia się w przypadku montażu kontaktem typu p do góry, gdzie między warstwą aktywną a chłodnicą znajduje się grube podłoże (rys. 3).

2.2.2. Dynamika procesów termicznych w laserach półprzewodnikowych

Jednym z krytycznych parametrów eksploatacyjnych, decydującym o użyteczności lasera półprzewodnikowego, jest odporność na zmiany temperatury zachodzące w czasie jego pracy, w szczególności w warunkach pracy impulsowej. Opracowane dotychczas techniki pomiarowe pozwalają zbadać rozkłady temperatury na powierzchni zwierciadeł lasera, wciąż jednak brakuje odpowiedniej techniki umożliwiającej określenie dokładnego przestrzennego rozkładu temperatury wewnątrz lasera. Opracowano dwie nowe eksperymentalne techniki pomiarowe służące do analizy dynamiki procesów optyczno-termicznych laserów półprzewodnikowych: pomiar temperatury obszaru czynnego za pomocą pomiaru spadku napięcia na złączu p-i-n oraz pomiar czasowo-przestrzennych widm laserowych.

W metodyce wyznaczania temperatury obszaru czynnego w laserze opartej na pomiarze spadku napięcia na złączu p-i-n wykorzystuje się zależność wartości napięcia przewodzenia złącza półprzewodnikowego, przez które płynie stały prąd,

od temperatury (rys. 4). Zaletą tej techniki jest dostarczenie bardzo dokładnych informacji o temperaturze złącza w chwili wyłączenia prądowego impulsu zasilającego oraz o wykładniczym charakterze stygnięcia złącza (w tym stałych czasu zaniku temperatury). Zależność wartości napięcia przewodzenia złącza półprzewodnikowego od temperatury jest wykorzystywana w komercyjnych półprzewodnikowych sondach temperatury.

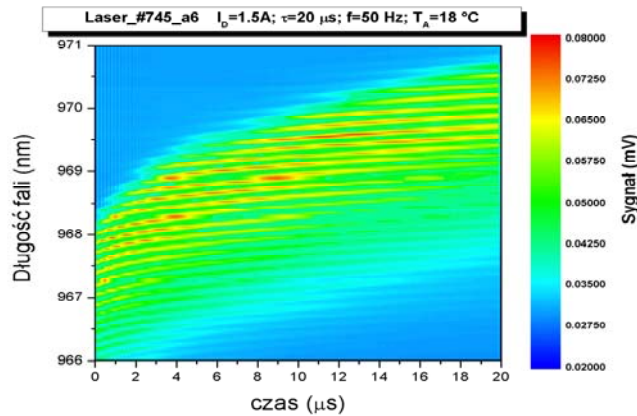


Rys. 4. Rozkład temperatury złącza lasera w czasie trwania impulsu zasilającego zmierzony za pomocą pomiaru spadku napięcia na złączu

Na parametry emitowanej wiązki światła największy wpływ ma wzmocnienie i falowód, w tym jego wymiary geometryczne i współczynnik załamania materiału, z którego został wytworzony. Wymiary geometryczne falowodu lasera są jednoznacznie zdeterminowane w czasie procesu wytwarzania heterostruktury przez wzrost, czyli proces epitaksji, oraz fotolitograficzną definicję metalicznego paska kontaktu, ograniczającego falowód w płaszczyźnie złącza p-i-n. Wartość efektywnego współczynnika załamania jest zmienna i zależy od parametrów pracy lasera, m. in. od koncentracji i rozkładu wstrzykiwanych nośników oraz temperatury.

Informacje o przestrzennym rozkładzie temperatury wewnątrz obszaru czynnego oraz o zmianach w ostatecznej strukturze modowej wiązki lasera wywołanych procesami termicznymi można uzyskać stosując technikę pomiaru czasowo-przestrzennych widm laserowych. Idea pomiaru polega na rozdzielaniu spektralnie widma emisji lasera, a następnie na badaniu rozdzielonej spektralnie wiązki w dziedzinie czasu. W konsekwencji wykreślenie widm laserowych w funkcji czasu trwania impulsu zasilającego na diagramie 2D formuje czasowo-przestrzenną mapę widma laserowego (rys. 5).

Wykorzystanie opisanych technik umożliwia badanie dynamiki procesów termicznych występujących w laserach złączowych pracujących impulsowo i określenie ich wpływu na właściwości optyczne lasera. Komplementarne zastosowanie technik pozwala na powiązanie procesów optyczno-termicznych zachodzących w takich laserach zasilanych impulsowo z faktyczną temperaturą obszaru czynnego lasera oraz jej rozkładem przestrzennym i czasowym. Badanie tego typu zjawisk



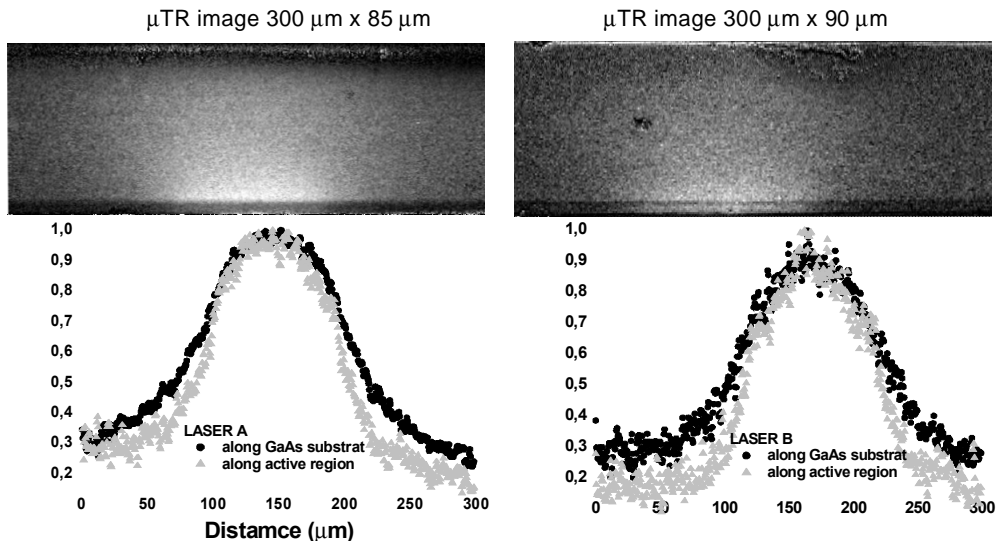
Rys. 5. Przykład czasowo-rozdzielczej mapy przestrzennej widma emisji diody laserowej

jest jedną z dróg do poprawienia parametrów optycznych emitowanej wiązki laserów, m. in. mocy optycznej, widma emisji, sprawności energetycznej lasera oraz zwiększenia niezawodności laserów i czasu ich życia.

2.2.3. Zastosowanie termoodbicia i spektroskopii mikro-Ramana do badania rozkładu temperatury w szerokopaskowych laserach półprzewodnikowych

Wysokorozdzielcza spektroskopia termoodbiciowa jest użyteczną i z powodzeniem stosowaną techniką pomiarową pozwalającą wyznaczyć rozkład temperatury na powierzchni przedniego zwierciadła lasera półprzewodnikowego. W 2005 r. uzupełniliśmy nasz warsztat technik termometrycznych o spektroskopię mikro-Ramana. Technika ta umożliwia wyznaczenie bezwzględnej wartości temperatury na powierzchni zwierciadła lasera półprzewodnikowego. Komplementarne wykorzystanie takich technik, jak termoodbicie i spektroskopia mikro-Ramana umożliwia wyznaczenie rozkładu temperatury pracujących laserów półprzewodnikowych, a także głębsze zrozumienie istoty procesów degradacji zwierciadeł.

Badane struktury to lasery szerokopaskowe typu DBCH SQW (Double-Barrier Separate Confinement Heterostructures) ze studnią GaAsP, zaprojektowane na długość fali emisji ok. 810 nm. Wykonano pomiary przestrzennie rozdzielczych map termoodbicia dla laserów A i B dla różnych wartości prądu zasilania, powyżej prądu progowego. Na rys. 6 przedstawiono mapy rozkładu temperatury zmierzone dla lasera A zasilanego prądem 400 mA oraz dla lasera B zasilanego prądem 800 mA. Pokazano także poprzeczny przekrój wzdłuż linii równoległej do warstw epitaksjalnych przedstawiający znormalizowany rozkład sygnału termoodbicia wzdłuż podłoża GaAs oraz wzdłuż obszaru aktywnego.



Rys. 6. Mapy termoodbicia laserów A i B zasilanych odpowiednio prądem 400 mA i 800 mA oraz przekroje poprzeczne przedstawiające rozkład temperatury w obszarze aktywnym i podłożu GaAs

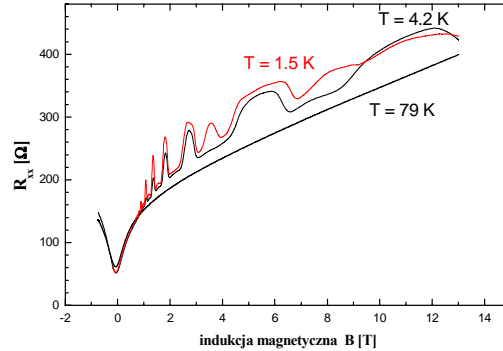
Komplementarne wykorzystanie techniki termoodbicia i spektroskopii mikro-Ramana umożliwia uzyskanie prawdziwych rozkładów temperatury na powierzchni zwierciadeł laserów półprzewodnikowych. Możliwość eksperymentalnego wyznaczenia w mikroskali rozkładu temperatury na pracujących laserach półprzewodnikowych jest istotna dla określenia źródeł ciepła w laserze, a także dla zrozumienia mechanizmu degradacji zwierciadeł laserów półprzewodnikowych.

2.3. Zjawiska w strukturach półprzewodnikowych z dwuwymiarowym gazem elektronowym 2DEG

2.3.1. Magnetotransport w heterostrukturach 2DEG z $In_{0,52}Al_{0,48}As/In_{0,53}Ga_{0,47}As$ na podłożu (100) InP

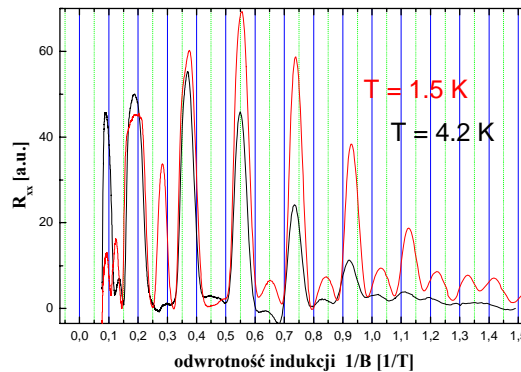
Jednym z najpotężniejszych narzędzi badania mechanizmu procesów transportu jest pole magnetyczne. Obecność pola magnetycznego sprawia, że konduktancja i rezystancja stają się tensorami. Z drugiej strony pole magnetyczne w układach niskowymiarowych stanowi podstawowe narzędzie do charakteryzacji systemu, np. do określenia koncentracji swobodnych nośników, rozkładu gęstości stanów itp. Układ dwuwymiarowy może być uzyskany przez wytworzenie heterozłącza między dwoma materiałami o różnej szerokości przerwy zabronionej. Prowadzi to do powstania studni kwantowych, których nośnik przebywający w cienkiej warstwie materiału o wąskiej przerwie zabronionej, np. $In_{0,53}Ga_{0,47}As$, jest uwięziony między barierami utworzonymi przez materiał o większej przerwie, np. $In_{0,52}Al_{0,48}As$. Innym sposobem realizacji układu dwuwymiarowego jest wytworzenie barier potencjału przez wprowadzenie wąskiej warstwy silnie domiesz-

kowanej do półprzewodnika jednorodnego, tzw. domieszkowanie delta. Jeżeli dokonamy pomiaru magnetorezystancji R_{xx} w reżimie kwantowym (niskie temperatury i silne pola magnetyczne) wykorzystując strukturę Halla wykonaną z materiału zawierającego 2DEG o dużej ruchliwości, to stwierdzimy, że oscyluje ona w funkcji wartości pola magnetycznego. Są to tzw. oscylacje Szubnikowa de Haasa (SdH) – rys. 7.



Rys. 7. Rezystancja podłużna w funkcji indukcji magnetycznej struktury testowej z 2DEG w temperaturze 1,5 K, 4,2 K i 79 K

Wykreślenie oscylacyjnej części magnetooporu w funkcji odwrotności pola magnetycznego przedstawiono na rys. 8. Wyraźnie widać dwie oscylujące składowe różniące się amplitudami – większa dla 2DEG i mniejsza dla 3DEG. Korzystając z okresu i częstotliwości oscylacji w efekcie SdH określamy koncentrację 2DEG ze wzoru $n_i = 2f_i/h = 4,82 \cdot 10^{10} f_i \text{ cm}^{-2}$. Dla $f_i = 5,34 \text{ T}$ $n_i = 2,6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. Ponadto na rys. 7 widać, że względny przyrost magnetorezystancji dla $T = 79 \text{ K}$ rośnie liniowo w funkcji pola magnetycznego i osiąga kilkaset procent, co wiążemy z makroskopowymi niejednorodnościami w wysoko nieuporządkowanej heterostrukturze. Efekt ten można wykorzystać w konstrukcjach czujników pola magnetycznego do pomiarów wysokich pól magnetycznych.



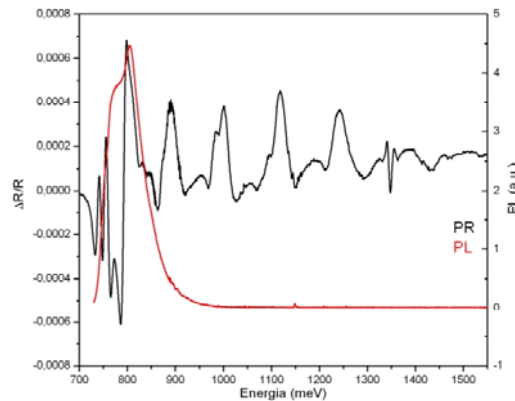
Rys. 8. Oscylacje RXX w funkcji odwrotności pola magnetycznego $1/B$ w temperaturze 1,5 K i 4,2 K

2.3.2. Fotoodbicie w heterostrukturach 2DEG z $In_{0,52}Al_{0,48}As/In_{0,53}Ga_{0,47}As$ na podłożu (100) InP

W 2005 r. rozpoczęto prace nad optyczną charakteryzacją struktur półprzewodnikowych służących do pomiaru pól magnetycznych. Struktury tego typu wymagają istnienia w przyrządzie dwuwymiarowego gazu elektronowego (2DEG). Wykonywano pomiary fotoodbicia na strukturach, jak i numeryczne modelowanie struktury. Celem prac jest wspomaganie procesu projektowania i charakteryzacji heterostruktur.

Pomiary fotoodbicia umożliwiają scharakteryzowanie struktury pod względem materiałowym, a także oszacowanie występujących w strukturze pól elektrycznych. Pozwala to wyznaczyć koncentrację występującego w strukturze dwuwymiarowego gazu elektronowego. Wykorzystanie optycznych pomiarów spowoduje poszerzenie obecnie stosowanych metod charakteryzacji czujników pola magnetycznego.

Numeryczne obliczenia struktury zostały wykonane z użyciem oprogramowania Nextnano umożliwiającego m. in. rozwiązanie samouzgodnionego równania Schrödingera-Poissona. Wykonano również pomiary fotoodbicia i fotoluminescencji na strukturach czujników pola magnetycznego. Na rys. 9 jest przedstawiony wynik



Rys. 9. Porównanie wyników pomiaru fotoodbicia i fotoluminescencji dla czujnika pola magnetycznego

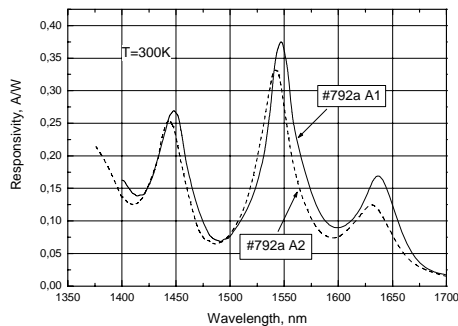
dwóch pomiarów: fotoodbicia i fotoluminescencji. Jak widać, widmo fotoluminescencji nie dostarcza tak bogatej informacji o przejściach, z którymi mamy do czynienia wewnątrz struktury, jak widmo fotoodbicia. Widmo fotoodbicia zawiera cały szereg oscylacji, które można podzielić na pięć grup. Dalsze pomiary, zwłaszcza niskotemperaturowe, powinny jeszcze lepiej wyeksponować oscylacje i ułatwić interpretację ich pochodzenia.

2.4. Fotodetektor InGaAs/InAlAs/InP z wnęką rezonansową

Opracowano konstrukcję fotodetektora typu p-i-n z wnęką rezonansową z InGaAs/InAlAs na podłożu InP. Do realizacji wybrano konstrukcję z bardzo

cienną warstwą absorpcyjną grubości 140 nm. Detektor ten charakteryzuje się dużą szybkością działania i jednocześnie dużą sprawnością kwantową. W celu uproszczenia technologii detektora zaproponowano konstrukcję z dwoma rodzajami zwierciadeł Bragga: półprzewodnikowym InGaAs/InAlAs i hybrydowym ($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ + metal). W celu przeciwdziałaniu absorpcji w warstwach w zwierciadle półprzewodnikowym wykorzystano efekt Bursteina, przesuwając krawędź absorpcji półprzewodnika do krótszych długości fal na skutek silnego domieszkania typu n.

Detektor został wykonany we współpracy z firmą VIGO System. Jest przeznaczony do detekcji promieniowania o długości fali 1,55 μm (rys. 10). Wykonuje się go w dwóch wersjach: z dwustopniową chłodziarką Peltiera i bez chłodziarki (rys. 11). Czułość tych detektorów przy rezonansowej długości fali wynosi ok. 0,4 A/W. Charakterystyki kierunkowe wykazują zmniejszanie czułości detektora o 50% dla kątów padania promieniowania większych od ok. 30° od normalnego. Silnie kierunkowa charakterystyka detektora jest typowa dla przyrządów z mikrownąką rezonansową.



Rys. 10. Charakterystyka widmowa detektora InGaAs/InAlAs/InP z wnęką rezonansową



Rys. 11. Fotodetektor InGaAs/InAlAs/InP z wnęką rezonansową zamontowany na chłodziarce Peltiera

Opracowany detektor ze względu na istnienie modów wyższych rzędów w mikrownące rezonansowej może być także stosowany do detekcji innych, wybranych długości fali. Pomimo istotnej redukcji czułości przyrząd ten umożliwia także detekcję szybkich impulsów promieniowania laserowego o długości fali 990 nm.

3. Współpraca międzynarodowa

W 2005 r. Zakład współpracował z następującymi ośrodkami zagranicznymi:

- National University of Ireland, Physics Department, Cork, Irlandia
przedmiot współpracy – spektroskopia optyczna struktur laserowych;
- University of Nottingham, Nottingham, Wielka Brytania
przedmiot współpracy – technologia MBE;

- Katholieke Universiteit Nijmegen, Research Institute for Materials Experimental Solid State Physics, Nijmegen, Holandia
przedmiot współpracy – spektroskopia optyczna struktur azotkowych, zjawiska transportu w warstwach tlenkowych;
- Center for High Technology Materials, The University of New Mexico, Albuquerque, USA
przedmiot współpracy – lasery VCSEL; teoria i modelowanie komputerowe.

4. Uzyskane stopnie naukowe, nagrody i wyróżnienia

Dr inż. Tomasz Piwoński uzyskał stopień doktora na podstawie pracy doktorskiej pt. "Zastosowanie metody termoodbicia do badania rozkładów temperatury na powierzchni zwierciadeł laserów półprzewodnikowych".

Prof. dr hab. Maciej Bugajski uzyskał Nagrodę Fundacji Nauki Polskiej, Subsydium Profesorskie w dziedzinie nauk technicznych 2005 r.

Publikacje'2005

[P1] BAK-MISIUK J., ORLIŃSKA K., KANIEWSKI J., SHALIMOV A., LUSAKOWSKA E., MISIUK A., MUSZALSKI J., WIERZCHOWSKI W., WIETESKA K., GRAEFF W.: Structural Characterization of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ Layers under Different Stresses. Proc. E-MRS 2005 Spring Meet., Strasburg, Francja, 31.05–3.06.2005.

[P2] BUGAJSKI M., MROZIEWICZ B., REGIŃSKI K., MUSZALSKI J., KOSIEL K., ZBROSZCZYK M., OCHALSKI T., PIWOŃSKI T., WAWER D., SZERLING A., KOWALCZYK E., WRZESIŃSKA H., GÓRSKA M.: High Power QW SCH InGaAs/GaAs Lasers for 980 nm Band. *Bull. of the PAS Technical Sciences* 2005 nr 53 s. 113.

[P3] GACA J., WÓJCIK M., TUROS A., STRUPIŃSKI W., JASIK A., ZYNEK J., KOSIEL K., EICHHORN F., PROKERT F.: Badanie profilu składu chemicznego i lateralnej jednorodności studni kwantowych związków półprzewodnikowych $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$. *Mat. Elektron.* (w druku).

[P4] GÓRSKA M., WRZESIŃSKA H., SZERLING A., HEJDUK K., ŁYSKO J. M.: HBV Deep Mesa Etching in the InGaAs/InAlAs/AlAs Heterostructure over InP Substrate. *Mater. Sci.-Poland* 2005 nr 23 s. 1.

[P5] HEJDUK K., PIERŚCIŃSKI K., RZODKIEWICZ W., MUSZALSKI J., KANIEWSKI J.: Dielectric Coatings for Infrared Detectors. *Optica Appl.* 2005 vol. 35 nr 3 s. 437–448.5.

[P6] HENINI M., BUGAJSKI M.: Advances in Self-Assembled Semiconductor Quantum Dot Lasers. *Microelectron. J.* 2005 nr 36 s. 950.

[P7] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., ŁUKASIEWICZ R., SZCZĘSNY A., KOWALCZYK E., JAGODZIŃSKI P., GUZIEWICZ M., KUDŁA A., BARCZ A., JAKIELA R.: Thermally Stable Transparent Ru-SiO Schottky Contacts for n-Type GaN and AlGaN. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 831, 2005 Materials Research Society. E3.41.1–E3.41.6.

[P8] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., KOSSUT J., BARCZ A., BUTKUTE R., DOBROWOLSKI R., DYNOWSKA E., JAKIELA R., ŁUKASIEWICZ R., ALESZKIEWICZ M., WOJNAR P., KOWALCZYK E.: Transparent p-Type ZnO Films Obtained by Oxidation of Sputter-Deposited Zn_3N_2 . *Solid State Commun.* 2005 vol. 135 nr 1–2 s. 11–15.

- [P9] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., KOSSUT J., BUTKUTE R., DOBROWOLSKI R., ŁUKASIEWICZ R., BARCZ A., JAKIEŁA R., DYNOWSKA E., PRZEŹDZIECKA E., ALESZKIEWICZ M., KOWALCZYK E.: P-Type Conducting ZnO: Fabrication and Characterization. *phys. stat. sol. (c)* 2005 vol. 2 nr 3 s. 1119–1124.
- [P10] KANIEWSKI J., MUSZALSKI J., PAWLUCZYK J., PIOTROWSKI J.: Resonant Cavity Enhanced InGaAs Photodiodes for High Speed Detection of 1.55 μm Infrared Radiation. *Proc. SPIE* 2005 nr 5783.
- [P11] KOSIEL K., MAJKUSIAK B., DOBRZAŃSKI L.: PVR Improvement by Smoothing the Interfaces of AlAs/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP Resonant Tunneling Heterostructures Deposited by LP MOVPE. *J. of Crystal Growth* (w druku).
- [P12] KOSMALA M., REGIŃSKI K., KOSIEL K.: Some Problems of MBE Growth of Epitaxial Structures of Semiconductor Lasers for the Band 980 nm. *Optica Appl.* 2005 vol. 35 nr 3 s. 399–405.
- [P13] KOWALCZYK E., ORNOCH L., SZERLING A., MROZIEWICZ B.: Thermally Induced Changes of Broad Contact Pulse Operated SQW SCH Laser Spectra. *Optica Appl.* 2005 vol. 35 nr 3 s. 573–578.
- [P14] KOZŁOWSKA A., WEIK F., TOMM J. W., MALĄG A., LATOSZEK M., WAWRZYŃIAK P., TEODORCZYK M., DOBRZAŃSKI L., ZBROSZCZYK M., BUGAJSKI M.: Thermal Properties of High-Power Diode Lasers Investigated by Micro-Thermography. *Proc. SPIE, Photonic West* 2005.
- [P15] KOZŁOWSKA A., LATOSZEK M., TOMM J. W., WEIK F., ELSAESSER T., ZBROSZCZYK M., BUGAJSKI M., SPELLENBERG B., BASSLER M.: Analysis of Thermal Images from Diode Lasers: Temperature Profiling and Reliability Screening. *Appl. Phys. Lett.* 2005 vol. 86 s. 203503.
- [P16] MROZIEWICZ B.: Lasery półprzewodnikowe wciąż pozostają przedmiotem zainteresowań nauki i przemysłu. Cz. I: Lasery bipolarne – technologia podąża za potrzebami rynku. *Elektronika* 2005 nr 5 s. 30.
- [P17] MROZIEWICZ B.: Lasery półprzewodnikowe wciąż pozostają przedmiotem zainteresowań nauki i przemysłu. Cz. II: Lasery unipolarne (kaskadowe) – nowe perspektywy optoelektroniki. *Elektronika* 2005 nr 6 s. 35.
- [P18] MROZIEWICZ B., PIWONSKI T., KOWALCZYK E., SZERLING A., LEWANDOWSKI S. J.: External Cavity Diode Lasers with Ridge-Waveguide Type Broad Contact Semiconductor Optical Amplifiers. *Proc. SPIE* 2005 nr 5958.
- [P19] OCHALSKI T., GRZEGORCZYK A., RUDZIŃSKI M., LARSEN P. K., KOWALCZYK E., HOLTZ P. O., BERGMAN P., PASKOV P. P.: Optical Study of AlGaIn/GaN Based HEMT Structures. *phys. stat. sol. (c)* 2005 vol. 2 s. 2791.
- [P20] OCHALSKI T. J., GRZEGORCZYK A., RUDZIŃSKI M., LARSEN P. K., HOLTZ P. O., BERGMAN P., PASKOV P. P.: Optical Study of AlGaIn/GaN Based HEMT Structures Grown on Sapphire and SiC. *phys. stat. sol. (a)* 2005 vol. 2 s. 1300.
- [P21] OCHALSKI T. J., PIWONSKI T., WAWER D., PIERŚCIŃSKI K., BUGAJSKI M., KOZŁOWSKA A., MALĄG A., TOMM J.: Thermoreflectance and Micro-Raman Measurements of the Temperature Distributions in Broad Contact Laser Diodes. *Optica Appl.* 2005 vol. 35 nr 3 s. 479–484.
- [P22] ORNOCH L., KOWALCZYK E., MROZIEWICZ B.: Analysis of Thermal Conditions of Pulse Operated SQW SCH Lasers. *Optica Appl.* 2005 vol. 35 nr 3 s. 591–595.
- [P23] PIERŚCIŃSKI K., OCHALSKI T., BUGAJSKI M.: Przestrzennie rozdzielcze techniki modulacyjne w zastosowaniu do badania naprężeń w strukturach laserowych. *Optica Appl.* 2005 vol. 35 nr 3.
- [P24] PIERŚCIŃSKI K., OCHALSKI T., BUGAJSKI M.: An Analysis of Mounting Strain in Semiconductor Structures by Means of Spatially Resolved Optical Modulation Techniques. *Optica Appl.* 2005 vol. 35 nr 3 s. 605–610.

- [P25] PIWOŃSKI T., HOULIHAN J., BUSCH T., HUJET G.: Delay-Induced Excitability. *Phys. Rev. Lett.* 2005 vol. 95, 040601.
- [P26] PIWOŃSKI T., WAWER D., SZYMAŃSKI M., OCHALSKI T., BUGAJSKI M.: Thermoreflectance Study of Temperature Distribution on the Unable Resonator Semiconductor Laser Mirrors. *Optica Appl.* 2005 vol. 35 nr 3 s. 611–617.
- [P27] PRZESŁAWSKI T., WOLKENBERG A., KANIEWSKI J., REGIŃSKI K., JASIK A.: Magnetic Field Sensors on Undoped $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}(\text{SI})$ Heterostructures Fabricated by MBE and MOCVD. *Optica Appl.* 2005 vol. 35 nr 3 s. 627–634.
- [P28] RYMUZA Z., WRZESIŃSKA H.: Considerations on Nanomechanical and Tribological Behaviours of Ultrathin Superlattice Films Deposited on Silicon. *Tren i Iznos* (w druku).
- [P29] SHALIMOV A., BAK-MISIUK J., KANIEWSKI J., MISIUK A., DOMAGALA J., KOWALCZYK E.: Strain State of InAlAs/InP Layers Subjected to High Pressure Treatment. *phys. stat. sol. (c)* 2005 nr 2 s. 1948–1952.
- [P30] SHALIMOV A., BAK-MISIUK J., KANIEWSKI J., TRELA J., WIERZCHOWSKI W., WIETESKA K., GRAEFF W.: Defect Structure of InAlAs/InP Layers. *J. Alloys a. Compounds* 2005 nr 401 s. 221.
- [P31] SZERLING A., KOSIEL K., WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., PLUSKA M., BUGAJSKI M.: Investigation of Oval Defects in (In)Ga(Al)As/GaAs Heterostructures by Spatially-Resolved Photoluminescence and Micro-Cathodoluminescence. *Mater. Sci. in Semicond. Process.* (w druku).
- [P32] SZERLING A., KOSIEL K., WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., PLUSKA M., BUGAJSKI M.: Properties and Origin of Oval Defects in Epitaxial Structures Grown by MBE. *Optica Appl.* 2005 vol. 35 nr 3 s. 537–548.
- [P33] WASIAK M., BUGAJSKI M., NAKWASKI W.: Envelope Function Description of Quantum Cascade Laser Electronic States. *Optica Appl.* 2005 vol. 35 nr 3 s. 651–654.
- [P34] WAWER D., OCHALSKI T. J., PIWOŃSKI T., WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., BUGAJSKI M., PAGE H.: Spatially Resolved Thermoreflectance Study of Facet Temperature in Quantum Cascade Lasers. *phys. stat. sol. (a)* 2005 nr 202 s. 1227.
- [P35] WAWER D., OCHALSKI T. J., PIERŚCIŃSKI K., SZYMAŃSKI M., BUGAJSKI M., PISKORSKI Ł., GUTOWSKI K., KOZŁOWSKA A., MALĄG A.: Analysis of Facet Heating in Semiconductor Lasers. *Proc. SPIE* 2005.
- [P36] WAWER D., TOMM J. W., PIERŚCIŃSKI K., BUGAJSKI M.: Analysis of High-Power Diode Laser Thermal Properties by Micro-Raman Spectroscopy. *Optica Appl.* 2005 vol. 35 nr 3 s. 555–560.
- [P37] WOLKENBERG A., PRZESŁAWSKI T.: Comparative Study of Sensor and Material Properties on $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ Fabricated by MBE and MOCVD. *Electron Technol. – Internet J.* 2005/2006 vol. 37/38 s. 1–9. www.ite.waw.pl/etij.
- [P38] WOLKENBERG A., PRZESŁAWSKI T.: Magnetic Field Sensors Built from Slightly Crystallographically Mismatched Thin Films of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}(\text{SI})$ Obtained by MBE and MOCVD. *Sensors a. Actuators A Phys.* (w druku).
- [P39] WOLKENBERG A., PRZESŁAWSKI T.: Mean Free Path and Mott Transition in InAs, $\text{In}_{0.57}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ and GaAs MBE Epitaxial Layers. *Mater. Sci. & Eng. B* (zł. do druku).
- [P40] WOLKENBERG A., PRZESŁAWSKI T.: The Comparison of Conductivity Mobility Spectrum Using Multi-Carrier Fitting in InAs, InGaAs and GaAs MBE Epi-Layers. *Mater. Sci. & Eng. B* (zł. do druku).
- [P41] WOLKENBERG A., PRZESŁAWSKI T., KANIEWSKI J., REGIŃSKI K.: Conductivity Analysis of n-GaAs Molecular Beam Epitaxy Layers Using Multi-Carrier Fitting. *J. Appl. Phys.* (w druku).

- [P42] WRZESIŃSKA H., MAŁYSKA K., RYMUZA Z., RATAJCZYK Ł.: Wpływ materiału przekładki na odporność na zarysowanie supersieci TiN/CrN. *Elektronika* 2005 nr 2–3 s. 10.
- [P43] WYROBEK J. T., WRZESIŃSKA H., STROM A., RYMUZA Z., NOWEK A.: Nanowear of Ultrathin TiN/NbN Superlattices Deposited on Silicon. *Tribology Lett.* 2005 nr 18 s. 165.
- [P44] YASTRUBCHAK O., DOMAGALA J. Z., WOSIŃSKI T., KUDŁA A., REGIŃSKI K.: Anisotropic Strain Relaxation in Lattice-Mismatched III-V Epitaxial Layers. *phys. stat. sol. (c)* 2005 vol. 2 nr 6 s. 1943–1947.

Konferencje, seminaria'2005

- [K1] BUGAJSKI M.: Physics and UHV Technology of Low Dimensional Structures. Joint Meet. of the German Vacuum Society (DVG) and the Polish Vacuum Society (PTP) Kraków 2005 "Vacuum Based Science and Technology" & 4th Annual Meet. of the German Vacuum Society DVG (ref. zapr.).
- [K2] BUGAJSKI M.: Thermoreflectance Study of Facet Heating in High Power Semiconductor Lasers. 2nd ASPECT Workshop on Advanced Spectroscopy 2005.
- [K3] BUGAJSKI M., PIWOŃSKI T., WAWER D., OCHALSKI T.: Thermoreflectance Study of Facet Heating in Semiconductor Lasers. XI Int. Conf. on Defect 2005.
- [K4] GÓRSKA M., WRZESIŃSKA H., SZERLING A., HEJDUK K., ŁYSKO J. M.: HBV Deep Messa Etching in the InGaAs/InAlAs/AlAs Heterostructure over InP Substrate. Mat. VIII Konf. Nauk. "Technologia Elektronowa" ELTE 2004, Stare Jabłonki, 19–22.04.2004. CD ROM 2005 s. 809–814.
- [K5] HEJDUK K., PIERŚCIŃSKI K., RZODKIEWICZ W., MUSZALSKI J., KANIEWSKI J.: Dielectric Coatings for Infrared Detectors. X Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe – 2005". Szklarska Poręba, 17–21.05.2005 (plakat).
- [K6] KOSMAŁA M., REGIŃSKI K., KOSIEL K.: Some Problems of MBE Growth of Epitaxial Structures of Semiconductor Lasers for the Band 980 nm. X Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe – 2005". Szklarska Poręba, 17–21.05.2005
- [K7] KOWALCZYK E., ORNOCH L., SZERLING A., MROZIEWICZ B.: Thermally Induced Changes of Broad Contact Pulse Operated SQW SCH Laser Spectra. X Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe – 2005". Szklarska Poręba, 17–21.05.2005 (kom.).
- [K8] KUCHARSKI K., TOMASZEWSKI D., GRODNER M., DUTKIEWICZ W., GRABIEC P., HEJDUK K., KOCIUBIŃSKI A., MALESIŃSKA J., KOKOSZKA A., OBRĘBSKI D., SZYNKA J.: MPW Service for Manufacturing of CMOS ASICs in a National Center of Silicon Micro- and Nano-Technology. Mat. VIII Konf. Nauk. "Technologia Elektronowa" ELTE 2004, Stare Jabłonki, 19–22.04.2004. CD ROM 2005 s. 361–364.
- [K9] MROZIEWICZ B.: Optical Interconnects – a Challenge to Semiconductor Lasers. 12th Int. Conf. MIXDES'2005, Kraków, 22–25.06.2005.
- [K10] MROZIEWICZ B., PIWONSKI T., KOWALCZYK E., SZERLING A., LEWANDOWSKI S. J.: External Cavity Diode Lasers with Ridge-Waveguide Type Broad Contact Semiconductor Optical Amplifiers. SPIE Congress on Optics and Opto-Electronics. Warszawa, 28.08–2.09.2005.
- [K11] OCHALSKI T. J.: Analysis of the Temperature Diffusion Length in High Power InGaAs/GaAs Lasers. 2005 MRS Fall Meet. Boston, USA.
- [K12] OCHALSKI T. J., KOZŁOWSKA A., SZYMAŃSKI M., PIWOŃSKI T., WAWER D., BUGAJSKI M.: Theoretical Calculation and Thermoreflectance Measurement of the Temperature Distribution in Broad Contact Diode Lasers. 2005 MRS Spring Meet., San Francisco, USA.

- [K13] OCHALSKI T. J., WAWER D., BUGAJSKI M., KOZŁOWSKA A., MALĄG A.: Thermoreflectance and Micro-Raman Measurements of the Temperature Distributions in Broad Contact Laser Diodes. X Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe – 2005". Szklarska Poręba, 17–21.05.2005.
- [K14] ORNOCH L., KOWALCZYK E., MROZIEWICZ B.: Analysis of Thermal Conditions of Pulse Operated SQW SCH Lasers. X Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe – 2005". Szklarska Poręba, 17–21.05.2005.
- [K15] PIWOŃSKI T., WAWER D., BUGAJSKI M.: Thermoreflectance Study of Temperature Distribution on the Unable Resonator Semiconductor Laser Mirrors. X Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe – 2005". Szklarska Poręba, 17–21.05.2005.
- [K16] PRZESŁAWSKI T., WOLKENBERG A., KANIEWSKI J., REGIŃSKI K., JASIK A.: Magnetic Field Sensors on Undoped $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}(\text{SI})$ Heterostructures Fabricated by MBE and MOCVD. X Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe – 2005". Szklarska Poręba, 17–21.05.2005 (ref.).
- [K17] RYMUZA Z., WRZESIŃSKA H.: Considerations on Nanomechanical and Tribological Behaviours of Ultrathin Superlattice Films Deposited on Silicon. Int. Conf. "Polymeric Composites and Tribology" Polymcomtrib 2005. Gomel, Białoruś, 18–21.07.2005.
- [K18] SZERLING A., KOSIEL K., WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., PŁUSKA M., BUGAJSKI M.: Investigation of Oval Defects in $(\text{In})\text{Ga}(\text{Al})\text{As}/\text{GaAs}$ Heterostructures by Spatially-Resolved Photoluminescence and Micro-Cathodoluminescence. 11th Int. Conf. on Defects: Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors (DRIP XI). Pekin, Chiny, 15–19.09.2005
- [K19] SZERLING A., KOSIEL K., WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., PŁUSKA M., BUGAJSKI M.: Properties and Origin of Oval Defects in Epitaxial Structures Grown by MBE. X Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe – 2005". Szklarska Poręba, 17–21.05.2005.
- [K20] SZERLING A., KOSIEL K., WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., PŁUSKA M., RATAJCZAK J.: Creation and Evaluation of Oval Defects in Crystals Grown by MBE. X Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe – 2005". Szklarska Poręba, 17–21.05.2005 (kom.).
- [K21] WAWER D., TOMM J. W., PIERŚCIŃSKI K., BUGAJSKI M.: Analysis of High-Power Diode Laser Thermal Properties by Micro-Raman Spectroscopy. X Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe – 2005". Szklarska Poręba, 17–21.05.2005.
- [K22] WRZESIŃSKA H., MAŁYSKA K., RYMUZA Z.: The Effect of Underlayer Material on Scratch Resistance of TiN/CrN Superlattices. Mat. VIII Konf. Nauk. "Technologia Elektronowa" ELTE 2004, Stare Jabłonki, 19–22.04.2004. CD ROM 2005.
- [K23] ZABOROWSKI M., GRABIEC P., WRÓBLEWSKI W., ROMANOWSKA E., WRZESIŃSKA H.: Cienkowarstwowa elektroda pseudo-referencyjna do pomiaru pH. Mat. VIII Konf. Nauk. "Technologia Elektronowa" ELTE 2004, Stare Jabłonki, 19–22.04.2004. CD ROM 2005.
- [24] WAWER D., PIERŚCIŃSKI K., OCHALSKI T. J., WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., M. SZYMAŃSKI M., BUGAJSKI M.: Phase Resolved Thermoreflectance Investigation of Broad Area $\text{GaAsP}/\text{AlGaAs}$ Lasers. 2nd Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers, Jałta, Ukraina, 12–17.09.2005 (wykład).

Patenty i zgłoszenia patentowe'2005

- [PA1] MROZIEWICZ B.: Odbiornik ciepła. Pat. PL 190264.
- [PA2] MROZIEWICZ B.: Dioda laserowa z dodatkową hermetyzacją ścian bocznych. Zgł. pat. nr P378152 z dn. 28.11.2005.
- [PA3] PRZESŁAWSKI T., WOLKENBERG A.: Cienkowarstwowy heterozłączowy czujnik pola magnetycznego. Zgł. pat. nr P.373852 z dn. 22.03.2005.