ZAKŁAD FIZYKI I TECHNOLOGII STRUKTUR NISKOWYMIAROWYCH

Kierownik: prof. dr hab. Maciej BUGAJSKI
e-mail: bugajski@ite.waw.pl
tel. (0-prefiks-22) 548 79 32, fax 847 06 31

Zespół: prof. dr hab. inż. Bohdan Mroziewicz, dr hab. Kazimierz Regiński, dr Janusz Kaniewski, dr inż. Jan Łysko, dr Jan Muszalski, dr Tomasz Przesławski, dr inż. Michał Szymański, dr Tomasz Ochalski, dr inż. Mariusz Zbroszczyk, dr Kamil Kosiel, mgr inż. Emil Kowalczyk, mgr inż. Leszek Ornoch, mgr inż. Marek Nikodem, mgr inż. Tomasz Piwoński, mgr inż. Paweł Sajewicz, mgr inż. Anna Wójcik, mgr inż. Anna Szerling, mgr inż. Dorota Wawer, mgr inż. Michał Kosmala, mgr inż. Hanna Wrzesińska, mgr inż. Marianna Górska, mgr inż. Krzysztof Hejduk

1. Realizowane projekty badawcze

W 2003 r. w Zakładzie Fizyki i Technologii Struktur Niskowymiarowych zostały zrealizowane następujące prace:

- "Badania nad strukturami niskowymiarowymi ze związków półprzewodnikowych III-V i przyrządami optoelektronicznymi wytwarzanymi z tych struktur" (temat statutowy nr 1.01.030),
- "Badania kinetyki nanoszenia oraz własności mechanicznych i trybologicznych supersieci ceramicznych pod kątem ich zastosowania w mikroinżynierii krzemowej" (projekt badawczy nr 2.01.084, 7 T11B 051 20),
- "Detektory podczerwieni z In(GaAl)As zintegrowane z mikrooptyką refrakcyjną" (projekt badawczy nr 2.01.088, 7 T11B 029 21),
- "Lasery dużej mocy i linijki laserowe z InGaAIAs/GaAs na pasmo 780 – 810 nm" (projekt badawczy nr 2.01.089, 7 T11B 021 21),
- "Heterozłączowy czujnik pola magnetycznego z $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ na podłożu z InP, wytwarzany metodą epitaksji z wiązek molekularnych" (projekt badawczy nr 2.01.093, 4 T11B 066 22),
- "Analiza wzmocnienia w obszarze czynnym lasera półprzewodnikowego z pojedynczą lub wielokrotną studnią kwantową" (projekt badawczy nr 2.01.098, 4 T11B 037 23),
- "Detektory podczerwieni z optyczną wnęką rezonansową na pasmo 1,55 μm" (projekt badawczy nr 2.01.103, 4 T11B 015 25),

- "Szerokokontaktowe, koherentne lasery do wzmacniaczy światłowodowych domieszkowanych erbem. Badanie rozkładów temperatur zwierciadeł i mechanizmów degradacji laserów półprzewodnikowych" (projekt badawczy finansowany przez Unię Europejską WILD-EAST nr PZ 5.01.016, IST-1999-10787-E),
- Centrum Doskonałości "Fizyka i Technologia Nanostruktur dla Fotoniki" CEPHONA (projekt badawczy finansowany przez UE nr 5.01.024, G5MA-CT-2002-72100).

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 wytwarzane 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.

Prace prowadzone w 2003 r. koncentrowały się na dwóch typach przyrządów optoelektronicznych: półprzewodnikowych źródłach promieniowania i detektorach podczerwieni. W zakresie źródeł prace dotyczyły w głównej mierze projektowania, technologii wytwarzania i właściwości laserów półprzewodnikowych dużej mocy. Badania te obejmowały zarówno elementy dyskretne, jak i linijki laserowe. Badano również procesy generacji w laserach, których działanie jest oparte na wykorzystaniu specyficznych efektów związanych z niestabilnym rezonatorem Fabry'ego-Perota. Prace dotyczące detektorów bliskiej podczerwieni z InAs koncentrowały się na badaniu sposobów poprawy ich detekcyjności poprzez zastosowanie nowej konstrukcji oraz mikrosoczewek.

2.1. Lasery półprzewodnikowe dużej mocy

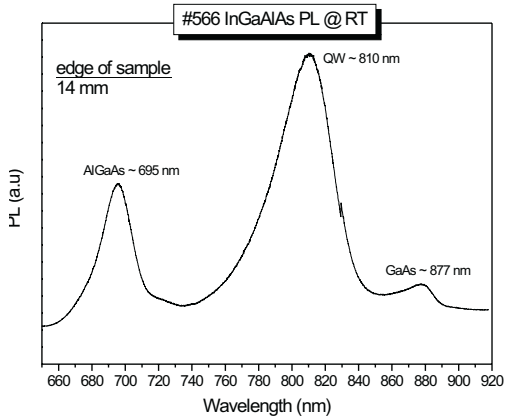
2.1.1. Technologia struktur laserowych na pasmo 808 nm

W 2003 r. prowadzono prace w dziedzinie wytwarzania struktur MBE laserów dużej mocy. Obejmowały one zagadnienia technologii materiałów półprzewodnikowych wchodzących w skład struktur, zagadnienia technologii wytwarzania testowych struktur wielowarstwowych oraz pełnych struktur laserów półprzewodnikowych. Badania skoncentrowano na strukturach laserowych z obszarem czynnym zawierającym studnię kwantową ze związku czteroskładnikowego InAlGaAs z barierami AlGaAs. Przykład struktury lasera dużej mocy na pasmo 808 nm jest przedstawiony na rys. 1.

grubość	skład	domieszkowanie
0.02 μm	GaAs:Be	$p = 1.0 \cdot 10^{19}$ cm^{-3}
0.23 μm	GaAs:Be	$p = 5.0 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}
1.20 μm	$Al_{0.40}Ga_{0.60}As$:Be	$p = 3.8 \cdot 10^{17}$ cm^{-3}
0.14 μm	$Al_{0.25}Ga_{0.75}As$ undoped	
80 Å	$In_{0.24}Al_{0.19}Ga_{0.57}$ undoped	
0.14 μm	$Al_{0.25}Ga_{0.75}As$ undoped	
1.20 μm	$Al_{0.40}Ga_{0.60}As$:Si	$n = 3.0 \cdot 10^{17}$ cm^{-3}
0.75 μm	buffer GaAs:Si	$n = 3.0 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}
	substrate GaAs:Si	$n = 2.0 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}

Rys. 1. Struktura lasera dużej mocy na pasmo 808 nm

Na rys. 2 przedstawiono przykładowe widmo luminescencji omawianej struktury. Prócz piku odpowiadającego emisji ze studni kwantowej InGaAlAs widać na nim piki od GaAs i AlGaAs.



Rys. 2. Widmo fotoluminescencji ze struktury lasera półprzewodnikowego ze studnią kwantową $In_{0,24}Al_{0,19}Ga_{0,57}As/Al_{0,25}Ga_{0,75}As$. Widmo zostało zdjęte w środku płytki. Pik 810 nm pochodzi ze studni kwantowej, pozostałe piki z innych warstw struktury.

W wyniku przeprowadzonych badań opracowano technologię MBE struktur laserów dużej mocy z obszarem czynnym zawierającym studnię kwantową ze związku czteroskładnikowego InAlGaAs z barierami AlGaAs nośników wymaganą w strukturze laserowej. Otrzymane struktury były badane metodami fotoluminescencji.

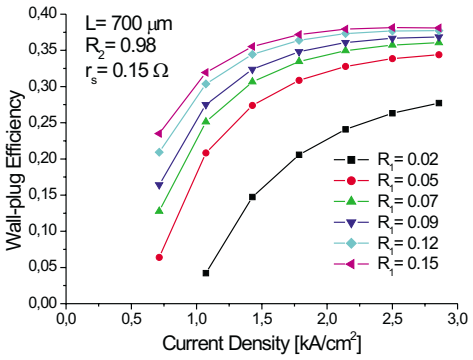
2.1.2. Pokrycia zwierciadeł w laserach półprzewodnikowych

Zwierciadła laserów półprzewodnikowych z rezonatorem Fabry'ego-Perota powstają zwykle w wyniku mechanicznego rysowania i łupania płytki półprzewodnikowej zawierającej strukturę laserową. Odłupanie chipu laserowego zachodzi zazwyczaj w płaszczyźnie {110}. Współczynnik odbicia zwierciadeł

wynika z różnicy współczynników załamania półprzewodnik-powietrze. Dla materiałów grupy A_{III}-B_V wynosi on ok. 32%. Umożliwia to uzyskanie wydajnej akcji laserowej, jednak nie pozwala na wykorzystanie pełnej mocy optycznej generowanej przez laser (połowa jest emitowana przez tylne zwierciadło) oraz na osiągnięcie maksymalnej sprawności kwantowej. Ponadto naturalne zwierciadła z odsłoniętymi interfejsami obszaru czynnego są narażone na degradację z powodu oddziaływania z otaczającą je atmosferą. Proces degradacji jest zwiększony przez zjawiska rekombinacji niepromienistej, które prowadzą do raptownego uszkodzenia zwierciadła, określanego terminem COD (Catastrophic Optical Damage).

Problemy te mogą być rozwiązane poprzez pokrycie zwierciadeł powłokami dielektrycznymi, które pozwalają uzyskać współczynniki odbicia o wymaganej wartości, a także zabezpieczają zwierciadło lasera przed wpływem otoczenia i osłabiają intensywność niepromienistej rekombinacji na jego powierzchni. Pojedyncza warstwa SiO_2 może być wykorzystana do utworzenia pokrycia AR, a do utworzenia pokrycia HR można zastosować kilka naprzemiennych warstw Si/SiO_2 o odpowiednio dobranej grubości.

Analizę pracy lasera w zależności od współczynnika odbicia przeprowadzono przy użyciu programu PICS3D firmy Crosslight. Przykładowe wyniki tych obliczeń są przedstawione na rys. 3.



Rys. 3. Zależność sprawności η_E od gęstości prądu zasilającego wykreślona dla laserów o różnej długości wnęki L, których przednie zwierciadło zostało pokryte warstwami refleksyjnymi o różnej wartości współczynnika odbicia

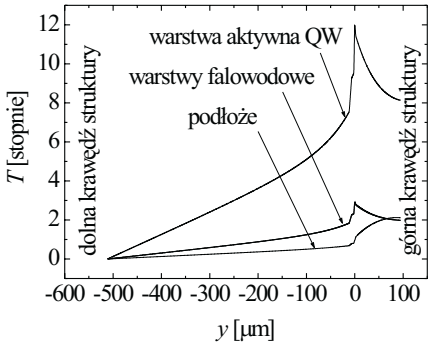
Znaczna asymetria we współczynnikach odbicia przedniego i tylnego zwierciadła lasera ze studniami kwantowymi powoduje trudności w określeniu współzależności między wzmocnieniem optycznym a stratami we wnęce lasera, a tym samym w określeniu wpływu tych parametrów na sprawność kwantową lasera.

Obliczenia wykazały, że zmiany w wielkości R_1 lub L powodują mniejsze niż oczekiwano (> 5%) zmiany w η_E, natomiast w istotny sposób wpływają na prąd progowy lasera. Wpływ ten można zmniejszyć przez odpowiednie zaprojektowanie lasera. Uzyskane wyniki upraszczają kryteria optymalizacji lasera pod kątem minimalizacji sprawności energetycznej. Ustalono, że można uzyskać zwiększenie wartości η_E o 12% poprzez pokrycie przedniego zwierciadła powłoką o odpowiednim współczynniku odbicia. Korzyść ta jednak maleje do 4,5% w przypadku laserów z rezonatorami dłuższymi od 700 μm.

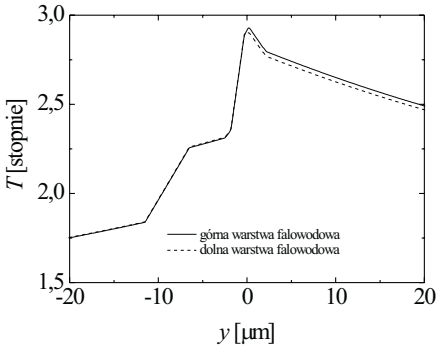
2.1.3. Właściwości termiczne laserów krawędziowych

Istotnym problemem mającym decydujący wpływ na pracę lasera jest kontrola zjawisk termicznych w przyrządzie. Na etapie projektowania przyrządu prowadzone są intensywne prace teoretyczne umożliwiające symulację tych zjawisk w laserach o różnej konstrukcji. Przykładowe wyniki dotyczą rozkładu temperatury w przekroju poprzecznym krawędziowego lasera półprzewodnikowego w płaszczyźnie równoległej do zwierciadeł.

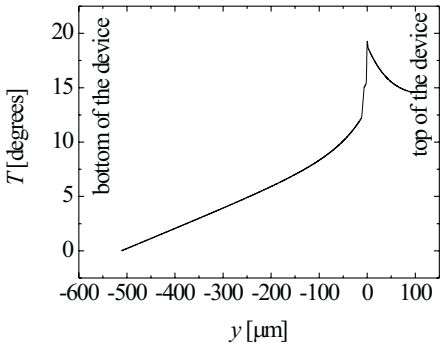
Rysunki 4–7 ilustrują transwersalne profile temperatury dla $x = 0$. Analiza wzrostu temperatury w zależności od generacji ciepła w wybranej warstwie jest przedstawiona na rys. 4. Wykres potwierdza znany fakt, że laser grzeje się głównie wskutek zjawisk zachodzących w warstwie aktywnej, czyli rekombinacji niepromienistej oraz reabsorpcji promieniowania.



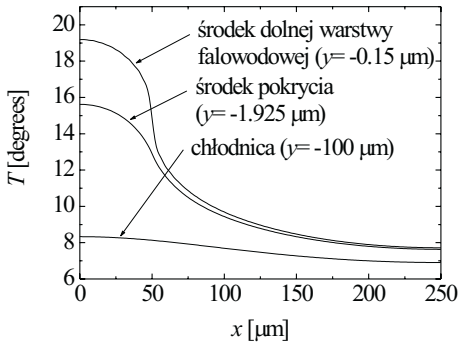
Rys. 4. Transwersalne profile ($x = 0$) wkładów do temperatury względnej lasera wynikające z generacji ciepła w różnych warstwach



Rys. 5. Powiększenie wykresów temperatury względnej wynikającej z generacji ciepła w warstwach falowodowych



Rys. 6. Całkowita temperatura względna w przekroju transwersalnym przy $x = 0$

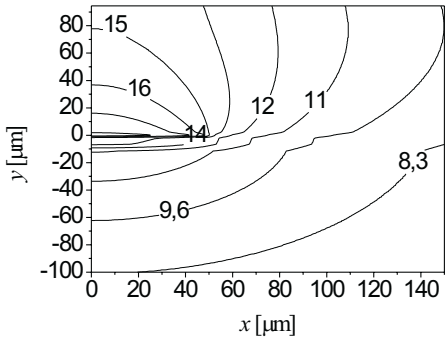


Rys. 7. Profile boczne dla temperatury względnej dla różnej wartości współrzędnej y

W analizowanym przypadku warstwy falowodowe są identyczne pod względem grubości i składu. Są one od siebie oddzielone jedynie bardzo cienką warstwą aktywną. Dlatego wkłady do temperatur pochodzące od ciepła wydzielanego w tych

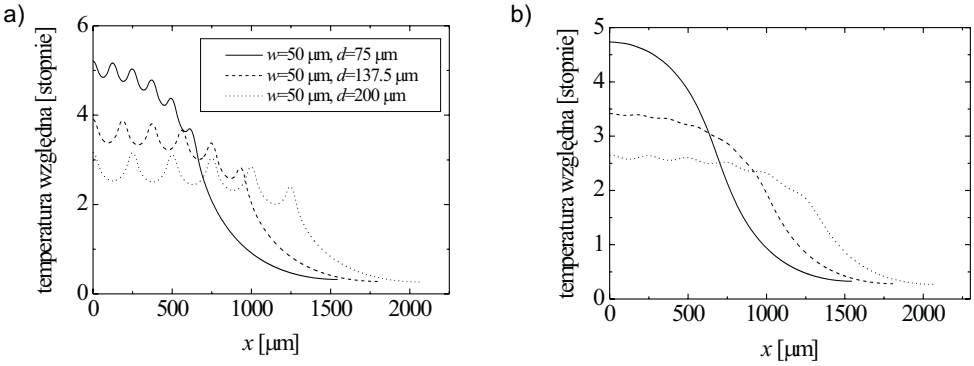
warstwach są niemal identyczne (warstwy falowodowe na rys. 4). Rozróżnienie wykresów jest możliwe jedynie na powiększeniu (rys. 5). Okazuje się, że górna warstwa falowodowa podgrzewa laser nieco bardziej niż dolna. Strumień ciepła skierowany jest głównie ku chłodnicy. Tak więc im mniejsza jest odległość danego źródła od górnego kontaktu, tym większy obserwuje się wzrost temperatury.

Całkowita temperatura względna w przekroju transwersalnym jest sumą wkładów od poszczególnych źródeł (rys. 6). Boczne profile temperatury względnej dla różnych wartości współrzędnej y są zaprezentowane na rys. 7, a całkowity rozkład temperatury względem przekroju lasera na rys. 8. Z wykresu wynika, że temperatura jest najwyższa w pobliżu warstwy aktywnej i szybko spada w kierunku chłodnicy. Mapa potwierdza zatem tezę o słabej wymianie ciepła przez kontakt typu n i kluczowej roli chłodnicy.



Rys. 8. Konturowa mapa temperatury względnej lasera w przekroju poprzecznym równoległym do jego zwierciadeł

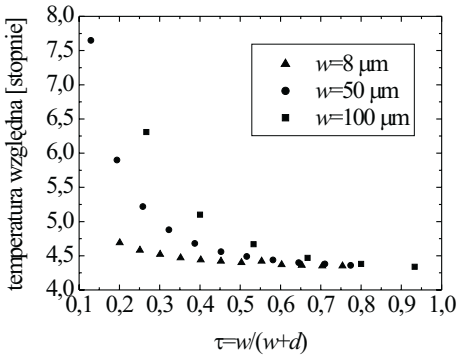
Opracowany model analityczny pozwala uwzględnić różnorodne mechanizmy wydzielania ciepła. Po niewielkich modyfikacjach model ten może być zastosowany także do linijki laserowej. Przykładowe wyniki symulacji dotyczą przyrządu składającego się z jedenastu pasków o szerokości w = 50 mm, oddalonych od siebie o odległość d. Profile boczne temperatury względnej na styku heterostruktury i chłodnicy dla linijki zamontowanej kontaktem typu p do dołu i do góry są przedstawione na rys. 9. W pierwszym przypadku warstwa aktywna, czyli główne źródło ciepła



Rys. 9. Boczny profil temperatury względnej w przekroju linijki laserowej zamontowanej kontaktem typu p do dołu (a) i do góry (b)

w przyrządzie, leży w pobliżu styku i na wykresie widać wyraźne zafalowania pochodzące od każdego ze źródeł z osobna. Przy montażu kontaktem typu p do góry odległość styku od źródeł ciepła jest znacznie większa za sprawą grubego podłoża i z tego powodu zafalowania są prawie niewidoczne.

Badania objęły termiczną analizę pracy linijki laserowej w zależności od gęstości upakowania chipów. Na rys. 10 przedstawiono wykres maksymalnej temperatury



Rys. 10. Maksymalna temperatura względna w funkcji przestrzennego współczynnika wypełnienia

względnej znalezionej w przekroju przyrządu w funkcji przestrzennego współczynnika wypełnienia zdefiniowanego jako $\tau = w/(w + d)$ przy założeniu stałej mocy. Z wykresu tego wynika, że najlepsze warunki termiczne (najniższe przyrosty temperatury) osiąga się w przypadku linijki z wieloma wąskimi paskami. Zaprojektowanie linijki z mniejszą liczbą pasków o większej szerokości prowadzi do uzyskania wyższych temperatur.

3. Detektory bliskiej podczerwieni z InGaAlAs

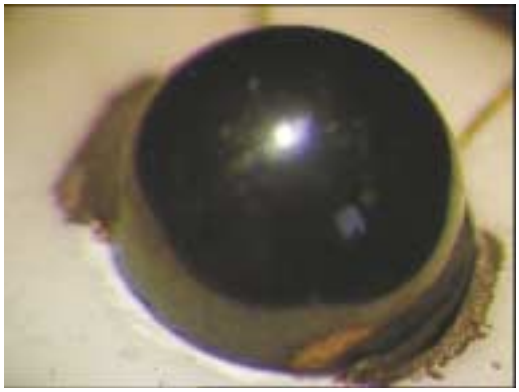
3.1. Immersja optyczna

Jednym ze sposobów poprawy parametrów fotodetektora jest zwiększenie jego optycznych rozmiarów w stosunku do rozmiarów rzeczywistych. Uzyskuje się to przez zastosowanie soczewki półsferycznej lub hiperpółsferycznej. Soczewki mogą być wykonywane z GaAs, ponieważ materiał ten jest często wykorzystywany jako podłoże dla struktur przyrządowych. GaAs jest przezroczysty dla promieniowania w szerokim zakresie widma od (0,9 ÷ 20) μm. Ponadto współczynnik załamania dla tego materiału jest stosunkowo duży i wynosi $n = 3{,}4$. Z tego powodu zastosowanie monolitycznej integracji detektora pozwala na istotną poprawę wielu parametrów detektora. W tab. 1 przedstawiono ile razy poprawiają się parametry detektora z soczewką półsferyczną i soczewką hiperpółsferyczną w porównaniu do detektora bez soczewki o takiej samej powierzchni optycznej.

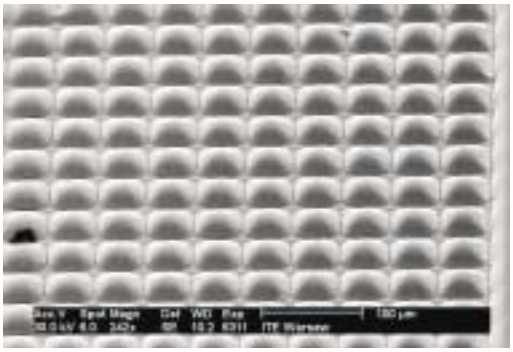
Tabela 1. Wpływ immersji optycznej na własności fotodetektora z soczewką z GaAs

Wielkość	Soczewka półkulista		Soczewka hyperpółkulista	
Rozmiar liniowy	n	(≈3,4)	n^2	(≈12)
Powierzchnia	n^2	(≈12)	n^4	(≈134)
Czułość napięciowa	n^2	(≈12)	n^4	(≈134)
Wykrywalność D^*	n	(≈3,4)	n^2	(≈12)
Pojemność elektryczna	n^2	(≈12)	n^4	(≈134)

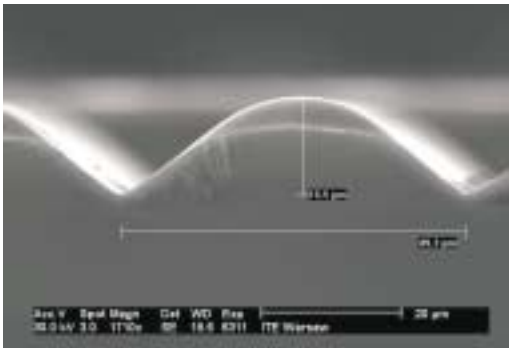
Soczewki do struktur detektorowych wyhodowanych w Zakładzie są wykonywane w firmie Vigo System. Mikrosoczewki w pojedynczych strukturach w o średnicy od 0,5 do 1 mm są wytwarzane metodą szlifowania mechanicznego połączoną z polerowaniem chemicznym. Typową mikrosoczewkę wykonaną tą techniką przedstawia rys. 11.



Rys. 11. Mikrosoczewka o średnicy 1 mm wykonana techniką szlifowania mechanicznego i polerowania chemicznego



Rys. 12. Fragment matrycy soczewek o średnicy 50 μm (widok z góry)



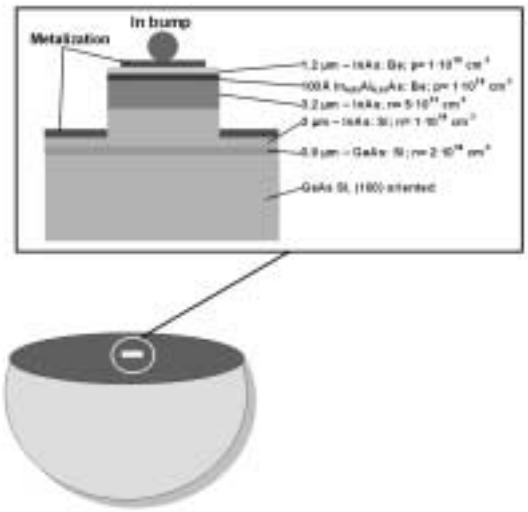
Rys. 13. Przekrój mikrosoczewki o średnicy 50 μm wykonanej metodą trawienia jonowego i chemicznego

Mikrosoczewki o średnicy mniejszej od 0,5 mm są wykonywane metodą kolejnych trawień jonowych i chemicznych na powierzchniach definiowanych fotolitograficznie. Metoda ta szczególnie dobrze nadaje się do wykonywania matryc zarówno jedno-, jak i dwuwymiarowych.

Na rys. 12 jest przedstawiony fragment matrycy mikrosoczewek uzyskany przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego, a na rys. 13 przekrój jednej mikrosoczewki. Przy module mikrosoczewek 50 μm wysokość soczewki wynosi ok. 15 μm. Ważną cechą tej techniki jest jej duża powtarzalność oraz możliwość uzyskiwania soczewek o różnym kształcie.

3.2. Konwencjonalny detektor typu p-i-n z In(Al)As/GaAs

Wszystkie wymagania stawiane fotodiodom dotyczące struktury i konstrukcji zostały wykorzystane przy opracowaniu detektora z InAs na podłożu z GaAs. Przyrząd ten jest produkowany obecnie we współpracy ITE i Vigo System. Strukturę detektora przedstawiono schematycznie na rys. 14.



Rys. 14. Struktura detektora z InAs z monolityczną soczewką immersyjną z GaAs

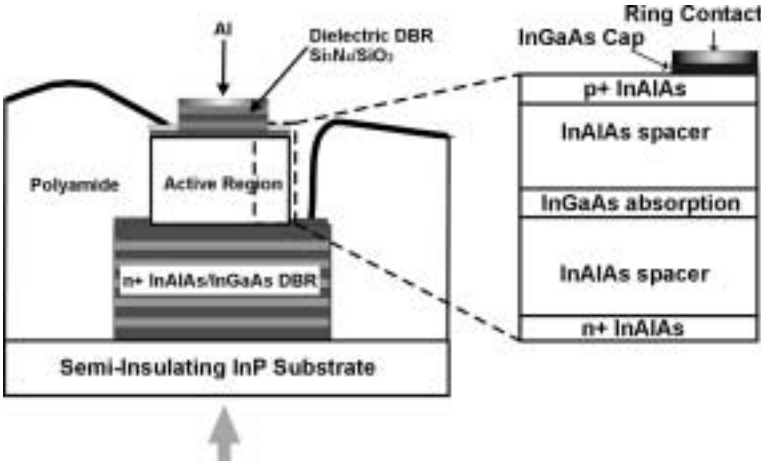
Elementem aktywnym jest oświetlana od dołu heterostruktura typu $n^+nP^+p^+$. Przy tej konstrukcji obszar aktywny może być dwa razy cieńszy, ponieważ promieniowanie po odbiciu od kontaktu metalicznego na powierzchni przechodzi drugi raz przez warstwę absorbującą. Takie rozwiązanie zapewnia dużą sprawność detektora i jednocześnie stosunkowo dużą szybkość działania ze względu na mniejszą grubość obszaru aktywnego.

Detektor z InAs charakteryzuje się dobrą wykrywalnością D^*, wynosząca w temperaturze pokojowej $7\cdot10^{10}$ cmHz$^{1/2/}$W w T =300K oraz $4\cdot10^{11}$ cmHz$^{1/2}$/W w T = = 225K. Stała czasowa RC detektorów bez polaryzacji wynosi poniżej ok. 1 ns. Przy

polaryzacji –0,2 V jest mniejsza i wynosi 100 ps. Pikosekundowa stała czasowa została uzyskana dla fotodiod o dużej optycznej powierzchni wynoszącej 1 mm^2. Było to możliwe dzięki redukcji pojemności złącza o ponad dwa rzędy wielkości i zastosowaniu immersji optycznej. Fotodiody te wykazują sprawność kwantową powyżej 60%. Jest to jedynie nieznacznie mniej aniżeli wynika z ograniczeń wskutek odbicia. Wartość sprawności może zostać poprawiona poprzez zastosowanie pokryć antyodbiciowych.

3.3. Detektor typu p-i-n z In(GaAl)As/InP z wnęką rezonansową

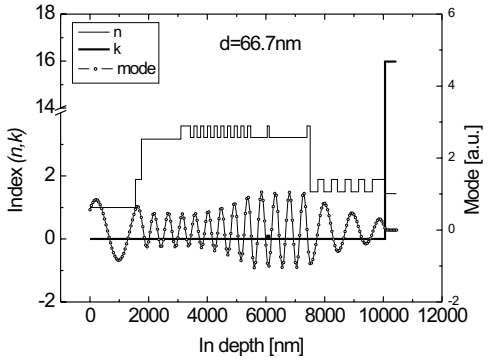
Istotną poprawę czasu odpowiedzi detektora uzyskuje się przez zastosowanie konstrukcji z wnęką rezonansową (rys. 15). Tego typu nowoczesny detektor, przeznaczony do detekcji promieniowania o długości fali λ = 1,548 μm, został opracowany w Zakładzie. Jest on oświetlany od strony podłoża z InP. Dolne zwierciadło Bragga jest wykonane z wielu par silnie domieszkowanych warstw $In_{0,52}Al_{0,48}As$ i $In_{0,53}Ga_{0,47}As$. Wnęka rezonansowa składa się z warstwy absorpcyjnej z $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ znajdującej się pomiędzy dwoma warstwami niedomieszkowanymi $In_{0,52}Al_{0,48}As$. Górne zwierciadło jest wykonane z wielu warstw dielektrycznych Si_3N_4/SiO_2 oraz cienkiej warstwy Al.



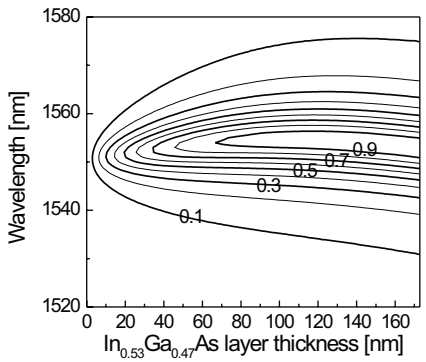
Rys. 15. Schemat detektora typu p-i-n z In(GaAl)As/InP z wnęką rezonansową

Rozkład pola elektromagnetycznego w tej strukturze jest przedstawiony na rys. 16. Struktura detektora była optymalizowana przy użyciu metody macierzy przejścia. Zmiany absorpcji w funkcji grubości warstwy aktywnej w detektorze ze zwierciadłami wykonanymi z dziewięciu par warstw InGaAs/InAlAs i pięciu par SiO_2/Si_3N_4 przedstawiono na rys. 17.

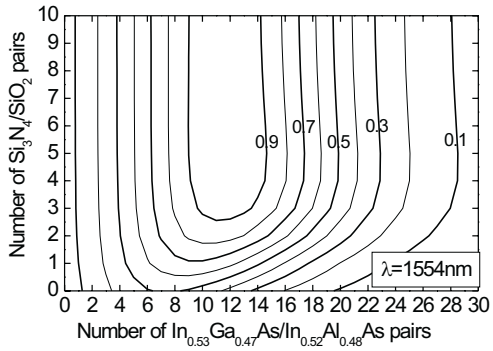
Na rys. 18 pokazano zmiany absorpcji w cienkiej warstwie aktywnej grubości 67 nm w zależności od liczby par warstw w obu zwierciadłach. Uzyskanie 90% absorpcji jest możliwe, gdy zwierciadła Bragga są wykonane z dziewięciu par



Rys. 16. Rozkład pola elektromagnetycznego w strukturze detektora In(GaAl)As/InP z wnęką rezonansową

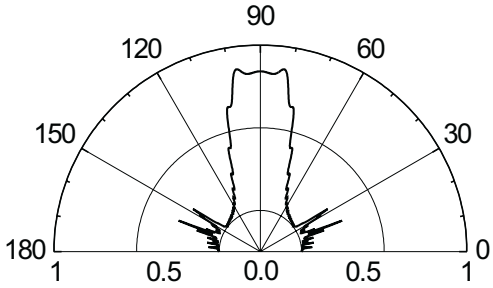


Rys. 17. Absorpcja promieniowania w strukturze detektora In(GaAl)As/InP z wnęką rezonansową



Rys. 18. Zależność absorpcji promieniowamia w warstwie grubości 67 nm od liczby par warstw w obu zwierciadłach Bragga

warstw $In_{0,52}Al_{0,48}As/In_{0,53}Ga_{0,47-x}Al_x$ oraz pięciu par warstw Si_3N_4 i SiO_2. Wynik ten jest bardzo korzystny. Ze względu na małą ilość niezbędnych warstw do wytworzenia zwierciadeł Bragga procesy technologiczne ulegają znacznemu uproszczeniu. Kierunkowa zależność absorpcji struktury In(GaAl)As/InP z wnęką rezonansową jest przedstawiona na rys. 19.



Rys. 19. Charakterystyka kierunkowa detektora In(GaAl)As/InP z wnęką rezonansową

W optymalizowanej strukturze detektor pracuje wydajnie jedynie wtedy, gdy promieniowanie pada pod kątem zbliżonym do normalnego. Sprawność detektora nie zmienia się, gdy kąt ten jest mniejszy od ok. 10°. Dla większych kątów sprawność gwałtownie maleje.

4. Współpraca międzynarodowa

W 2003 r. Zakład współpracował z następującymi ośrodkami zagranicznymi:

- National Microelectronics Research Center, Cork, Irlandia,
  przedmiot współpracy – lasery półprzewodnikowe dużej mocy;
- University Collage, Department of Physics, Cork, Irlandia,
  przedmiot współpracy – badania dynamiki laserów na kropkach kwantowych;
- Katholieke Universiteit Nijmegen, Research Institute for Materials Experimental Solid State Physics, Nijmegen, Holandia,
  przedmiot współpracy – spektroskopia optyczna struktur azotkowych;
- Department of Electrical Engineering & Computer Science Ohio University, College of Engineering and Technology, Athens, USA,
  przedmiot współpracy – 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.

PUBLIKACJE'2003

Publikacje

[P1] BĄK-MISIUK J., SHALIMOV A., KANIEWSKI J., MISIUK A., DYNOWSKA E., REGIŃSKI K., TRELA J., PRZESŁAWSKI T., HÄRTWIG J.: Stress-Induced Structural Changes in Thin InAs Layers Grown on GaAs Substrate. *Crystal Res. a. Technol*. 2003 vol. 38 nr 3–5 s. 302–306.

[P2] BUGAJSKI M.: Nanotechnologie fotoniczne. Mat. XXXVII Zjazdu Fizyków Polskich, Gdańsk, październik 2003.

[P3] DZIUBA Z., GÓRSKA M., DYBKO K., PRZESŁAWSKI T., REGIŃSKI K.: Analysis of Electrical Conduction in an n-Type GaAs Epilayer. *Appl. Phys*. A 2003 vol. 77 s. 937.

[P4] EKWIŃSKA M., WRZESIŃSKA H., CHIZHIK S. A., RYMUZA Z.: Surface Topography and Adhesive Properties of Ultrathin Superlattice Nitride Films Deposited on Silicon. *Proc.* of 2nd Int. Conf. on Global Research and Education "Inter-Academia 2003" Warszawa, 8–12.09.2003, s. 53.

[P5] GÓRSKA M., WRZESIŃSKA H., MUSZALSKI J., RATAJCZAK J., MROZIEWICZ B.: A Simple Method of Mesa Fabrication on DBR Containing Heterostructures. *Mater. Sci. in Semicond. Process.* 2003 vol. 5 s. 505.

[P6] KĄTCKI J., RATAJCZAK J., ŁASZCZ A., PHILLIPP F., MUSZALSKI J., BUGAJSKI M., CHEN J. X., FIORE A.: Electron Microscopy Study of Advanced Heterostructures for Optoelectronics. *Mater. Chem. a. Phys.* 2003 vol. 81 nr 2–3 s. 244–248.

[P7] ŁYSKO J. M.: Anisotropic Etching of Silicon Crystal Surface Free Energy Model. *J. of Sci. in Semicond. Process.* 2003 vol. 6 s. 2235.

[P8] ŁYSKO J. M.: Model anizotropii trawienia krzemowych struktur MEMS. Kraj. Konf. Elektroniki KKE'03, Kołobrzeg, 9–12.06.2003, Politechnika Koszalińska. Mat. konf. T. I s. 91.

[P9] ŁYSKO J. M., LATECKI B., NIKODEM M., GÓRSKA M., MRÓZ J., MAŁACHOWSKI M.: Silicon TCD for the Methane and Carbon Monoxide Detection. *Proc.* of the IEEE 6th Symp. "Diagnostics and Yield", Warszawa, 22–25.06.2003 (CD ROM).

[P10] ŁYSKO J. M., LATECKI B., WRZESIŃSKA H., HEJDUK K., GÓRSKA M., NIKODEM M.: Lift-Off and Anisotropic Etching Implementation in the TCD Silicon Technology. *Proc.* of the III Int. Symp. "New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation" NEET'03, Zakopane, 13–16.05.2003, s. 128–130.

[P11] ŁYSKO J. M., MRÓZ J., MAŁACHOWSKI M., LATECKI B., NIKODEM M.: Gas Flow Detection with the Silicon TCD Detector. *Proc.* of the III Int. Symp. "New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation" NEET'03, Zakopane, 13–16.05.2003, s. 125–127.

[P12] ŁYSKO J. M., MRÓZ J., MAŁACHOWSKI M., LATECKI B., NIKODEM M., WRZESIŃSKA H., BUDZYŃSKI T.: Detekcja gazów kopalnianych z użyciem TCD. Kraj. Konf. Elektroniki KKE'03, Kołobrzeg, 9–12.06.2003, Politechnika Koszalińska. Mat. konf. T. II s. 597–601.

[P13] MROZIEWICZ B.: Półprzewodnikowe diody elektroluminescencyjne (LED) Część I. HB-LED diody o wysokiej jaskrawości. *Elektronizacja* 2003 nr 5 s. 29.

[P14] MROZIEWICZ B.: Półprzewodnikowe diody elektroluminescencyjne (LED) Część II. Rewolucja w optoelektronice – LED emitujące światło niebieskie. *Elektronizacja* 2003 nr 6 s. 10.

[P15] MROZIEWICZ B.: Półprzewodnikowe diody elektroluminescencyjne (LED) Część III. Diody LED emitujące światło białe. *Elektronizacja* 2003 nr 7 s. 7.

[P16] MROZIEWICZ B., ZBROSZCZYK M., BUGAJSKI M.: Analysis of Threshold Current and Wall-Plug Efficiency of Diode Lasers with Asymmetric Facet Reflectivity. *Optic. a. Quantum Electron.* (w druku).

[P17] MROZIEWICZ B., ZBROSZCZYK M., BUGAJSKI M.: Power Efficiency of Diode Lasers with Asymmetric Mirror Losses. *Proc. SPIE* 2003 vol. 5230 s. 66.

[P18] PIJANOWSKA D. G., REMISZEWSKA E., ŁYSKO J. M., JAŹWIŃSKI J., TORBICZ W.: Immobilisation of Bioreceptors for Microreactors. *Sensors & Actuators* 2003 vol. 91 s. 152.

[P19] PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., BARCZ A., GOŁASZEWSKA K., WRZESIŃSKA H., PIOTROWSKI T. T., DYNOWSKA E., JAKIEŁA R.: Stable Ohmic Contacts on GaAs and GaN Devices for High Temperatures. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 2003 vol. 743 s. V11.57.1-6.

[P20] PIOTROWSKI J., MUCHA H., ORMAN Z., PAWLUCZYK J., RATAJCZAK J., KANIEWSKI J.: Refractive GaAs Microlenses Monolithically Integrated with InGaAs and HgCdTe Photodetectors. *Proc. SPIE* 2003 vol. 5074 s. 1–8.

[P21] PISARKIEWICZ T., MAZIARZ W., KOSZUR J., JAŹWIŃSKI J., ŁYSKO J. M.: Gas Microsensor Based on Semiconductors Deposited onto Silicon Membrane. *Proc.* of the 27th Int. Conf. and Exhib. IMAPS - Poland 2003, Podlesice-Gliwice, 16–19.09.2003, s. 227–230.

[P22] PIWOŃSKI T., WAWER D., BUGAJSKI M., MROZIEWICZ B., DEICHSEL E., CORBETT B.: Thermoreflectance Study of Facet Heating in High Power Lasers with Dry-Etched Mirrors. *IEEE J. Quantum Electron*. (zgł.).

[P23] PRZESŁAWSKI T. R., WOLKENBERG A., REGIŃSKI K., KANIEWSKI J.: Sensitive InGaAs/InP (SI) Magnetic Field Sensors. *phys. stat. sol.* (c) (zgł.).

[P24] REGIŃSKI K., KANIEWSKI J., KOSIEL K., PRZESŁAWSKI T., BĄK-MISIUK J.: MBE Growth and Characterization of InAs/GaAs for Infrared Detectors. *phys. stat. sol.* (a) (zgł.).

[P25] SARZAŁA R. P., MENDLA P., WASIAK M., MAĆKOWIAK P., BUGAJSKI M., NAKWASKI W.: Comprehensive Self-Consistent Three-Dimensional Simulation of an Operation of GaAs-Based

Oxide-Confined 1,3 μm Quantum-Dot (InGa)As/GaAs Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. *Optic. a. Quantum Electron*. 2003 vol. 35 s. 676–692.

[P26] SARZAŁA R. P., WASIAK M., CZYSZANOWSKI T., BUGAJSKI M., NAKWASKI W.: Threshold Simulation of 1,3 μm Oxide-Confined In-Plane Quantum-Dot (InGa)As/GaAs Lasers. *Optic. a. Quantum Electron.* 2003 vol. 35 s. 675.

[P27] SZYMAŃSKI M.: Theoretical Analysis of Broad-Area Semiconductor Lasers with Laterally Shifted Modal Reflectors. *Optic. a. Quantum Electron*. 2003 vol. 35 s. 147.

[P28] SZYMAŃSKI M., ZBROSZCZYK M., MROZIEWICZ B.: The Influence of Different Heat Sources on Temperature Distributions in Broad-Area Diode Lasers and 1-D Laser Arrays. *Proc. SPIE* (zgł.)

[P29] WASIAK M., BUGAJSKI M., SARZAŁA R. P., MAĆKOWIAK P., CZYSZANOWSKI T., NAKWASKI W.: Output Power Saturation in InAs/GaAs Quantum Dot Lasers. *phys. stat. sol.* 2003 vol. 0 nr 4 s. 1351–1354.

[P30] WOLKENBERG A., PRZESŁAWSKI T., KANIEWSKI J., REGIŃSKI K.: Experimental Confirmation by Galvanomagnetic Methods of the Complex Transport Model in Layers of $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ Deposited by MBE on SI-InP. *J. of Phys. a. Chem. of Solids* 2003 vol. 64 s. 7.

[P31] WRZESIŃSKA H., EKWIŃSKA M., MISIAK M., CHIZHIK S. A., RYMUZA Z.: Surface Morphology, Nanomechnical and Tribological Behaviours of Ultrathin Nitride Superlattice Films. *J. of Alloys a. Comp.* (zgł.).

[P32] WRZESIŃSKA H., ILKA L., WAWER D., HEJDUK K., KUDŁA A., BUGAJSKI M., ŁUSAKOWSKA E.: Investigation of Indium Thin Oxide (ITO) Films for the VCSEL Laser with Dielectric Bragg Reflectors. *phys. status sol.* (zgł.).

[P33] WRZESIŃSKA H., MAŁYSKA K., RYMUZA Z.: Characterization of Surface of TiN/CrN and TiN/NbN Superlattices Deposited on Microelectronic Materials Using Atomic Force Microscopy. *Phys. a. Chem. of Solid St.* (zgł.)

[P34] WRZESIŃSKA H., RATAJCZAK J., STUDZIŃSKA K., KĄTCKI J.: Transmission Electron Microscopy of Hard Ceramic Superlattices Applied in Silicon Micro Electro Mechanical Systems. *Mater. Chem. a. Phys.* 2003 vol. 81 nr 2–3 s. 265–268.

[P35] WRZESIŃSKA H., RYMUZA Z., MAŁYSKA K.: Nanomechanical Behaviour of Ultrathin Nitride Films Deposited on Silicon. *ZEM* (w druku).

[P36] WYROBEK J. T., MALYSKA K., WRZESIŃSKA H., RYMUZA Z.: Surface Topography and Nanomechanical-Tribological Behaviour of Ultrathin Nitrides Films PVD Deposited on Silicon without and with SiO_2 or Si_3N_4 Ultrathin Films as Underlayer Material. *Z. für Metallkunde* (zgł.).

[P37] YASTRUBCHAK O., BĄK-MISIUK J., ŁUSAKOWSKA E., KANIEWSKI J., WOSIŃSKI T., SHALIMOV A., REGIŃSKI K., KUDŁA A.: Strain Release in $InGaAs/In_xAl_{1-x}As/InP$ Heterostructures. *Physica* B 2003 vol. 340–342 s. 1082–1085.

[P38] ZBROSZCZYK M., BUGAJSKI M.: Design Optimization of InGaAlAs/GaAs Single and Double Quantum Well Lasers Emitting at 808 nm. *Proc. SPIE* 2003 (w druku).

Konferencje

[K1] ARABASZ S., ADAMOWICZ B., PETIT M., GRUZZA B., PIWOŃSKI T., BUGAJSKI M., HASEGAWA H.: Room Temperature Photoluminescence Studies of Nitrided InP(100) Surfaces. III Int. Workshop on Semiconductor Surface Passivation, Ustroń,14–17.09.2003 (plakat).

[K2] BUGAJSKI M.: Nanotechnology for High Power Semiconductor Lasers. Euronanoforum 2003, Triest, Włochy , 8–12.12.2003 (ref.).

[K3] BUGAJSKI M., OCHALSKI T., PIWONSKI T., WAWER D., MROZIEWICZ B., CORBETT B., DEICHSEL E.: Thermoreflectance Study of Facet Heating in High Power Semiconductor Lasers. Fourth Seminar – Nanostructures: Research, Technology and Applications, Bachotek, 21–24.05.2003 (ref.).

[K4] BUGAJSKI M., OCHALSKI T., PIWONSKI T., WAWER D., MROZIEWICZ B., CORBETT B., DEICHSEL E.: Thermoreflectance Study of Facet Heating in High Power Semiconductor Lasers. Int. Workshop on GaAs Based Lasers for the 1.3 to 1.5 μm Wavelength Range, Wrocław, 24–26.04.2003 (ref.).

[K5] KANIEWSKI J.: Detektory podczerwieni z InGaAs: fizyka i technologia. XVII Szkoła Optoelektroniki "Fotowoltaika – ogniwa słoneczne i detektory", Kazimierz Dolny, Polska, 13–16.10.2003 (ref. zapr.).

[K6] KOSIEL K., REGIŃSKI K., KANIEWSKI J., PRZESŁAWSKI T.: MBE Technology of InAs Layers Grown on GaAs Substrates. Fourth Seminar – Nanostructures: Research, Technology and Applications, Bachotek, 21–24.05.2003 (kom.).

[K7] ŁYSKO J. M.: Model anizotropii trawienia krzemowych struktur MEMS. II Kraj. Konf. Elektroniki KKE'03, Kołobrzeg, 9–12.06.2003 (ref.).

[K8] ŁYSKO J. M., LATECKI B., NIKODEM M., GÓRSKA M., MRÓZ J., MAŁACHOWSKI M.: Silicon TCD for the Methane and Carbon Monoxide Detection. IEEE 6th Symp. "Diagnostics and Yield", Warszawa, 22–25.06.2003 (plakat).

[K9] ŁYSKO J. M., LATECKI B., NIKODEM M.: Gas Micro-Flow-Metering with the In-Channel Pt Resistors. IEEE 6th Symp. "Diagnostics and Yield", Warszawa, 22–25.06.2003 (plakat).

[K10] ŁYSKO J. M., LATECKI B., WRZESIŃSKA H., HEJDUK K., GÓRSKA M., NIKODEM M.: Lift-Off and Anisotropic Etching Implementation in the TCD Silicon Technology. III Int. Symp. "New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation" NEET'03, Zakopane, 13–16.05.2003 (ref.).

[K11] ŁYSKO J. M., MRÓZ J., MAŁACHOWSKI M., LATECKI B., NIKODEM M., WRZESIŃSKA H., BUDZYŃSKI T.: Detekcja gazów kopalnianych z użyciem TCD. II Kraj. Konf. Elektroniki KKE'03, Kołobrzeg, 9–12.06.2003 (ref.).

[K12] ŁYSKO J. M., MRÓZ J., MAŁACHOWSKI M., LATECKI B., NIKODEM M.: Gas Flow Detection with the Silicon TCD Detector. III Int. Symp. "New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation", Zakopane, Poland, 13–16.05.2003 (plakat).

[K13] PAPIS E., HEJDUK K., MUSZALSKI J., WAWER D.: Dielectric Mirrors Deposite by PECVD for Photonic Devices. Europ. Vacuum Congr., Berlin, Niemcy, 23–26.06.2003 (plakat).

[K14] PIOTROWSKI J., MUCHA H., ORMAN Z., PAWLUCZYK J., RATAJCZAK J., KANIEWSKI J.: Refractive GaAs Microlenses Monolithically Integrated with InGaAs and HgCdTe Photodetectors. AeroSense 2003, Orlando, USA, 21–27.04.2003 (ref.).

[K15] PIERSCINSKI K., SZLACHTA K., ZIELINSKI M., BUGAJSKI M.,MROZIEWICZ B., PIWONSKI T., WAWER D., NIKODEM M., FRELAK A.: Spatial and Spectral Properties of Radiation Emitted by High Power Semiconductor Lasers. Fourth Seminar – Nanostructures: Research, Technology and Applications, Bachotek, 21–24.05.2003 (plakat).

[K16] PIWOŃSKI T., WAWER D., SZYMAŃSKI M., MROZIEWICZ B., BUGAJSKI M.: Study of Facet Heating and Degradation Mechanisms in Etched Facet Lasers. Ultrabright-Wild Workshop, Würtzburg, Niemcy, 17.01.03 (ref.).

[K17] PRZESŁAWSKI T., WOLKENBERG A., KANIEWSKI J., REGIŃSKI K.: Sensitive $In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP$ (SI) Magnetic Field Sensors. E-MRS'2003 Fall Meet., Warszawa, 15–19.09.2003 (plakat).

[K18] REGIŃSKI K., KANIEWSKI J., KOSIEL K., PRZESŁAWSKI T., BĄK-MISIUK J.: MBE Growth and Characterization of InAs/GaAs for Infrared Detectors, E-MRS'2003 Fall Meet., Warszawa, 15–19.09.2003 (plakat).

[K19] SAJEWICZ P.: Semiconductor Lasers. Fourth Seminar – Nanostructures: Research, Technology and Applications, Bachotek, 21–24.05.2003 (ref.).

[K20] SARZAŁA R. P., MENDLA P., WASIAK M., MAĆKOWIAK P., NAKWASKI W., BUGAJSKI M.: Three-Dimensional Comprehensive Self-Consistent Simulation of a Room Temperature Continuous-Wave Operation of GaAs-Based 1,3 μm Quantum-Dot (InGa)As/GaAs Vertical Cavity Surface Emitting Lasers, ICTON 2003, Miedzeszyn (ref.).

[K21] SZERLING A., SAJEWICZ P., PIWOŃSKI T., MUSZALSKI J., MROZIEWICZ B., BUGAJSKI M.: AR/HR Dielectric Coatings and Their Influence on InGaAs/GaAs (980nm) Semiconductor Lasers. Fourth Seminar – Nanostructures: Research, Technology and Applications, Bachotek, 21–24.05.2003 (ref.).

[K22] SZYMAŃSKI M.: Heat Transport in High Power Lasers: Simulation and Experiment. 1st CEPHONA Workshop, Warszawa, 14.11.2003 (ref. zapr.).

[K23] SZYMAŃSKI M., PIWOŃSKI T., WAWER D., MROZIEWICZ B., BUGAJSKI M.: Temperature Distributions in Broad Contact Diode Lasers and 1-D Laser Arrays. Int. Workshop on GaAs Based Lasers for the 1.3 to 1.5 μm Wavelength Range, Wrocław, 24–26.04.2003 (plakat).

[K24] SZYMAŃSKI M., ZBROSZCZYK M., MROZIEWICZ B.: The Influence of Different Heat Sources on Temperature Distributions in Broad-Area Diode Lasers and 1-D Laser Arrays Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL'2003), Alushta, Ukraina, 16–20.09.2003 (plakat).

[K25] WAWER D., SZERLING A., PIWOŃSKI T., HEJDUK K., MUSZALSKI J., KĄTCKI J.: Reflectance Study of SiO_2/Si_3N_4 Dielectric Bragg Reflectors for Vertical Cavity Surface Emitting Lasers. Fourth Seminar – Nanostructures: Research, Technology and Applications, Bachotek, 21–24.05.2003 (ref.).

[K26] WAWER D., PIWONSKI T., WÓJCIK A., OCHALSKI T., MROZIEWICZ B., BUGAJSKI M.: Spectroscopic Techniques for Mapping of Strain and Temperatute in Laser Bar. 1st CEPHONA Workshop, Warszawa, 14.11.2003 (ref. zapr.).

[K27] WĘGRZECKI M., GRABIEC P., BAR J., WĘGRZECKA I., GRODECKI R., SŁYSZ W., USZYŃSKI A., GRYNGLAS M., KRZEMIŃSKI S., BUDZYŃSKI T., ZABOROWSKI M., PANAS A., STUDZIŃSKA K., WRZESIŃSKA H., CIEŻ M., GANDURSKA J., MAREK A.: Prace nad krzemowymi monokrystalicznymi ogniwami fotowoltaicznymi prowadzone w ITE. XVII Szkoła Optoelektroniki "Fotowoltaika – ogniwa słoneczne i detektory", Kazimierz Dolny, 13–16.10.2003 (plakat).

[K28] WRZESIŃSKA H., EKWIŃSKA M., MISIAK M., CHIZHIK S. A., RYMUZA Z.: Surface Morphology, Nanomechnical and Tribological Behaviours of Ultrathin Nitride Superlattice Films. E-MRS 2003 Fall Meet., Warszawa, 15–19.09.2003 (plakat).

[K29] WRZESIŃSKA H., ILKA L., WAWER D., HEJDUK K., KUDŁA A., BUGAJSKI M., ŁUSAKOWSKA E.: Investigation of Indium Thin Oxide (ITO) Films for the VCSEL Laser with Dielectric Bragg Reflectors. E-MRS 2003 Fall Meet., Warszawa, 15–19.09.2003 (plakat).

[K30] WRZESIŃSKA H., MAŁYSKA K., RYMUZA Z.: Characterization of Surface of TiN/CrN and TiN/NbN Superlattices Deposited on Microelectronic Materials Using Atomic Force Microscopy. III Int. Symp. "New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation" NEET'03, Zakopane, 13–16.05.2003 (plakat).

[K31] WRZESIŃSKA H., RYMUZA Z., MAŁYSKA K.: Nanomechanical Behaviour of Ultrathin Nitride Films Deposited on Silicon. XXVI Szkoła Tribologiczna "Problemy Tribologiczne w Przyrodzie i Technice", Niedzica, 16–19.09.2003 (ref.).

[K32] WRZESIŃSKA H., RYMUZA Z., MISIAK M., MAŁYSKA K.: Nanomechanical and Wear Behaviour of Ultrathin Superlattice Films. 14th Int. Conf. on Wear of Materials, Waszyngton, USA, 30.03–3.04.2003 (plakat).

[K33] WYROBEK J. T., MALYSKA K., WRZESIŃSKA H., RYMUZA Z.: Surface Topography and Nanomechanical-Tribological Behaviour of Ultrathin Nitrides Films PVD Deposited on Silicon without and with SiO_2 or Si_3N_4 Ultrathin Films as Underlayer Material. Int. Conf. on Tribology, Hückelhoven, Niemcy, 23–25.09.2003.

[K34] YASTRUBCHAK O., BĄK-MISIUK J., ŁUSAKOWSKA E., KANIEWSKI J., DOMAGAŁA J. Z., WOSIŃSKI T., SHALIMOV A., REGIŃSKI K., KUDŁA A.: Strain Release in InGaAs/$In_xAl_{1-x}As$/InP heterostructures. 22nd Int. Conf. on Defects in Semiconductors, Aarhus, Dania, 28.07–1.08.2003 (plakat).