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 Michał Borysiewicz, e-mail: mbory@ite.waw.pl,
mgr Krystyna Gołaszewska, e-mail: krystyg@ite.waw.pl,
dr inż. Marek Guziewicz, e-mail: margu@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. Norbert Kwietniewski, e-mail: nkwietni@interia.pl,
Iwona Pasternak, e-mail: iwonap@ite.waw.pl,
dr Ewa Papis-Polakowska, e-mail: papis@ite.waw.pl,
dr inż. Tadeusz T. Piotrowski, e-mail: ttpiotr@ite.waw.pl,
mgr inż. Zuzanna Sidor, e-mail: zsidor@ite.waw.pl

1. Wprowadzenie

Działalność naukowo-badawcza Zakładu Technologii Struktur Półprzewodnikowych dla Fotoniki jest ukierunkowana na opracowanie i optymalizację metod wytwarzania i obróbki technologicznej funkcjonalnych struktur cienkowarstwowych dla nowoczesnych przyrządów półprzewodnikowych opartych o związki półprzewodnikowe III-V, II-VI i IV-IV, ze szczególnym uwzględnieniem przyrządów półprzewodnikowych na bazie GaN, GaSb, ZnO i SiC.

Badania dotyczą zarówno struktur cienkowarstwowych, pełniących rolę obszarów czynnych przyrządu, jak i struktur z materiałów metalicznych, dielektrycznych i półprzewodnikowych, pełniących funkcje kontaktów omowych, kontaktów prostujących, przezroczystych elektrod, powłok przeciwodblaskowych oraz powłok pasywacyjnych.

W 2007 r. Zakład realizował następujące projekty badawcze:

- „Technologia funkcjonalnych struktur cienkowarstwowych dla przyrządów półprzewodnikowych III-V". Etap III (projekt statutowy nr 1.03.045),
- "Tranzystory polowe AlGaN/GaN nowej generacji dla elektroniki dużej mocy i wysokiej częstotliwości" (projekt badawczy nr 3 T11B 00826),
- "Półprzewodnikowe fotoogniwa GaSb/In(Al)Ga As Sb do zastosowań w przyrządach termofotowoltaicznych" (projekt badawczy nr 3 T11B 00926),
- "Inżynieria międzypowierzchni SiC/metal i SiC/izolator: wytwarzanie, charakteryzacja i zastosowanie w technologii tranzystora MOSFET" (projekt badawczy nr 3 T11B 042 30),

- "Opracowanie technologii nanostruktur fotonicznych wraz z układami sprzęgającymi optyki zintegrowanej dla zastosowań w technice sensorowej" (projekt nr N515 025 32/1887),
- "Nowe materiały i sensory dla optoelektroniki, informatyki, energetyki i medycyny" (projekt nr D/SN-001/03/2007),
- „Hybrydowe podłoża dla konkurencyjnej elektroniki wysokiej częstotliwości" HYPHEN (projekt EC nr FP-6 IST 027455),

Zakład świadczył również usługi badawcze i produkcyjne na zamówienie odbiorców zewnętrznych oraz kontynuował działalność edukacyjną we współpracy z jednostkami akademickimi.

2. Wyniki działalności naukowo-badawczej

W centrum uwagi obecnego 3-letniego projektu statutowego były struktury cienkowarstwowe z tlenków i azotków metali oraz, w ograniczonym zakresie, z siarczków metali. Stosunkowo najszerszy zakres prac dotyczył nowej w skali światowej technologii wytwarzania cienkich warstw ZnO z sukcesywnym użyciem technik reaktywnego rozpylania katodowego i utleniania. Największym sukcesem poprzednich dwu etapów projektu było uzyskanie warstw ZnO typu p. Znakomite wyniki uzyskano również w zakresie technologii przezroczystych tlenków przewodzących (TCO), n-ZnO, CdO i $RuSiO_4$. Ich użyteczność zweryfikowano w detektorach termofotowoltaicznych z GaSb/AlGaAsSb (przezroczyste elektrody do strony światłoczułej) i tranzystorach HEMT z AlGaN/GaN (składowa elektrody bramki w strukturze Mg_3N_2/$RuSiO_4$/Au). Obiecujące wyniki przyniosły prace nad technologią stabilnych termicznie warstw metalicznych TiSiN i TaSiN i próby ich implementacji w systemach metalizacji do GaN i SiC. Nowością były również prace nad pasywacją powierzchni GaN z użyciem powłok siarczkowych oraz prace nad dielektrykami bramkowymi dla tranzystorów HEMT z AlGaN/GaN oraz MOSFET z n-SiC.

Prace obecnego, trzeciego etapu projektu obejmowały cztery zadania:

- technologia cienkowarstwowych przezroczystych tlenków półprzewodnikowych,
- technologia cienkowarstwowych metalizacji z materiałów stabilnych termicznie i odpornych chemicznie,
- technologia tlenków podbramkowych dla tranzystorów polowych z azotków grupy III i SiC,
- technologia pasywacji powierzchni struktur półprzewodnikowych z azotków grupy III.

Prowadzone badania koncentrowały się na następujących materiałach i procesach:

- optymalizacja domieszkowania ZnO – w grupie przezroczystych tlenków przewodzących,
- wytwarzanie cienkich warstw Ir i IrO_2 (kontakty prostujące) oraz TaSiN (bariery antydyfuzyjne) – w kategorii metalizacji stabilnych termicznie i odpornych chemicznie,

- wytwarzanie cienkich warstw HfO_2, ZrO_2 i TiO_2 oraz utleniania SiC-RTP – w kategorii tlenków podbramkowych,
- wytwarzanie cienkich warstw ZnS – w kategorii powłok pasywacyjnych.

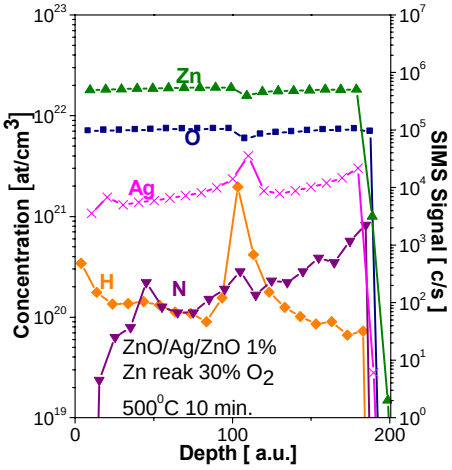
2.1. Technologia cienkowarstwowych przezroczystych tlenków półprzewodnikowych

Celem obecnego etapu prac nad cienkimi warstwami tlenków półprzewodnikowych było udoskonalenie, w oparciu o dotychczasowe doświadczenia, metodyki i technologii wytwarzania warstw ZnO o kontrolowanym typie przewodnictwa. Prowadzone badania dotyczyły w pierwszym rzędzie domieszkowania na typ p oraz wytwarzania ZnO o właściwościach izolacyjnych dla celów pasywacji powierzchni GaN oraz przyrządów ze związków AlGaN/GaN.

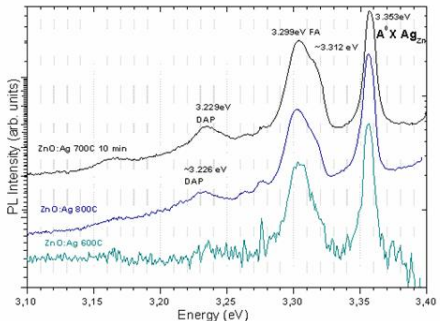
W części dotyczącej domieszkowania na typ p przeprowadzono badania porównawcze cienkich warstw ZnO:N i ZnO:Sb. Materiałem wyjściowym były warstwy cynku domieszkowane azotem bądź antymonem, osadzane metodą rozpylania katodowego. Procesy utleniania termicznego prowadzono w temperaturach z zakresu 600 ÷ 800°C. Otrzymany ZnO typu p charakteryzował się koncentracją swobodnych nośników ładunku na poziomie $1 \div 5 \cdot 10^{17}$ cm^{-3} i ruchliwością 1 ÷ 10 $cm^2/V \cdot s$. Wyniki badań własności transportowych oraz korelacja ich zależności temperaturowych z wynikami pomiarów fotoluminescencji w funkcji temperatury wykazały co następuje. Dla ZnO:N (przy założeniu, że przejście o energii 3,357 eV odpowiada rekombinacji ekscytonu związanego na neutralnym akceptorze NO) pomiary fotoluminescencji (PL) w funkcji temperatury wykazały, że wielkość optycznej energii aktywacji akceptora związanego z azotem wynosi E_{aN} ~ 200 meV, a akceptora związanego z antymonem (kompleks $Sb_{Zn} + 2V_{Zn}$) E_{aSb} ~170 meV. Energia aktywacji wyznaczona z pomiarów efektu Halla, w konfiguracji Halla i van der Pauwa, w funkcji temperatury, wynosi ~150 meV dla obydwu domieszek.

Przeprowadzono również wstępne próby domieszkowania na typ p z użyciem domieszki akceptorowej z grupy I, która powinna podstawiać cynk. Materiał wyjściowy osadzano metodą rozpylania katodowego w postaci struktury wielowarstwowej Zn/Ag, przy czym zawartość Ag zmieniano tak, by w utlenionym materiale wynosiła ona od 1% at. do 5% at. Procesy utleniania prowadzono w szerokim zakresie temperatur 400 ÷ 900°C. Na rys. 1 przedstawiono profile składu SIMS świadczące o równomiernym rozkładzie domieszki Ag w warstwie ZnO.

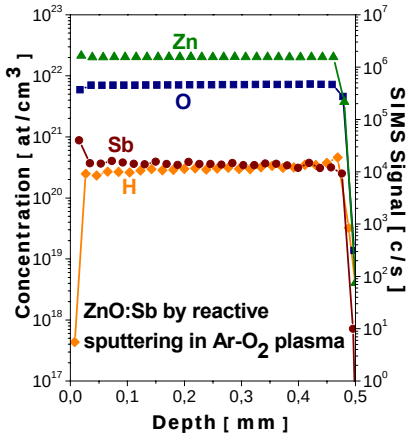
Uzyskano pozytywne wyniki w postaci ZnO typu p o koncentracji dziur $4 \cdot 10^{16}$ cm^{-3} i ruchliwości 4,6 $cm^2/V \cdot s$ dla zawartości Ag1% at. i znacznie wyższe koncentracje dziur dla domieszkowania Ag na poziomie 5%. W widmach fotoluminescencji cienkich warstw ZnO:Ag, przedstawionych na rys. 2, przejścia odpowiadające energii 3,353 eV, podobne do wcześniej obserwowanych dla Zn:N oraz ZnO:Sb, z dużą dozą prawdopodobieństwa można przypisać ekscytonowi związanemu na neutralnym akceptorze A^0X.



Rys. 1. Profile głębokościowe SIMS cienkiej warstwy ZnO:Ag



Rys. 2. Widma fotoluminescencji warstw p-ZnO:Ag wygrzewanych w temperaturze 600°C, 700°C oraz 800°C zmierzone w 10 K



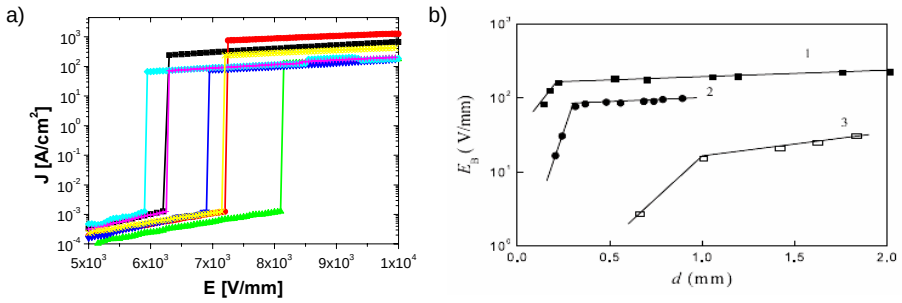
Rys. 3. Profile składu SIMS cienkiej warstwy wysokooporowego ZnO

Wykorzystując wiedzę zdobytą w trakcie badań nad technologią ZnO typu p opracowano proces wytwarzania warstw materiału półizolacyjnego, który jest przeznaczony do pasywacji powierzchni GaN oraz struktur HEMT AlGaN/GaN. Materiał ten jest otrzymywany metodą reaktywnego magnetronowego rozpylania katodowego ZnSb w plazmie O_2-Ar. Na rys. 3 przedstawiono głębokościowe profile składu świadczące o znakomitej jednorodności warstw ZnO.

Stwierdzono, że cienkie warstwy ZnO pozostają wysokooporowe do temperatury co najmniej 700°C. Wygrzewanie w 800°C powoduje aktywację domieszki Sb. ZnO zaczyna wykazywać przewodnictwo typu p, co nie pogarsza jego własności pasywacyjnych, bo na powierzchni struktury AlGaN/aN tworzy się prostujące złącze p-n.

Rysunek 4 przedstawia wyniki badań napięcia przebicia warstw ZnO oraz dla porównania dane literaturowe dotyczące warstw ZnO wykorzystywanych do wytwarzania warystorów. Należy zaznaczyć, że warstwy ZnO:Sb charakteryzują się nieporównanie większymi napięciami przebicia, $\sim 7 \cdot 10^3$ V/mm, przy czym ich grubość jest nieporównanie mniejsza.

W tab. 1 zestawiono wartości naprężeń w warstwach pasywujących, a w tab. 2 wyniki pomiarów gęstości 2DEG w strukturach HEMT AlGaN/GaN z pasywacją powierzchni przy użyciu konwencjonalnych dielektryków oraz wysokorezystywnego niedomieszkowanego ZnO (opracowanego w poprzednim etapie prac) i ZnO:Sb. Pomiary naprężeń wykonano metodą WBC w urządzeniu Tencor FLX 2300. Gęstość 2DEG wyznaczono z pomiarów efektu Halla. Biorąc pod uwagę własności higroskopijne ZnO warstwy dodatkowo hermetyzowano cienką warstwą Si_3N_4.



Rys. 4. a) Wyniki badań napięcia przebicia 100 nm warstw półizolacyjnego ZnO, b) napięcie przebicia w funkcji grubości warstw ZnO dla trzech rodzajów ZnO przeznaczonego do wytwarzania warystorów: *1* – warstwy o dużym napięciu przebicia, *2* – warstwy o średnim napięciu przebicia, *3* – warstwy o małym napięciu przebicia [Li et al., *J. Phys. D.: Appl. Phys*. 39, 4969, 2006].

Tabela 1. Naprężenia w warstwach pasywujących osadzonych na powierzchni struktur HEMT AlGaN/GaN

materiał	grubość [nm]	naprężenia [GPa]
poly-HfO_2	205	-2.3
a-Si_3N_4	100	- 0.90
ZnO	100	- 0.57
ZnO:Sb	130	- 0.25
ZnO:Sb/Si_3N_4	130/100	- 0.48

Tabela 2. Gęstość 2DEG w pasywowanych strukturach HEMT AlGaN/GaN

materiał	n_s [cm^{-2}]
bez pasywacji	1.0×10^{13}
a-Si_3N_4	1.8×10^{13}
ZnO/Si_3N_4	2.6×10^{13}
ZnO:Sb/Si_3N_4	1.0×10^{14}

Otrzymane wyniki badań w pełni potwierdzają tezę wyjściową naszych badań, zgodnie z którą dopasowana sieciowo warstwa ZnO powinna wprowadzać minimalne naprężenia w układzie struktura półprzewodnikowa/dielektryk, a dodatkowo jako warstwa wysokorezystywna skutecznie pasywować powierzchnię struktury HEMT AlGaN/GaN, o czym świadczy podwyższona gęstość dwuwymiarowego gazu elektronowego.

2.2. Technologia cienkowarstwowych metalizacji z materiałów stabilnych termicznie i odpornych chemicznie

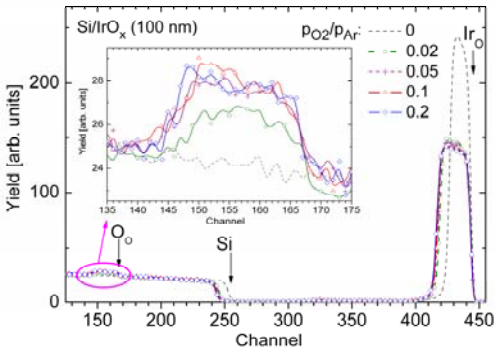
Celem niniejszego zadania było opracowanie technologii nowego typu metalizacji, spełniających zaostrzone kryteria stabilności termicznej i odporności chemicznej, wynikające z warunków pracy przyrządów półprzewodnikowych dużej mocy/ /wysokiej temperatury na bazie SiC i GaN. Na obecnym etapie prace te dotyczyły w pierwszym rzędzie kontaktów prostujących (barier Schottky'ego) do n-SiC oraz barier antydyfuzyjnych w układach metalizacji wielowarstwowej z montażową warstwą Au. Za najbardziej perspektywiczne materiały na bariery Schottky'ego uznano iryd (Ir) i tlenek irydu (IrO_2), z uwagi na charakterystyczne dla nich wysokie temperatury topnienia, wysokie prace wyjścia, wysokie przewodnictwo elektryczne oraz odporność chemiczną. W kategorii barier antydyfuzyjnych zweryfikowano skuteczność cienkich warstw krzemoazotku tantalu (TaSiN) jako zabezpieczenia kontaktów omowych n-SiC/Ni_2Si przed reakcją z montażową warstwą Au.

Użyty w eksperymentach SiC (CREE Inc.) miał postać domieszkowanych azotem warstw epitaksjalnych o grubości 5 μm i koncentracji nośników $n = 5\cdot10^{15}$ cm^{-3} wyhodowanych na podłożach 4H-SiC ($n = 1\cdot10^{18}$ cm^{-3}, strona Si). Przygotowanie powierzchni SiC przed procesami osadzania kontaktów prostujących obejmowało kolejno: mycie w rozpuszczalnikach organicznych, 10-minutowe trawienie we wrzących roztworach NH_4OH-H_2O_2-$5H_2O$ i HCl-$7NH_4F$-H_2O oraz utlenianie RTO w temperaturze 1100°C przez 10 min. Warstwa zabezpieczającego/czasowego tlenku RTO była usuwana w zbuforowanym HF, bezpośrednio przed właściwym procesem osadzania kontaktów Schottky'ego i omowych.

Cienkie warstwy Ir, o grubości 50 ÷ 65 nm, były wytwarzane techniką magnetronowego rozpylania katodowego DC w plazmie Ar przy następujących parametrach procesu: $P_{DC} = 50$ W, $p_{Ar} = 1\cdot10^{-2}$ mbar. Warstwy tlenku irydu grubości 50 ÷ 100 nm wytwarzano techniką reaktywnego rozpylania katodowego RF w plazmie Ar/O_2, przy ustalonych wartościach prądu $I_{RF} = 120$ mA i ciśnienia $p_{Ar} = 1\cdot10^{-5}$ mbar, zmieniając zawartość tlenu w plazmie w granicach 2 ÷ 30%. W obu przypadkach materiałem wyjściowym był target z czystego irydu (Ir 5N).

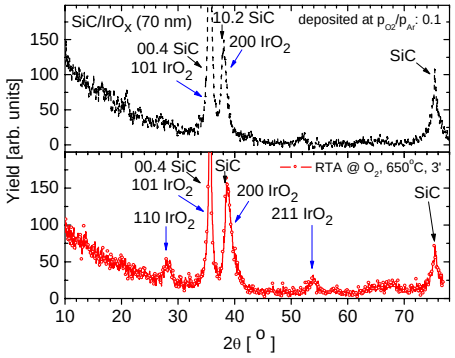
Charakteryzacja strukturalna otrzymanych warstw była prowadzona przy pomocy metod dyfrakcji rentgenowskiej (XRD), mikroskopii optycznej z kontrastem fazowym (OMN) oraz mikroskopii sił atomowych (AFM). Skład chemiczny (profile wgłębne) określano na podstawie pomiarów RBS, z użyciem próbek wzorcowych wykonanych na podłożach (001) Si. Do badania naprężeń zastosowano metodę pomiaru krzywizny płytek (WCM) z wykorzystaniem urządzenia TENCOR FLX2320. Przewodność elektryczną warstw Ir i IrO_2 wyznaczano z pomiarów rezystywności powierzchniowej sondą czteroostrzową. Parametry elektryczne barier Schottky'ego, wysokość bariery, współczynnik idealności i rezystywność właściwą wyznaczano na podstawie pomiarów I-V kontaktów Ir/SiC i IrO_2/SiC o geometrii kołowej (średnicy 1 mm) kształtowanej techniką lift-off.

Stosowne próbki były zaopatrzone w kontakty omowe (Ni o grubości 200 nm, wygrzewane w Ar, RTP @ 950°C, 3 min.) wykonane na stronie spodniej płytek SiC. W celu zbadania stabilności termicznej barier Schottky'ego przeprowadzono procesy ich wygrzewania w argonie i tlenie w temperaturze z zakresu 400 ÷ ÷ 600°C przez 10 min. oraz długoczasowe starzenia (t = 0,5 ÷ 100 h) w temperaturze 600°C.



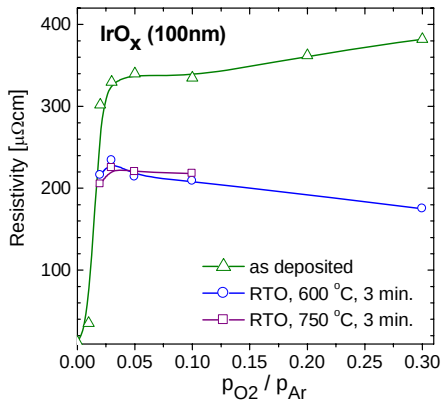
Rys. 5. Widma 2 MeV He$^+$ RBS metalizacji Si/IrO$_x$ osadzanych przy różnym składzie tlenu w plazmie O_2/Ar

Wpływ zawartości tlenu w plazmie Ar/O_2 na skład chemiczny otrzymywanych warstw tlenku irydu ilustruje rys. 5, na którym przedstawiono odpowiadające im profile wgłębne RBS. Wskazują one, że warunkiem uzyskania warstw o składzie stechiometrycznym (Ir:O = 1:2) jest prowadzenie procesu reaktywnego rozpylania katodowego przy stosunku ciśnień cząstkowych tlenu do azotu na poziomie równym lub większym od 0,02. Wyniki analiz rentgenowskich wykazały, że wszystkie te warstwy charakteryzują się strukturą amorficzną, w odróżnieniu od cienkich warstw Ir wykazujących strukturę polikrystaliczną, silnie teksturowaną w kierunku (111). Krótkotrwała obróbka termiczna w argonie lub w tlenie w temperaturze $T \geq 600$°C powoduje zmianę mikrostruktury warstw IrO_2 z amorficznej na polikrystaliczną, z dominującymi refleksami (110) i (200) w obrazie XRD (rys. 6). Co warte odnotowania, podobną mikrostrukturą charakteryzowały się warstwy IrO_2 otrzymane w procesie utleniania warstw Ir (RTO @ 750°C, 3 min.).

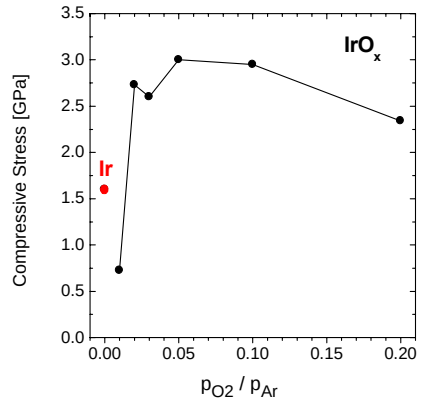


Rys. 6. Widma XRD warstwy IrO_2 po osadzeniu na (0001)SiC (I_{RF} = 120 mA, p_{Ar} = 1·10^{-5} mbar, p_{O2}/p_{Ar} = 0,1) oraz po wygrzaniu w atmosferze tlenu przez 3 min.

Wzrost zawartości tlenu w plazmie procesowej skutkował wzrostem rezystywności od 380 μΩ·cm dla warstw IrO_2 osadzanych przy p_{O2}/p_{Ar} = 0,3, co może wynikać z ich większego stopnia zdefektowania. Znaczną poprawę przewodnictwa (spadek rezystywności warstw osadzanych przy wartości p_{O2}/p_{Ar} = 0,3 do 175 μcm uzyskano na drodze obróbki termicznej RTO w temperaturze $T \geq 600$°C (rys. 7), co wiąże się najprawdopodobniej z przejściem od struktury amorficznej do polikrystalicznej. Dla porównania, rezystywność niewygrzewanych warstw Ir o podobnej grubości wynosiła 12 μcm.



Rys. 7. Rezystywność warstw IrO_x w zależności od składu gazów podczas reaktywnego osadzania warstw przy prądzie I_{RF} = 120 mA, p_{Ar} = $1\cdot10^{-5}$ mbar oraz wpływ wygrzania warstw w tlenie na ich rezystywność



Rys. 8. Naprężenia warstw IrO_x(50 nm) osadzanych na (001)Si w zależności od stosunku ciśnień p_{O2}/p_{Ar} podczas reaktywnego osadzania warstw przy prądzie I_{RF} = 120 mA, p_{Ar} = $1\cdot10^{-5}$ mbar

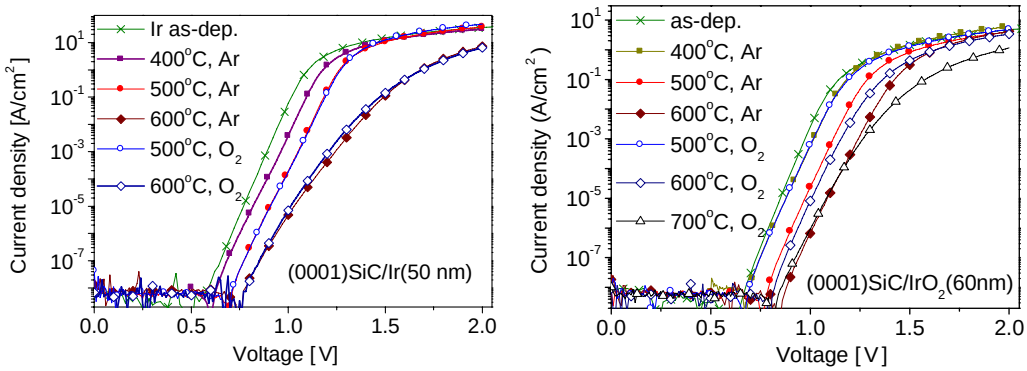
Wyniki pomiarów WCM pokazały, że wszystkie warstwy niepoddawane obróbce termicznej charakteryzują się naprężeniami ściskającymi o wartości od ok. 1,7 GPa (dla warstw Ir o grubości 65 nm) do 3 GPa (dla warstw IrO_2 o grubości 50 nm), wykazując przy tym zależność od zawartości tlenu w czasie procesu osadzania (rys. 8). Obróbka termiczna w atmosferze argonu w temperaturze 650 ÷ 750°C pozwalała na co najmniej dwukrotne zmniejszenie naprężeń.

Wyniki pomiarów charakterystyk elektrycznych I-V kontaktów n-SiC/Ir oraz n-SiC/IrO_2 i ich zależności od obróbki termicznej w atmosferze tlenu i argonu przedstawiono na rys. 9. W tab. 3 zestawiono wyniki obliczeń wysokości bariery Schottky'ego φ_b i współczynnika idealności n. Obliczenia były prowadzone w oparciu o termoemisyjny model transporttu nośników, zgodnie z którym zależność I-V złącza Schottky'ego dana jest następującym równaniem:

$$I = A^{**}AT^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{b0}}{kT}\right)\left(\exp\frac{qV}{nkT}-1\right), \tag{1}$$

gdzie: A^{**} – efektywna stała Richardsona, A – powierzchnia diody, b_0 – wysokość bariery przy zerowym napięciu, n – współczynnik idealności. W obliczeniach użyto teoretycznej wartości A^{**} dla 4H-SiC (146 $A\cdot cm^{-2}\cdot K^{-2}$). Napięcie w równ. (1) jest często zastępowane przez wyrażenie $V - R_sI$, uwzględniające rezystywność szeregową (R_s) diody.

Wyniki wskazują na wysoką wartość wytworzonych bariery Schottky'ego na n-SiC: 1,4 eV dla Ir i 1,53 eV dla IrO_2. Wygrzewanie w temperaturze 500°C przez 10 min. w atmosferze tlenu lub Ar poprawia własności prostujące barier – wzrost wysokości bariery do 1,53 eV dla Ir i 1,64 dla IrO_2. Dalsze zwiększanie temperatury obróbki cieplnej do 600°C oraz wydłużanie jej czasu skutkuje pogarszaniem własności elektrycznych barier – zmniejszaniem wysokości i zwiększaniem współczynnika idealności.



Rys. 9. Charakterystyki elektryczne I-V kontaktów Schottky'ego n-SiC/Ir i n-SiC/IrO_2 po osadzeniu na n-SiC 4H oraz wygrzewaniu w argonie i tlenie, t =10 min.

Tabela 3. Wpływ parametrów obróbki termicznej na wysokość bariery φ_b i współczynnik idealności *n* kontaktów Schottky'ego Ir/n-SiC oraz IrO_2/SiC

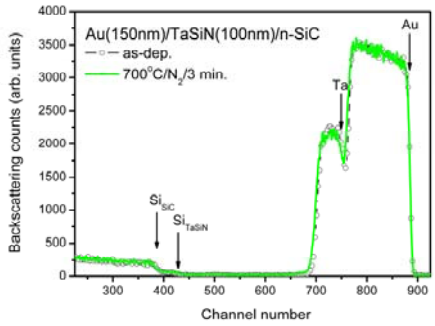
Temp., czas wygrzewania	φ_b [eV]				*n*			
	Ir @ Ar	Ir @ O_2	IrO_2 @ Ar	IrO_2 @ O_2	Ir @ Ar	Ir @ O_2	IrO_2 @ Ar	IrO_2 @O_2
–	1,40	1,40	1,53	1,53	1,10	1,10	1,06	1,06
500ºC, 10'	1,53	1,50	1,64	1,56	1,13	1,15	1,09	1,06
600ºC, 10'	1,29	1,50	1,67	1,61	1,81	1,30	1,15	1,14
600ºC, 100h	1,24	1,25	1,37	1,44	1,92	2,23	1,78	1,90

Najwyższą i najbardziej stabilną barierę osiągnięto dla IrO_2/4H-SiC po wygrzaniu w 600°C przez 10 min. w atmosferze Ar. Dalsze zmniejszanie rezystancji charakterystycznej kontaktów wymaga podniesienia nominalnej wartości prądu przepływającego przez urządzenie i ograniczeniu strat mocy. Rezystywność warstw IrO_2 może być główną przeszkodą w osiągnięciu niskiej wartości tego parametru. Kontakty Ir/4H-SiC wydają się tu być lepszym rozwiązaniem dla wysokoprądowych przyrządów, pracujących w temperaturach do 500°C.

Prace badawcze nad barierami antydyfuzyjnymi TaSiN dla metalizacji wielowarstwowych z montażową warstwą Au były prowadzone dla kontaktów omowych Ni_2Si do n-SiC. W eksperymentach użyto komercyjnych podłoży n-4H-SiC (0001) typu n o rezystywności 0,074 Ω·cm, z odchyleniem od osi krystalizacji 0,14° i zakończonych powierzchnią Si. Metalizacja kontaktowa Ni/Si (66/60 nm) była osadzana metodą rozpylania magnetronowego DC w plazmie Ar z użyciem targetów Ni i Si. Kontakty omowe Ni_2Si/n-SiC uzyskiwano w wyniku obróbki termicznej dwuwarstwy Ni/Si w azocie, kolejno w temperaturze 600°C przez 15 min., a następnie 1000°C przez 3 min. Bariery antydyfuzyjne TaSiN (100 nm) wytwarzano metodą reaktywnego rozpylania katodowego RF z targetu Ta_5Si_3 w plazmie

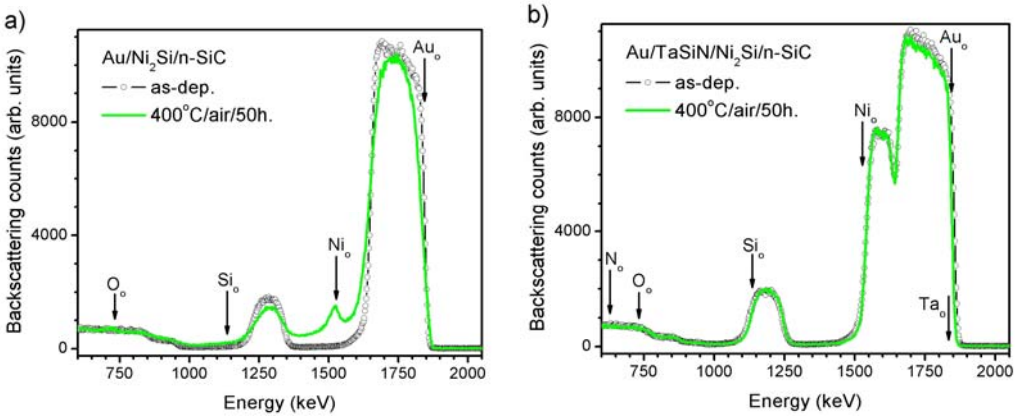
Ar/N_2, przy następujących parametrach procesu: moc RF P = 250 W, stosunek Ar/N_2 = 15, ciśnienie całkowite 0,6 Pa. Montażowa warstw, Au wytwarzana techniką rozpylania katodowego DC, miała grubość 150 nm. W celu zweryfikowania skuteczności cienkich warstw TaSiN jako bariery antydufuzyjnej wytworzone kontakty poddawano obróbce termicznej w powietrzu, w temperaturze 400°C przez czas do 150 h. Charakteryzacja kontaktów obejmowała pomiary charakterystyk elektrycznych I-V i rezystywności (c-TLM), pomiary profilów składu techniką RBS oraz badania morfologii powierzchni metodą SEM.

Pomiary charakterystyk elektrycznych kontaktów Au/Ni_2Si/n-SiC i Au/TaSiN/ /Ni_2Si/n-SiC wykazały stały, dwukrotny wzrost rezystywności po 50 h starzenia dla Au/Ni_2Si/n-SiC i nieprzekraczający 12% wzrost rezystywności dla Au/TaSiN/ /Ni_2Si/n-SiC.

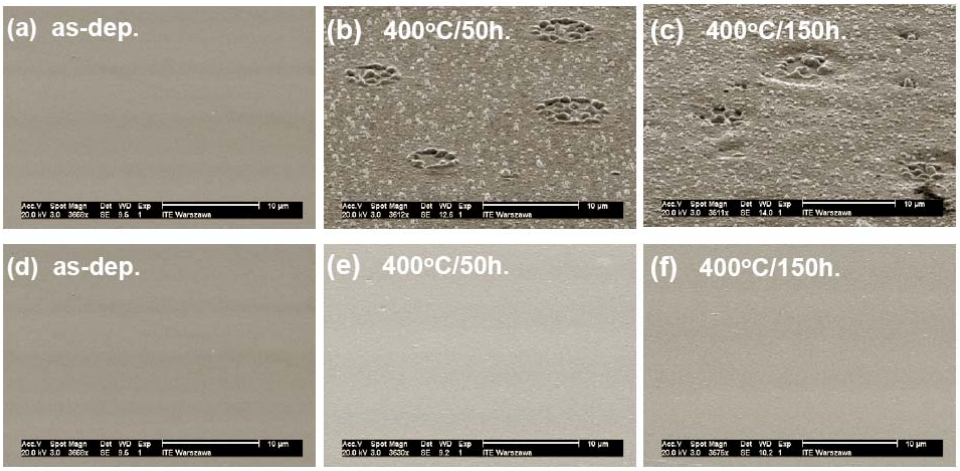


Rys. 10. Widma RBS (2-MeV He^+) kontaktu Au/TaSiN/n-SiC przed wygrzewaniem i po wygrzewaniu przy 700°C w N_2 w ciągu 3 min.

Pomiary RBS świadczą o małej reaktywności cienkich warstw TaSiN w kontakcie z SiC (rys. 10) oraz o bardzo dobrych własnościach barierowych w metalizacji warstwowej z kontaktem omowym Ni_2Si i wierzchnią warstwą Au. O ile w przypadku kontaktu Au/Ni_2Si/n-SiC wygrzewanie w 400°C przez 50 h powoduje wyraźną interdyfuzję w obrębie metalizacji i na międzypowierzchni metal/półprzewodnik, z dyfuzją Ni ku powierzchni metalizacji (rys. 11a), o tyle profil składu chemicznego kontaktu Au/TaSiN/Ni_2Si/n-SiC pozostaje niezmienny po identycznym starzeniu (rys. 11b). Badania SEM (rys. 12) świadczą o znakomitej morfologii powierzchni wygrzewanych kontaktów Au/TaSiN/Ni_2Si/n-SiC przy progresywnym pogarszaniu się stanu powierzchni kontaktów bez warstwy barierowej TaSiN.



Rys. 11. Widma RBS (2-MeV He^+) kontaktów Au/Ni_2Si/n-SiC (a) oraz Au/TaSiN/Ni_2Si/n-SiC (b) przed starzeniem i po starzeniu w powietrzu przy 400°C w ciągu 50 h



Rys. 12. Zdjęcie SEM dla kontaktów Au/Ni_2Si/n-SiC (a, b, c) i Au/TaSiN/Ni_2Si/n–SiC (d, e, f): (a, d) przed starzeniem; (b, e) po starzeniu w powietrzu przy 400°C w ciągu 50 h; (c, f) po starzeniu w powietrzu przy 400°C w ciągu 150 h

2.3. Technologia tlenków podbramkowych dla tranzystorów polowych z azotków grupy III i SiC

Celem obecnego etapu prac nad tlenkami podbramkowymi dla tranzystorów polowych z materiałów na bazie GaN i SiC było zbadanie podstawowych własności cienkich warstw alternatywnych względem SiO_2 i Si_3N_4 materiałów dielektrycznych o dużej stałej dielektrycznej – tlenków metali grupy IVB (Ti, Zr i Hf) otrzymywanych techniką reaktywnego rozpylania katodowego.

Cienkie warstwy tlenków były osadzane w sputronach Leybold Z400 i Z550. Jako podłoża stosowano kwarc, szafir oraz krzem typu n o orientacji (100). Podstawowe parametry procesów wytwarzania zestawiono w tab. 4.

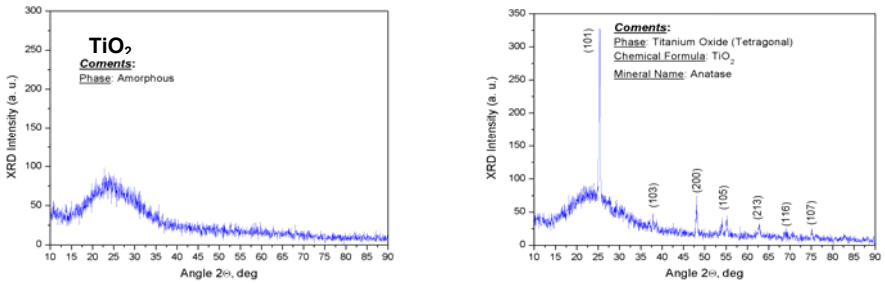
Tabela 4. Parametry procesów wytwarzania cienkich warstw TiO_2, ZrO_2 i HfO_2

Materiał	Mod	Target	I [W]	I [mA]	I_{total} [mbar]	p_{O2}/p_{Ar} [%]	v_{dep} [nm/min.]	Sputron
TiO_2	DC	Ti, 4N	75	–	$5\cdot10^{-3}$	30	24	Z550
ZrO_2	RF	Zr, 4N	–	220	$1\cdot10^{-2}$	50	8	Z400
HfO_2	DC	Hf, 3N	100	–	$8\cdot10^{-3}$	10	8	Z400
						20	8	
						30	8	
						40	8	
						50	8	

Charakteryzacja wytworzonych warstw obejmowała analizę mikrostruktury metodą dyfrakcji rentgenowskiej (Philips X'Pert – MDP), morfologii powierzchni techniką AFM, pomiary transmisji widmowej (spektrofotometr Perkin-Elmer Lambda), wyznaczenie zależności widmowych współczynnika załamania i współczynnika ekstynkcji (elipsometr spektroskopowy VASE - Woolam), a na podstawie pomiarów I-V i C-V struktur kondensatorowych typu n-Si/tlenek/Au – wyznaczanie napięcia przebicia i stałej dielektrycznej.

Wyniki badań rentgenowskich (rys. 13) wykazały, że cienkie warstwy TiO_2 charakteryzowały się strukturą amorficzną, która była stabilna do temperatury 450°C. Wygrzewanie w temperaturze 500°C w atmosferze tlenu powodowało zmianę struktury na polikrystaliczną, z wyraźną teksturą w kierunku 101. Podobne zachowanie obserwowano w przypadku cienkich warstw ZrO_2. W odróżnieniu od nich, cienkie warstwy HfO_2 bezpośrednio po wytworzeniu miały strukturę polikrystaliczną, o słabej teksturze w kierunku (-111), przy czym cecha ta dotyczyła wszystkich badanych warstw, niezależnie od parametrów (składu plazmy) procesu osadzania (rys. 14).

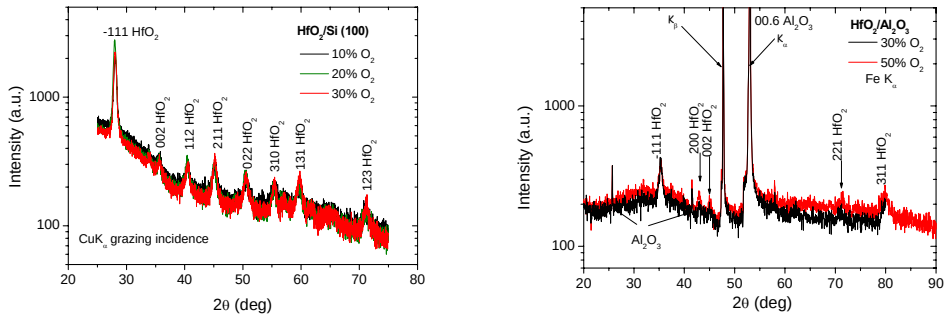
a) b)



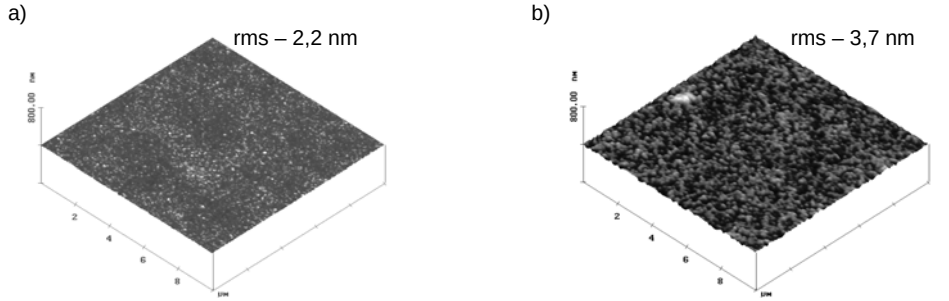
Rys. 13. Dyfraktogramy rentgenowskie warstw TiO_2 wytwarzanych metodą reaktywnego rozpylania katodowego: a) po nałożeniu na podłoże (100) Si, b) po obróbce termicznej w atmosferze O_2, $T = 500°C$, $t = 3$ min.

Badania AFM (rys. 15 i 16) wykazały, że wszystkie otrzymane warstwy tlenkowe cechowała bardzo dobra morfologia powierzchni, przy czym najmniejszą chropowatość, *rms* < 1 nm, wykazywały cienkie warstwy HfO_2.

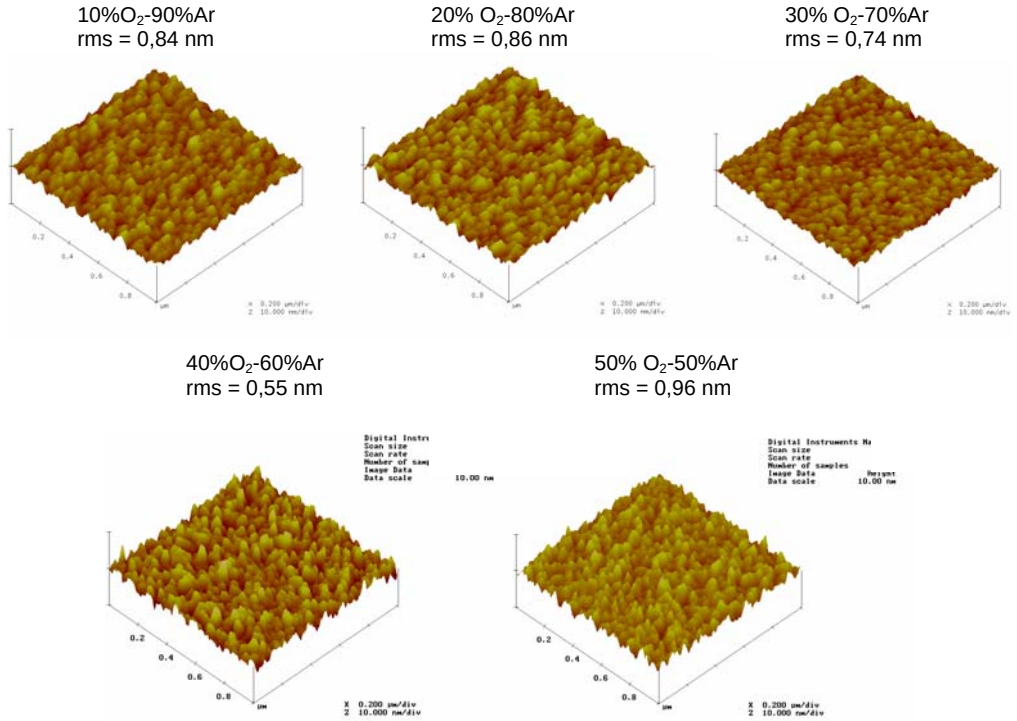
a) b)



Rys. 14. Dyfraktogramy rentgenowskie warstw HfO_2 wytwarzanych metodą reaktywnego rozpylania katodowego: a) osadzane na podłożu (100) Si, b) osadzane na Al_2O_3



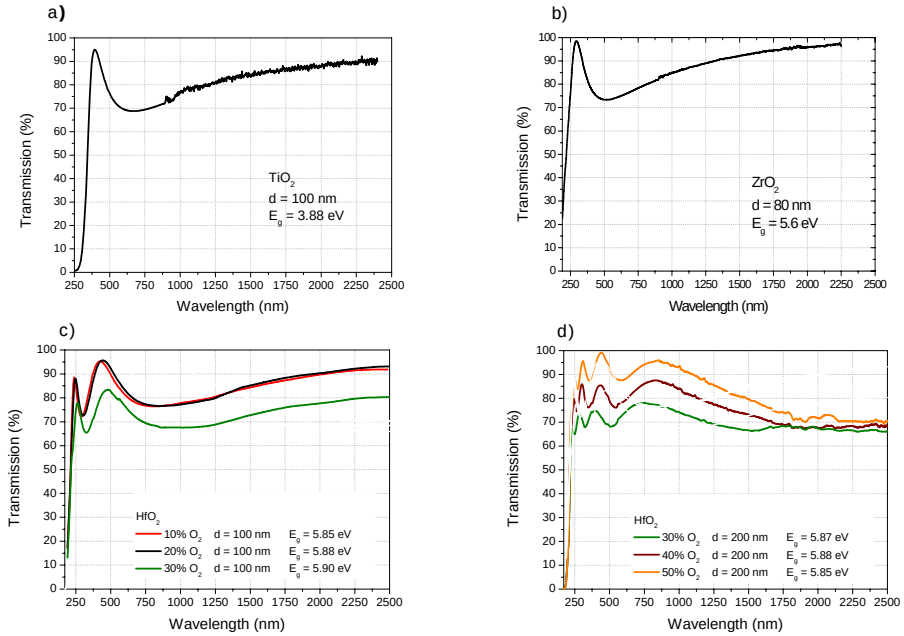
Rys. 15. Obrazy AFM powierzchni cienkich warstw tlenkowych wytwarzanych metodą reaktywnego rozpylania katodowego na podłożu (100)Si: a) TiO_2, b) ZrO_2



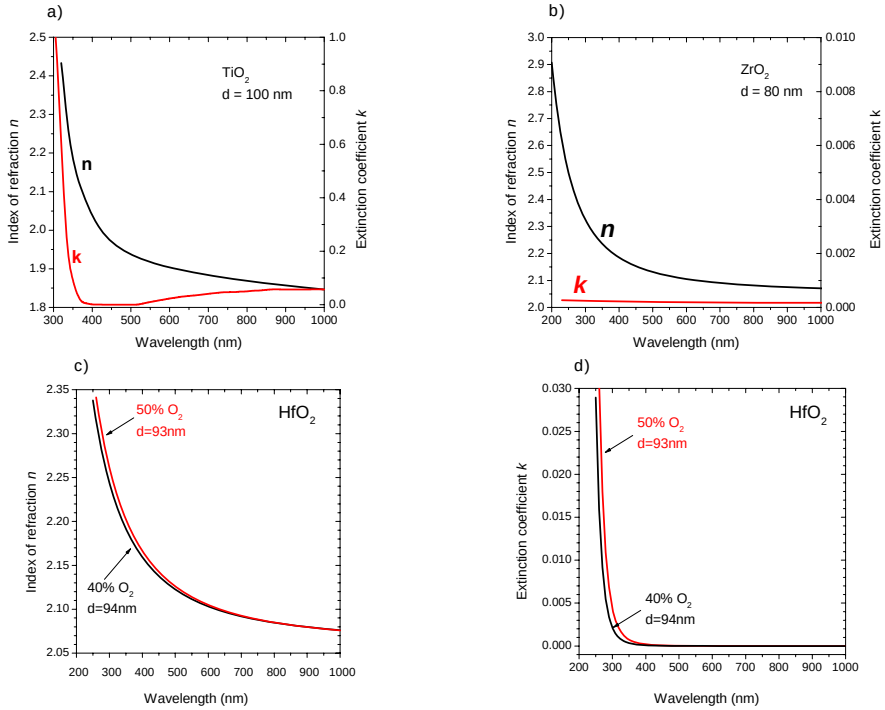
Rys. 16. Obrazy AFM powierzchni cienkich warstw HfO_2 wytwarzanych przy różnym stosunku ciśnień O_2/Ar

Na kolejnych rysunkach przedstawiono wyniki pomiarów parametrów optycznych cienkich warstw TiO_2, ZrO_2 i HfO_2: transmisji (rys. 17) oraz współczynników załamania i ekstynkcji (rys. 18). Na podstawie pomiarów progu transmisji określono szerokość przerwy zabronionej: E_g-TiO_2 = 3,88 eV, E_g-ZrO_2 = 5,6 eV i E_g-HfO_2 = 5,85 ÷ 5,9 eV.

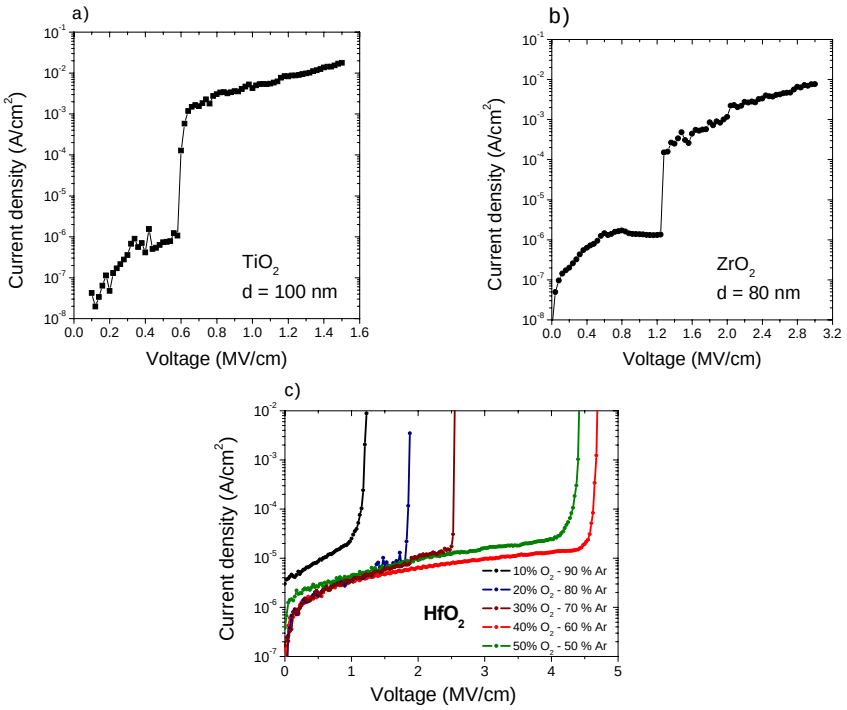
Na rys. 19 przedstawiono charakterystyki prądowo-napięciowe struktur kondensatorowych n-Si/tlenek/Au. Wyznaczone na ich podstawie wartości napięcia przebicia zestawiono w tab. 5. Zamieszczono w niej również wyznaczone metodą C-V (przy częstotliwości 1 MHz) wartości stałej dielektrycznej.



Rys. 17. Charakterystyki widmowe transmisji cienkich warstw tlenkowych: a) TiO_2, b) ZrO_2; c), d) HfO_2



Rys. 18. Charakterystyki widmowe współczynnika załamania i ekstynkcji cienkich warstw tlenkowych: a) TiO_2, b) ZrO_2, c), d) HfO_2



Rys. 19. Charakterystyki prądowo-napięciowe struktur: a) n-Si/TiO_2/Au, b) n-Si/ZrO_2/Au, c) n-Si/HfO_2/Au

Tabela 5. Własności elektryczne cienkich warstw TiO_2, ZrO_2 i HfO_2

Materiał	*d* [nm]	% O_2	*RMS* [nm]	Mikrostruktura	U_b [MV/cm]	ε @ 1 MHz
TiO_2	100	30	2,2	amorficzna po wytworzeniu polikrystaliczna po obróbce termicznej, O_2, 500°C	0,6	78
ZrO_2	80		3,7	amorficzna po wytworzeniu	1,6	18
HfO_2	100	10	0,84	polikrystaliczna po wytworzeniu	0,9 – 1,1	16
	100	20	0,86		1,5 – 2,2	18
	100	30	0,74		1,6 – 2,4	18
	100	40	0,55		4,5	20
	100	50	0,96		5,2	20

Reasumując wyniki dotychczasowych prac, a w szczególności wartości napięć przebicia i stałej dielektrycznej można przyjąć, że najbardziej perspektywiczne w kategorii alternatywnych tlenków podbramkowych są cienkie warstwy HfO_2. Uzyskane wyniki są spójne z najnowszymi doniesieniami literaturowymi.

2.4. Technologia pasywacji powierzchni struktur półprzewodnikowych z azotków grupy III

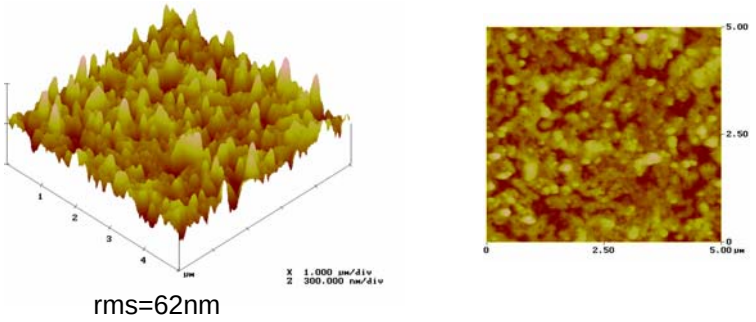
W poszukiwaniu efektywnych metod pasywacji powierzchni azotków grupy III i użycia do tego celu cienkich warstw związków siarki podjęto prace nad wytwarzaniem cienkich warstw ZnS. Siarczek cynku ZnS jest bowiem półprzewodnikiem szerokoprzerwowym (E_G = 3,5 eV @RT), może krystalizować w strukturze heksagonalnej i charakteryzuje się dużą stałą dielektryczną, ε_{ZnS} = 8,3 (dla porównania ε_{SiO2} = 3,9 i ε_{Si3N4} = 7,5). Do wytwarzania cienkich warstw ZnS zastosowano metodę osadzania chemicznego w kąpieli CBD (Chemical Bath Deposition) z użyciem roztworów:

A 0,1M $SC(NH_2)_2$ + 2,4M NH_4OH + 0,1M $ZnSO_4$ (17+17+1)

B 0,07M $ZnSO_4$ + 0,78M NH_4OH + 0,003M NH_2NH_2 + 0,14M $SC(NH_2)_2$

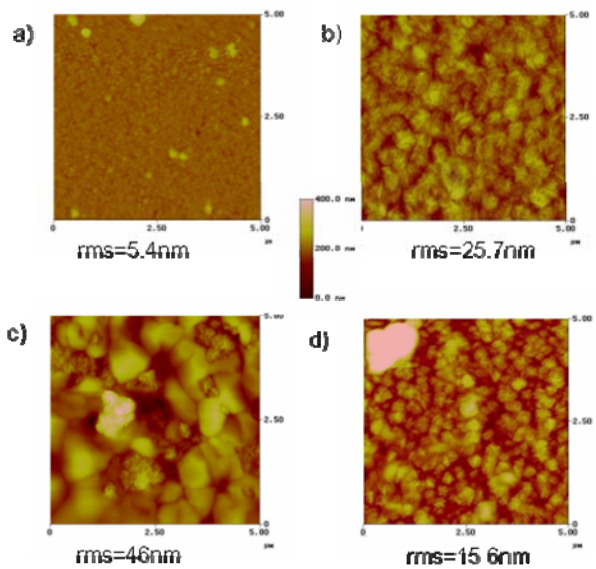
Skład i temperaturę roztworu oraz wartość pH optymalizowano pod kątem uzyskania relatywnie grubych warstw ZnS wolnych od wytrąceń dodatkowych faz ZnO i $Zn(OH)_2$. Procesy osadzania prowadzono na powierzchni (0001) GaN, z użyciem cienkich warstw epitaksjalnych (MOCVD) domieszkowanych magnezem ($p > 10^{18}$ cm^{-3}) lub krzemem ($n = 1{,}05 \cdot 10^{13}$ cm^{-2}). Charakteryzacja otrzymanych powłok ZnS była prowadzona za pomocą metod elipsometrii spektroskopowej VASE (wyznaczenie grubości, zespolonego współczynnika załamania oraz stałej dielektrycznej – elipsometr fimy J. A. Woollam pracujący w zakresie długości fal 240 ÷ 1100 nm) oraz mikroskopii sił atomowych AFM (zbadanie morfologii powierzchni – Digital Instruments Nanoscope IIIa microscope).

Wyniki przeprowadzonych analiz wykazały, że warstwy ZnS otrzymywane z użyciem roztworu **A** charakteryzują się dużą chropowatością powierzchni (*rms* > > 60 nm). Przykładem jest obraz mikroskopowy AFM przedstawiony na rys. 20. Warstwy ZnS otrzymywane z roztworu **B** cechowała relatywnie mniejsza chropowatość, a jej zależność od parametrów procesu wzrostu ilustruje rys. 21.



Rys. 20. Obrazy AFM powierzchni ZnS/n GaN po procesie CBD w roztworze **A**, T = 800°C, t = 120 min.

Zestawienie wyników pomiarów elipsometrycznych parametrów optycznych warstw ZnS zawiera tab. 6. Dla porównania zamieszczono w niej także charaktery-



Rys. 21. Obrazy AFM powierzchni ZnS/GaN po procesie CBD w roztworze **B**: a) T = 800°C, t = 60 min., b) T = 800°C, t = 120 min., c) T = 800°C, t = 180 min., d) T = 900°C, t = 60 min.

Tabela 6. Własności optyczne cienkich warstw ZnS osadzanych metodą CBD na powierzchni (0001)GaN

Podłoże	Obróbka powierzchni				Elipsometria spektroskopowa (dla λ = 630 nm)		
	Metoda/roztwór	T [°C]	t [min.]	Model	Grubość warstwy [nm]	n	k
(001)Gan $p>1\cdot10^{18}$ cm^{-2}	Mycie w rozpuszczalnikach organicznych	22	5	Cauchy GaN	**d_2 = 5,67** d = 1961,8	2,38 2,39	0,004 0,006
(001)Gan $p>1{,}05\cdot10^{13}$ cm^{-2}	**Roztwór A** 0,1M $SC(NH_2)_2$ 2,4M NH_4OH 0,1M $ZnSO_4$ (17+17+1) pH = 5,8	80	120	Cauchy GaN	**d_2 = 100** d = 1936,7	2,00 2,38	0,001 0,005
(001)Gan $p>1\cdot10^{18}$ cm^{-2}	**Roztwór B** 0,07 M $ZnSO_4$ 0,78M NH_4OH +0,003M NH_2NH_2 +0,14M $SC(NH_2)_2$ (2+2+1+2) pH = 10	80	30	Powierzchnia niejednorodna			
		80	60	Cauchy Gan	**d_2 = 43,22** d = 1935,3	2,26 2,39	0,003 0,006
		80	120	Cauchy GaN	**d_2 = 56,51** d = 1952,2	2,26 2,39	0,002 0,006
		80	180	Powierzchnia niejednorodna			
		90	60	Powierzchnia niejednorodna			
		90	20	Powierzchnia niejednorodna			

styki optyczne powierzchni p GaN poddanej standardowej operacji mycia w rozpuszczalnikach organicznych.

3. Współpraca międzynarodowa

Zakład uczestniczył w realizacji projektu europejskiego HYPHEN, ściśle współpracując z ośrodkami europejskimi stanowiącymi konsorcjum tego projektu: Picogiga International (PICO), Francja; Universita di Padova (DEI), Włochy; Alcatel Thales III-V Lab (III-V LAB), Francja; Research Institute for Technical Physics and Material Science (MFA), Węgry; Norstel AB (NOR), Szwecja; Centre National de la Recherche Scientifique (IEMN), Francja; United Monolithic Semiconductor s GmbH (UMS), Niemcy.

Publikacje'2007

[P1] BODZENTA J., GOŁASZEWSKA K., KAMIŃSKA E., KAŹMIERCZAK-BAŁATA A., PIOTROWSKA A., PYKA M.: Thermal Properties of SiC - Results of Photothermal Measurements. Proc. of the VII Int. Conf. Microtechnology and Thermal Problems in Electronics MicroTherm'2007. Łódź, 25–27.06.2007, s. 105–106.

[P2] BODZENTA J., GOŁASZEWSKA-MALEC K., KAŹMIERCZAK-BAŁATA A., PIOTROWSKA A., PYKA M.: Thermal Properties of Thin Films Deposited on Si and SiC Substrates. Proc. of the VII Int. Conf. Microtechnology and Thermal Problems in Electronics MicroTherm'2007. Łódź, 25–27.06.2007, s. 107–108.

[P3] BODZENTA J., GOŁASZEWSKA K., KAMIŃSKA E., KAŹMIERCZAK-BAŁATA A., PIOTROWSKA A., PYKA M., SZPERLICH P.: Photothermal Measurements in Determination of the Thermal Diffusivity of SiC. Proc. of 14th Int. Conf. on Photoacoustic and Photothermal Phenomena. Kair, Egipt, 6–9.01.2007 (w druku).

[P4] GOŁASZEWSKA-MALEC K., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., RUTKOWSKI J., KRUSZKA R., KOWALCZYK E., PAPIS-POLAKOWSKA E., PIOTROWSKI T. T., WAWRO A.: Transparent Ohmic Contacts to GaSb/In(Al)GaAsSb Photovoltaic Cells. *phys. stat. sol.* (a) 2007 vol. 204 nr 4 s. 1051–1055.

[P5] GUZIEWICZ M., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., DOMAGAŁA J., LAHRECHE H., LANGER R., BOVE P., POISSON M. S.: Proc. of the VII Int. Conf. Microtechnology and Thermal Problems in Electronics MicroTherm'2007. Łódź, 25–27.06.2007, s. 151–158.

[P6] GUZIEWICZ M., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., DOMAGAŁA J., POISSON M. S., LAHRECHE H., LANGER R., BOVE P.: Evaluation of Stress in AlGaN/GaN HEMT Structures Grown on Composite Substrates of the Type Mono-Si/Poly-SiC and Mono-SiC/Poly-SiC. 31st Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits Book WOCSDICE 2007. Extended Abstract, ed. by G. Meneghesso, University of Padova, s. 265–268.

[P7] GUZIEWICZ M., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., POISSON M. S., LANGER R., DOMAGAŁA J., BOVE P.: Comparative Study on Stress in AlGaN/GaN HEMT Structures Grown on 6H-SIC, Si and on Composite Substrates of the 6H-SiC/Poly-SiC and Si/Poli-SiC. Inst. of Phys.: Conf. Series (w druku).

[P8] KAMIŃSKA E., PRZEŹDZIECKA E., PIOTROWSKA A., KOSSUT J., DYNOWSKA E., JAKIEŁA R., DOBROWOLSKI W., BOGUSŁAWSKI P., PASTERNAK I., ŁUSAKOWSKA E.: Towards Efficient P-type

Doping ZnO with Group-v Atoms: N Versus As and Sb. Proc. of the 28th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors ICPS. Wiedeń, Austria, 24–28.07.2006, 2007, s. 337–338.

[P9] KUCHUK A., KLADKO V., GUZIEWICZ M., PIOTROWSKA A., MINIKAYEV R., STONERT A., RATAJCZAK R.: Fabrication and Characterization of Nickel Silicide Ohmic Contacts to n-type 4H Silicon Carbide. *J. of Phys.: Conf. Series* (w druku).

[P10] KUCHUK A. V., KLADKO V. P., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., MINIKAYEV R. A., RATAJCZAK R.: Nanocomposite nc-TaN/a-Si_3N_4 „Mictamict" Films in Metallization Scheme of Gallium Nitride for High Temperature Electronics. Proc. of 19th Int. Symp. "Thin Films in Optics and Nano-Electronics" at Kharkov Nanotechnology Assembly. Charków, Ukraina, 23–27.04.2007, vol. 2 s. 43–47.

[P11] PAPIS E., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., KRUSZKA R., KWIETNIEWSKI N., SIDOR Z., RZODKIEWICZ W., WAWRO A.: Properties of Chemical Bath Deposited CdS and ZnS Coatings for Application in Surface Passivation of GaN. *Appl. Surf. Sci*. (w druku).

[P12] PAPIS-POLAKOWSKA E., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., GOŁASZEWSKA-MALEC K., KRUSZKA R., PIOTROWSKI T. T., RZODKIEWICZ W., SZADA J., WINIARSKI A., WAWRO A.: Sulphur Passivation of GaSb, InGaAsSb and AlGaAsSb Surfaces. *phys. stat. sol.* (c) 2007 nr 4 s. 1448–1453.

[P13] PIOTROWSKA A., PAPIS E., KAMIŃSKA E., GOŁASZEWSKA K., PUSTELNY T., MACIAK E., OPILSKI Z.: ZnO Sensing Structure for NH_3 Detection. *Europ. Phys. J. - Special Topics* (w druku).

[P14] PIOTROWSKI T. T., GOŁASZEWSKA K., RUTKOWSKI J., PAPIS E., KAMIŃSKA E., KRUSZKA R., SZADE J., WINIARSKI A., PIOTROWSKA A.: Long-Term Stability of GaSb/In(AI)GaAsSb Thermo-photovoltaic Cells Passivated by Electrochemical Treatment in Sulphur Containing Solutions. IEEE Proc. of Int. Conf. on Clean Electrical Power. Capri, Włochy, 21–23.05.2007 (w druku).

[P15] PŁACZEK-POPKO E., NOWAK A., KARCZEWSKI G., WOJTOWICZ T., WIATER M., GUZIEWICZ M., GUMIENNY Z.: Investigation of the Quantum Confinement Effects in CdTe Dots by Electrical Measurements. Proc. of the 28th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors ICPS. Wiedeń, Austria, 24–28.07.2006, 2007, s. 813–814.

[P16] PRZEŹDZIECKA E., KAMIŃSKA E., KORONA K.P., DYNOWSKA E., DOBROWOLSKI W., JAKIEŁA R., PACUSKI W., KŁOPOTOWSKI Ł., KOSSUT J.: Optical Properties of P-type ZnO and ZnMnO Doped by N and/or As Acceptors. Proc. of the 28th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors ICPS. Wiedeń, Austria, 24–28.07.2007, s. 339–340.

[P17] PRZEŹDZIECKA E., KAMIŃSKA E., PASTERNAK I., PIOTROWSKA A., KOSSUT J.: Photoluminescence Study of p-Type ZnO:Sb Prepared by Thermal Oxidation of the Zn-Sb Starting Material. *Phys. Rev*. B 2007 vol. 76 s. 193303.

[P18] PUSTELNY T., MACIAK E., OPILSKI Z., PIOTROWSKA A., PAPIS E., GOŁASZEWSKA K.: Investigation of the ZnO Sensing Structure on NH_3 Action by Means of the Surface Plasmon Resonance Method. *Europ. Phys. J. - Special Topics* (w druku).

[P19] WÓJCIK A., GODLEWSKI M., GUZIEWICZ E., KOPALKO K., JAKIEŁA R., KIECANA K., SAWICKI M., GUZIEWICZ M., PUTKONEN M., NIINISTO L., DAUMONT Y., KELLER N.: Low Temperature Growth of ZnMnO: A Way to Avoid Inclusions of Foreign Phases and Spinodal Decomposition. *J. Appl. Phys.* 2007 vol. 90 s. 082502-1-3.

Konferencje'2007

[K1] ANDREEV I. A., GREBENSHCHIKOVA E. A., KUNITSYNA E. V., LVOVA T. V., MIKHAILOVA M. P., YAKOVLEV YU. P., PIOTROWSKI T. T., GOŁASZEWSKA K., PAPIS E., KRUSZKA R., GUZIEWICZ M., PIOTROWSKA A.: Processing of GaSb-Based Materials for Photodiodes and Thermophotovoltaic

Applications. 8th Int. Conf. on Mid-Infrared Optoelectronics: Materials and Devices. Bad Ischl, Austria, 14–16.02.2007 (plakat).

[K2] BEDNORZ M., URBAŃCZYK M., PUSTELNY T., PIOTROWSKA A., PAPIS E., SIDOR Z., KAMIŃSKA E.: Application of SU8 Polymer in Waveguide Interferometer Ammonia Sensor. 3rd Winter Workshop on Acoustics and Optoelectronics. Wisła, 26.02–3.03.2007 (ref.).

[K3] BODZENTA J., GOŁASZEWSKA K., KAMIŃSKA E., KAŹMIERCZAK-BAŁATA A., PIOTROWSKA A., PYKA M.: Thermal Properties of SiC – Results of Photothermal Measurements. VII Int. Conf. Microtechnology and Thermal Problems in Electronics. Łódź, 25–27.06.2007 (ref.).

[K4] BODZENTA J., GOŁASZEWSKA K., KAMIŃSKA E., KAŹMIERCZAK-BAŁATA A., PIOTROWSKA A., PYKA M., SZPERLICH P.: Photothermal Measurements in Determination of the Thermal Diffusivity of SiC. 14th Int. Conf. on Photoacoustic and Photothermal Phenomena. Kair, Egipt, 6–9.01,2007 (ref).

[K5] BODZENTA J., GOŁASZEWSKA K., KAŹMIERCZAK-BAŁATA A., PIOTROWSKA A., PYKA M.: Thermal Properties of Thin Films Deposited on Si and SiC Substrates. VII Int. Conf. Microtechnology and Thermal Problems in Electronics. Łódź, 25–27.06.2007 (ref.).

[K6] BOROWICZ L., RZODKIEWICZ W., GUZIEWICZ M.: Methods of Stress Investigations in Dielectric Layer of MIS Structures. E-MRS Fall Meet. 2007. Warszawa, 17–21.09.2007 (plakat).

[K7] DOBOSZ D., CZYZAK A., DOMAGAŁA J. Z., ŻYTKIEWICZ Z. R., GOŁASZEWSKA K., CZAPKIEWICZ M., PIOTROWSKI T. T.: Liquid Phase Growth and Characterization of Laterally Overgrown GaSb Epitaxial Layers. 5th Int. Conf. on Solid State Crystals and 8th Polish Conf. on Crystal Growth. Zakopane Kościelisko, 20–24.05.2007 (plakat).

[K8] GOŁASZEWSKA K., GUZIEWICZ M., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., BODZENTA J., KAŹMIERCZAK-BAŁATA A., PYKA M.: Thermal Conductivity of Thin Insulating Films by Photothermal Measurements. 17 Int. Vacuum Congr. and 13 Int. Conf. on Surface Science and Int. Conf. on Nanoscience and Technology. Sztokholm, Szwecja, 2–6.07.2007 (plakat).

[K9] GOŁASZEWSKA K., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., BODZENTA J., KAŹMIERCZAK-BAŁATA A., PYKA M., Lahereche H., Langer R., Bove P.: Photothermal Investigations of SIC Thermal Properties. 5th Int. Conf. on Solid State Crystals and 8th Polish Conf. on Crystal Growth. Zakopane Kościelisko, 20–24.05.2007 (plakat).

[K10] GOŁASZEWSKA K., PIOTROWSKI T. T., RUTKOWSKI J., PAPIS E., KRUSZKA R., DYNOWSKA E., RATAJCZAK J., PIOTROWSKA A.: Comparison of Various GaSb Based Device Structures for Application in Thermophotovoltaic Cells. 5th Int. Conf. on Solid State Crystals and 8th Polish Conf. on Crystal Growth. Zakopane Kościelisko, 20–24.05.2007 (plakat).

[K11] GUZIEWICZ M., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., DOMAGAŁA J., LAHRECHE H., LANGER R., BOVE P., POISSON M.-A.: Determination of Stress in Composite Engineered Substrates for GaN-Based RF Power. 5th Int. Conf. on Solid State Crystals and 8th Polish Conf. on Crystal Growth. Zakopane Kościelisko, 20–24.05.2007 (plakat).

[K12] GUZIEWICZ M., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., DOMAGAŁA J., LAHRECHE H., LANGER R., BOVE P., POISSON M. A.: Comparative Study on Stress in AlGaN/GaN HEMT Structures Grown on 6H-SIC, Si and on Composite Substrates of the 6H-SiC/Poly-SiC and Si/Poly-SiC. 17th Int. Vacuum Congr. a. 13th Int. Conf. on Surface Science and Int. Conf. on Nanoscience and Technology. Sztokholm, Szwecja, 2–6.07.2007 (plakat).

[K13] GUZIEWICZ M., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., DOMAGAŁA J., LAHRECHE H., LANGER R., POISSON M.-A.: Stress-Temperature Dependence in (Al)GaN HEMT Structure Grown on the Composite SiC Substrates. VII Int. Conf. Microtechnology and Thermal Problems in Electronics. Łódź, 25–27.06.2007 (ref.).

[K14] GUZIEWICZ M., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., DOMAGAŁA J., DI FORTE POISSON M.-A., LAHRECHE H., LANGER R., BOVE P.: Evaluation of Stress in AlGaN/GaN HEMT Structures Grown on Composite Substrates of the Type Mono-Si/Poly-SIC and Mono-SiC/Poly-SIC. 31st Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits Held in Europe. Wenecja, Włochy, 20–23.05.2007 (kom.).

[K15] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., DI FORTE POISSON M.-A., DELAGE S., LAHRECHE H., KWIETNIEWSKI N., PASTERNAK I., GUZIEWICZ M., KRUSZKA R., BOGUSŁAWSKI P., BORYSEWICZ M., RZODKIEWICZ W.: Application of ZnO to Passivate the GaN-Based Device Structures. MRS Fall Meet. Boston, USA, 26–30.11.2007 (plakat).

[K16] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., DI FORTE POISSON M.-A., KWIETNIEWSKI N., PASTERNAK I., SIDOR Z., BOGUSŁAWSKI P., GUZIEWICZ M., KRUSZKA R.: Surface Passivation of AlGaN/GaN Heterostructures with Lattice-Matched ZnO. XXXVI Int. School on the Physics of Semiconducting Compounds. Ustroń-Jaszowiec, 9–15.06.2007 (plakat).

[K17] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., DI FORTE POISSON M.-A., KWIETNIEWSKI N., PASTERNAK I., SIDOR Z., BOGUSŁAWSKI P., GUZIEWICZ M., KRUSZKA R., DYNOWSKA E.: ZnO as Lattice-Matched Passivating Coating for AlGaN/GaN Heterostructures. 13th Int. Conf. on II-VI Compounds. Jeju, Korea, 14.09.2007 (plakat).

[K18] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., KWIETNIEWSKI N., GUZIEWICZ M., KRUSZKA R., PASTERNAK I., POISSON M.-A., LAHERECHE H., BOVE P., SZCZĘSNY A., SZMIDT J.: Development of Passivation Technology for AlGaN/Gan HEMTfor High Power/High Temperature Operation. IX Konf. Nauk. „Technologia Elektronowa" ELTE 2007. Kraków, 4–7.09.2007 (plakat).

[K19] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., PRZEŹDZIECKA E., PASTERNAK I., GUZIEWICZ M., DYNOWSKA E., BOGUSŁAWSKI P., KOSSUTH J.: Functionalizing ZnO, First Polish-American Symp.: New Low Dimensional Structures of Wide Gap Semiconductors for Spintronics and New Functional Materials. Warszawa, 24–25.05.2007 (ref. zapr.).

[K20] KAMIŃSKA E., PRZEŹDZIECKA E., PIOTROWSKA A., PASTERNAK I., BOGUSŁAWSKI P., KOSSUTH J.: Growth of p-Type ZnO by Oxidation of Zn-Based Compounds. 13th Int. Conf. on II-VI Compounds. Jeju, Korea, 14.09.2007 (ref. zapr.).

[K21] KISIEL R., SOCHACKI M., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., GUZIEWICZ M.: Kontakty omowe Ni oraz Ni-TaSi do podłoży SiC typu n. VI Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko, 10–13.06.2007 (plakat).

[K22] KISIEL R., SOCHACKI M., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., GUZIEWICZ M.: Ni, Ni-TaSi and Si/Ni Ohmic Contacts to n-Type 4H SiC. VII Int. Conf. Microtechnology and Thermal Problems in Electronics. Łódź, 25–27.06.2007 (ref.).

[K23] KOWALIK A., GUZIEWICZ E., KOPALKO K., GODLEWSKI M., WÓJCIK A., OSINNIY V., KRAJEWSKI T., STORY T., GUZIEWICZ M.: Effect of Annealing on Electrical Properties of Iow Temperature ZnO Films. 5th Int. Conf. on Solid State Crystals and 8th Polish Conf. on Crystal Growth. Zakopane Kościelisko, 20–24.05.2007 (plakat).

[K24] KUCHUK A., KLADKO V., GUZIEWICZ M., PIOTROWSKA A., MINIKAYEV R., STONERT A., RATAJCZAK R.: Fabrication and Characterization of Nickel Silicide Ohmic Contacts to n-Type 4H Silicon Carbide. 17 Int. Vacuum Congr. and 13 Int. Conf. on Surface Science and Int. Conf. on Nanoscience and Technology. Sztokholm, Szwecja, 2–6.07.2007 (plakat).

[K25] KUCHUK A. V., KLADKO V. P., LYTVYN O. S., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., MINIKAYEV R. A., RATAJCZAK R.: Fabrication of Thermally Stable Ohmic Contacts for Wide Band-Gap GaN and SiC Semiconductors. XI Int. Conf. on Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems. Ivano-Frankivsk, Ukraina, 7–12.05.2007 (plakat).

[K26] KUCHUK A. V., KLADKO V. P., PIOTROWSKA A., GOŁASZEWSKA K., MINIKAYEV R. A., RATAJCZAK R.: Nanocomposite nc-TaN/a-Si_3N_4 „Mictamict" Films in Metallization Scheme of Galium Nitride for High Temperature Electronics. 19th Int. Symp. "Thin Films in Optics and Nano-Electronics" at Kharkov Nanotechnology Assembly. Charków, Ukraina, 23–27.04.2007 (ref.).

[K27] KUCHUK A., KLADKO V., PIOTROWSKA A., LYTVYN O., GUZIEWICZ M., RATAJCZAK R., STONERT A., MINIKAYEV R.: Thermal Stability of Ohmic Contacts to GaN and SiC with Ta-Si-N Diffusion Barriers and Au Overlayers. Book of Abstracts of 8th Int. Balkan Workshop on Applied Physics. Konstancja, Rumunia, 5–7.07.2007 (ref.).

[K28] KUCHUK A. V., PIOTROWSKA A., KLADKO V. P., GUZIEWICZ M., LYTVYN O. S., RATAJCZAK R., STONERT A., TKACH S. V.: Influence of Si on the Formation of Ni-Si/N-SiC Ohmic Contacts. V Int. Workshop on Semiconductor Surface Passivation. Zakopane, 16–19.09.2007 (plakat).

[K29] KWIETNIEWSKI N., GUZIEWICZ M., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., GOŁASZEWSKA K.: Characterization of Ir and IrO_2 Schottky Contacts on n-Type 4H-SiC under High Temperature Stress. 5th Int. Conf. on Solid State Crystals and 8th Polish Conf. on Crystal Growth. Zakopane Kościelisko, 20–24.05.2007 (plakat).

[K30] KWIETNIEWSKI N., GUZIEWICZ M., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., GOŁASZEWSKA K., DIDUSZKO R.: Fabrication and Stability of Ir and IrO_2 Schottky Contacts on n-SiC. 17 Int. Vacuum Congr. and 13 Int. Conf. on Surface Science and Int. Conf. on Nanoscience and Technology. Sztokholm, Szwecja, 2–6.07.2007 (plakat).

[K31] KWIETNIEWSKI N., GUZIEWICZ M., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., SOCHACKI M., SZMIDT J., DIDUSZKO R., RATAJCZAK R., JAKIEŁA R., WAWRO A.: Development of Thermally Stable Ir-Based Schottky Contacts n-Type 4H SiC. IX Konf. Nauk. „Technologia Elektronowa" ELTE 2007. Kraków, 4–7.09.2007 (plakat).

[K32] KWIETNIEWSKI N., SOCHACKI M., GUZIEWICZ M., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A.: Influence of Surface Cleaning Effects on Properties of Schottky Diodes on 4H-SIC. V Int. Workshop on Semiconductor Surface Passivation. Zakopane, 16–19.09.2007 (plakat).

[K33] PAPIS E., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., KRUSZKA R., KWIETNIEWSKI N., RZODKIEWICZ W., WAWRO A.: Passivation of GaN Surface By Chemical Bath Deposition of Thin CdS Layers. 5th Int. Conf. on Solid State Crystals and 8th Polish Conf. on Crystal Growth. Zakopane Kościelisko, 20–24.05.2007 (plakat).

[K34] PAPIS E., KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., KRUSZKA R., KWIETNIEWSKI N., SIDOR Z., RZODKIEWICZ W., WAWRO A.: Properties of Chemical Bath Deposited CdS and ZnS Coatings for Application in Surface Passivation of GaN. V Int. Workshop on Semiconductor Surface Passivation. Zakopane, 16–19.09.2007 (plakat).

[K35] PIOTROWSKI T. T., GOŁASZEWSKA K., PAPIS E., RUTKOWSKI J., KRUSZKA R., SZADE J., WINIARSKI A., PIOTROWSKA A.: Optimisation of Electrochemical Sulphur Treatment of GaSb and Related Semiconductors: Application to Surface Passivation of GaSb/In(AI)GaSb TPV Cells. 5th Int. Conf. on Solid State Crystals and 8th Polish Conf. on Crystal Growth. Zakopane Kościelisko, 20–24.05.2007 (plakat).

[K36] PIOTROWSKI T. T., GOŁASZEWSKA K., RUTKOWSKI J., PAPIS E., KRUSZKA R., SZADE J., WINIARSKI A., PIOTROWSKA A.: Long-Term Stability of GaSb/In(Al)GaAsSb TPV Cells Passivated by Electrochemical Treatment in Sulphur Containing Solutions. Int. Conf. on Clean Electrical Power. Capri, Włochy, 21–23.05.2007 (ref.).

[K37] PRZEŹDZIECKA E., KAMIŃSKA E., PASTERNAK I., BOGUSŁAWSKI P., JAKIEŁA R., KOWALCZYK E., KILAŃSKI Ł., PIOTROWSKA A., KOSSUT J.: Optical Analysis of Sb-Doped p-Type ZnO Grown by

Thermal Oxidation of Zn-Sb Films. XXXVI Int. School on the Physics of Semiconducting Compounds. Ustroń-Jaszowiec, 9–15.06.2007 (plakat).

[K38] PUSTELNY T., OPILSKI Z., MACIAK E., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., GOŁASZEWSKA K., PAPIS E.: Sensing Characteristics of ZnO-Based NH_3 Surface Plasma Resonance Sensors. 3rd Winter Workshop on Acoustics and Optoelectronics. Wisła, 26.02–3.03.2007 (ref.).

[K39] SZMIDT J., SOCHACKI M., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., GOŁASZEWSKA K., GUZIEWICZ M., KWIETNIEWSKI N.: Wykonanie, pasywacja i terminacja kontaktów Schottky'ego na podłożach SiC. VI Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko, 10–13.06.2007 (ref.).

[K40] SZMIDT J., SOCHACKI M., PIOTROWSKA A., KAMIŃSKA E., GOŁASZEWSKA K., GUZIEWICZ M., KWIETNIEWSKI N.: Silicon Carbide Schottky Diodes – Performance, Passivation and Termination Problems. VII Int. Conf. Microtechnology and Thermal Problems in Electronics. Łódź, 25–27.06.2007 (plakat).

Patenty'2007

[PA1] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A.: Sposób pasywacji powierzchni tranzystorów polowych. Zgł. pat. nr P383756 z dn. 13.11.2007.

[PA2] KAMIŃSKA E., PIOTROWSKA A., KOSSUT J.: Sposób wytwarzania półprzewodnikowej warstwy tlenku cynku. Zgł. pat. nr P384127 z dn. 20.12.2007.