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: dr hab. inż. Jerzy Ciosek, e-mail: jciosek@ite.waw.pl,
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: ttpiotr@ite.waw.pl,
dr inż. Maciej Piskorski, e-mail: piskorsk@ite.waw.pl,
mgr inż. Paweł Skoczylas, e-mail: pskoczy@ite.waw.pl,
mgr inż. Artur Szczęsny e-mail: szczesny@ite.waw.pl,
mgr Andrian Kuchuk, mgr inż. Lidia Ilka, mgr inż. Ireneusz Wójcik

1. Wprowadzenie

W 2004 r. Zakład Technologii Struktur Półprzewodnikowych dla Fotoniki realizował następujące projekty badawcze:

- "Opracowanie procesów wytwarzania cienkich warstw tlenków i azotków przewodzących dla potrzeb półprzewodnikowych przyrządów fotonowych" Etap III (projekt statutowy nr 1.03.035, termin realizacji 31.12.2004);
- "Procesy obróbki powierzchni struktur półprzewodnikowych na bazie GaSb i ich zastosowanie w technologii źródeł i detektorów podczerwieni" (grant promotorski KBN nr 4 T1B 039 22, termin realizacji 15.05.2004);
- "Tranzystory polowe AlGaN/GaN nowej generacji dla elektroniki dużej mocy i wysokiej częstotliwości" (grant KBN nr 1359/T11/2004/26, termin realizacji 25.04.2007);
- "Półprzewodnikowe fotoogniwa GaSb/In(Al)GaAsSb do zastosowań w przyrządach termofotowoltaicznych" (grant KBN nr 1360/T11/2004/26, termin realizacji 03.05.2007);
- "Wytwarzanie i optymalizacja kontaktu omowego typu p do GaN", DENIS (projekt EC nr G5RD-CT-2001-00566, termin realizacji 31.03.2005);
- "Nanostrukturalne czujniki fotonowe", NANOPHOS (projekt EC nr IST-2001-39112, termin realizacji 31.12.2005).

Zakład świadczył również usługi badawcze na zamówienie odbiorców zewnętrznych, m. in. w zakresie opracowania technologii wytwarzania masek ZrN na podłożach GaAs i GaSb stosowanych do lateralnego wzrostu warstw epitaksjalnych metodą LPE.

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

2. Wyniki działalności naukowo-badawczej

Najważniejszymi zadaniami naukowo-badawczymi w 2004 r. było:

- opracowanie technologii wytwarzania przezroczystych przewodzących warstw ZnO typu p,
- opracowanie technologii wytwarzania przewodzących warstw tlenkowych o strukturze amorficznej z materiałów na bazie rutenu,
- przeprowadzenie badań stabilności termicznej metalicznych barier antydyfuzyjnych W-Ti-N, Ta-Si-N i Ti-Si-N.

Równolegle prowadzono prace aplikacyjne związane z zastosowaniem opracowywanych struktur cienkowarstwowych w technologii półprzewodnikowych przyrządów opto- i mikroelektronicznych z materiałów na bazie GaSb, GaAs i GaN.

Nieodłącznym elementem działalności było doskonalenie metod litografii i charakteryzacji opracowywanych struktur cienkowarstwowych.

2.1. Technologia i własności cienkich warstw p-ZnO

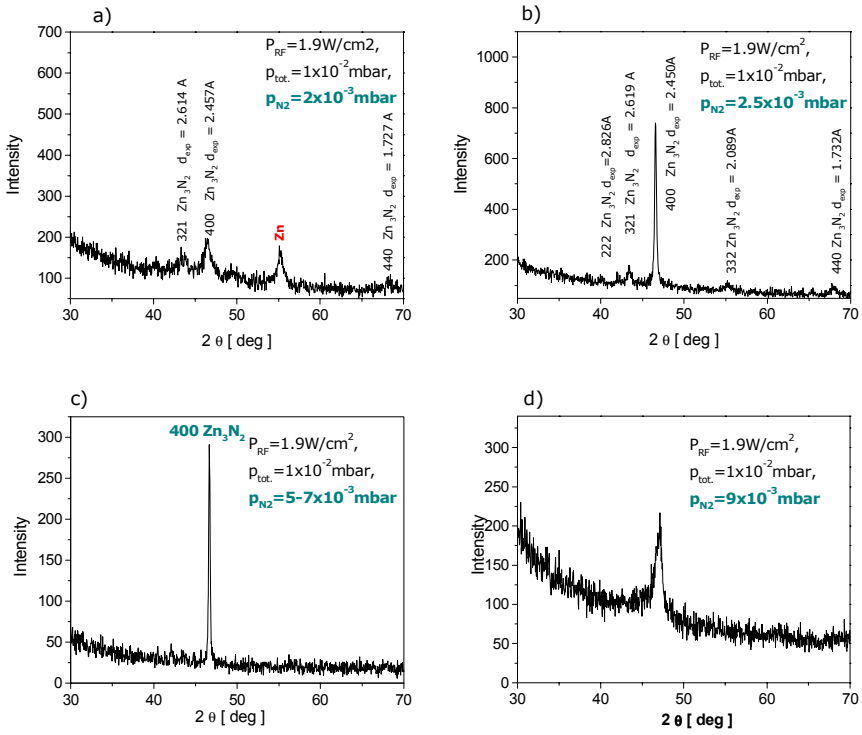
Bazując na wynikach prac z 2003 r. za najbardziej perspektywiczną drogę do uzyskania cienkich warstw ZnO typu p uznano metodę utleniania termicznego Zn_3N_2 z ewentualnym kodomieszkowaniem chromem. W przyjętym podejściu warstwy Zn_3N_2 były wytwarzane techniką reaktywnego magnetronowego rozpylania katodowego r.f. z targetu Zn w plazmie Ar/N_2; dla kodomieszkowania chromem stosowano dodatkowo target Cr. Procesy utleniania Zn_3N_2 były prowadzone w standardowym piecu do obróbki termicznej w przepływie tlenu.

Celem badań było określenie:

- wpływu warunków procesu rozpylania katodowego oraz struktury krystalicznej podłoża na mikrostrukturę warstw Zn_3N_2 i dalej na własności strukturalne ZnO;
- wpływu zanieczyszczeń wodorem oraz domieszkowania azotem i chromem na własności transportowe p-ZnO.

Jako podłoża stosowano kwarc (struktura amorficzna), szafir (struktura heksagonalna) oraz GaN (struktura heksagonalna, dopasowana sieciowo do ZnO) i cienkie, monokrystaliczne warstwy ZnO na podłożu GaN. W badaniach mikrostruktury cienkich warstw zastosowano techniki XRD, SIMS, AFM.

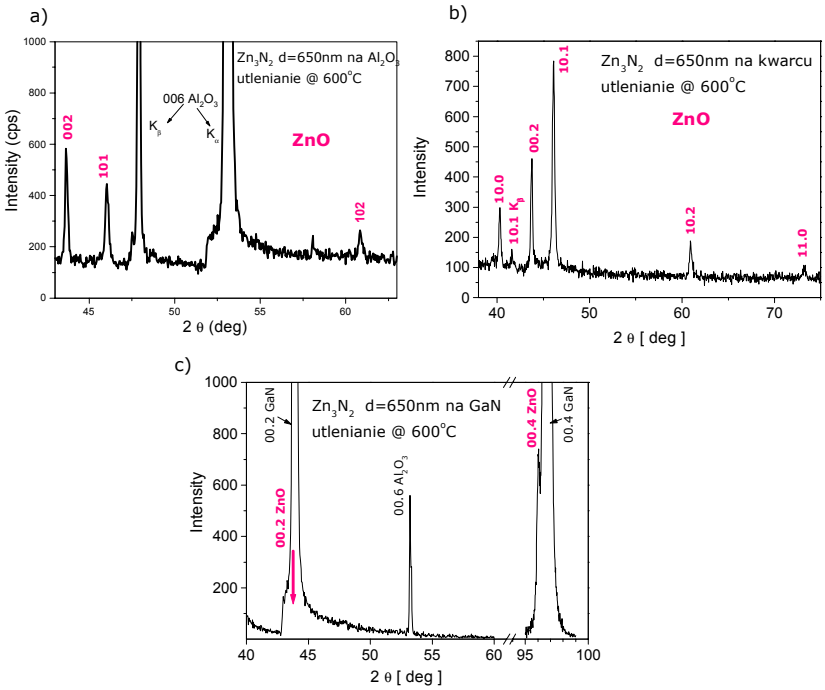
Otrzymane wyniki wskazują, że czynnikiem decydującym o strukturze krystalicznej warstw Zn_3N_2 jest skład plazmy, w jakiej odbywa się proces rozpylania katodowego. Przy niskiej zawartości azotu, poniżej 25% N_2, otrzymywane warstwy Zn_3N_2 zawierają wytrącenia metalicznego Zn. Jednofazowy, polikrystaliczny Zn_3N_2 o charakterystycznej dla tego materiału strukturze kubicznej otrzymuje się przy 25% zawartości azotu. W zakresie 50 ÷ 70% N_2 struktura krystaliczna Zn_3N_2 jest uporządkowana, o orientacji (100). Dalszy wzrost zawartości N_2 sprawia, że warstwy Zn_3N_2 stają się drobnokrystaliczne i amorficzne. Ilustrują to przedstawione na rys. 1 wyniki analiz rentgenowskich warstw Zn_3N_2.



Rys. 1. Dyfraktogramy rentgenowskie warstw Zn_3N_2 osadzanych metodą reaktywnego rozpylania katodowego przy różnym stosunku ciśnień N_2/Ar: a) 20% N_2 → Zn_3N_2 + Zn, b) 25% N_2→ polikrystaliczny Zn_3N_2, c) 50% ÷ 70% N_2 → monokrystaliczny, d) N_2 > 80% polikrystaliczny/amorficzny

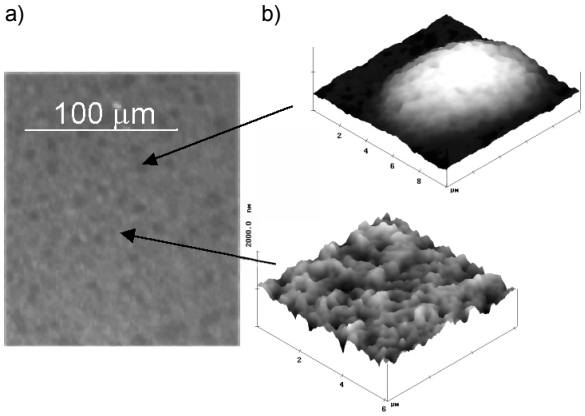
Co ciekawe, powyższe zależności były obserwowane niezależnie od rodzaju podłoża, na którym osadzano Zn_3N_2. W przeciwieństwie do tego mikrostruktura warstw ZnO bardzo silnie zależała zarówno od struktury wyjściowego podłoża, jak i od struktury Zn_3N_2.

Na rys. 2 przedstawiono dyfraktogramy rentgenowskie ilustrujące wpływ wyjściowego podłoża (szafir, kwarc, epi-ZnO) na mikrostrukturę warstw ZnO otrzymywanych w wyniku utleniania monokrystalicznego Zn_3N_2 (o strukturze jak na rys. 1c). Jak widać, na podłożach niedopasowanych sieciowo do ZnO – kwarcu i szafirze – otrzymano polikrystaliczny ZnO. W przypadku gdy podłożem był



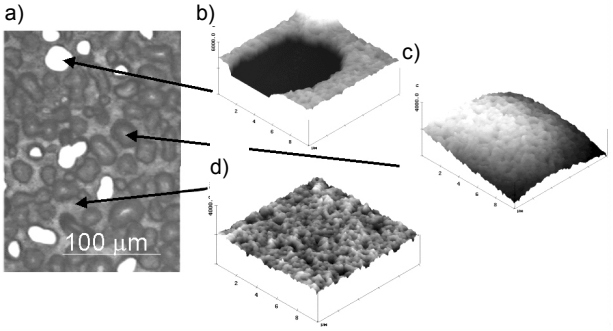
Rys. 2. Dyfraktogramy rentgenowskie warstw ZnO na podłożach z szafiru, kwarcu oraz GaN: a) polikrystaliczny ZnO na szafirze, b) polikrystaliczny ZnO na kwarcu, c) epitaksjalny ZnO na Ga

tlenek cynku lub GaN, struktura ZnO charakteryzowała się wysokim uporządkowaniem zgodnym z orientacją krystaliczną podłoża. Komplementarne badania morfologii powierzchni technikami mikroskopii optycznej i AFM wykazały, że transformacja strukturalna silnie uporządkowanego kubicznego Zn_3N_2 w heksagonalny ZnO, zachodząca na niedopasowanym do ZnO podłożu, daje w efekcie warstwy polikrystaliczne o jednorodnej morfologii (rys. 3). Jeśli



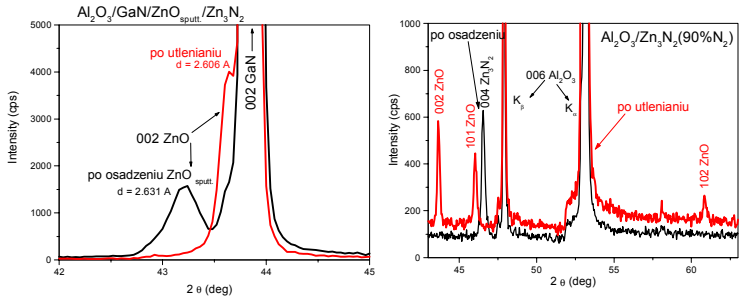
Rys. 3. Morfologia powierzchni warstwy ZnO wytworzonej poprzez utlenianie monokrystalicznego Zn_3N_2 na szafirze: a) obraz z mikroskopu optycznego, b) obraz AFM

zaś proces transformacji przebiega na podłożu dopasowanym sieciowo, to naprężenia wewnętrzne generowane w trakcie przemiany strukturalnej sprawiają, że otrzymany materiał mimo monokrystalicznej struktury charakteryzuje się bardzo niejednorodną topografią (rys. 4).



Rys. 4. Morfologia powierzchni warstwy ZnO podłożu GaN: a) obraz z mikroskopu optycznego, b)–d) obrazy AFM cech charakterystycznych jak dziury, wzgórki i obszar płaski

Na rys. 5 przedstawiono dyfraktogramy rentgenowskie ilustrujące wpływ wyjściowego podłoża (ZnO, szafir) na mikrostrukturę warstw ZnO otrzymywanych w wyniku utleniania polikrystalicznego Zn_3N_2 (o strukturze jak na rys. 1a). Na podłożach dopasowanych sieciowo (GaN, ZnO) otrzymano monokrystaliczny ZnO, podczas gdy warstwy otrzymane na niedopasowanych sieciowo podłożach (kwarc, szafir) charakteryzują się strukturą polikrystaliczną.

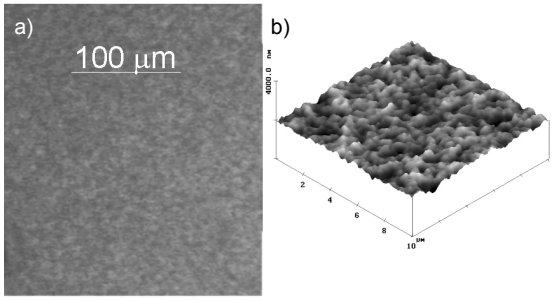


Rys. 5. Dyfraktogramy rentgenowskie warstw ZnO otrzymanych z drobnoziarnistego Zn_3N_2 na podłożach ZnO oraz Al_2O_3

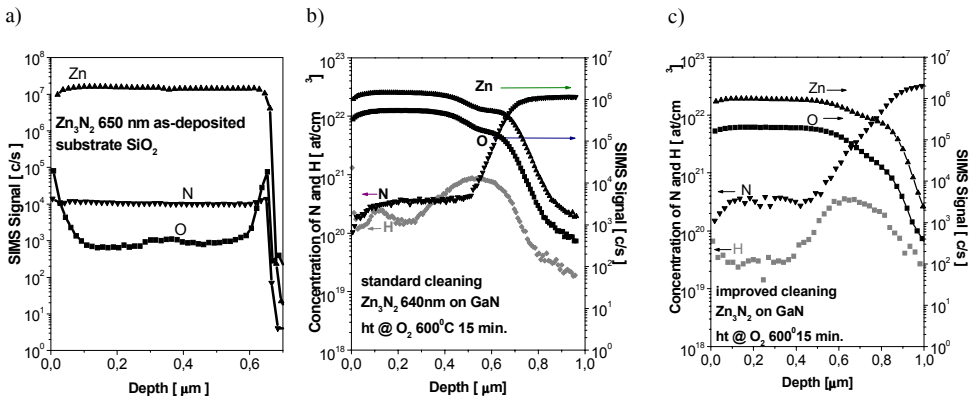
Za najważniejszy wynik przeprowadzonych prac badawczych należy uznać zoptymalizowanie parametrów wytwarzania jednorodnych, monokrystalicznych warstw ZnO na podłożach GaN. W szczególności wykazano, iż stosując polikrystaliczny/amorficzny Zn_3N_2 można uzyskać cienkowarstwowy monokrystaliczny ZnO o regularnej morfologii powierzchni. Obrazy mikroskopowe tego typu warstw przedstawiono na rys. 6.

W badaniach nad efektywnością domieszkowania ZnO ustalono korelację między własnościami transportowymi warstw ZnO a koncentracją aktywnej domieszki, jaką jest azot, oraz koncentracją wodoru. Ilościowe badania składu

zostały wykonane metodą SIMS z użyciem specjalnie do tego celu wytworzonych wzorców azotu i wodoru w ZnO. Pomiary zawartości azotu wykazały jednorodną i powtarzalną koncentrację N w utlenionej warstwie na poziomie $3 \div 5 \cdot 10^{20}$ at./cm^3. Stwierdzono, że warstwy ZnO zawierają porównywalną z azotem koncentrację wodoru. Na rys. 7 przedstawiono wyniki badań głębokościowych składu Zn_3N_2 po osadzeniu i utlenianiu. Stwierdzono, że koncentracja wodoru w ZnO zależy od poziomu ciśnienia resztkowego wodoru podczas procesu nanoszenia Zn_3N_2. Wprowadzenie specjalnego reżimu technologicznego, polegającego na dodatkowym czyszczeniu komory próżniowej i trawieniu podłoża jonami Ar *in situ*, pozwoliło na znaczącą redukcję zawartości wodoru w warstwie ZnO. Stwierdzono, że zawartość graniczna, powyżej której nie jest możliwe uzyskanie w ZnO przewodnictwa dziurowego, wynosi ok. $2 \cdot 10^{20}$ at./cm^3.



Rys. 6. Morfologia powierzchni warstw ZnO wytworzonej poprzez utlenianie drobnokrystalicznego Zn_3N_2 na podłożu GaN: a) obraz z mikroskopu optycznego, b) obraz AFM cech charakterystycznych



Rys. 7. Profile głębokościowe warstw Zn_3N_2 i ZnO: a) Zn_3N_2 po osadzeniu, b) warstwa ZnO –zawartość H przed optymalizacją czyszczenia stanowiska i podłoża; c) warstwa ZnO – zawartość H po optymalizacji procesu oczyszczania

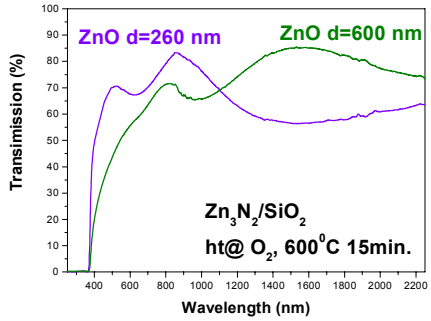
Wartości parametrów elektrycznych warstw ZnO, otrzymanych z materiału wyjściowego Zn_3N_2 osadzonego przy różnej ilości azotu, zestawiono w tab. 1. W świetle tych wyników wydaje się, że rola chromu jako kodomieszki umożliwiającej uzyskanie wyższej koncentracji dziur w p-ZnO polega na geterowaniu zanieczyszczeń wodorowych.

Tabela 1. Parametry elektryczne utlenionych warstw Zn_3N_2

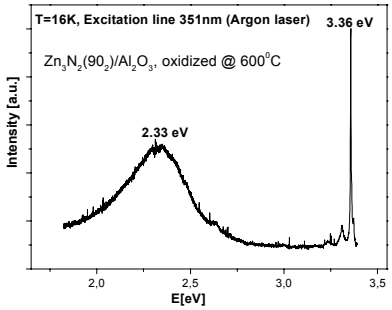
Materiał wyjściowy	Utlenianie	d_{ZnO} [nm]	Typ	ρ [Ω·cm]	Koncentr. [cm^{-3}]	μ [cm^2/Vs]
$Al_2O_3/Zn_3N_2(30\%N_2)$	600°C 15 min.	700	p	2,37	$2,6\cdot10^{17}$	10,0
$Al_2O_3/Zn_3N_2(50\%N_2)$	600°C 15 min.	660	p	1,52	$2,3\cdot10^{17}$	17,9
$Al_2O_3/Zn_3N_2(80\%N_2)$	600°C 15 min.	630	p	1,31	$2,96\cdot10^{17}$	16,0
$ZnO/Zn_3N_2(90\%N_2)$	600°C 30 min.	1450	p	3,51	$5,04\cdot10^{16}$	35,2
$Al_2O_3/Zn_3N_2(100\%N_2)$	600°C 15 min.	260	p	1,18	$6,57\cdot10^{17}$	7,9

Pomiary transmisji warstw p-ZnO:N przedstawione na rys. 8 wykazały dobrą, 80% wartość dla zakresu podczerwieni 0,7 ÷ 2,2 μm i słabszą, ok. 60 ÷ 70 %, dla zakresu widzialnego.

Badania fotoluminescencji warstw p-ZnO:N w temperaturze 16 K przeprowadzono we współpracy z Instytutem Fizyki PAN. Jak można zauważyć na rys. 9, w widmie fotoluminescencji widoczny jest silny pik odpowiadający energii 3,36 eV oraz emisji z głębokiego poziomu 2,33 eV. Pierwszy pik 3,36 eV przypisuje się ekscytonowi związanemu z domieszką azotową (A^oX), a wzbudzenie ok. 2,33 eV, tzw. green band, lukom tlenowym w ZnO.



Rys. 8. Transmisja warstw p-ZnO:N o grubości 260 nm i 600 nm



Rys. 9. Fotoluminescencja warstw p-ZnO:N utlenianych w 600°C

2.2. Technologia i własności cienkowarstwowych barier dyfuzyjnych dla metalizacji na bazie złota

Złoto oraz jego stopy i struktury warstwowe na bazie Au są najczęściej stosowanymi materiałami w technologii metalizacji przyrządów półprzewodnikowych III-V. Wykorzystywane są zarówno w technologii warstw kontaktowych (kontakty omowe), jak i warstw montażowych (doprowadzenia elektryczne). W szczególności badania przeprowadzone w poprzednim etapie projektu DENIS wykazały, że kontakty Pd/Au mają najlepsze własności elektryczne (najniższe wartości rezystywności), jeśli chodzi o kontakty omowe do obszaru typu p lasera GaN/AlGaN/ /InGaN.

Zalety i wady metalizacji na bazie złota są nierozłącznie związane z metalurgią układu Au/półprzewodnik A^{III}-B^{V} i aktywowanymi termicznie reakcjami zachodzącymi w tych układach. Mają one m. in. negatywny wpływ na długoczasową stabilność mikrostruktury kontaktów i ich własności elektryczne.

Powszechne jest przekonanie, że rozwiązaniem problemu ograniczonej stabilności termicznej metalizacji na bazie Au jest wprowadzenie do nich cienkowarstwowych barier antydyfuzyjnych. Cienkowarstwowe materiały barierowe muszą spełniać warunki wysokiej stabilności termicznej, wysokiego przewodnictwa elektrycznego, odporności na korozję, kompatybilności z procesem wytwarzania struktur przyrządowych. Najnowsze badania w tym zakresie sugerują, że materiały barierowe powinny się charakteryzować strukturą amorficzną, wolną od łatwej dyfuzji (np. po granicach ziaren).

Przedmiotem badań szczegółowych były dwa układy materiałowe: cienkowarstwowe przewodzące azotki metali przejściowych, w tym warstwy układów Ta-Si-N, Ti-Si-N i Ti-W-N, oraz cienkowarstwowe przewodzące tlenki na bazie rutenu, w tym warstwy układów Ru-O and Ru-Si-O.

2.2.1. Cienkowarstwowe przewodzące azotki metali przejściowych

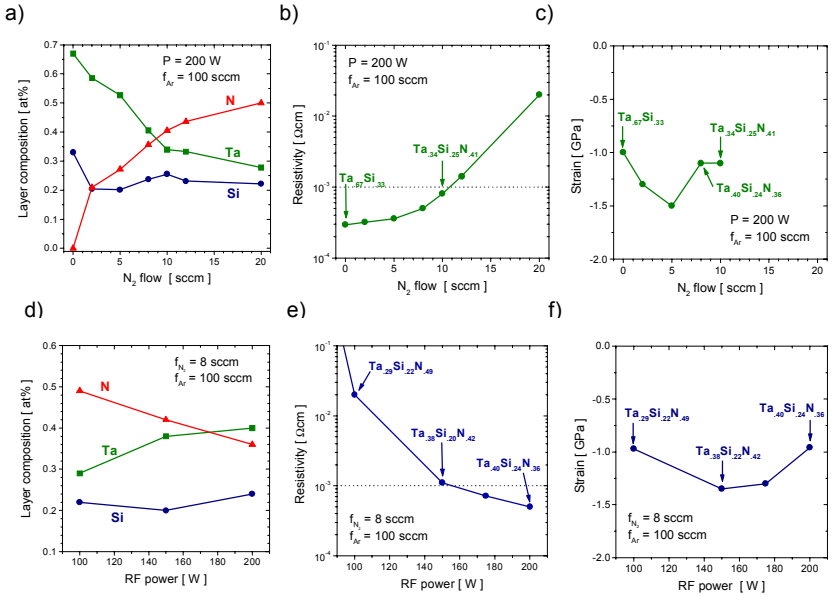
Cienkie warstwy Ta-Si-N, Ti-Si-N i W-Ti-N były wytwarzane metodą reaktywnego magnetronowego rozpylania katodowe w plazmie Ar/N_2 przy użyciu targetów Ta_5Si_3, Ti_5Si_3 i Ti(10%)W(90%). Osadzanie warstw Ta-Si-N i Ti-Si-N prowadzono w urządzeniu Leybold L560, a warstw W-Ti-N w sputronie Leybold Z550. Duża część prac była wykonywana z użyciem podłoży (100)GaAs, końcowe eksperymenty prowadzono stosując podłoża GaN.

Charakteryzacja wytworzonych warstw obejmowała pomiary oporności elektrycznej (metodą czterech sond), naprężeń (Tencor FLX 2320), składu chemicznego (RBS i SIMS), struktury krystalicznej i morfologii powierzchni (XRD, AFM).

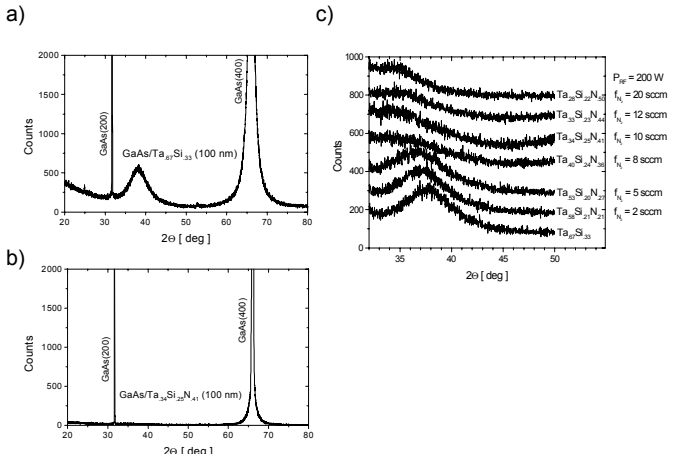
W celu określenia stabilności termicznej wytwarzane warstwy były poddawane procesom wygrzewania w atmosferze Ar w temperaturze $400 \div 1000^{o}C$.

Wytwarzanie i własności barierowe cienkich warstw Ta-Si-N

Wpływ parametrów osadzania (moc RF, zawartość N_2 w plazmie) na podstawowe własności warstw Ta-Si-N (skład chemiczny, rezystywność, naprężenia) ilustrują zależności przedstawione na rys. 10. Otrzymane wyniki, uzupełnione analizami XRD (rys. 11), wskazują, że skład gazu procesowego (zawartości N_2 w plazmie) ma zasadniczy wpływ na skład chemiczny i strukturę krystaliczną warstw Ta-Si-N. W szczególności dowodzą, że optymalizując parametry procesu osadzania można otrzymać przewodzące warstwy o strukturze amorficznej.



Rys. 10. Zależność składu (a, b), rezystywności (c, d) i naprężeń (e, f) warstwy Ta-Si-N od prze- pływu N_2 oraz mocy RF

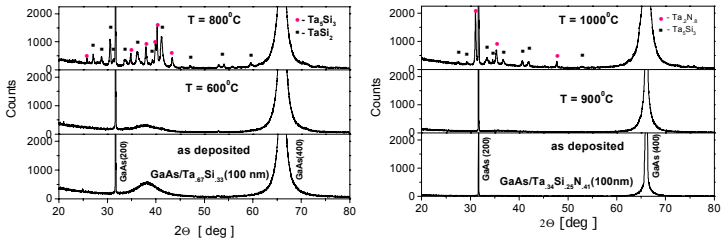


Rys. 11. Wpływ parametrów rozpylania katodowego (P = 200 W, f_{N2} = 2 – 20 sccm) na mikrostrukturę warstw Ti-Si-N: a), b) widma XRD warstw GaAs/$Ta_{0,67}Si_{0,33}$ i GaAs/$Ta_{0,34}Si_{0,25}N_{0,41}$, c) fragment widma XRD ilustrujący zmianę struktury warstwy Ta-Si-N ze wzrostem zawartości azotu

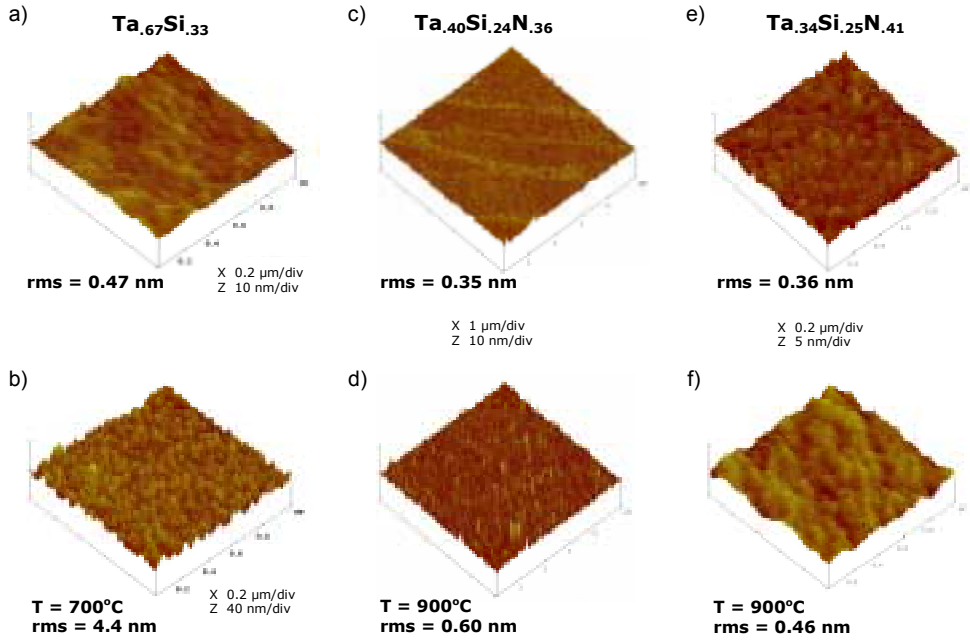
Wpływ obróbki termicznej na mikrostrukturę i własności elektryczne warstw Ta-Si-N ilustrują zależności przedstawione na rys. 12–17 oraz w tab. 2.

Tabela 2. Wpływ procesów termicznych na skład warstw GaAs/$Ti_xSi_{1-x-y}N_y$

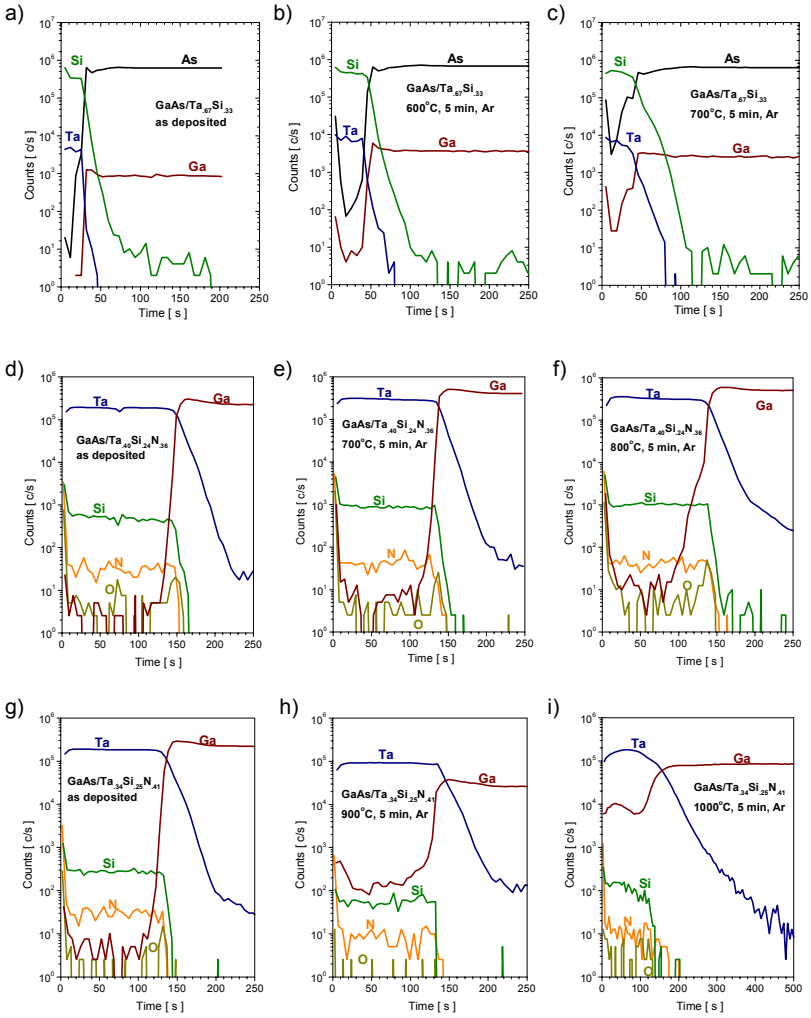
Metalizacja d = 100 nm	Parametry procesu obróbki termicznej		
	600°C, 5 min.	800°C, 5 min.	1000°C, 5min.
GaAs/$Ta_{0,67}Si_{0,33}$	$Ta_{0,67}Si_{0,33}$	Ta_5Si_3 + $TaSi_2$	Ta_5Si_3 + $TaSi_2$
GaAs/$Ta_{0,34}Si_{0,25}N_{0,41}$	$Ta_{0,34}Si_{0,25}N_{0,41}$	$Ta_{0,34}Si_{0,5}N_{0,41}$	Ta_5Si_3 + $Ta_{0,2}N_{0,8}$



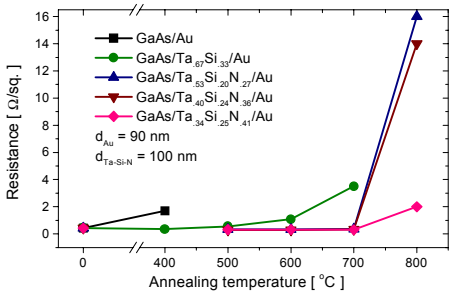
Rys. 12. Wpływ temperatury wygrzewania na mikrostrukturę warstw: a) GaAs/$Ta_{0,67}Si_{0,33}$, b) GaAs/ /$Ta_{0,34}Si_{0,25}N_{0,41}$



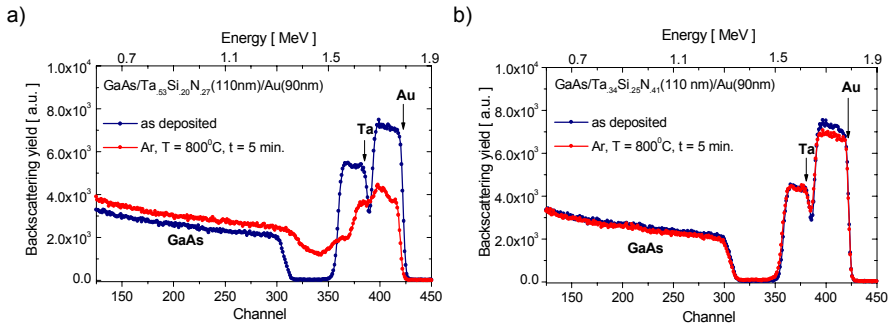
Rys. 13. Obrazy AFM powierzchni warstw Ta-Si-N:$Ta_{0,67}Si_{0,33}$ po osadzeniu (a) i wygrzewaniu w T = = 700°C, t = 5 min. (b); $Ta_{0,40}Si_{0,24}N_{0,36}$ po osadzeniu (c) i wygrzewaniu w T = 900°C, t = 5 min. (d); $Ta_{0,34}Si_{0,25}N_{0,41}$ po osadzeniu (e) i wygrzewaniu w T = 900°C, t = 5 min. (f)



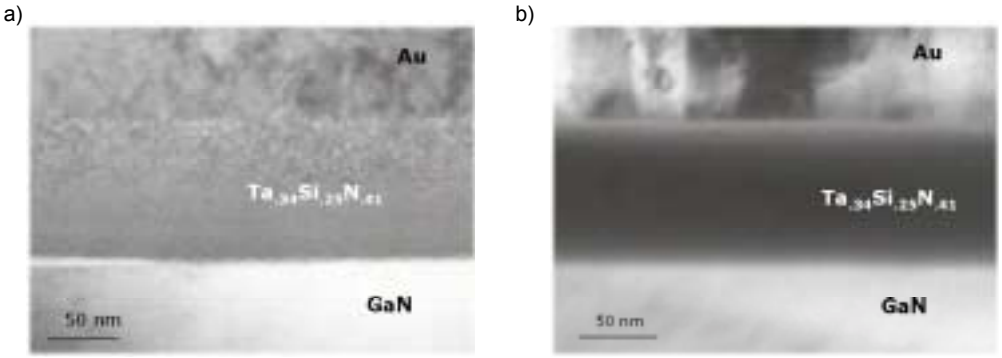
Rys. 14. Profile SIMS warstw Ta-Si-N:$Ta_{0,67}Si_{0,33}$ po osadzeniu (a) i po wygrzewaniu w T = 600°C (b), T = 700°C (c); $Ta_{0,40}Si_{0,24}N_{0,36}$ po osadzeniu (d) i po wygrzewaniu w T = 700°C (e), T = 800°C (f); $Ta_{0.34}S_{0.25}N_{0.41}$ po osadzeniu (g) i po wygrzewaniu w T = 900°C (h), T = 1000°C (i)



Rys. 15. Wpływ temperatury wygrzewania na rezystywność kontaktów GaAs/Ta-Si-N/Au



Rys. 16. Widma RBS kontaktów GaAs/$Ta_{0,53}Si_{0,20}N_{0,27}$/Au (a) i GaAs/$Ta_{0,34}Si_{0,25}N_{0,41}$/Au (b) przed i po wygrzewaniu w Ar, $T = 800^{o}C$, $t = 5$ min.

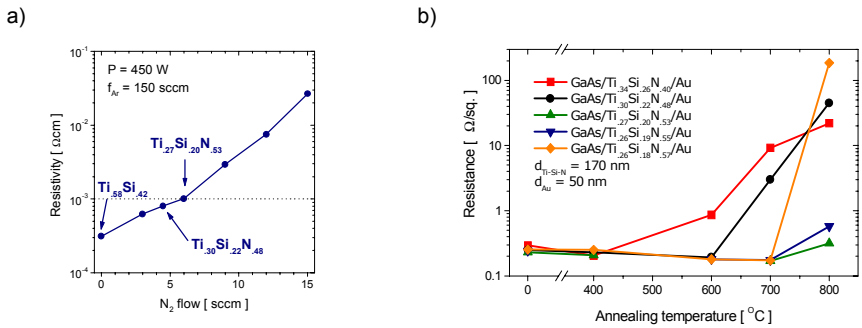


Rys. 17. Zdjęcia TEM kontaktu Au/$Ta_{0,34}Si_{0,25}N_{0,41}$/GaN przed (a) i po (b) wygrzewaniu w Ar, $T = 800^{o}C$, $t = 5$ min.

Podsumowując otrzymane wyniki należy podkreślić, iż cienkie warstwy o składzie $Ta_{0,34}Si_{0,25}N_{0,41}$ i grubości 100 nm stanowią znakomitą warstwę barierową, odporną na działanie podwyższonych aż do 800°C temperatur.

Wytwarzanie i własności barierowe cienkich warstw Ti-Si-N

Wpływ parametrów osadzania na rezystywność i własności barierowe warstw Ti-Si-N jest przedstawiony na rys. 18. Otrzymane wyniki wskazują, że cienkie

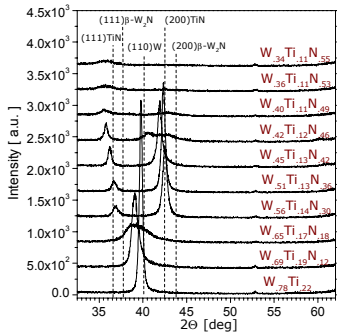


Rys. 18. Wpływ parametrów procesu osadzania na rezystywność warstw Ti-Si-N (a) i wygrzewania na rezystywność kontaktów GaAs/Ti-Si-N/Au (b)

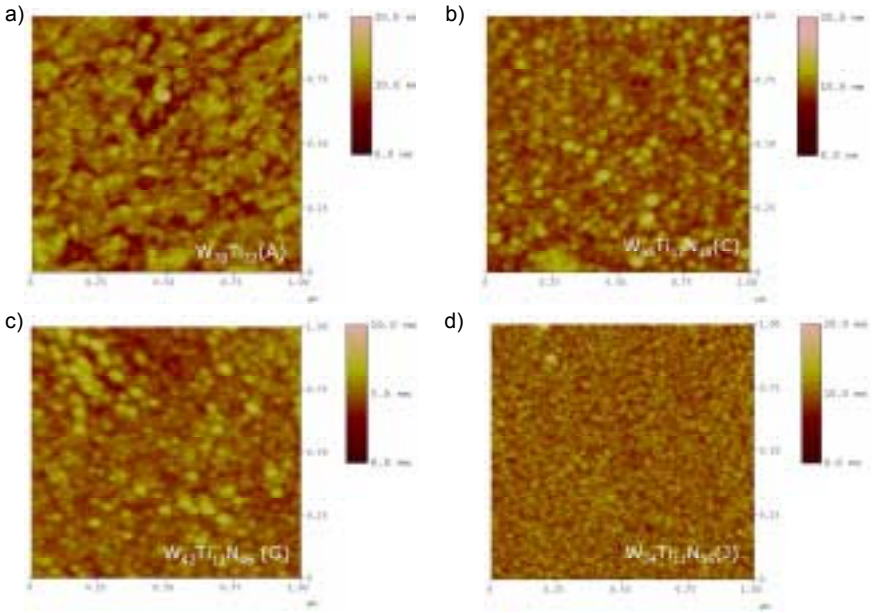
warstwy$Ti_{0,27}Si_{0,20}N_{0,53}$ spełniają wymogi wysokiego przewodnictwa i stabilności termicznej w temperaturze do 800°C.

Wytwarzanie i własności barierowe cienkich warstw W-Ti-N

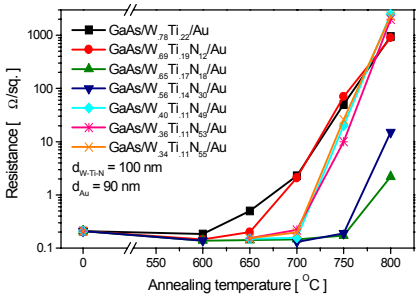
Wpływ parametrów osadzania na rezystywność, mikrostrukturę i własności barierowe warstw W-Ti-N jest przedstawiony na rys. 19–22. Otrzymane wyniki wskazują, że optymalizując parametry procesu osadzania można otrzymać przewodzące warstwy o strukturze amorficznej. Ich własności barierowe są jednakże gorsze w porównaniu z warstwami Ta-Si-N i Ti-Si-N. Najlepsze pod tym względem warstwy $W_{0,65}Ti_{0,17}N_{0,18}$ wykazują odporność na działanie podwyższonych temperatur nie przekraczających 750°C.



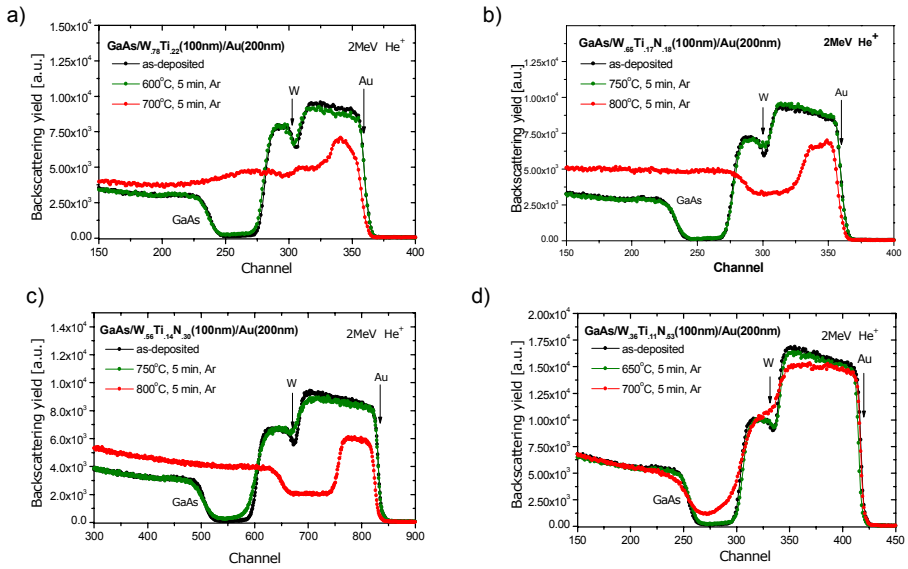
Rys. 19. Dyfraktogramy XRD warstw W-Ti-N



Rys. 20. Obrazy AFM powierzchni warstw W-Ti-N: a) $W_{0,78}Ti_{0,22}$, b) $W_{0,65}Ti_{0,17}N_{0,18}$, c) $W_{0,42}Ti_{0,12}N_{0,46}$, d) $W_{0,34}Ti_{0,11}N_{0,55}$



Rys. 21. Wpływ wygrzewania na własności barierowe warstw W-Ti-N



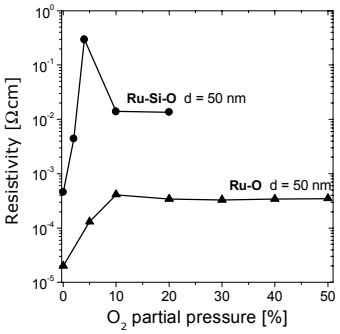
Rys. 22. Widma RBS kontaktów GaAs/$W_{0,78}Ti_{0,22}$/Au (a); GaAs/$W_{0,65}Ti_{0,17}N_{0,18}$/Au (b); GaAs/ $W_{0,56}Ti_{0,14}N_{0,30}$/Au (c) i GaAs/$W_{0,36}Ti_{0,11}N_{0,53}$/Au (d) przed i po wygrzewaniu w Ar

2.2.2. Cienkowarstwowe tlenki przewodzące na bazie rutenu

Cienkie warstwy Ru-O i Ru-Si-O były wytwarzane metodą magnetronowego rozpylania katodowego w plaźmie Ar/O_2 przy użyciu targetów Ru i Ru_1Si_1. Procesy osadzania były prowadzone w urządzeniu Leybold Z400 w modzie DC. Materiałem podłożowym był kwarc, szafir, krzem i epi-GaN.

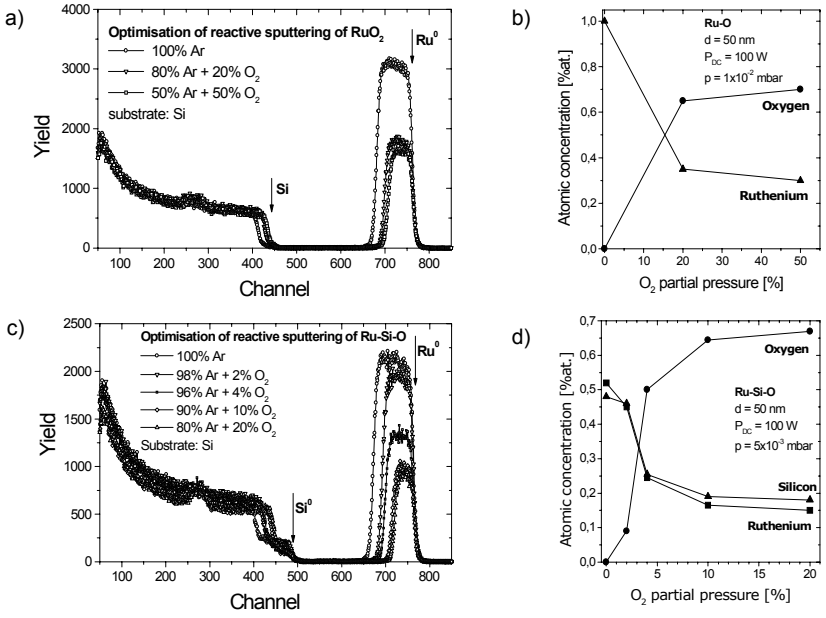
Zasadniczym zadaniem prowadzonych prac było ustalenie korelacji pomiędzy parametrami procesu osadzania a własnościami elektrycznymi i strukturą krystaliczną otrzymywanych warstw.

Wpływ zawartości tlenu w procesie rozpylania katodowego na rezystywność i skład chemiczny warstw Ru-O i Ru-Si-O ilustrują rys. 23 i 24. Komplementarne wyniki badań rentgenowskich wykazały, że warstwy RiO_2 charakteryzują się strukturą nanokrystaliczną, a warstwy $RuSiO_4$ cechuje struktura amorficzna.

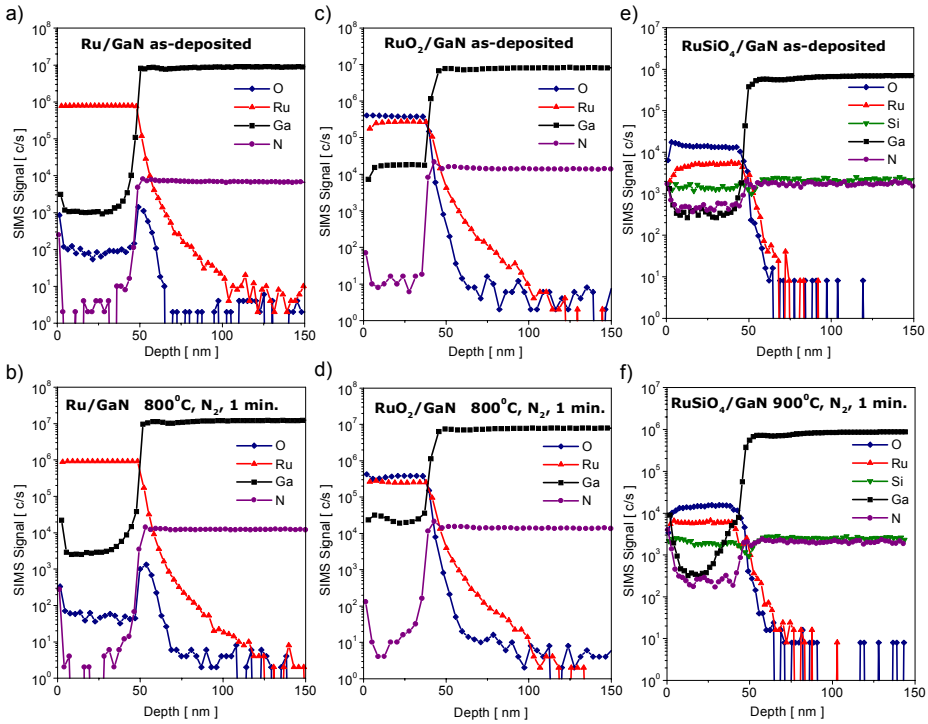


Rys. 23. Zależność rezystywności warstw Ru-O i RuSi-O w funkcji względnego ciśnienia tlenu podczas rozpylania katodowego z targetu Ru i RuSi

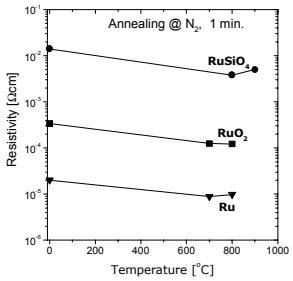
Badania stabilności termicznej warstw Ru-O_2/GaN i $RuSiO_4$/GaN (rys. 25, 26) wykazały, że pierwsze z nich charakteryzują się odpornością na działanie temperatur do 800°C, drugie zaś cechuje stabilność termiczna aż do 900°C.



Rys. 24. Widma RBS i skład atomowy warstw Ru-O (a, b) i Ru-Si-O (c, d) osadzonych na Si



Rys. 25. Profile SIMS warstw na bazie Ru osadzonych na GaN przed i po wygrzewaniu w azocie przez 1 min.: a), d) warstwa Ru; b), e) warstwa RuO_2; c), f) warstwa $RuSiO_4$



Rys. 26. Zależność rezystywności warstw Ru, RuO_2 i $RuSiO_4$ od temperatury ich wygrzewania

2.3. Cienkie warstwy CdO, ZnO i RuSiO jako przezroczyste elektrody kontaktowe dla struktur półprzewodnikowych na bazie GaSb pracujących w zakresie średniej podczerwieni

Najpopularniejszym materiałem na przezroczyste elektrody kontaktowe w przyrządach optoelektronicznych pracujących w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni jest tlenek indowo-cynowy (ITO). Użycie ITO dla średniej podczerwieni napotyka na znaczne ograniczenia ze względu na wzrastające w tym zakresie

widmowym wartości odbicia i absorpcji. Tak więc dla półprzewodników na bazie GaSb konieczne jest poszukiwanie innych tlenków przewodzących.

Biorąc po uwagę dotychczasowe doświadczenia, przeprowadzono badania czterech materiałów przewodzących: tlenku kadmu, tlenku cynku, tlenku cyny oraz tlenku rutenowo-krzemowego.

Badane TCO były osadzane na podłożach p-GaSb ($p = 3 \cdot 10^{17}$ cm^{-3}), domieszkowanych germanem p-$Al_{0,30}Ga_{0,70}As_{0,03}Sb_{0,97}$, oraz dodatkowo do badań optycznych na podłożach kwarcowych.

Warstwy Cd-O, Sn-O i Ru-Si-O były nakładane metodą reaktywnego rozpylania katodowego z targetów Cd, Sn i RuSi w atmosferze będącej mieszaniną argonu i tlenu. ZnO osadzano metodą RF sputteringu w atmosferze argonowej stosując target ZnO. Optymalizacja warunków osadzania (stosunek przepływu Ar/O_2, moc RF, ciśnienie w komorze procesowej) była prowadzona pod kątem uzyskania jak najwyższych wartości transmisji optycznej i przewodnictwa elektrycznego.

Charakteryzację tlenków przewodzących prowadzono wykonując pomiary rezystancji warstw tlenkowych (sonda czteroostrzowa), szybkości ich nakładania (pomiar grubości wykonywano za pomocą profilometru Tencor α-step 200), transmisji widmowej (spektrofotometr Perkin–Elmer Lambda 9 w Zakladzie Fizyki i Technologii Struktur Niskowymiarowych) oraz pomiary elipsometryczne (elipsometr spektroskopowy VASE w Zakładzie Badania Struktur MOS) pozwalające na wyznaczenie zależności widmowych współczynnika załamania i współczynnika ekstynkcji. Na podstawie pomiarów transmisji wyznaczano także szerokość przerwy zabronionej badanych tlenków. Rezystancję właściwą kontaktów omowych wyznaczano metodą c-TLM w układzie ze źródłem pomiarowym Keithey SourceMeter 2400. Skład warstw osadzanych reaktywnie określano metodą RBS (wiązka $^4He^+$ o energii 2 MeV) stosując do interpretacji wyników program symulacyjny RUMP. Morfologię powierzchni TCO badano techniką AFM (Digital Instruments Nanoscope IIIa).

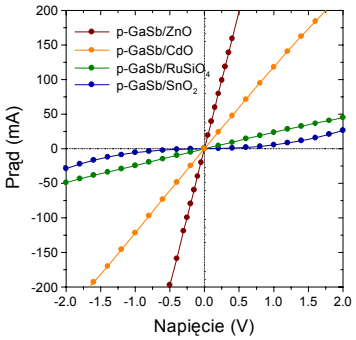
W tab. 3 podano optymalne parametry procesów wytwarzania oraz podstawowe charakterystyki uzyskanych TCO.

Tlenki kadmu, cynku i rutenowo-krzemowy tworzą zarówno z podłożami GaSb, jak i AlGaAsSb typu p kontakt omowy bezpośrednio po nałożeniu i nie wymagają dodatkowej obróbki termicznej (rys. 27). W przeciwieństwie do nich tlenek cyny nie daje z p-GaSb kontaktu omowego nawet po wygrzewaniu. Wartości rezystancji właściwej wyznaczone metodą c-TLM wynoszą od $5 \cdot 10^{-4}$ Ω·cm^2 dla kontaktu p-GaSb/CdO do $12 \cdot 10^{-2}$ Ω·cm^2 dla p-GaSb/$RuSiO_2$. Wyższe wartości rezystywności dla AlGaAsSb wynikają z niższego poziomu domieszkowania warstwy poczwórnej. Analizując parametry elektryczne, można powiedzieć, że najbardziej obiecującymi materiałami są tlenek cynku i tlenek kadmu.

Rysunek 28 przedstawia zależności widmowe transmisji warstw badanych tlenków przewodzących o grubości 100 nm osadzonych na podłożach kwarcowych. W zakresie widmowym 1800 ÷ 2400 nm najwyższą wartość transmisji ob-

Tabela 3. Parametry procesu wytwarzania oraz własności tlenków przewodzących i kontaktów TCO/półprzewodnik

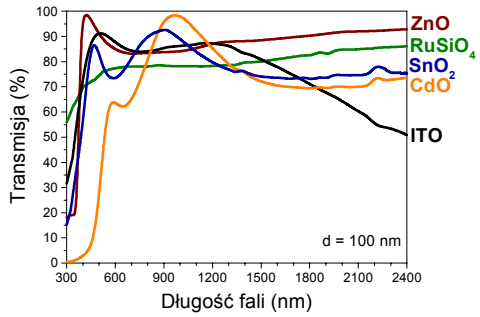
TCO	Warunki osadzania sputeringowego	Przerwa zabroniona [eV]	Rezystywność TCO [Ω·cm]	Rezystyw. kontaktu TCO/GaSb [Ω·cm^2]	Rezystywność kontaktu TCO/AlGaAsSb [Ω·cm^2]
CdO	DC $P = 50$ W $p = 1\cdot10^{-2}$ mbar 10%O_2 – 90%Ar	2,4	$5\cdot10^{-4}$	$3{,}4\cdot10^{-4}$	$5\cdot10^{-3}$
ZnO	RF $I_c = 160$ mA $p_{Ar} = 2\cdot10^{-3}$ mbar	3,3	$2\cdot10^{-3}$	$2{,}4\cdot10^{-4}$	$1{,}3\cdot10^{-3}$
RuSiO	DC $P = 100$ W $p = 5\cdot10^{-3}$ mbar 20%O_2 – 80%Ar	–	$1\cdot10^{-2}$	$1{,}5\cdot10^{-3}$	–
SnO_2	DC $P = 75$ W $p = 1\cdot10^{-2}$ mbar 20%O_2 – 80%Ar	3,6	$4\cdot10^{-3}$	NΩ	–



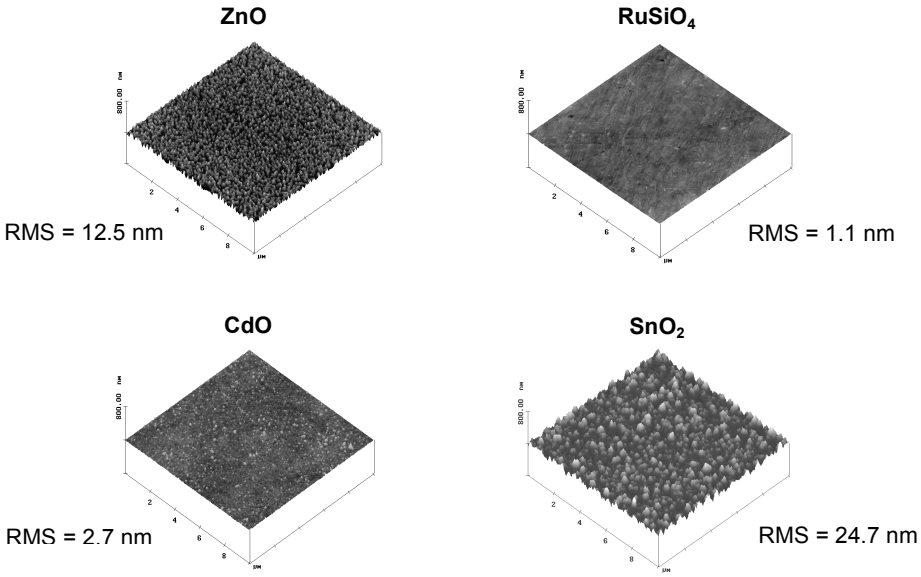
Rys. 27. Charakterystyki prądowo-napięciowe struktur p-GaSb/TCO

serwuje się dla ZnO (na poziomie 90%) oraz $RuSiO_4$ (85%), nieco niższe wartości dla CdO i SnO_2 (ok. 75%). Jak widać, tlenki te spełniają kryterium dobrej przezroczystości w wymaganym zakresie długości fali. Dla porównania pokazana została również transmisja warstwy ITO, która dla $\lambda = 2400$ nm spada do wartości 50%.

Morfologię powierzchni analizowanych tlenków osadzonych na podłożu GaSb pokazano na rys. 29.



Rys. 28. Widmowa zależność transmisji warstw ZnO, $RuSiO_4$, SnO_2, CdO i ITO



Rys. 29. Obrazy AFM powierzchni ZnO, $RuSiO_4$, CdO i SnO_2 osadzonych sputteringowo na podłożu GaSb

3. Współpraca międzynarodowa

W ramach 6. Programu Ramowego Zakład uczestniczył w realizacji dwóch projektów europejskich współpracując z następującymi ośrodkami zagranicznymi:

- DENIS
  - ACREO AB, Szwecja;
  - Linköping University, Linköping, Szwecja;
  - Centrum Badań Wysokociśnieniowych UNIPRESS PAN, Warszawa;
  - Okmetic, Finlandia;
  - Universität Bremen, Brema, Niemcy;

  - OSRAM-Opto Semiconductors GmbH, Niemcy;
  - Instytut Fizyki PAN, Warszawa.
- NANOPHOS
  - National Research Foundation, Ateny, Grecja;
  - THALES, Paryż, Francja;
  - Jenasensoric E.V., Jena, Niemcy;
  - Cybernetix, Marsylia, Francja;
  - 3D Digital Design & Development Ltd, Broxbourne, Wielka Brytania;
  - Foundation for Research and Technology – Hellas, Iraklion, Grecja;
  - The Weizmann Institute of Science, Rehovot, Izrael;
  - Universite de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, Marsylia, Francja;
  - Universita Degli Studi di Lecce, Włochy;
  - Institutul National de Cercetare Dezvoltare Pentru Fizica Laserilor, Plasmei si Radiatiei, Bukareszt, Rumunia;
  - Centre National de la Recherche Scientifique, Paryż, Francja.

Publikacje'2004

[P1] ANTONOV A. V., GAVRILENKO V. I., DEMIDOV E. V., MOROZOV S. V., DUBINOV A. A., LUSAKOVSKI J., KNAP W., DYAKONOVA N., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., SHUR M. S.: Electron Transport and Terahertz Radiation Detection in Submicrometer-Sized GaAs/AlGaAs Field-Effect Transistors with Two-Dimensional Electron Gas. *Phys. Solid State* 2004 vol. 46 nr 1 s. 146–149.

[P2] ANTONOV A. V., GAVRILENKO V. I., DEMIDOV E. V., MOROZOV S. V., DUBINOV A. A., LUSAKOVSKI J., KNAP W., DYAKONOVA N., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., SHUR M. S.: Electron Transport and Terahertz Radiation Detection in Submicrometer-Sized GaAs/AlGaAs Field-Effect Transistors with Two-Dimensional Electron Gas. *Fizika Tverdovo Tela* 2004 vol. 46 s. 146–149 (ros.).

[P3] DENNEMERCK J., BOTTCHER T., FIGGE S., EINFIELDT S., KROGER R., HOMMEL D., KAMIŃSKA E., WIATROSZAK W., PIOTROWSKA A.: The Role of Sub-Contact Layers in the Optimization of Low-Resistivity Contacts to p-Type GaN. *phys. stat. sol.* (c) 2004 vol. 1 nr 10 s. 2537–2540.

[P4] GRABECKI G., WRÓBEL J., DIETL T., PAPIS E., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., RATUSZNA A., SPRINGHOLZ G., BAUER G.: Ballistic Transport in PbTe-Based Nanostructures. *Physica* E 2004 vol. 20 nr 3–4 s. 236–245.

[P5] DOBOSZ D., ZYTKIEWICZ 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.* (w druku).

[P6] GRABECKI G., WRÓBEL J., FRONC K., ALESZKIEWICZ M., GUZIEWICZ M., PAPIS E., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., SHTRIKMAN H., DIETL T.: Unidirectional Transmission of Electrons in a Magnetic Field Gradient. *Physica* E 2004 vol. 21 nr 2–4 s. 451–455.

[P7] GUZIEWICZ E., GODLEWSKI M., KOPALKO K., LUSAKOWSKA E., DYNOWSKA E., GUZIEWICZ M., GODLEWSKI M. M., PHILLIPS M.: Atomic Layer Deposition of Thin Films of ZnSe – Structural and Optical Characterization. *Thin Solid Films* 2004 vol. 446 nr 2 s. 172–177.

[P8] GUZIEWICZ E., KOPALKO K., SADOWSKI J., GUZIEWICZ M., GOLACKI Z.: Electronic Structure of Zn(Mn)O Surface Alloy – a Resonant Photoemission Study. *Mat. Res. Soc. Proc*. 2004 vol. 786 s. E6.4.1-6.

[P9] GUZIEWICZ E., KOPALKO K., SADOWSKI J., GUZIEWICZ M., GOLACKI Z., KANSKI J., ILVER L.: Mn on the Surface of ZnO(0001) - a Resonant Photoemisson Study. *Physica Scripta* 2004 (w druku).

[P10] JAROSZYŃSKI J., ANDREARCZYK T., KARCZEWSKI G., WRÓBEL J., WOJTOWICZ T., PAPIS E., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., POPOVIC D., DIETL T.: Quantum Hall Ferromagnetism in II-VI Based Alloys. *phys. stat. sol.* (b) 2004 vol. 241 nr 3 s. 712–717.

[P11] JAROSZYŃSKI J., ANDREARCZYK T., WRÓBEL J., KARCZEWSKI G., WOJTOWICZ T., PAPIS E., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., POPOVIC D., DIETL T.: Quantum Hall Ferromagnet in Magnetically-Doped Quantum Wells. *Physica* E 2004 vol. 22 nr 1–3 s. 76–81.

[P12] KAMIŃSKA E., GOŁASZEWSKA K., PIOTROWSKA A., KUCHUK A., KRUSZKA R., PAPIS E., SZELOCH R., JANUS P., GOTSZALK T., BARCZ A., WAWRO A: Study of Long-Term Stability of Ohmic Contacts to GaN. *phys. stat. sol.* (c) 2004 vol. 1 nr 2 s. 219–222.

[P13] KAMIŃSKA E., KOSSUT J., PIOTROWSKA A., PRZEŹDZIECKA E., DOBROWOLSKI W., DYNOWSKA E., BUTKUTE R., BARCZ A., JAKIEŁA R., ALESZKIEWICZ M., JANIK E., KOWALCZYK E.: Transparent p-Type ZnO by Oxidation of Zn-Based Compounds. *ICPS-27 Proc*. (zgł. do druku).

[P14] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., KRUSZKA R., KUCHUK A., SZADE J., WINIARSKI A., JASINSKI J., LILIENTAL-WEBER Z.: ZnO-GaN Tunnel Junction for Transparent Ohmic Contacts to p-GaN. *J. Alloys a. Compounds* 2004 vol. 371 nr 1–2 s. 129–132.

[P15] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., ŁUKASIEWICZ R., SZCZĘSNY A., KOWALCZYK E., JAGODZIŃSKI P., GUZIEWICZ M., KUDŁA A., BARCZ A., JAKIEŁA R.: Thermally Stable Transparent Ru-Si-O Schottky Contacts for n-Type GaN and AlGaN. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc*. (w druku).

[P16] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., KOSSUT J., BUTKUTE R., DOBROWOLSKI W., GOŁASZEWSKA K., BARCZ A., JAKIELA R., DYNOWSKA E., PRZEZDZIECKA E., WAWER D.: P-Type in ZnO:N by Codoping with Cr. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 2004 vol. 786 s. E6.1.1-6.

[P17] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., KOSSUT J., BUTKUTE R., DOBROWOLSKI W., GOŁASZEWSKA K., BARCZ A., JAKIELA R., DYNOWSKA E., PRZEZDZIECKA E., WAWER D.: p-Type Conducting ZnO: Fabrication and Characterisation. *phys. stat. sol.* (c) 2004 (zgł. do druku).

[P18] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., SZCZĘSNY A., ŁUKASIEWICZ R., KUCHUK A., GOŁASZEWSKA K., KRUSZKA R., BARCZ A., JAKIEŁA R., DYNOWSKA E., STONERT A., TUROS A.: Thermally Stable Ru-Si-O Gate Electrode for AlGaN/GaN HEMT. *phys. stat. sol.* (c) (w druku).

[P19] KANIEWSKA M., SADOWSKI J., GUZIEWICZ M.: DLTS Study of Deep Centers Created by Ar-Ion Bombardment in n- and p-Type MBE AIGaAs. *Europ. Phys. J. Appl. Phys*. 2004 vol. 27 s. 213–217.

[P20] KORBUTYAK D. V., KLAD'KO V. P., KRYLYUK S. G., LITOVCHENKO V. G., SHALIMOV A. V., KUCHUK A.: Influence of Layer Deformation on Thermal Quenching of Exciton Photoluminescence in Short-Period GaAs/AlAs Superlattices. *Semicond. Sci. a. Technol*. 2004 vol. 19 s. 475–479.

[P21] KUCHUK A., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., DYNOWSKA E., LYTVYN O. S., NOWICKI L., RATAJCZAK R.: Amorphous Ta-Si-N Diffusion Barriers on GaAs. *Thin Solid Films* 2004 vol. 459 nr 1–2 s. 292–296.

[P22] KUCHUK A., CIOSEK J., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., WAWRO A., LYTVYN O. S., NOWICKI L., RATAJCZAK R.: Barrier Properties of Ta-Si-N Films in Ag-and Au-Containing Metallization. *Vacuum* 2004 vol. 74 nr 2 s. 195–199.

[P23] KUCHUK A., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., JAKIELA R., LYTVYN O. S., KLADKO V. P., KORCHOVYI A. A., OSADCHA N. V.: The Study of Thermal Stability of Ta-Si Films on the GaAs Substrate. *Phys. a. Chem. of Solid State* 2004 vol. 5 nr 1 s. 85–89 (ukr.).

[P24] KUCHUK A., KLADKO V. P., MACHULIN V. F., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., GOŁASZEWSKA K., RATAJCZAK R., MINIKAYEV R.: Diffusion Barrier Properties of Reactively Sputtered W-Ti-N Thin Films. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2004 vol. 8 s. 22–26.

[P25] LUSAKOWSKI J., KNAP W., DYAKONOVA N., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., SHUR M. S., SMIRONOV D., GAVRILENKO V. I., ANTONOV A. V., MOROZOV S. V.: Magnetotransport Characterization of THz Detectors Based on Plasma Oscillations in Submicron Field-Effect Transistors. *Phys. Solid State* 2004 vol. 46 nr 1 s. 138–145.

[P26] LUSAKOWSKI J., KNAP W., DYAKONOVA N., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., SHUR M. S., SMIRONOV D., GAVRILENKO V. I., ANTONOV A. V., MOROZOV S. V.: Magnetotransport Characterization of THz Detectors Based on Plasma Oscillations in Submicron Field-Effect Transistors. *Fizika Tverdovo Teła* 2004 vol. 46 s. 138–145.

[P27] MYCIELSKI A., SZADKOWSKI A., KOWALCZYK L., WITKOWSKA B., JAKIELA R., BARCZ A., ALESHEVYCH P., SZUSZKIEWICZ W., SUCHOCKI A., LUSAKOWSKA E., KAMIŃSKA E., DOBROWOLSKI W.: ZnO and ZnO:Mn Crystals Obtained with the Chemical Vapour Transport Method. *phys. stat. sol*. (c) 2004 vol.1 nr 4 s. 884–887.

[P28] MYCIELSKI A., KOWALCZYK L., SZADKOWSKI A., CHWALISZ B., WYSMOLEK A., STEPNIEWSKI R., BARANOWSKI J. M., POTEMSKI M., BARCZ A., WITKOWSKA B., KAMIŃSKA E.: The Chemical Vapour Transport Growth of ZnO Single Crystals. *J. Alloys a. Compounds* 2004 vol. 371 nr 1–2 s. 150–152.

[P29] PAPIS E., PIOTROWSKA A., PIOTROWSKI T. T., GOŁASZEWSKA K., ILKA L., KRUSZKA R., RATAJCZAK J., KĄTCKI J., WRÓBEL J., ALESZKIEWICZ M., ŁUKASIEWICZ R.: Fabrication of GaSb Microlenses by Photo and E-Beam Lithography and Dry Etching. *Solid St. Phenom.* 2004 vol. 99–100 s. 83–88.

[P30] PIOTROWSKA A., PAPIS E., GOŁASZEWSKA K., ŁUKASIEWICZ R., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKI T. T., KRUSZKA R., KUDŁA A., RUTKOWSKI J., SZADE J., WINIARSKI A., WAWRO A., ALESZKIEWICZ M.: Improved Performance of GaSb-Based MIR Photodetectors Through Electrochemical Passivation in Sulphur Containing Solutions. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc*. (w druku).

[P31] PISKORSKI M., PIOTROWSKA A., PIOTROWSKI T. T., GOŁASZEWSKA K., PAPIS E., KĄTCKI J., RATAJCZAK J., BARCZ A., WAWRO A.: LPE Growth and Characterisation of GaInAsSb and GaAlAsSb Quaternary Layers on (100) GaSb Substrates. *Thin Solid Films* 2004 vol. 459 nr 1–2 s. 2–6.

[P32] PRZEŹDZIECKA E., KAMIŃSKA E., DYNOWSKA E., JANIK E., BUTKUTE R., DOBROWOLSKI W., SAWICKI M., KEPA H., JAKIELA R., ALESZKIEWICZ M., KOSSUT J.: Preparation and Characterization of Hexagonal MnTe and ZnO Layers. *phys. stat. sol.* (c) 2004 (zgł. do druku).

[P33] WRZESIŃSKA H., ILKA L., WAWER D., HEJDUK K., KUDŁA A., BUGAJSKI M., LUSAKOWSKA E.: Investigation of Indium Tin Oxide (ITO) Films for the VCSEL Laser with Dielectric Bragg Reflectors. *phys. stat. sol.* (c) 2004 vol. 1 nr 2 s. 396–400.

Konferencje'2004

[K1] CIOSEK J., PASZKOWICZ W., KUBICKI J., PANKOWSKI P., PRZESŁAWSKI T., ZARASKA W.: Modification of Cu-Al-O Film Microstructure During Post-Deposition Annealing. 4th Int. Conf. on Solid State Crystals: Material Science and Applications, Zakopane, 16–20.05.2004 (kom.).

[K2] CIOSEK J., PASZKOWICZ W., KUBICKI J., PIOTROWSKA A., KUDŁA A., PRZESŁAWSKI T., PANKOWSKI P., MINIKAYEV R.: Phase Relationships in Annealed Cu-Al-O Layers. E-MRS Fall Meet. 2004, Warszawa, 6–10.09.2004 (plakat).

[K3] DOBOSZ D., ZYTKIEWICZ 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. 4th Int. Conf. on Solid State Crystals: Material Science and Applications, Zakopane, 16–20.05.2004 (plakat).

[K4] GOŁASZEWSKA K., PAPIS E., PIOTROWSKA A., PIOTROWSKI T. T., KAMIŃSKA E., KRUSZKA R., ŁUKASIEWICZ R., RUTKOWSKI J., SZADE J., WINIARSKI A., WAWRO A.: The Effect of Sulphur Passivation Treatment on GaSb/InGaSb/AlGaSb Photovoltaic Detector Parameters. 4th Int. Conf. on Solid State Crystals: Material Science and Applications, Zakopane, 16–20.05.2004 (plakat).

[K5] GOŁASZEWSKA K., KAMIŃSKA E., KOWALCZYK E., KRUSZKA R., ŁUKASIEWICZ R., PAPIS E., PIOTROWSKA A., PIOTROWSKI T. T., SKOCZYLAS P., BARCZ A., JAKIELA R.: Transparent Conducting Oxides as Ohmic Contacts for GaSb-Based Thermophotovoltaic Cells. E-MRS Fall Meet. 2004, Warszawa, 6–10.09.2004 (plakat).

[K6] GRABECKI G., WRÓBEL J., DIETL T., PAPIS E., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., SPRINGHOLZ G., BAUER G.: Conductance Quantization in Nanostructures of Narrow PbTe Quantum Wells. XXXIII Int. School on the Physics of Semiconducting Compounds, Ustroń-Jaszowiec, 29.05–4.06.2004 (plakat).

[K7] GRABECKI G., WRÓBEL J., BASTJAN M., MICHALUK E., FRONC K., ALESZKIEWICZ M., PAPIS E., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., SPRINGHOLZ G., BAUER G., DIETL T.: Andreev Reflection by In/PbTe Interface. XXXIII Int. School on the Physics of Semiconducting Compounds, Ustroń-Jaszowiec, 29.05–4.06.2004 (kom.).

[K8] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., KOSSUT J., BUTKUTE R., DOBROWOLSKI W., GOŁASZEWSKA K., BARCZ A., JAKIELA R., DYNOWSKA E., PRZEZDZIECKA E., WAWER D.: Formation Process and Properties of p-Type ZnO Thin Films. XXXIII Int. School on the Physics of Semiconducting Compounds, Ustroń-Jaszowiec, 29.05–4.06.2004 (plakat).

[K9] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., KUCHUK A., ŁUKASIEWICZ R., SZCZĘSNY A., WIATROSZAK M., BARCZ A., DYNOWSKA E., JAKIELA R., STONERT A., TUROS A.: Capabilities of Ruthenium-Based Contacts to GaN. XXXIII Int. School on the Physics of Semiconducting Compounds, Ustroń-Jaszowiec, 29.05–4.06.2004 (plakat).

[K10] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., KOSSUT J., PRZEZDZIECKA E., GOŁASZEWSKA K., DYNOWSKA E., DOBROWOLSKA W., BUTKUTE R., BARCZ A., JAKIELA R., JANIK E., WAWER D.: Properties of Transparent p-Type ZnO Films Grown by Oxidation of Zn-Based Compounds. 8th Int. Conf. on Nanometer-Scale Science and Technology, Wenecja, Włochy, 28.06–2.07.2004 (kom.).

[K11] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., KUCHUK A., ŁUKASIEWICZ R., KOWALCZYK E., BARCZ A., DYNOWSKA E., JAKIELA R., STONERT A., TUROS A., SZCZĘSNY A., WIATROSZAK M.: Thermally Stable Transparent Ru-Si-O Schottky Contacts for n-Type GaN and $Al_xGa_{1-x}N$. 2004 MRS Fall Meet., Boston, USA, 29.11–3.12.2004 (plakat).

[K12] KAMIŃSKA E., KOSSUT J., PIOTROWSKA A., PRZEŹDZIECKA E., DOBROWOLSKI W., DYNOWSKA E., BUTKUTE R., BARCZ A., JAKIEŁA R., ALESZKIEWICZ M., JANIK E., KOWALCZYK E.: Transparent

p-Type ZnO by Oxidation of Zn-Based Compounds. 27th Conf. on the Physics of Semiconductors, Flagstaff, Arizona, USA, 26–30.07.2004 (plakat).

[K13] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., SZCZĘSNY A., ŁUKASIEWICZ R., KUCHUK A., GOŁASZEWSKA K., KRUSZKA R., BARCZ A., JAKIEŁA R., DYNOWSKA E., STONERT A., TUROS A.: Thermally Stable Ru-Si-O Gate Electrode for AlGaN/GaN HEMT. Cells. E-MRS Fall Meet. 2004, Warszawa, 6–10.09.2004 (plakat).

[K14] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., KOSSUT J., BUTKUTE R., DOBROWOLSKI W., GOŁASZEWSKA K., BARCZ A., JAKIEŁA R., DYNOWSKA E., PRZEŹDZIECKA E., WAWER D.: p-Type Conducting ZnO; Fabrication and Characterisation. E-MRS Fall Meet. 2004, Warszawa, 6–10.09.2004 (kom.).

[K15] KROEGER R., DENNEMARCK J., FIGGE S., BOETTCHER T., HOMMEL D., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A.: Microstructure of Highly p-Type Doped GaN Sub-Contact Layers for Low-Resistivity Contacts. 2004 MRS Fall Meet., Boston, USA, 29.11–3.12.2004 (plakat).

[K16] KUCHUK A., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., GOŁASZEWSKA K., PIOTROWSKI T.T., KRUSZKA R., MINIKAYEV R.A., LYTVYN O. S., TUROS A.: Barrier Properties of Reactively Sputter-Deposited W-Ti-N Thin Films on GaAs. 8th Int. Conf. on Nanometer-Scale Science and Technology, Wenecja, Włochy, 28.06–2.07.2004 (plakat).

[K17] KUCHUK A., KLADKO V. P., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., GOŁASZEWSKA K., MACHULIN V. F., MINIKAYEV R., RATAJCZAK R.: Diffusion Barrier Properties of Reactively Sputtered W-Ti-N Thin Films. E-MRS Fall Meet. 2004, Warszawa, 6–10.09.2004 (plakat).

[K18] KUCHUK A., KLADKO V. P., MACHULIN V.F., PIOTROWSKA A., MINIKAYEV R., LYTVYN O. S.: Structural Analysis of Reactively Sputtered W-Ti-N Thin Films. E-MRS Fall Meet. 2004, Warszawa, 6–10.09.2004 (plakat).

[K19] MANASIS G., TSIGARA A., ANYFANTIS G., MADAMOPOULOS N., MOUSDIS G., GATSOULI K., PISPAS S., VAINOS N., PERRONE A., DATTA R., CIOSEK J., GOŁASZEWSKA K., KAMIŃSKA E., KRUSZKA R., PIOTROWSKA K., COURIS S.: Nanocomposite Photonic Sensors: First Approach by the Nanophos Initiative. E-MRS Fall Meet. 2004, Warszawa, 6–10.09.2004 (plakat).

[K20] PAPIS E., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKI T. T., GOŁASZEWSKA K., ILKA L., KRUSZKA R., RATAJCZAK J., KĄTCKI J., WRÓBEL J., ALESZKIEWICZ M., ŁUKASIEWICZ R.: GaSb Microlenses Fabricated by Photo and E-Beam Lithography and Dry Etching. 4th Int. Conf. on Solid State Crystals: Material Science and Applications, Zakopane, 16–20.05.2004 (plakat).

[K21] PAPIS E., PIOTROWSKA A., PIOTROWSKI T. T., GOŁASZEWSKA K., KAMIŃSKA E., KRUSZKA R., ŁUKASIEWICZ R., KUDŁA A., RUTKOWSKI J., SZADE J., WINIARSKI A., WAWRO A.: Sulphur Passivation of GaSb Surface and GaSb-Based MIR Photodetector Heterostructures. 8th Int. Conf. on Nanometer-Scale Science and Technology, Wenecja, Włochy, 28.06–2.07.2004 (plakat).

[K22] PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., GOŁASZEWSKA K., WIATROSZAK M., PIOTROWSKI T. T., BARCZ A., DENNEMARCK J., FIGGE S., BOTTCHER T., HOMMEL D.: Ohmic Contacts Study for GaN-Based Laser Diodes. 4th Int. Conf. on Solid State Crystals: Material Science and Applications, Zakopane, 16–20.05.2004 (plakat).

[K23] PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., GOŁASZEWSKA K., WIATROSZAK M., PIOTROWSKI T. T., BARCZ A., DENNEMARCK J., FIGGE S., BOTTCHER T., HOMMEL D.: Application of Ta-Si-N Thin Film Diffusion Barrier in PdAu Metalization to p-Type GaN. 8th Int. Conf. on Nanometer-Scale Science and Technology, Wenecja, Włochy, 28.06–2.07.2004 (plakat).

[K24] PIOTROWSKA A., PAPIS E., GOŁASZEWSKA K., ŁUKASIEWICZ R., PIOTROWSKI T.T., KRUSZKA R., KUDŁA A., RUTKOWSKI J., SZADE J., WINIARSKI A., ALESZKIEWICZ M.: Improved Performance of GaSb-Based MIR Photodetectors trough Electrochemical Passivation in Sulphur Containing Solutions. 2004 MRS Fall Meet., Boston, USA, 29.11–3.12.2004 (kom.)

[K25] PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., KUCHUK A., GOŁASZEWSKA K., WIATROSZAK M., ŁUKASIEWICZ R., PIOTROWSKI T. T., KĄTCKI J., RATAJCZAK J., BARCZ A., JAKIELA R., TUROS A., STONERT A., DENNEMARCK J., FIGGE S., BOTTCHER T., HOMMEL D.:TaSiN, TiSiN and TiWN Diffusion Barriers for Metallization Systems to GaN. E-MRS Fall Meet. 2004, Warszawa, 6–10.09.2004 (plakat).

[K26] PISKORSKI M., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., PIOTROWSKI T. T., JUNG W., PRZESŁAWSKI T., KĄTCKI J., RATAJCZAK J., BARCZ A., WAWRO A.: Sn and Te Doped InGaAsSb Quaternary Layers for TPV Applications. 8th Int. Conf. on Nanometer-Scale Science and Technol- ogy, Wenecja, Włochy, 28.06–2.07.2004 (plakat).

[K27] PISKORSKI M., PIOTROWSKI T. T., GOŁASZEWSKA K., SKOCZYLAS P., PIOTROWSKA A., JUNG W., PRZESŁAWSKI T., KĄTCKI J., RATAJCZAK J., BARCZ A., WAWRO A.: Luttice Matched InGaAsSb/ /GaSb Heterostructures for Thermophotovoltaic Cells. 6th Int. Conf. on Mid-Infrared Optoelectronics Materials and Devices, MIOMD-VI, 28.06–2.07.2004 St. Petersburg, Rosja (plakat).

[K28] PRZEŹDZIECKA E., KAMIŃSKA E., DYNOWSKA E., JANIK E., BUTKUTE R., DOBROWOLSKI W., SAWICKI M., KEPA H., JAKIELA R., KOSSUT J.: In Search for Magnetism in II-VI Materials. XXXIII Int. School on the Physics of Semiconducting Compounds, Ustroń-Jaszowiec, 29.05–4.06.2004 (plakat).

[K29] PRZEŹDZIECKA E., KAMIŃSKA E., DYNOWSKA E., JANIK E., BUTKUTE R., DOBROWOLSKI W., SAWICKI M., KEPA H., JAKIELA R., ALESZKIEWICZ M., KOSSUT J.: Preparation and Characterization of Hexagonal MnTe and ZnO Layers. E-MRS Fall Meet. 2004, Warszawa, 6–10.09.2004 (plakat).

[K30] SOCHACKI M., ŁUKASIEWICZ R., SZMIDT J., RZODKIEWICZ W., LEŚKO M., WIATROSZAK M.: Thermal Oxidation and Nitridation of 4H-SiC for MS and MIS Power Devices. VIII Konf. Nauk. ”Technologia Elektronowa” ELTE 2004, Stare Jabłonki, 19–22.04.2004 (plakat, abstr. s. 140–141).

[K31] SZCZĘSNY A., KAMIŃSKA E., SZMIDT J.: GaN – The Material for High Power Microwave Devices (HEMT) Working in Extreme Conditions. VIII Konf. Nauk. ”Technologia Elektronowa” ELTE 2004, Stare Jabłonki, 19–22.04.2004 (plakat, abstr. s. 146–147).