



ZAKŁAD TECHNOLOGII STRUKTUR PÓŁPRZEWODNIKOWYCH DLA FOTONIKI

Kierownik: prof. dr hab. inż. Anna PIOTROWSKA
e-mail: ania@ite.waw.pl, tel. (0-prefiks-22) 548 79 40

Zespół: mgr Krystyna Gołaszewska, e-mail: krystyg@ite.waw.pl,
dr inż. Marek Guziewicz, e-mail: margu@ite.waw.pl,
mgr inż. Paweł Jagodziński, e-mail: jagodzin@ite.waw.pl,
dr inż. Eliana Kamińska, e-mail: eliana@ite.waw.pl,
mgr inż. Renata Kruszka, e-mail: kruszka@ite.waw.pl,
mgr inż. Radosław Łukasiewicz, e-mail: rlukasi@ite.waw.pl,
dr Ewa Papis-Polakowska, e-mail: papis@ite.waw.pl,
dr inż. Tadeusz T. Piotrowski, e-mail: tpiotr@ite.waw.pl,
mgr inż. Paweł Skoczylas, e-mail: pskoczy@ite.waw.pl,
mgr inż. Artur Szczęsny e-mail: szczesny@ite.waw.pl,
mgr inż. Lidia Ilka, mgr inż. Ireneusz Wójcik

1. Wprowadzenie

W 2005 r. Zakład Technologii Struktury Półprzewodnikowych dla Fotoniki realizował następujące projekty badawcze:

- „Technologia funkcjonalnych struktur cienkowarstwowych dla przyrządów półprzewodnikowych III-V”. Etap I (projekt statutowy nr 1.03.045),
- “Wytwarzanie i optymalizacja kontaktu omowego typu p do GaN” DENIS (projekt EC nr G5RD-CT-2001-00566),
- „Nanostrukturalne czujniki fotonowe” NANOPHOS (projekt EC nr IST-2001-39112),
- „Hybrydowe podłoża dla konkurencyjnej elektroniki wysokiej częstotliwości” HYPHEN (projekt EC nr FP-6 IST 027455),
- Centrum Doskonałości “Fizyka i Technologia Nanostruktur dla Fotoniki” CEPHONA (projekt badawczy nr G5MA-CT-2002-72100),
- „Tranzystory polowe AlGaIn/GaN nowej generacji dla elektroniki dużej mocy i wysokiej częstotliwości” (projekt badawczy nr 1359/T11/2004/26),
- „Półprzewodnikowe fotoogniwa GaSb/In(Al)GaAsSb do zastosowań w przyrządach termofotowoltaicznych” (projekt badawczy nr 1360/T11/2004/26),
- „Detektory promieniowania THz oparte na mikrometrowych tranzystorach polowych” (projekt badawczy we współpracy z Instytutem Fizyki Doświadczalnej UW),
- „Wytwarzanie i wykrywanie stanów splątanych w nanostrukturach półprzewodnikowych” (PBZ/KBN/044/P03/2001 we współpracy z Instytutem Fizyki PAN i Instytutem Fizyki Doświadczalnej UW).

Zakład świadczył również usługi badawcze i produkcyjne na zamówienie odbiorców zewnętrznych oraz kontynuował działalność edukacyjną we współpracy z Instytutem Mikroelektroniki i Optoelektroniki PW.

Odrębną grupę działalności stanowiły prace recenzenckie na rzecz Komisji Europejskiej w 6. Programie Ramowym, w części Human Resources & Mobility.

2. Wyniki działalności naukowo-badawczej

Główny wysiłek badawczy Zakładu jest skoncentrowany na opracowywaniu i optymalizacji metod wytwarzania oraz obróbki technologicznej funkcjonalnych struktur cienkowarstwowych dla nowoczesnych przyrządów półprzewodnikowych z materiałów na bazie GaN, GaSb i GaAs. Przedmiotem badań są cienkowarstwowe struktury z materiałów metalicznych i dielektrycznych pełniące funkcje kontaktów omowych, kontaktów prostujących, elektrod przezroczystych, powłok przeciwodblaskowych oraz powłok pasywacyjnych. Optymalizacja ich parametrów jest prowadzona pod kątem zastosowania w przyrządach narażonych na działanie podwyższonej temperatury (elektronika wysokotemperaturowa, optoelektronika zastosowań specjalnych).

Program badań w 2005 r. obejmował następujące zagadnienia:

- nowe materiały tlenkowe dla optoelektroniki, mikroelektroniki i termofotowoltaiki, a w szczególności inżynierię domieszkowania ZnO oraz przezroczyste tlenki przewodzące jako elektrody w przyrządach fotonicznych i fotowoltaicznych;
- nowe typy metalizacji półprzewodnikowych struktur III-V dla elektroniki i optoelektroniki wysokotemperaturowej.

Nieodłącznym elementem działalności zespołu było doskonalenie metod litografii i charakteryzacji opracowywanych struktur cienkowarstwowych oraz rozwój zaplecza technologicznego.

2.1. Nowe materiały tlenkowe

2.1.1. Inżynieria domieszkowania ZnO

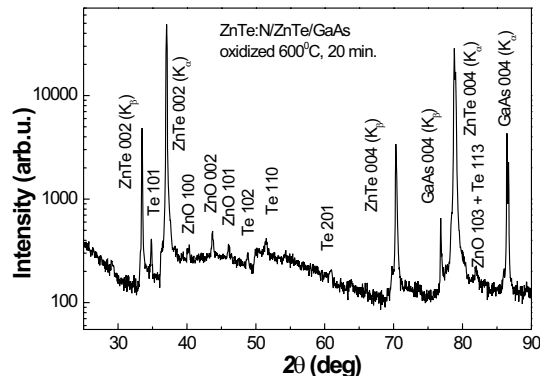
Badania nad domieszkowaniem ZnO na typ p

Przyjęta metoda domieszkowania ZnO na typ p polega na utlenianiu termicznym związku cynku zawierającego dużą koncentrację domieszki akceptorowej. W badaniach zapoczątkowanych w poprzednim projekcie statutowym materiał wyjściowy stanowiły warstwy Zn_3N_2 osadzone metodą reaktywnego magnetronowego rozpylania katodowego cynku. Wykazano, że metoda ta umożliwia wytwarzanie cienkich warstw ZnO domieszkowanych azotem na poziomie $\sim 5 \cdot 10^{20}$ at./ cm^3 . Ponadto dowiedziono, że zanieczyszczenie wodorem wyjściowego Zn_3N_2 stanowi zasad-

niczą przeszkodę w osiągnięciu efektywnego przewodnictwa dziurowego w ZnO. Dzięki obniżeniu koncentracji wodoru poniżej $5 \cdot 10^{19}$ at./cm³ otrzymano materiał typu p o koncentracji dziur $\sim 5 \cdot 10^{17}$ cm⁻³ i ruchliwości ~ 10 cm²/V.s.

W obecnym etapie badań zastosowano materiał wyjściowy wolny od zanieczyszczeń wodorem. Jest to epitaksjalny ZnTe:N hodowany w warunkach wysokiej próżni metodą epitaksji z wiązek molekularnych (MBE). ZnTe jest związkiem półprzewodnikowym II-VI o strukturze blendy cynkowej. Domieszkowanie azotem pozwala wytworzyć materiał typu p o koncentracji swobodnych nośników ładunku sięgającej $5 \cdot 10^{19}$ cm⁻³. Procesy MBE cienkich warstw ZnTe prowadzono w Środowiskowym Laboratorium „Fizyka i wzrost kryształów niskowymiarowych” Instytutu Fizyki PAN. Na monokrystalicznych podłożach SI ZnTe i SI GaAs o orientacji (001) w pierwszej kolejności hodowano nie-domieszkowany, wysokooporowy bufor ZnTe, a następnie warstwy ZnTe domieszkowane atomowym azotem ze źródła plazmowego w.c.z. Procesy utleniania prowadzono w temperaturze 600°C w atmosferze O₂. W celu utlenienia warstwy ZnTe grubości 0,15 ÷ 1,0 μm przyjęto czas wygrzewania w 600°C od 4 do 25 min.

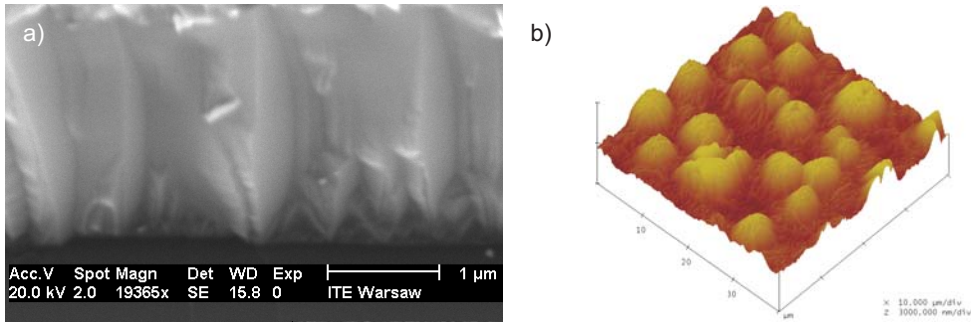
Analiza rentgenowska utlenionych warstw ZnTe:N (rys. 1) wykazała obecność polikrystalicznego ZnO o preferowanej orientacji (001) oraz śladowe ilości metalicznego Te. Ziarna ZnO charakteryzują się strukturą kolumnową o długości równej



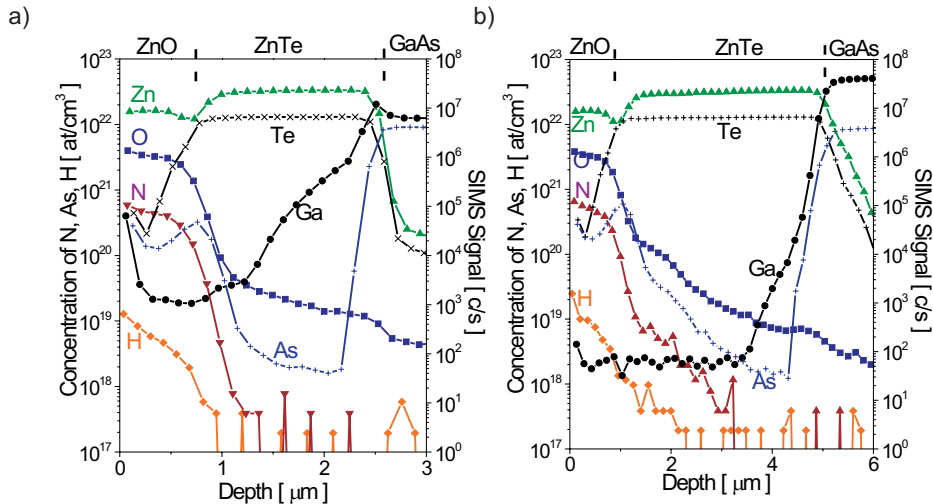
Rys. 1. Dyfraktogram rentgenowski (promieniowanie FeK_α) utlenionej struktury ZnTe:N/ZnTe/GaAs

grubości warstwy ZnO (rys. 2a). W wyniku transformacji kubicznego ZnTe w heksagonalny ZnO powierzchnia utlenionych warstw staje się nierówna z chropowatością $rms = 200 \div 500$ nm w zależności od czasu trwania obróbki termicznej (rys. 2b).

Na rys. 3 przedstawiono głębokościowe profile składu dwóch utlenionych próbek ZnTe:N/ZnTe/GaAs różniących się grubością warstwy buforowej ZnTe. Z powodu dużej chropowatości powierzchni oraz nieco różniącej się prędkości trawienia warstw ZnO, ZnTe i GaAs w trakcie pomiaru SIMS przy interpretacji wyników należy wziąć pod uwagę „rozmycie” międzypowierzchni ZnO/ZnTe i ZnTe/GaAs. Przybliżone położenie tych międzypowierzchni zaznaczono na wykresach przerywaną linią. Średnia koncentracja azotu wbudowanego do ZnO wynosi $5 \cdot 10^{20}$ at./cm³. Analiza SIMS ujawniła ponadto znaczną outdyfuzję As z GaAs w kierunku między-



Rys. 2. Mikrostruktura ZnO typu p: a) obraz SEM przekroju poprzecznego warstwy ZnO typu p, b) obraz AFM powierzchni ZnO



Rys. 3. Profile głębokościowe SIMS utlenionych struktur ZnTe:N/ZnTe/GaAs dla różnych grubości bufora ZnTe (d_{ZnTe}): a) $d_{\text{ZnTe}} = 2,5 \mu\text{m}$, b) $d_{\text{ZnTe}} = 5 \mu\text{m}$

powierzchni ZnO/ZnTe z maksimum umiejscowionym w ZnO. Średnia koncentracja As w ZnO jest porównywalna z koncentracją azotu. Należy zauważyć, że podobną do As migrację Ga w kierunku powierzchni obserwowano tylko w przypadku cienkich warstw buforowych (rys. 3a). Przy grubości przekraczającej $3 \mu\text{m}$ Ga pochodzący z dekomponowanego GaAs był akumulowany w ZnTe przy międzypowierzchni z GaAs (rys. 3b). Aby uzyskać pewność, że migracja As nie zmodyfikowała właściwości bufora ZnTe, przeprowadzono dodatkowe analizy SIMS i pomiary przewodnictwa bufora po strawieniu warstwy ZnO. Nie stwierdzono obecności As w ZnTe, jak również nie uległy zmianie właściwości izolacyjne ZnTe.

Pomiary SIMS pozwoliły zlokalizować wytrącenia Te w warstwie ZnO. Ponieważ transformacja ZnTe w ZnO postępuje od powierzchni w głąb materiału, więc Te sublimujący w początkowej fazie procesu, po uformowaniu się ciągłej warstwy ZnO, jest pułapowany w ZnO.

Warstwy ZnO wytworzone na strukturach z grubym buforem na podłożu GaAs wykazywały przewodnictwo typu p z koncentracją dziur powyżej 10^{19} cm^{-3} . Warstwy ZnO typu p, otrzymane po utlenieniu podobnych warstw ZnTe:N wyhodowanych na podłożu ZnTe, charakteryzowały się $\sim 1,5$ rzędu niższą koncentracją dziur. Aby dokładniej zbadać rolę As jako domieszki akceptorowej w ZnO, utleniono niedomieszkowane warstwy ZnTe grubości $4 \div 5 \mu\text{m}$ wyhodowane na podłożu GaAs. Otrzymane warstwy podobnie jak poprzednio charakteryzowały się koncentracją dziur przewyższającą 10^{19} cm^{-3} , co dowodzi, że domieszką odpowiedzialną za bardzo wysokie przewodnictwo dziurowe jest As.

Ponieważ urządzenie MBE wyposażone jest również w komórkę Mn, istnieje możliwość wyhodowania struktur ZnTe:N:Mn. Okazuje się, że domieszkowanie Mn powoduje obniżenie koncentracji dziur w ZnO typu p. Utlenienie $\text{Zn}_{0,98}\text{Mn}_{0,02}\text{Te}$ pozwoliło wytworzyć ZnO z zawartością Mn $\sim 0,5\%$ i koncentracją dziur $\sim 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Własności elektryczne warstw ZnO zostały przedstawione w tab. 1.

Tabela 1. Własności elektryczne typowych warstw ZnO wytworzonych na drodze utleniania warstw ZnTe wyhodowanych MBE na podłożach ZnTe lub GaAs							
Materiał wyjściowy	Utlen termicz.	d_{ZnO} [μm]	Domieszki	Typ	p [cm^{-3}]	μ [$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$]	ρ [$\Omega\cdot\text{cm}$]
GaAs/ZnTe($5 \mu\text{m}$)/ZnTe:N($0,5 \mu\text{m}$)	600°C 8 min.	1	N, As	p	$1,6 \cdot 10^{19}$	2,5	0,15
GaAs/ZnTe($3,5 \mu\text{m}$)	600°C 8 min.	1	As	p	$2,9 \cdot 10^{19}$	2,4	0,09
ZnTe(001)/ZnTe:N	600°C 12 min.	2	N	p	$6,7 \cdot 10^{17}$	95,2	0,1
GaAs/ZnTe($5 \mu\text{m}$)/ $\text{Zn}_{0,98}\text{Mn}_{0,02}\text{Te}$:N ($0,7 \mu\text{m}$)	600°C 16 min.	1,8	N, As, Mn	p	$9,7 \cdot 10^{16}$	9,1	7,1

Anomalnie wysokie wartości ruchliwości dziur w utlenionym ZnTe są najprawdopodobniej związane z obecnością metalicznego Te. Taki znaczący wzrost ruchliwości obserwowano wcześniej w warstwach półprzewodnikowych zawierających metaliczne wytrącenia.

Wytwarzanie ZnO typu n

Warstwy ZnO typu n osadzano metodą magnetronowego rozpylania katodowego w modzie r.f., w plazmie Ar z targetu ZnO (99,95%). Grubość warstw wynosiła $0,4 \div 0,6 \mu\text{m}$.

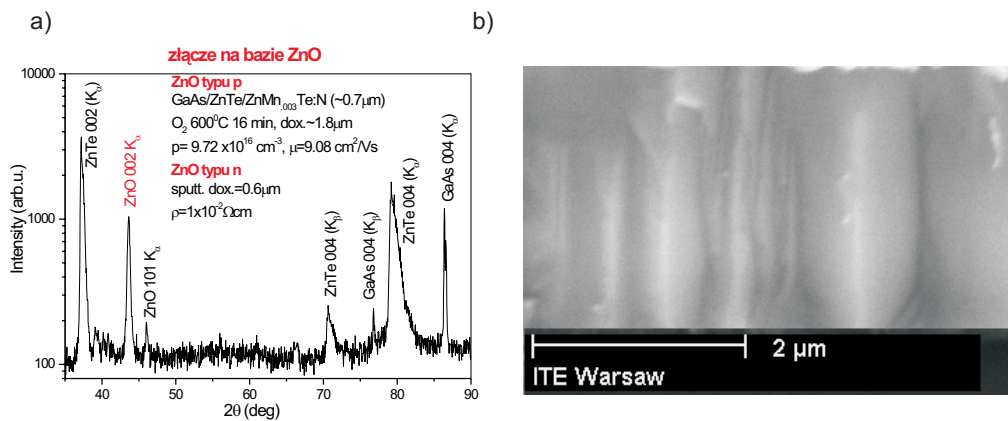
Pomiary transportowe wykazały, że ZnO charakteryzuje się przewodnictwem elektronowym, przy czym koncentracja swobodnych nośników ładunku jest na poziomie $\sim 1 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, a ruchliwość $\sim 2 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$.

Wytwarzanie izolacyjnego ZnO

Wysokooporowy ZnO wytwarzano metodą reaktywnego rozpylania katodowego w plazmie $\text{O}_2\text{-Ar}$, z targetu metalicznego Zn (99,995%). Całkowite ciśnienie w czasie procesu wynosiło $p = 1 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$, a ciśnienie cząstkowe tlenu $p_{\text{O}_2} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$.

Złącze p-n na bazie ZnO

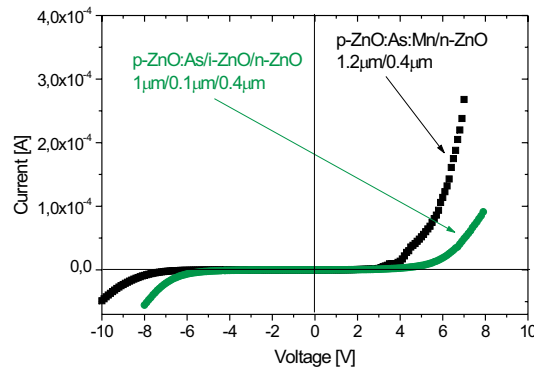
W celu zweryfikowania własności warstw ZnO o przewodnictwie dziurowym i elektronowym wykonano struktury złączowe p-n i p-i-n. Na rys. 4a przedstawiono dyfraktogram rentgenowski złącza p-n wykonanego zgodnie z opisanymi wcześniej procedurami. Warstwy ZnO typu n, nanoszone metodą rozpylania katodowego na ZnO typu p, charakteryzują się strukturą podobną do warstw ZnO typu p z wyraźnie zaznaczoną teksturą (001). Potwierdzeniem tego jest również obraz przekroju poprzecznego warstwy ZnO typu n pokazany na rys. 4b.



Rys. 4. Mikrostruktura złącza p-n na bazie ZnO: a) dyfraktogram rentgenowski (promieniowanie FeK_α) struktury p-n na bazie ZnO, b) obraz SEM przekroju poprzecznego warstwy ZnO typu n

Obróbka technologiczna złączy p-n polegała na uformowaniu struktur mesa i wykonaniu kontaktów omowych do obszarów p i n ZnO. Metalizację kontaktową stanowiła dwuwarstwa $\text{Cr}(10\text{nm})/\text{Au}(100\text{nm})$ osadzana metodą rozpylania katodowego. W przypadku ZnO typu p metalizację dodatkowo wygrzewano w 350°C w przepływie N_2 . Kontakty omowe do ZnO typu n formowano w 200°C w atmosferze N_2 .

Złącza p-n z silnie domieszkowanymi warstwami ZnO:As charakteryzowały się własnościami tunelowymi. Do wytworzenia złączy prostujących p-n użyto mniej przewodzących warstw ZnO:Mn:As typu p. Warstwy ZnO:As o koncentracji dziur na poziomie 10^{19} cm^{-3} zostały wykorzystane w złączach prostujących p-i-n. Charakterystyki I-V złączy prostujących p-n oraz p-i-n przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Charakterystyki I-V złączy prostujących p-n i p-i-n na bazie ZnO

Podsumowując wyniki otrzymane w obecnym etapie badań nad domieszkowaniem warstw ZnO, za najważniejsze należy uznać uzyskanie rekordowego przewodnictwa swobodnych nośników ładunku w materiale typu p oraz pokazanie, że arsen pozwala znacznie efektywniej niż azot domieszkować ZnO na typ p. Z uwagi na znaczną różnicę w wielkości promieni jonowych tlenu i arsenu domieszkowanie przez podstawienie tlenu jest mało prawdopodobne. Realne jest natomiast podstawianie cynku przez arsen, co jest równoznaczne z utworzeniem donora. Taki scenariusz jest spójny z niedawno opublikowanym modelem teoretycznym, zgodnie z którym w trakcie domieszkowania ZnO domieszką grupy V o dużym promieniu jonowym domieszką podstawia cynk. Jednocześnie tworzą się dwie wakansje cynkowe i powstaje kompleks $As_{Zn-2}V_{Zn}$, który jest płytkim akceptorem o energii jonizacji ~ 150 meV.

2.1.2. Przezroczyste tlenki przewodzące jako elektrody w przyrządach fotonicznych i termofotowoltaicznych

Fotodetektory oraz ogniwa słoneczne i termofotowoltaiczne to grupa przyrządów, dla których przezroczyste elektrody mają szczególne znaczenie. O ile w przypadku ogniw słonecznych ich zastosowanie jest szeroko opisywane, o tyle nieliczne prace informują o przezroczystych elektrodach tlenkowych dla przyrządów pracujących w zakresie średniej podczerwieni wytwarzanych ze związków poczwórnych dopasowanych sieciowo do GaSb. W tych przyrządach standardowo są stosowane metalizacje kontaktowe na bazie Ti/Pt/Au, Ti/Ni/Au lub Au/Zn/Au.

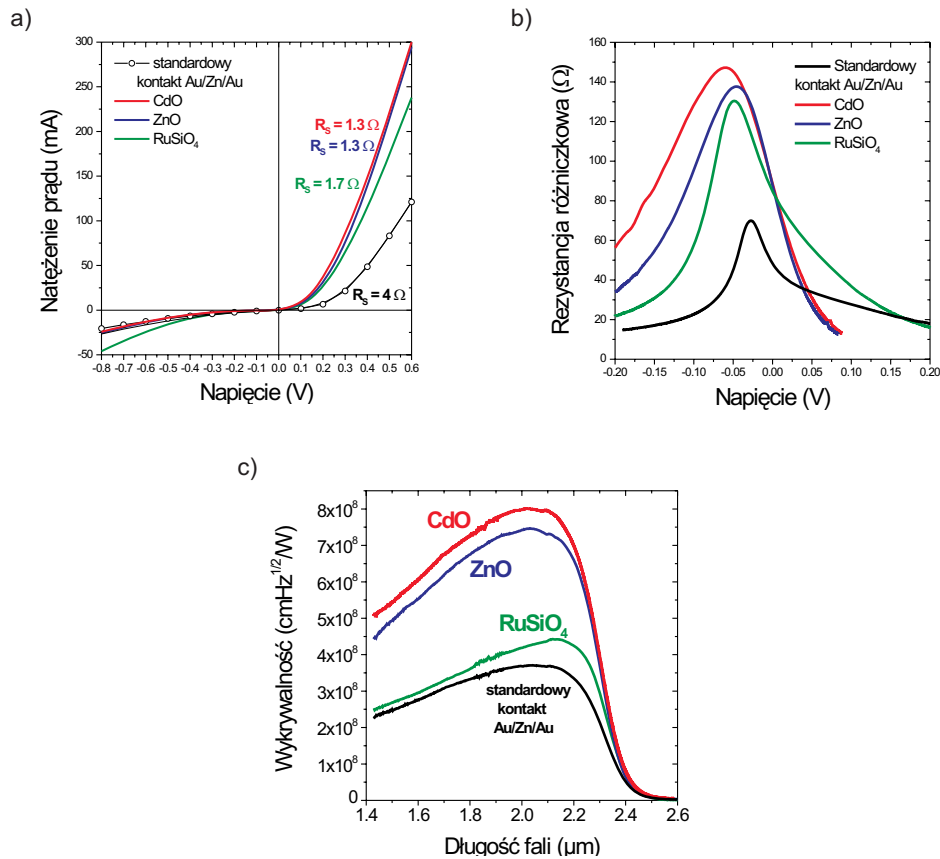
Przedstawione wyniki dotyczą efektów zastosowania tlenku cynku, tlenku kadmu i tlenku rutenowo-krzemowego w procesie wytwarzania przyrządów fotonicznych wykorzystujących struktury typu GaSb/InGaAsSb/AlGaAsSb wytwarzane w konwencjonalnym stanowisku LPE, charakteryzujące się wykrywalnością na poziomie 10^8 cm Hz^{1/2}/W.

Kontakty przezroczyste były osadzone metodą rozpylania katodowego: CdO i RuSiO₄ reaktywnie z targetów Cd i Ru₁Si₁ w atmosferze Ar-O, ZnO – z targetu ZnO w atmo-

sferze Ar. Dla porównania wykonano strukturę ze standardowym kontaktem Au/Zn/Au w formie siatki szerokości 10 μm powodującej zakrycie ok. 9% powierzchni czynnej. Struktury przeznaczone do pomiarów nie były poddawane procesowi pasywacji, nie stosowano także powłok przeciwoodbiornych.

Rysunek 6a przedstawia charakterystyki prądowo-napięciowe w kierunku przewodzenia i zaporowym badanych struktur. Zastosowanie kontaktu przezroczystego z CdO lub ZnO na całej powierzchni czynnej powoduje trzykrotną redukcję rezystancji szeregowej. Nieco gorszy efekt, czyli dwukrotną redukcję rezystancji szeregowej, uzyskano stosując RuSiO_4 .

Na rys. 6b przedstawiono zależność rezystancji różniczkowej R od napięcia polaryzacji. Wartość R_0 dla struktur z przezroczystymi kontaktami wynosi średnio 90 Ω ($R_0A = 21 \Omega \cdot \text{cm}^2$); w przypadku kontaktu standardowego $R_0 = 40 \Omega$ ($R_0A = 8 \Omega \cdot \text{cm}^2$). Maksymalna wartość R dla struktur z kontaktami TCO wynosi 120 ÷ 140 Ω ($R_A = 28 \div 32 \Omega \cdot \text{cm}^2$) i pojawia się przy polaryzacji $-0,05 \text{ V}$. Zależność widmową wykrywalności struktur GaSb/In(Al)GaAsSb przedstawiono na rys. 6c. Obserwuje się tu znaczną przewagę struktur z kontaktami CdO i ZnO. W ich przypadku wykry-

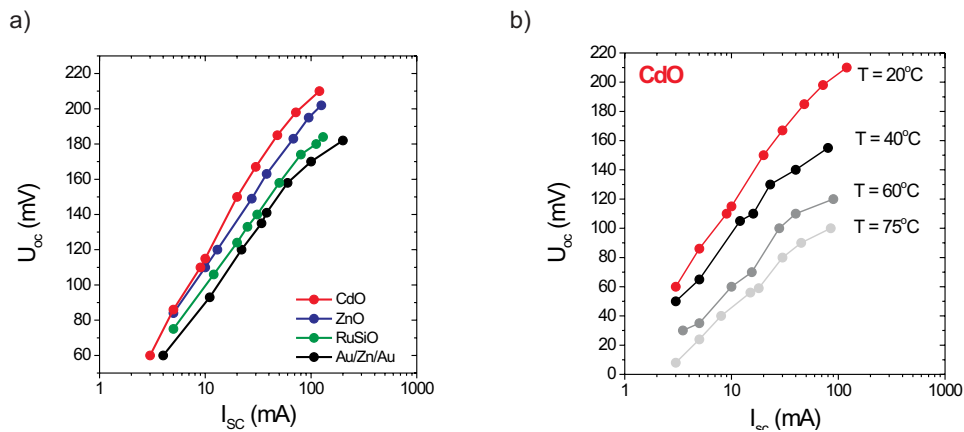


Rys. 6. Charakterystyki detektorów GaSb/InGaAsSb/AlGaAsSb z przezroczystymi elektrodami

walność dla długości fali 2,0 μm wynosi $7,5 \div 8 \cdot 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$. Dla kontaktów RuSiO_4 uzyskano wykrywalność $4 \cdot 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, podobną jak dla nieprzezroczystego kontaktu metalicznego.

Zależność fotonapięcia obwodu otwartego U_{oc} od fotoprądu obwodu zwartego I_{sc} dla fotodiod z trzema rodzajami kontaktów przezroczystych pokazano na rys. 7a. W przypadku struktur z kontaktami CdO i ZnO zaobserwowano nawet 40% wzrost wartości U_{oc} dla niższych poziomów promieniowania w stosunku do pozostałych analizowanych struktur.

Ważnym dla ogniów termofotowoltaicznych zagadnieniem jest zależność ich parametrów od temperatury, w praktyce pracują one zwykle w temperaturze do ok. 60°C . W kontaktach tlenkowych mechanizmem dominującym jest emisja polowa, całkowicie niezależna od temperatury. Wyniki pomiarów oporności właściwej kontaktów TCO/AlGaAsSb metodą c-TLM z dla temperatur $20 \div 75^\circ\text{C}$ pokazują, że wartość r_c pozostaje stała w granicach błędów pomiarowych.



Rys. 7. Zależność fotonapięcia obwodu otwartego U_{oc} od fotoprądu obwodu zwartego I_{sc} : a) dla różnych kontaktów przezroczystych, b) w funkcji temperatury dla kontaktu CdO

Zależność fotonapięcia obwodu otwartego U_{oc} od fotoprądu obwodu zwartego I_{sc} w funkcji temperatury pokazano na przykładzie ogniwa TPV z kontaktem CdO (rys. 7b). Obserwuje się istotny spadek wartości U_{oc} ze wzrostem temperatury. Charakter tych zmian jest zdeterminowany konstrukcją struktury detektorowej i nie zależy od rodzaju zastosowanego przezroczystego kontaktu omowego.

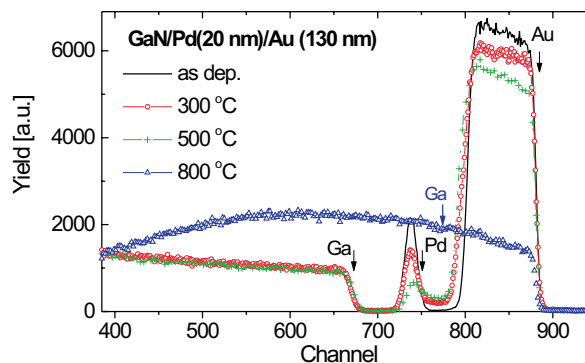
2.2. Nowe typy metalizacji półprzewodnikowych struktur III-V dla elektroniki i optoelektroniki wysokotemperaturowej

Stale rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną (światowe prognozy mówią o globalnym zapotrzebowaniu w 2025 r. na poziomie 60 TW) przy ograniczonych zasobach konwencjonalnych źródeł energii i coraz groźniejszych skutkach efektu cieplarnianego na Ziemi sprawia, że racjonalna gospodarka energią elektryczną staje

się imperatywem działań wysoko uprzemysłowionych społeczeństw XXI w. Wagę tego problemu podkreślają nie tylko specjalistyczne opracowania i międzynarodowe uregulowania prawne (protokół Kyoto), ale również szeroko zakrojone działania badawczo-wdrożeniowe podjęte przez przemysł światowy. Przemysł elektroniczny, w tym przemysł półprzewodnikowy, ma do odegrania szczególną rolę. Prace badawcze są skoncentrowane na dwóch zagadnieniach: opracowaniu alternatywnych półprzewodnikowych źródeł energii elektrycznej oraz opracowaniu nowej generacji przyrządów półprzewodnikowych dla energoelektroniki i technik sensorowych. Pierwsze z nich to półprzewodnikowe przyrządy fotowoltaiczne i termofotowoltaiczne, drugie to półprzewodnikowe przyrządy mocy/wysokiej częstotliwości przeznaczone do pracy w wysokich temperaturach ($> 350^{\circ}\text{C}$).

Pierwszoplanowym zadaniem jest podwyższenie temperatury pracy przyrządów półprzewodnikowych do poziomu 350°C (aktualna norma to 30°C dla urządzeń powszechnego użytku i 125°C dla urządzeń wojskowych). Pozwoliłoby to na zasadnicze oszczędności energii zużywanej obecnie przez systemy chłodzenia wszystkich przyrządów mocy i na oszczędności energii wynikające ze zwiększenia skali integracji oraz możliwości umieszczenia czujników i układów kontrolnych w strefie wysokiej temperatury. Opracowanie wysokotemperaturowych przyrządów mocy oraz wysokiej częstotliwości wymaga wprowadzenia półprzewodników o przerwie zabronionej znacznie szerszej niż przerwa energetyczna Si czy GaAs, charakteryzujących się znacząco wyższymi wartościami natężenia pola elektrycznego, przy którym następuje przebicie, lepszym przewodnictwem cieplnym oraz odpornością na działanie wysokich temperatur. W tej grupie potencjalnymi kandydatami są azotki grupy III (GaN, AlN i BN), SiC oraz diament.

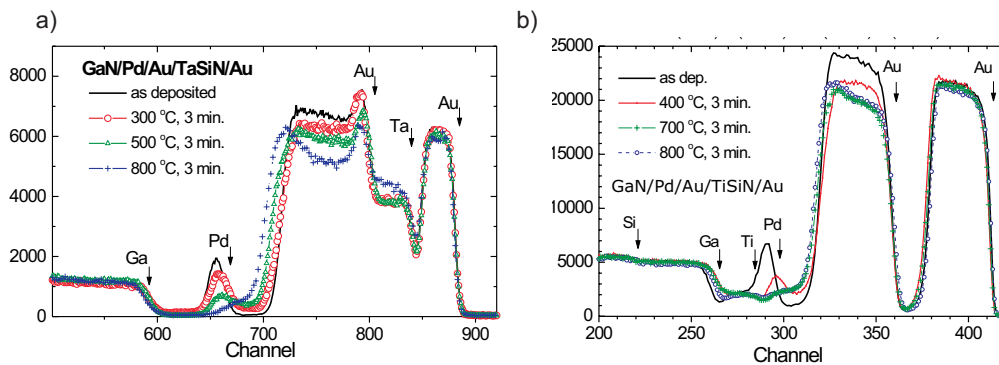
Celem badań prowadzonych w Zakładzie jest pogłębienie wiedzy odnośnie aktywowanych termicznie oddziaływań w strukturach metal/GaN i możliwej kontroli procesów interdyfuzji. Rysunek 8 przedstawia widma RBS typowego kontaktu omowego p-GaN/PdAu po wygrzewaniu w temperaturze $300 \div 800^{\circ}\text{C}$, świadczące o bardzo ograniczonej stabilności termicznej metalizacji na bazie Au w kontakcie z GaN i o konieczności stosowania barier antydyfuzyjnych separujących obszar kontaktu od zewnętrznych (np. montażowych) warstw złota.



Rys. 8. Widma 2 MeV He^+ RBS metalizacji p-GaN/Pd(20 nm)/Au(130 nm) poddanej obróbce termicznej RTP w N_2

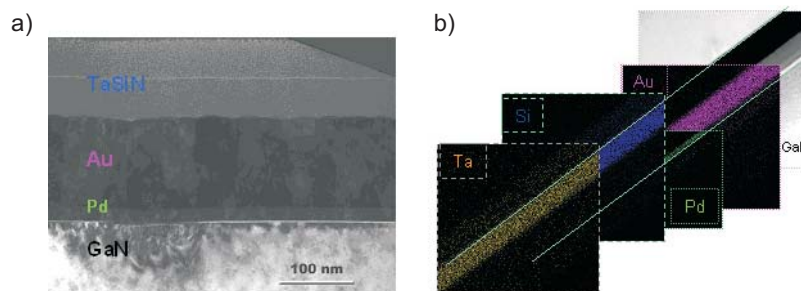
Biorąc pod uwagę wcześniejsze doświadczenia zespołu, w obecnym etapie prac kontynuowano badania nad cienkowarstwowymi barierami antydyfuzyjnymi z materiałów układu Ta-Si-N i Ti-Si-N dla metalizacji na bazie złota do GaN. Warstwy barierowe były wytwarzane techniką reaktywnego rozpylania katodowego, a ich własności strukturalne, mechaniczne i elektryczne określano na podstawie pomiarów XRD i RBS (mikrostruktura, profile składu chemicznego), pomiarów naprężeń (TencorTMFLX) oraz pomiarów rezystywności (sondą czterostrzową).

Optymalizowano procesy osadzania warstw TiSiN oraz TaSiN pod kątem niskiej rezystywności, niskich naprężeń oraz amorficznej struktury. Za optymalne uznano warstwy o składzie $Ta_{0,24}Si_{0,25}N_{0,41}$ i $Ti_{26}Si_{17}N_{57}$. Przedstawione na rys. 9 wyniki pomiarów profili składu chemicznego kontaktów techniką RBS potwierdzają przyjętą hipotezę.

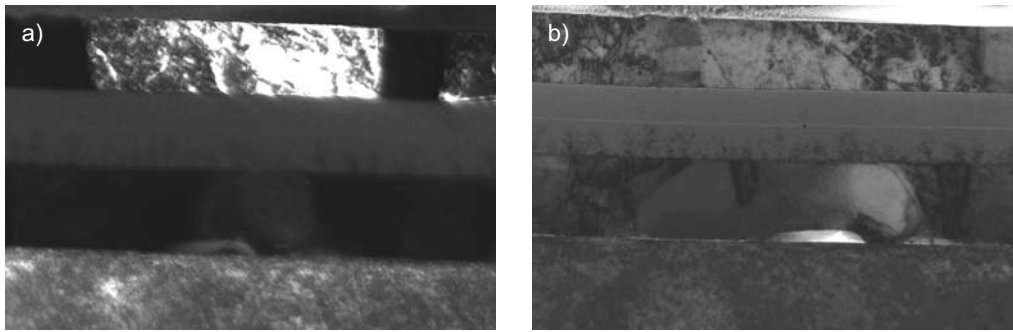


Rys. 9. Widma 2 MeV He^+ RBS kontaktów do p-GaN z warstwami barierowymi: a) Pd(20 nm)/Au(130 nm)/ $Ta_{0,24}Si_{0,25}N_{0,41}$ (100 nm)/Au(50 nm), b) Pd(20 nm)/Au(130 nm)/ $Ti_{26}Si_{17}N_{57}$ (100 nm)/Au(100 nm) po obróbce termicznej w N_2

W ramach współpracy z Uniwersytetem w Bremie wykonano badania TEM przekrojów poprzecznych kontaktów wielowarstwowych zawierających barierę antydyfuzyjną o zoptymalizowanych własnościach. Wyniki badań mikrostruktury kontaktów przedstawione na rys. 10 i 11 świadczą o stabilności metalizacji p-GaN/PdAu/ $Ta_{0,24}Si_{0,25}N_{0,41}$ /Au aż do temperatury 700°C.



Rys. 10. Obrazy mikroskopowe XTEM i EDS kontaktów p-GaN/Pd(20 nm)/Au(130 nm)/ $Ta_{0,24}Si_{0,25}N_{0,41}$ (100 nm)/Au(100 nm) poddanych obróbce termicznej w atmosferze Ar przez 3 min. Mikrostruktura i skład chemiczny kontaktu wygrzewanego w temperaturze 400°C: a) jasne pole, b) EDS



Rys. 10. Obrazy mikroskopowe XTEM i EDS kontaktów p-GaN/Pd(20 nm)/Au(130 nm)/Ta_{0,34}Si_{0,25}N_{0,41}(100 nm)/Au(100nm) poddanych obróbce termicznej w atmosferze Ar przez 3 min. Mikrostruktura i skład chemiczny kontaktu wygrzewanego w temperaturze 700°C: a) jasne pole, b) EDS

3. Współpraca międzynarodowa

W ramach 5. i 6. Programu Ramowego Zakład uczestniczył w realizacji czterech projektów europejskich: DENIS, NANOPHOS, HYPHEN, CEPHONA, ściśle współpracując z ośrodkami europejskimi stanowiącymi konsorcja tych projektów. Za szczególne osiągnięcie Zakładu należy uznać zorganizowanie międzynarodowego sympozjum na temat nanostrukturalnych czujników fotonowych „Workshop on Nanostructured Photonic Sensor”, na którym referaty wygłosili światowej sławy eksperci z Włoch, Francji i Polski.

Publikacje'2005

[P1] DOBOSZ D., ŻYTKIEWICZ Z. R., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., PIOTROWSKI T. T.: Properties of ZrN Films as Substrate Masks in Liquid Phase Epitaxial Lateral Overgrowth of Compound Semiconductors. *Cryst. Res. Technol.* 2005 nr 4/5 s. 492–497.

[P2] GRABECKI G., WRÓBEL J., DIETL T., JANIK E., ALESZKIEWICZ M., PAPIŚ E., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., SPRINGHOLZ G., BAUER G.: Disorder Suppression and Precise Conductance Quantization in Constructions of PbTe Quantum Wells. *Phys. Rev. B* 2005 vol. 72 s. 125332.

[P3] GRABECKI G., WRÓBEL J., DIETL T., JANIK E., ALESZKIEWICZ M., PAPIŚ E., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., SPRINGHOLZ G., BAUER G.: PbTe-a New Medium for Quantum Ballistic Devices. *Physica E* (w druku).

[P4] GUZIEWICZ E., KOPALCO K., SADOWSKI J., GUZIEWICZ M., GOŁACKI Z.: Zn(Mn)O Surface Alloy Studied by Synchrotron Radiation Photoemission. *Acta Phys. Pol. A* 2005 vol. 108 s. 689–696.

[P5] JELINEK M., KLINI A., KOCOUREK T., ZEPL R., SANTONI A., FOTAKIS C., KAMIŃSKA E.: Subpicosecond and Enhanced Nanosecond PLD to Grow ZnO Films in Nitrogen Ambient. *Surf. & Coatings Technol.* 2005 nr 200 s. 418–420.

[P6] KAMIŃSKA E., KOSSUT J., PIOTROWSKA A., PRZEŹDZIECKA E., DOBROWOLSKI R., DYNOWSKA E., BUTKUTE R., BARCZ A., JAKIEŁA R., ALESZKIEWICZ M., JANIK E., KOWALCZYK E.: Transparent p-Type ZnO by Oxidation of Zn-Based Compounds. *AIP Conf. Proc.* 2005 nr 772 s. 185–186.

- [P7] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., KOSSUT J., BARCZ A., BUTKUTE R., DOBROWOLSKI R., DYNOWSKA E., JAKIEŁA R., ŁUKASIEWICZ R., ALESZKIEWICZ M., WOJNAR P., KOWALCZYK E.: Transparent p-Type ZnO Films Obtained by Oxidation of Sputter-Deposited Zn₃N₂. *Solid State Commun.* 2005 vol. 135 nr 1–2 s. 11–15.
- [P8] KAMIŃSKA E., PRZEŹDZIECKA E., PIOTROWSKA A., KOSSUT J., DYNOWSKA E., DOBROWOLSKI W., BARCZ A., JAKIEŁA R., ŁUSAKOWSKA E., RATAJCZAK J.: ZnO-Based p-n Junction with p-Type ZnO by ZnTe Oxidation. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* (w druku).
- [P9] KUCHUK A., KLADKO V. P., MACHULIN V. F., LYTVYN O. S., KORCHOVYI A. A., PIOTROWSKA A., MINIKAYEV R. A., JAKIEŁA R.: Effect of Nitrogen in Ta-Si-N Thin Films on Properties and Diffusion Barrier Performances. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2005 vol. 27 nr 5 s. 625–634.
- [P10] MADAMOPOULOS N., SIGANAKIS G., TSIGARA A., ATHANASEKOS L., PISPAS S., VAINOS N., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., PERRONE A., RISTOUSCU C., KIBASI K.: Diffractive Optical Elements for Photonic Gas Sensors. *Proc. of SPIE*, 6008 Nanosensing: Materials and Devices II 60081K (2005).
- [P11] MAZINGUE T., SPALLUTO L., ESCOUBAS L., FLORY F., JELINEK M., MIHALESCU I., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., PERRONE A.: Optical Sensitivity of Thin Films to Hydrocarbons and Ozone. *Proc. of SPIE*, 5963 Advanced in Optical Thin Films II 59631K (2005).
- [P12] PAPIS E., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKI T. T., KUDŁA A., SZADE J., WINIARSKI A., WAWRO A.: Electrochemical Sulphur Passivation of InGaAsSb and AlGaAsSb Surfaces. Mat. IV Int. Workshop on Semiconductor Surface Passivation SSP'2005, Ustroń, 10–14.09.2005. *Appl. Surface Sci.* (w druku).
- [P13] PIOTROWSKA A., KAMINSKA E., GUZIEWICZ M., DYNOWSKA E., STONERT A., TUROS A., FIGGE S., KRÖGER R., HOMMEL D.: Anti-Diffusion Barriers for Gold-Based Metallization to p-GaN. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* (w druku).
- [P14] PRZEŹDZIECKA E., KAMIŃSKA E., DYNOWSKA E., DOBROWOLSKI W., JAKIEŁA R., KŁOPOTOWSKI Ł., SAWICKI M., KIECANA K., KOSSUT J.: p-Type ZnO and ZnMnO by Oxidation of Zn(Mn)Te Films. *phys. stat. sol. (c)* 2005 vol. 2 nr 3 s. 1218–1223.
- [P15] SAWICKI M., WANG K.-Y., EDMONDS K. W., CAMPION R. P., STADDON C. R., FARLAY N. R. S., FAXON C. T., PAPIS E., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., DIETL T., GALLAGHER B. L.: In-Plane Uniaxial Anisotropy Rotation in (Ga,Mn)As Thin Films. *Phys. Rev B* 2005 vol. 71 s. 121302.
- [P16] SZCZĘSNY A., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., SZMIDT J.: GaN – materiał do konstrukcji przyrządów pracujących przy wysokich częstotliwościach (HEMT) i w ekstremalnych warunkach. *Elektronika* 2005 nr 2–3 s. 16–17.
- [P17] SZCZĘSNY A., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., GUZIEWICZ M., JAGODZIŃSKI P., MROCYŃSKI R., SZMIDT J.: Ru-Si-O/AlN,Si₃N₄ Schottky Contacts for n-Type GaN and AlGaIn. *J. of Superhard Mater.* (w druku).

Konferencje'2005

- [K1] GOŁASZEWSKA K., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., RUTKOWSKI, GOTSZALK T., SZELOCH R., SKOCZYŁAS P., ŁUKASIEWICZ R., PIOTROWSKI T. T., KOWALCZYK E., KRUSZKA R., JAGODZIŃSKI P.: Thin Film Transparent Conducting Oxides as Ohmic Contacts to GaSb/In(Al)GaAsSb Thermophotovoltaic Cells. SPIE Int. Congress on Optics and Optoelectronics. Warszawa, 28.08–2.09.2005.
- [K2] GRABECKI G., WRÓBEL J., DIETL T., JANIK E., ALESZKIEWICZ M., PAPIS E., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., SPRINGHOLZ G., BAUER G.: Suppression of Nanoscale Disorder in PbTe Nano-

structures. XXXIV Int. School on the Physics of Semiconducting Compounds 2005. Ustroń Jaszowiec, 4–10.06.2005.

[K3] GRABECKI G., WRÓBEL J., DIETL T., JANIK E., ALESZKIEWICZ M., PAPIS E., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., SPRINGHOLZ G., BAUER G.: PbTe-a New Medium for Quantum Ballistic Devices. 16th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-16). Albuquerque, NM, USA, 10–15.07.2005.

[K4] GUZIEWICZ E., KOPALCO K., SADOWSKI J., GUZIEWICZ M., GOŁACKI Z.: Zn(Mn)O Surface Alloy Studied by Synchrotron Radiation Photoemission. XXXIV Int. School on the Physics of Semiconducting Compounds 2005, Ustroń Jaszowiec, 4–10.06.2005.

[K5] KAMIŃSKA E., ILCZUK E., PIOTROWSKA A., KOSSUT J., BARCZ A., JAKIEŁA R., DOBROWOLSKI W., ŁUKASIEWICZ R.: Effect of Atmosphere on the Thermally Activated Diffusion of Ga and As across ZnTe/GaAs Interface. XXXIV Int. School on the Physics of Semiconducting Compounds 2005, Ustroń Jaszowiec, 4–10.06.2005.

[K6] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., GUZIEWICZ M., JAGODZIŃSKI P., KRUSZKA R., KUDŁA A., KOWALCZYK E., MADAMOPOULOS N., VAINOS N., ESCOUBAS L., MAZINGUE T., COURIS S.: Deposition, Characterisation and Patterning of Materials for Nanostructured Photonic Sensors. Workshop on Nanostructured Photonic Sensors. Warszawa, 3.09.2005.

[K7] KAMIŃSKA E., PRZEŹDZIECKA E., PIOTROWSKA A., KOSSUT J., DYNOWSKA E., DOBROWOLSKI W., BARCZ A., JAKIEŁA R., ŁUSAKOWSKA E., RATAJCZAK J.: ZnO-Based p-n Junction with p-Type ZnO by ZnTe Oxidation. MRS Fall Meet. 2005, Boston, USA, 28.11–2.12.2005.

[K8] KAMIŃSKA E., PRZEŹDZIECKA E., PIOTROWSKA A., KOSSUT J., ŁUKASIEWICZ R., JAGODZIŃSKI P., GOŁASZEWSKA K., DYNOWSKA E., DOBROWOLSKI W., JAKIEŁA R., ŁUSAKOWSKA E.: Study of Key Technological Processes to Achieve ZnO p-n Junction. 12th Int. Conf. on II-VI Compounds. Warszawa, 12–16.09.2005.

[K9] PAPIS E., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., ŁUKASIEWICZ R., PIOTROWSKI T. T., KAMIŃSKA E., KRUSZKA R., KUDŁA A., RUTKOWSKI J., SZADE J., WINIARSKI A., WAWRO A.: Properties of InGaAsSb and AlGaAsSb Surfaces under Sulphide Treatments Studies using XPS and VASE Techniques. SPIE Int. Congress on Optics and Optoelectronics. Warszawa, 28.08–2.09.2005.

[K10] PAPIS E., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKI T. T., KUDŁA A., SZADE J., WINIARSKI A., WAWRO A.: Electrochemical Sulphur Passivation of InGaAsSb and AlGaAsSb Surfaces. IV Int. Workshop on Semiconductor Surface Passivation SSP'2005. Ustroń, 10–14.09.2005.

[K11] PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., RUTKOWSKI J., PAPIS E., ŁUKASIEWICZ R., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKI T. T.: Long Term Stability of GaSb-Based MIR Photodetectors Passivated by Electrochemical Treatment in Sulphur Containing Solutions. SPIE Int. Congress on Optics and Optoelectronics. Warszawa, 28.08–2.09.2005.

[K12] PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., GUZIEWICZ M., DYNOWSKA E., STONERT A., TUROS A., FIGGE S., KRÖGER R., HOMMEL D.: Anti-Diffusion Barriers for Gold-Based Metallization to p-GaN. 2005 MRS Fall Meet. Boston, USA, 28.11–3.12.2005.

[K13] PRZEŹDZIECKA E., KAMIŃSKA E., DYNOWSKA E., BUTKUTE R., DOBROWOLSKI W., JAKIEŁA R., ALESZKIEWICZ M., ŁUSAKOWSKA E., ANDREARCZYK T., KŁOPOTOWSKI Ł., KOSSUT J.: Preparation and Characterization of p-Type ZnO by Oxidation of ZnTe Films. XXXIV Int. School on the Physics of Semiconducting Compounds 2005, Ustroń Jaszowiec, 4–10.06.2005.

[K14] PRZEŹDZIECKA E., KAMIŃSKA E., DYNOWSKA E., BUTKUTE R., DOBROWOLSKI W., JAKIEŁA R., ALESZKIEWICZ M., ŁUSAKOWSKA E., ANDREARCZYK T., SAWICKI M., KIECANA K., KŁOPOTOWSKI Ł.,

KOSSUT J.: p-Type ZnO and ZnMnO by Oxidation of Zn(Mn)Te Films. 12th Int. Conf. on II-VI Compounds. Warszawa, 12–16.09.2005.

[K15] SKOCZYŁAS P. A., PISKORSKI M., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., PIOTROWSKI T. T., KĄTCKI J., RATAJCZAK J., JUNG W., PRZESŁAWSKI T., WAWRO A., WÓJCIK M., GACA J.: GaAlAsSb/GaInAsSb/GaSb Structures for Thermophotovoltaic Cells. SPIE Int. Congress on Optics and Optoelectronics. Warszawa, 28.08–2.09.2005.

[K16] SZCZĘSNY A., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., GUZIEWICZ M., JAGODZIŃSKI P., MROCYŃSKI R., SZMIDT J.: Ru-Si-O/AlN, Si₃N₄ Schottky Contacts for n-Type GaN and AlGaN. 4th Int. Conf. Nanodiamond and Related Materials jointly with 6th Diamond and Related Films. Zakopane, 28.06–1.07.2005.