



Kierownik: doc. dr hab. inż. Andrzej CZERWIŃSKI

e-mail: aczerwin@ite.waw.pl, tel. (0-prefiks-22) 548 77 64, fax 847 06 31

Zespół: dr inż. Jacek Ratajczak, e-mail: rataj@ite.waw.pl,
mgr inż. Adam Łaszcz, e-mail: laszcz@ite.waw.pl,
mgr inż. Mariusz Płuska, e-mail: mpluska@ite.waw.pl,
mgr inż. Marek Wzorek, e-mail: mwzorek@ite.waw.pl

1. Wstęp

W 2005 r. w Zakładzie Badań Materiałów i Struktur Półprzewodnikowych były realizowane następujące projekty badawcze:

- „Badania zmian strukturalnych w materiałach i strukturach półprzewodnikowych dla nanotechnologii elektronicznych”. Etap I – projekt statutowy nr 1.08.046,
- Centrum Doskonałości CEPHONA “Physics and Technology of Photonic Nanostructures (“Fizyka i technologia nanostruktur fotonicznych”) – projekt realizowany wspólnie z trzema zakładami ITE w ramach 5. Programu Ramowego Unii Europejskiej G5MA-CT-2002-04061,
- „Metallic Source/Drain for Advanced MOS Technology METAMOS” (Metaliczne źródło/dren dla zaawansowanej technologii MOS) – projekt realizowany w ramach 6. Programu Ramowego Unii Europejskiej, IST-CT-2005-016677).

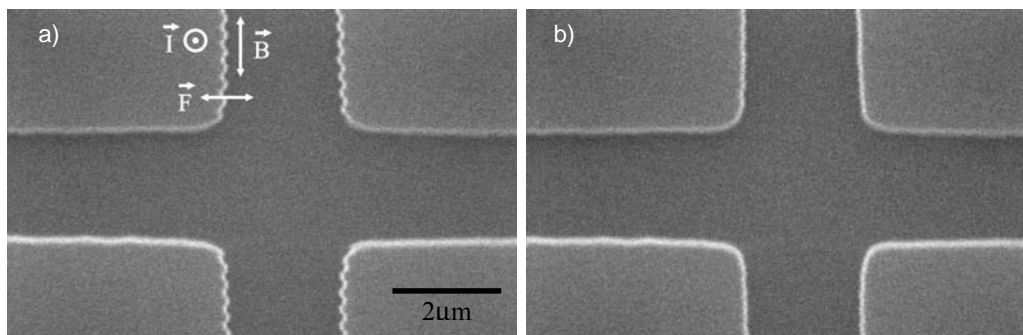
Osiągnięciem Zakładu było zorganizowanie XII International Conference on Electron Microscopy of Solids (EM’2005), która odbyła się w Kazimierzu Dolnym w dniach 5–9.06.2005 r. Wzięło w niej udział 140 uczestników z 21 krajów. Konferencja została zorganizowana pod auspicjami European Microscopy Society i przy wsparciu Polskiego Towarzystwa Mikroskopii oraz Polskiego Towarzystwa Materiałoznawczego. Przewodniczącym Komitetu Organizacyjnego Konferencji był prof. dr hab. inż. Jerzy Kątki, sekretarzem – dr inż. Jacek Ratajczak, a redaktorami specjalnego wydania Journal of Microscopy, Oxford – prof. dr hab. inż. Jerzy Kątki i doc. dr hab. inż. Andrzej Czerwiński.

2. Eliminacja zakłóceń periodycznych w skaningowym mikroskopie elektronowym z zastosowaniem metod cyfrowego przetwarzania sygnałów

Obecność zakłóceń elektromagnetycznych powoduje niepożądane odchylenie wiązki elektronowej w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM), czego skutkiem jest deformacja obrazów badanych obiektów. Aby uniknąć deformacji,

stosuje się ekrany magnetyczne i systemy aktywnej kompensacji pola. Tańszym rozwiązaniem są metody numeryczne. Przeprowadzone badania pozwoliły na opracowanie metod eliminacji zakłóceń wykorzystujących w nowy sposób techniki cyfrowego przetwarzania sygnałów i obrazów.

Zewnętrzne pole magnetyczne (B) przenikające do komory mikroskopu powoduje, że na wiązkę elektronów (I) oddziałuje siła Lorentza (F) (rys. 1).

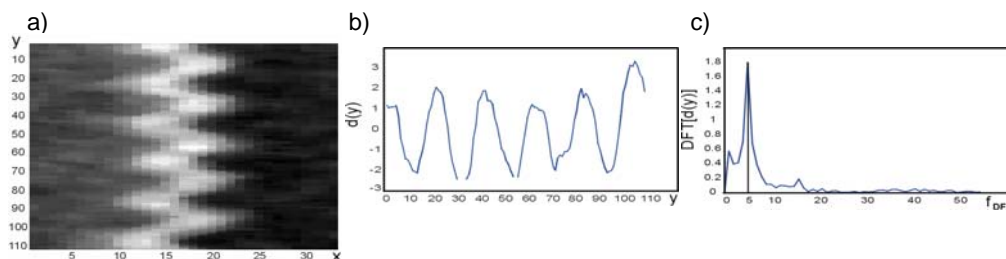


Rys. 1. Zniekształcony obraz mikroskopowy powstały w wyniku zewnętrznego pola magnetycznego (a) i jego korekcja metodą przesunięć poziomych linii obrazu (b). Periodyczna deformacja pionowych krawędzi została wyeliminowana.

Zmiana natężenia tego pola w trakcie skanowania obrazu powoduje periodyczne przemieszczanie się wiązki elektronów, zmianę miejsca jej zetknięcia z badaną próbką i deformację rejestrowanego obrazu. Opracowano dwie metody eliminacji: metodę filtracji medianowej oraz metodę korekcji przesunięć poziomych linii obrazu.

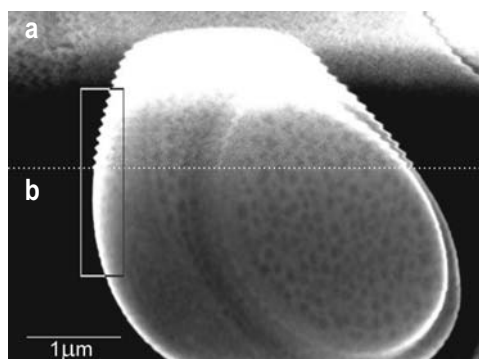
Filtracja obrazu z zastosowaniem opracowanego zespołu dwóch prostopadłych filtrów medianowych (np. filtr poziomy o matrycy 3×11 pikseli i filtr pionowy 1×21 pikseli, skorygowane dodatkowo przez filtr erozyjny o matrycy 3×3 piksele) pozwala na rekonstrukcję krawędzi, ale wprowadza lokalne zmiany jasności obrazu i tracone są detale obrazu o wymiarach mniejszych od matryc filtrów. W związku z tym głównym zastosowaniem metody może być przygotowywanie obrazów do automatycznych pomiarów geometrycznych (odległości pomiędzy krawędziami, kątów itp.).

Metoda korekcji przesunięć poziomych linii obrazu polega na znalezieniu kształtu krawędzi, rozpoznaniu na nim periodycznie zmiennych wzajemnych przesunięć poszczególnych poziomych linii obrazu oraz ich kompensacji. Identyfikacja zakłóceń odbywa się na zaznaczonym przez użytkownika obszarze zdjęcia mikroskopowego, gdzie dzięki odpowiedniemu obróceniu obrazu zakłócenia krawędzi zachodzą tylko w kierunku poziomym (rys. 2a). Każdą linię obszaru przetwarza się przy użyciu dyskretnego przekształcenia Fouriera (Discrete Fourier Transform – DFT). Charakterystyki fazowe wyznaczone kolejno dla wszystkich poziomych linii obszaru pozwalają na odtworzenie kształtu krawędzi zniekształconego przez zakłócenia (rys. 2b).



Rys. 2. a) Obszar zdjęcia wybrany do identyfikacji parametrów deformacji (y – numer linii, x – numer kolumny); b) zmiana przesunięcia $d(y)$ linii dla wybranego obszaru (y – numer linii odpowiadający pionowej skali na rys. 2a); c) amplitudowe widmo DFT wektora $d(y)$ wyznaczone w celu oszacowania liczby cykli zakłócenia przypadających na obszar (ok. 5 w tym przypadku).

Zakłócenia pochodzą z sieci elektroenergetycznej, więc ich przebieg jest aproksymowany funkcją sinusoidalną. Identyfikacja deformacji obrazu polega na znalezieniu amplitudy, częstotliwości i fazy tej funkcji w wyniku transformacji DFT przebiegu kształtu krawędzi (rys. 2c). Dokładne parametry przebiegu zakłóceń wynikają z badania jego korelacji z funkcjami harmonicznymi o precyzyjnie strojonej często-



Rys. 3. Obraz obiektu o nieregularnym kształcie z zasymulowaną sinusoidalną deformacją przed (a) i po korekcji (b). Ramka obejmuje obszar zdjęcia użyty do detekcji parametrów deformacji. Widoczna eliminacja deformacji potwierdza skuteczność metody.

tliwości. Współczynnik korelacji osiąga maksimum dla rzeczywistej częstotliwości deformacji. Z zespolonej wartości tego współczynnika wyznacza się amplitudę i fazę przebiegu zakłóceń. Korekcja polega na przesunięciu poziomych linii obrazu o wartość wyznaczoną z analizy zakłóceń w przeciwnym kierunku (rys. 3) i w przyszłości będzie podstawą algorytmu rekonstrukcji obrazu w czasie rzeczywistym.

3. Płóciowa metoda pomiaru in situ EBIC. Lokalne pomiary grubości warstw w przyrządach półprzewodnikowych metodą EBIC

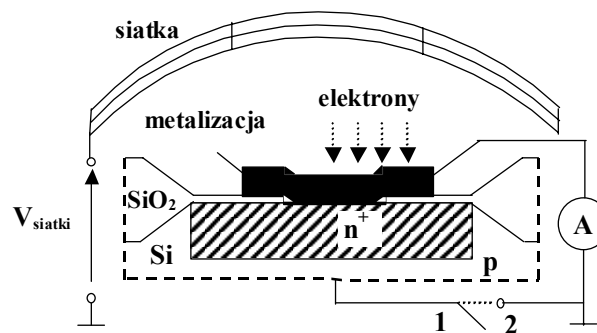
Nowa metoda umożliwia pomiar prądu wiązki elektronowej w mikroskopie skaningowym (SEM) generującego pary elektron-dziura w półprzewodniku (I_{beam}).

Jest to konieczne dla zastosowania ilościowych metod wykorzystujących pomiary prądu indukowanego wiązką elektronową (Electron Beam Induced Current – I_{EBIC}), opartych na wyznaczeniu wzmocnienia I_{EBIC}/I_{beam} , skąd można wyznaczyć grubości warstw, cechy defektów itp. rozszerzając stosowanie metody EBIC poza obserwację obrazów mikroskopowych.

Do pomiaru I_{beam} standardowo kieruje się wiązkę elektronów do puszkii Faradaya i w niej dokonuje pomiaru, co wiąże się z licznymi utrudnieniami i niedokładnościami pomiarów, m. in. należy znać tzw. współczynnik elektronów odbitych (BSE coefficient). Współczynnik ten określa część energii wiązki niewykorzystanej do wytworzenia par elektron-dziura, lecz uniesionej z elektronami odbitymi. Jest zależny od materiału i energii wiązki i od słabo kontrolowanych czynników (zanieczyszczeń powierzchni próbki, nierównomierności powierzchni itp.). Jego wartość często różni się nawet w przypadku tego samego rodzaju materiału i odbiega od wartości teoretycznych czy literaturowych.

Metodę stosuje się *in situ*, na strukturze półprzewodnikowej w miejscu, gdzie przeprowadzane są pomiary prądu EBIC, bez użycia puszkii Faradaya, bez stosowania współczynników elektronów odbitych i dla typowych przyrządów wykorzystywanych w metodzie EBIC (jak dioda Schottky i kontakt metalizacji do złącza p-n).

Kiedy obwód służący do pomiarów EBIC jest zamknięty (przełącznik na rys. 4 w pozycji 2), wtedy mierzony jest prąd I_{EBIC} . Po otwarciu obwodu (przełącznik w pozycji 1) mierzony jest prąd płynący od działa elektronowego przez miernik prądu do uziemienia.



Rys. 4. Przekrój struktury złącza p-n z kontaktem metalizacji. Siatka przewodów ponad półprzewodnikiem jest polaryzowana ujemnym potencjałem.

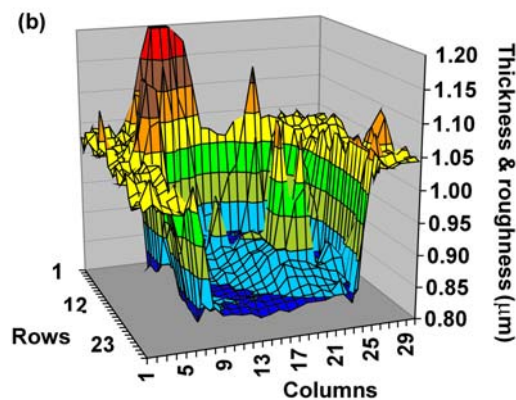
W następujący sposób rozwiązano problemy związane z obecnością elektronów wtórnych płynących przez miernik prądu w kierunku przeciwnym do I_{beam} , z pasożytniczą pojemnością łączącą obydwie końce otwartego przełącznika, przez którą przedostaje się składowa zmienna prądu I_{EBIC} (zmian sygnału podczas skanowania próbki), oraz z obecnością elektronów odbitych, które zanim nie-rejestrowane przez miernik prądu opuszczą próbkę, część swojej energii prześlą wygenerowanym parom elektron-dziura (e-h).

- Umieszczona ponad mierzoną próbką i izolowana od niej spolaryzowana ujemnie siatka druciana o kształcie połowy sfery powoduje powrót do próbki wyemitowanych elektronów wtórnych.
- Po zastosowaniu długich odstępów czasowych przy skanowaniu znika zmienny składnik prądu EBIC.
- Energię wiązki elektronowej ograniczono do wartości, dla których zasięg elektronów w półprzewodniku R_e jest mniejszy od dwukrotnej (efektywnej) grubości półprzewodnika o takiej samej zdolności zatrzymywania padających elektronów (stopping power) jak wierzchnia warstwa pokrywająca półprzewodnik, np. metalizacja. Nadlatujące elektrony, które zagłębią się w strukturę dalej niż $R_e/2$ i osiągną półprzewodnik, po odbiciu nie opuszczą struktury, gdyż ich energia nie pozwala na ponowne przebycie tej drogi, a elektrony odbite na mniejszych głębokościach nie docierają do półprzewodnika i praktycznie nie wytwarzają par e-h. Dla badanych próbek odpowiadało to energii wiązki poniżej 15 keV.

W celu potwierdzenia słuszności metody wykonano pomiar grubości metalizacji pokrywającej półprzewodnik, porównano uzyskane wartości z wartościami wyznaczonymi przy tym samym umieszczeniu próbki w mikroskopie elektronowym, wykorzystując obraz w trybie elektronów wtórnych (SE) do obserwacji krawędzi warstwy. Pomiar grubości w trybie SE jest ograniczony do krawędzi warstw, natomiast nowa metoda pozwala na pomiar grubości warstw w obrazie planarnym próbki, również dla miejsc dalekich od krawędzi warstw i bez dodatkowych przygotowań, jak przełamanie czy przecięcie.

Lokalne zmniejszenie wzmocnienia I_{EBIC}/I_{beam} względem teoretycznej maksymalnej liczby generowanych par e-h wynika z obecności wierzchniej warstwy ponad półprzewodnikiem oraz z procesów rekombinacji w półprzewodniku. Wpływ tych czynników rozdzielono wykonując pomiary przy dwóch różnych wartościach energii wiązki.

Na podstawie wyników pomiarów wykonanych na obszarach kontaktów Al-Si do obszarów złączy p-n można było wyznaczyć grubość warstw (rys. 5). Grubość war-



Rys. 5. Trójwymiarowy rozkład grubości metalizacji ponad kontaktem Al-Si otrzymany nową metodą (jedna ściana kontaktu usunięta numerycznie w celu zapewnienia lepszej widoczności)

stwy metalizacji na obszarze kontaktu (800 ± 40 nm) została potwierdzona przez pomiar grubości mierzonej w trybie SE na krawędzi przełomu takiej samej struktury.

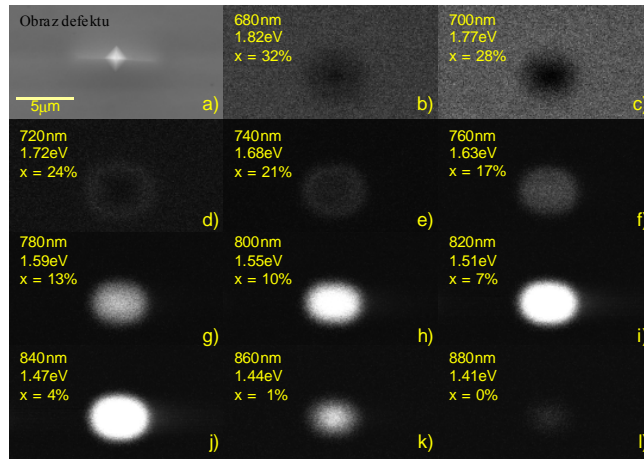
4. Charakteryzacja lokalnych zaburzeń składu warstw wykonanych w technologii MBE przy użyciu pomiaru katodoluminescencji monochromatycznej

Wyznaczono lokalne zmiany składu chemicznego półprzewodnikowych materiałów optoelektronicznych ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) wykorzystując pomiary katodoluminescencji w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM). Szerokość i typ przerwy zabronionej oraz promieniowanie emitowane pod wpływem padającej wiązki elektronowej zależą od składu warstw półprzewodnikowych. Gdy lokalne naprężenia mechaniczne są tak małe, że nie wpływają istotnie na długość fali powstającego promieniowania (co jest typowe dla $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$), wtedy możliwy jest ilościowy pomiar składu warstw. Gdy naprężenia są większe, wówczas metoda pozwala na wyciągnięcie mniej jednoznacznych, ale praktycznych wniosków.

Szerokość prostej przerwy zabronionej struktur $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ w temperaturze 300 K dla $x < 0,45$ wynosi $E_g(x) = 1,424 + 1,247x$ [eV] i zgodne z tym zmiany widma poszczególnych części defektu charakteryzują jego skład. Podczas badania defektów owalnych powstałych w procesie wzrostu struktur półprzewodnikowych zawierających warstwy $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ oraz $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$, wytworzonych w technologii epitaksji z wiązek molekularnych (MBE) w Zakładzie Fizyki i Technologii Struktur Niskowymiarowych, rejestrowano zestaw wielu obrazów katodoluminescencyjnych, każdy w bardzo wąskim przedziale widma promieniowania (prawie monochromatycznych). Pozwala to na klasyfikowanie rodzajów defektów i poprzez porównanie z wcześniejszymi wzorcami takich zestawów przyspiesza charakteryzację defektów dla nowych próbek.

Na rys. 6 przedstawiono zestaw obrazów katodoluminescencji monochromatycznej otoczenia defektu w strukturze $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Maksimum luminescencji tła wypada dla ok. 700 nm (1,77 eV), co odpowiada w przybliżeniu strukturze $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ i zgadza się z teoretycznymi parametrami badanej próbki. Maksimum luminescencji defektu występuje dla ok. 840 nm, co świadczy o zmniejszonej zawartości glinu (4%), czyli zwiększonej zawartości galu. Wzbogacenie zdefektowanego obszaru w gal sugeruje, że źródłem defektu jest tutaj komórka galowa, co zostało potwierdzone przez inne badania.

Podobne badania wykonano dla cienkiej warstwy (80 \AA) $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ osadzonej na podłożu GaAs. Zaobserwowano przesunięcie luminescencji bezpośredniego otoczenia defektu w kierunku fal krótszych niż wynikające z założonego składu chemicznego struktury (980 nm dla $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$), co również odpowiada zwiększonej koncentracji galu.



Rys. 6. Obrazy defektu owalnego w strukturze $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ uzyskane z pomiaru elektronów wtórnych (a) oraz katodoluminescencji monochromatycznej (b – l). Zaznaczono długość fali, odpowiadającą jej energii oraz wyliczoną stąd procentową zawartość glinu.

Opisana metoda, jako oparta na pomiarach elektronomikroskopowych, pozwala na charakteryzację defektów z wyższą rozdzielczością geometryczną w stosunku do metody fotoluminescencji. Możliwa jest klasyfikacja rodzajów defektów poprzez określanie ich rozkładów widmowych w postaci zestawów monochromatycznych obrazów katodoluminescencyjnych, a przez to szybsze określanie przyczyn powstawania defektów w nowych próbkach.

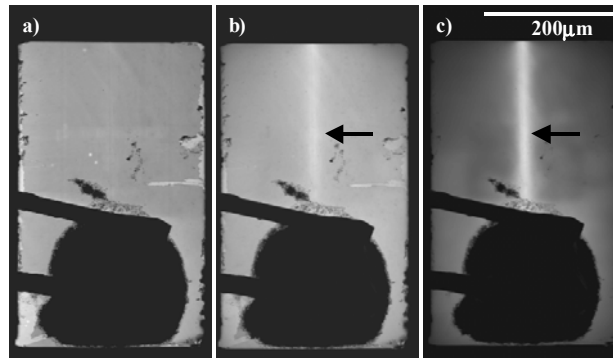
5. Badanie geometrii laserów półprzewodnikowych metodami EBIC i katodoluminescencji

Geometria falowodu lasera półprzewodnikowego wpływa na jego sprawność. Zbadano możliwość badania geometrii przy użyciu specjalizowanych metod skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM), a w szczególności wpływ ograniczeń bocznych na rozptył prądu i emisję promieniowania laserów krawędziowych.

Pobudzenie lasera wiązką elektronów o stosunkowo dużym natężeniu z działa elektronowego mikroskopu powoduje indukowanie w nim prądu EBIC o rozkładzie gęstości zależnym od geometrii ograniczeń bocznych. Zjawisko to przedstawia rys. 7 dla lasera ze strukturą $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ i studnią kwantową InGaIn wytworzonego w technologii MOCVD w Instytucie Wysokich Ciśnień PAN.

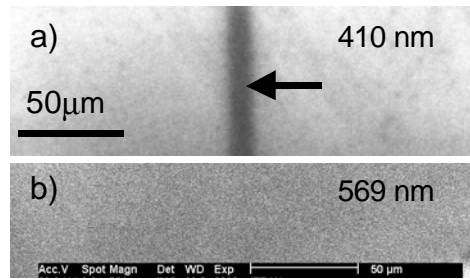
Przy małym prądzie wiązki (20 nA) lokalna gęstość prądu EBIC wynika z obecności zanieczyszczeń, defektów struktury itp. (rys. 7a), natomiast przy dużym prądzie wiązki (np. 300 nA) widoczna jest zwiększona gęstość prądu EBIC w obszarze mesy wskazanym strzałką (rys. 7c).

Również pomiary katodoluminescencyjne (CL) górnej powierzchni laserów ujawniły wpływ ich geometrii na rozkład emitowanego promieniowania



Rys. 7. Zależność rozkładu gęstości prądu EBIC (obraz planarny lasera) od prądu pobudzającej wiązki elektronicznej I_{beam} o wartości: 20 nA (a), 140 nA (b), 300 nA (c). Energia wiązki elektronicznej wynosi 30 keV.

światelnego, a mianowicie wygaszenie promieniowania w obszarze mesy (wskazanym strzałką) dla prądów wiązki o wartości nie mniejszej niż 300 nA, dotyczące tylko fali długości 410 nm emitowanej ze studni kwantowej (rys. 8). Sugeruje to, że dla dużej gęstości prądu wiązki pobudzającej występuje emisja wymuszona w laserze, którą można obserwować w SEM. W obszarze aktywnym promieniowanie krąży między zwierciadłami i wymuszając emisję w tym samym kierunku ogranicza emisję spontaniczną.



Rys. 8. Obraz planarny katodoluminescencji monochromatycznej dla fragmentu struktury laserowej AlGaIn/GaN (widok z góry) dla długości fali równej 410 nm (a) i 569 nm (b). Pionowy pasek widoczny na środku zdjęcia obrazuje falowód z wytrawionymi ograniczeniami bocznymi.

W ten sposób ewentualne niedoskonałości wykonania ograniczeń bocznych laserów można przy zastosowaniu metod SEM obserwować w postaci nieregularności rozkładów prądu EBIC i emisji promieniowania uwidocznionej przez pomiary katodoluminescencji monochromatycznej.

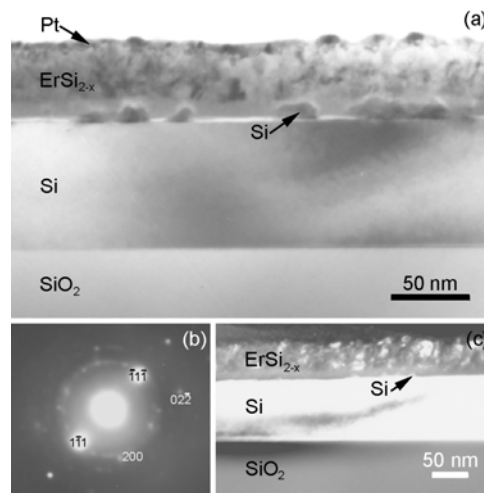
6. Identyfikacja faz w wygrzewanej strukturze Pt/Er/Si/SiO₂/Si metodą dyfrakcji elektronicznej

Krzemki erbu ErSi_{2-x} są stosowane w przyrządach półprzewodnikowych jako omowe lub niskorezystywne kontakty, gdyż mają niską barierę Schottky'ego dla krzemu typu n. W najnowszych zastosowaniach kontakty takie stanowią samo-

dzielne obszary źródło/dren w tranzystorach typu MOSFET bez konieczności implantowania lub wdyfundowania domieszki.

Celem badań była identyfikacja za pomocą analizy dyfrakcyjnej faz tworzących się w strukturze Pt/Er/Si/SiO₂/Si po wygrzaniu przez 2 min. w temperaturze 450°C, 525°C albo 600°C.

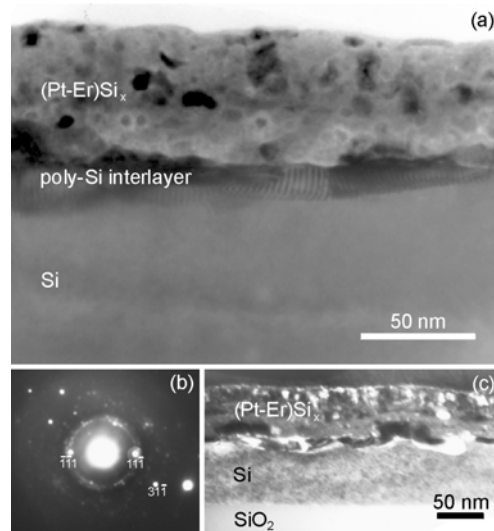
Na rys. 9a przedstawiona jest struktura wygrzana w 450°C. Pochodzące od erbu refleksy występujące na obrazie dyfrakcyjnym struktury niewygrzewanej nie są widoczne na obrazie dyfrakcyjnym struktury wygrzanej (rys. 9b). Dowodzi to, że mobilne atomy Si migrują do warstwy Er podczas wygrzewania i reagują tam z prawie niemobilnymi atomami erbu tworząc warstwę ErSi_{2-x}. Obraz w ciemnym polu (rys. 9c) struktury Pt/Er/Si/SiO₂/Si uzyskany z pojedynczego refleksu ugiętego [1 $\bar{1}$ 1]-Si obrazu dyfrakcyjnego pokazuje, że refleks ten należy do monokrystalicznej warstwy krzemu, do ziaren krzemu formujących się podczas wygrzewania na granicy fazowej ErSi_{2-x}/Si i do wosp krzemu w warstwie krzemu.



Rys. 9. Elektronmikroskopowa analiza struktury Pt/Er/Si/SiO₂/Si wygrzanej w 450°C: a) obraz w jasnym polu; b) obraz dyfrakcyjny ze zorientowanymi [011] refleksami Si; c) obraz w ciemnym polu

Po wygrzaniu w 600°C cała wierzchnia warstwa Pt znika i formuje się warstwa wieloskładnikowa (Pt-Er)Si_x (rys. 10a). Obraz w ciemnym polu (rys. 10c) uzyskany z pojedynczego refleksu [1 $\bar{1}$ 1]-Si obrazu dyfrakcyjnego (rys. 10b) potwierdza formowanie się wosp krzemu w warstwie (Pt-Er)Si_x i na granicy z krzemem krystalicznym. W temperaturze 450°C na granicy międzyfazowej Er/Si gromadzą się pojedyncze ziarna Si, a w temperaturze 525 °C i 600°C tworzy się tam ciągła warstwa polikrystalicznego Si. Ponieważ warstwa Pt znika całkowicie w trakcie wygrzewania w 600°C, oznacza to, że atomy Pt migrują do tworzącej się warstwy krzemu erbu.

Na obrazach dyfrakcyjnych nie obserwuje się wyraźnych refleksów czy pierścieni pochodzących od erbu lub krzemu erbu. W warstwie krzemu trzy pierwiastki Si, Er i Pt mogą tworzyć ErSi_{2-x}, PtSi i stop Pt-Er oraz skomplikowane



Rys. 10. Elektronomikroskopowa analiza struktury Pt/Er/Si/SiO₂/Si wygrzanej w 600°C: a) przekrój struktury; b) obraz dyfrakcyjny ze zorientowanymi [011] refleksami Si, c) obraz w ciemnym polu

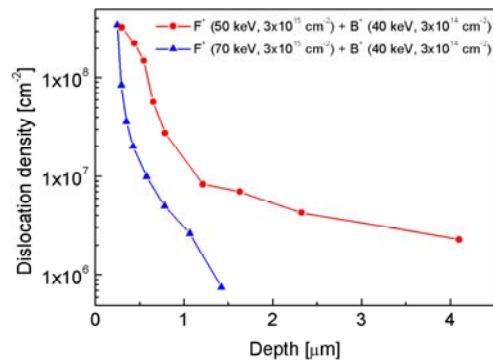
związki wieloskładnikowe, jak np. (Pt-Er)Si_x. Brak faz ErSi_{2-x} w badanych próbkach można interpretować jako formowanie się bardziej skomplikowanej fazy krzemku erbu z udziałem atomów Pt.

7. Badanie wpływu warstw amorficznych na rozkład gęstości dyslokacji w implantowanym krzemie

Określono wpływ warstw amorficznych, powierzchniowej oraz zagrzebanej na jakość struktury krystalicznej złącza p-n dla piezorezystorów wytwarzanych w Zakładzie Technologii Mikrosystemów i Nanostruktur Krzemowych. Piezorezystory wytwarzano poprzez implantację boru do płytki typu n. Badane struktury testowe zostały wytworzone na płytkach krzemowych otrzymanych metodą Czochralskiego, typu n o orientacji [100] i rezystywności 4 Ω·cm. Znaną metodą w mikroelektronice, redukującą liczbę poimplantacyjnych defektów resztkowych, jest wstępna amorfizacja płytki krzemowej, skutkująca następnie rekrytalizacją warstwy amorficznej i usunięciem defektów. Jak stwierdzono przy użyciu metod transmisyjnej mikroskopii elektronowej, implantacja jonami fluoru o energii do 50 keV formuje powierzchniową warstwę amorficzną, a przy energii 70 keV formuje się zagrzebana warstwa amorficzna. Płytki krzemowe z warstwami amorficznymi były następnie implantowane borem oraz poddane cyklowi termicznemu: 600°C(3h, N₂)/800°C(1h, N₂)/1100°C(2h, N₂ + O₂). W piezorezystorach złącze p-n powinno znajdować się odpowiednio głęboko i zostało uformowane na głębokości 2,8 mm.

Dyslokacje zwiększają prąd upływności, jeżeli znajdują się w obszarze aktywnym złącza. Dlatego jako kryterium jakości badanych piezorezystorów zastosowano rozkład gęstości dyslokacji w głąb krzemu. W celu wyznaczenia gęstości dyslokacji zastosowano selektywne trawienie chemiczne. Powierzchnie płytek były szlifowane i polerowane pod kątem 3° , a następnie trawione w rozcieńczonym roztworze Shimmela: $2\text{HF}:1(1\text{M CrO}_3):7\text{H}_2\text{O}$.

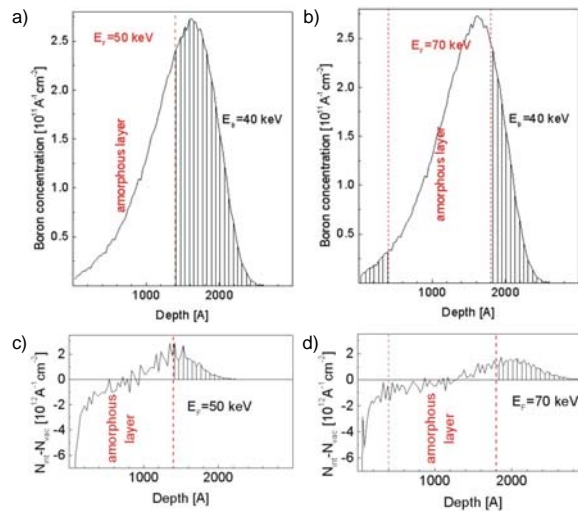
Zliczenie widocznych w skaningowym mikroskopie elektronowym jamek trawienia pozwala przypisać danej głębokości odpowiednią gęstość dyslokacji. Wyniki dla płytek z powierzchniową warstwą amorficzną (F^+ , 50 keV, $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) oraz zagrzebaną warstwą amorficzną (F^+ , 70 keV, $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) przedstawia rys. 11.



Rys. 11. Zależności gęstości dyslokacji wyznaczone dla próbek z powierzchniową (F^+ , 50 keV) oraz zagrzebaną (F^+ , 70 keV) warstwą amorficzną

W przypadku wygrzewania zagrzebanej warstwy amorficznej występują dwa fronty rekrytalizacji. Poza defektami EOR (End of Range) pojawia się druga warstwa defektów w obszarze zetknięcia się frontów rekrytalizacji poruszających się w przeciwnych kierunkach. Fakt ten skłania do stosowania w praktyce warunków amorfizującej implantacji prowadzących do powstania powierzchniowej warstwy amorficznej. Jednakże otrzymanie wystarczająco głębokiej warstwy powierzchniowej nie zawsze jest technicznie możliwe.

Warstwa amorficzna ogranicza anomalną dyfuzję boru (Transient Enhanced Diffusion – TED) i transport międzywęzłowych atomów krzemu w głąb płytki krzemowej, polegający na łączeniu się atomów boru i międzywęzłowych atomów krzemu, które razem łatwo dyfundują na znaczne odległości. Gdy atomy zajmą położenie węzłowe w sieci krystalicznej krzemu, wówczas uwalniają defekt punktowy. Zwiększenie energii implantowanych jonów fluoru z 50 keV do 70 keV przesuwa warstwę amorficzną w głąb materiału (rys. 12). Zastosowanie warstwy zagrzebanej powoduje, że mniejsza część boru znajdzie się poza obszarem warstwy: $N_B(70 \text{ keV})/N_B(50 \text{ keV}) = 0,47$. Wzrost dyslokacji w głąb materiału będzie więc wcześniej hamowany w przypadku zagrzebanej warstwy amorficznej.



Rys. 12. Wyniki obliczeń przeprowadzonych za pomocą programu TRIM-98: a), b) rozkłady implantowanych atomów boru (energia 40 keV, dawka $3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$); c), d) rozkłady nadmiarowych luk (–) i nadmiarowych atomów międzywęzłowych krzemu Si_{int} (+) wygenerowanych przez wstępną implantację fluoru o energii odpowiednio 50 keV dla (a) i (c) oraz 70 keV dla (b) i (d) (dawka w obu przypadkach $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$). Na rysunkach zaznaczono granice warstw amorficznych określone w badaniach TEM. Zakresowane obszary odpowiadają atomom boru (a) i (b) oraz nadmiarowym atomom międzywęzłowym krzemu Si_{int} (c) i (d) znajdującym się poza warstwą amorficzną.

Zastosowana metoda pozwala na oszacowanie jakości piezorezystorów już na etapie materiałowym, po procesie implantacji, bez dodatkowych procesów technologicznych i konieczności wytwarzania przyrządów półprzewodnikowych.

Wydaje się, że głównym czynnikiem zmniejszającym gęstość dyslokacji na dużych głębokościach jest ograniczenie liczby dyfundujących par atom boru-międzywęzłowy atom krzemu (B- Si_{int}) poprzez przesunięcie warstwy amorficznej w głąb materiału. Wykazano, że za pomocą jednej amorfizującej implantacji jest możliwa poprawa jakości wytwarzanych piezorezystorów w porównaniu z rozwiązaniami klasycznymi.

Publikacje 2005

[P1] ANTONOVA I. V., MISIUK A., BARCZ A., RATAJCZAK A.: Electrical and Structural Properties of Multilayer Structures Formed by Implantation of Nitrogen or Oxygen and Annealed under High Pressure. *J. Appl. Phys.* (zgł. do druku)

[P2] CIOSEK J., MISIUK A., RATAJCZAK J.: Influence of Temperature-Pressure Treatment on the Heavily Hydrogenated Silicon Surface. *Surface Sci.* (zgł. do druku).

[P3] CZERWIŃSKI A., PLUSKA M., RATAJCZAK J., KĄTCKI J.: In-situ EBIC Measurements of Local-Thickness in Semiconductor Devices. *J. of Microscopy* (w druku).

[P4] GÓRSKA M., WRZESIŃSKA H., SZERLING A., HEJDUK K., RATAJCZAK J., ŁYSKO J. M.: HBV Deep Mesa Etching in the InGaAs/InAlAs/AlAs Heterostructure on InP Substrate. *Mater. Sci.-Poland* 2005 nr 23 s. 221–226.

- [P5] JAROSZEWICZ B., DOMAŃSKI K., TOMASZEWSKI D., JANUS P., KUDLA A., LATECKI B., KOCIUBIŃSKI A., NIKODEM M., KAŹCKI J., WZOREK M., MARCZEWSKI J., GRABIEC P.: Application of Ion Implantation for Mono-Si Piezoresistors Manufacturing in Silicon MEMS Technology. *Vacuum* 2005 nr 78 s. 263–267.
- [P6] JUNG W., MISIUK A., RATAJCZAK J., BARCZ A.: Effect of Heat Treatment at Enhanced Pressure on Electrical and Structural Properties of Silicon Surface Layer Co-Implanted with Hydrogen and Helium Ions. *Opto-Electron. Rev.* 2005 nr 13 s. 31–34.
- [P7] LU J., CZERWINSKI A., KORDAS L., ZHAO W., ROZGONYI G.: Characterization of Threading Dislocations in Strained-Si/SiGe Heterostructures Using Preferential Two-Step Etching and MOS-EBIC. 2005 Int. Conf. on Characterization and Metrology for ULSI Technology, AIP Conf. Proc. No 788, Subseries: Material Science and Application, American Institute of Physics 2005 s. 633–637.
- [P8] ŁASZCZ A., KAŹCKI J., RATAJCZAK J., CIEŻ M., PLUSKA M.: Electron Microscopy Characterisation of ZnS:Cu:Cl Phosphorus. *Proc. Microscopy of Semiconducting Mater.* 2005, s. 495–498.
- [P9] ŁASZCZ A., KAŹCKI J., RATAJCZAK J., XIAOHUI TANG, DUBOIS E.: TEM Characterisation of Erbium Silicide Formation Process Using a Pt/Er Stack on a Thin Silicon-On-Insulator Substrate. *J. of Microscopy* (w druku).
- [P10] MISIUK A., RATAJCZAK A., KAŹCKI J., ANTONOVA I. V.: Impact of Hydrostatic Pressure During Annealing of Si:O on Creation of SIMOX-Like Structures. “Science and Technology of Semiconductor-On-Insulator Structures and Devices Operating in a Harsh Environment”, Kluwer Academic Publish, The Netherlands, D. Flandre et al. (eds.), 2005 s. 91–96.
- [P11] PLUSKA M., CZERWIŃSKI A., RATAJCZAK J., KAŹCKI J., RAK R.: Elimination of SEM-Image Periodic Distortions with Digital Signal Processing Methods. *J. of Microscopy* (w druku).
- [P12] PROCHWICZ W., CIEŻ M., KAŹCKI J., ŁASZCZ A., ŁUKASIK A. M., RATAJCZAK J., PORADA Z.: The Influence of Supply Voltage Parameters on Ageing Process of Thick-Film Electroluminescent Light Sources. *Proc. XXIX IMAPS Poland Chapter Conf., Koszalin-Darłówek*, 19–21.09.2005, s. 239–242.
- [P13] RZODKIEWICZ W., KUDLA A., RATAJCZAK J., PISKORSKI K., ULYASHIN A. G.: Badanie właściwości optycznych i mikrostrukturalnych wodorowego Cz-Si poddanego obróbce HT-HP. *Mat. konf. VIII Konf. Nauk. ”Technologia Elektronowa” ELTE 2004, Stare Jabłonki*, 19–22.04.2004. CD ROM 2005 s. 205–208.
- [P14] SZERLING A., KOSIEL K., JEDLIŃSKA-WÓJCIK A., PLUSKA M., BUGAJSKI M.: Investigation of Oval Defects in (In)Ga(Al)As/GaAs Heterostructures by Spatially-Resolved Photoluminescence and Micro-Cathodoluminescence. *Mater. Sci. in Semicond. Process.* (w druku).
- [P15] SZERLING A., KOSIEL K., JEDLIŃSKA-WÓJCIK A., PLUSKA M., BUGAJSKI M.: Properties and Origin of Oval Defects in Epitaxial Structures Grown by MBE. *Optica Appl.* 2005 vol. 35 nr 3 s. 537–548.
- [P16] WZOREK M., KAŹCKI J., PLUSKA M., RATAJCZAK J., JAROSZEWICZ B., DOMAŃSKI K., GRABIEC P.: Buried Amorphous-Layer Impact on Dislocation Densities in Silicon. *J. of Microscopy* (w druku).
- [P17] WZOREK M., KAŹCKI J., RATAJCZAK J., JAROSZEWICZ B., DOMAŃSKI K., GRABIEC P.: TEM Study of Silicon Implanted with Fluorine and Boron Applied to Piezoresistors Manufacturing. *Proc. XIV Int. Conf. on Microscopy of Semiconducting Materials, Oxford, Wielka Brytania*, 11–14.04.2005 s. 363–366.

Konferencje 2005

- [K1] CIOSEK J., MISIUK A., RATAJCZAK J.: Influence of Temperature-Pressure Treatment on the Heavily Hydrogenated Silicon Surface. *Int. Workshop on Surface Physics ECOSS-23 Satellite, Advanced and Bio-Materials. Polanica Zdrój*, 10–13.09.2005.

- [K2] CIOSEK J., MISIUK A., BAK-MISIUK J., SHALIMOV A., SURMA B., RATAJCZAK J., ZAVODINSKY V.: Heavily Hydrogenated Silicon Structure Modification by High Temperature-Pressure Treatment. BUTT 2005, Mińsk, Białoruś, 28–30.09.2005.
- [K3] CZERWIŃSKI A., PLUSKA M., RATAJCZAK J., KĄTCKI J.: In-situ EBIC Measurements of Local-Thickness in Semiconductor Devices. XII Int. Conf. on Electron Microscopy of Solids (EM'2005), Kazimierz Dolny, 5–9.06.2005.
- [K4] LU J., CZERWIŃSKI A., KORDAS L., ZHAO W., ROZGONYI G.: Characterization of Threading Dislocations in Strained-Si/SiGe Heterostructures Using Preferential Two-Step Etching and MOS-EBIC. 2005 Int. Conf. on Characterization and Metrology for ULSI Technology, Richardson, Texas, USA, 15–18.03.2005.
- [K5] ŁASZCZ A., KĄTCKI J., RATAJCZAK J., CIEŻ M., PLUSKA M.: Electron Microscopy Characterisation of ZnS:Cu:Cl Phosphorus. XIV Int. Conf. on Microscopy of Semiconducting Materials, 11–14.04.2005, Oxford, Wielka Brytania.
- [K6] ŁASZCZ A., KĄTCKI J., RATAJCZAK J., CZERWIŃSKI A., DUBOIS E., LARRIEU G., WALLART X.: TEM Characterisation of Accumulation Low Schottky Barrier MOSFET with PtSi Contacts; Autumn School on Materials Science and Electron Microscopy 2005 – Microscopy of Tomorrow's Industrial Materials, 3–8.10.2005, Berlin, Niemcy.
- [K7] ŁASZCZ A., KĄTCKI J., RATAJCZAK J., XIAOHUI TANG, DUBOIS E.: TEM Characterisation of Erbium Silicide Formation Process Using a Pt/Er Stack on a Thin Silicon-On-Insulator Substrate. XII Int. Conf. on Electron Microscopy of Solids (EM'2005), Kazimierz Dolny, 5–9.06.2005.
- [K8] PLUSKA M., CZERWIŃSKI A., RATAJCZAK J., KĄTCKI J., RAK R.: Elimination of SEM-Image Periodic Distortions with Digital Signal Processing Methods. XII Int. Conf. on Electron Microscopy of Solids (EM'2005), Kazimierz Dolny, 5–9.06.2005.
- [K9] PLUSKA M.: Usprawnianie pracy mikroskopu elektronowego z zastosowaniem metod cyfrowego przetwarzania sygnałów. Międzyuczelniana Konf. Metrologów MKM 2005, Zielona Góra, 5–7.09.2005.
- [K10] PLUSKA M., RATAJCZAK J., CZERWIŃSKI A., KĄTCKI J., RAK R.: Software Methods for Identification and Compensation of Electron Beam Vibration in SEM. Autumn School on Materials Science and Electron Microscopy 2005 – Microscopy of Tomorrow's Industrial Materials, Berlin, Niemcy, 3–8.10.2005.
- [K11] PROCHWICZ W., CIEŻ M., KĄTCKI J., ŁASZCZ A., ŁUKASIK A. M., RATAJCZAK J., PORADA Z.: The Influence of Supply Voltage Parameters on Ageing Process of Thick-Film Electroluminescent Light Sources. XXIX IMAPS Poland Chapter Conf., Koszalin-Darłówko, 19–21.09.2005.
- [K12] SKOCZYŁAS P. A., PISKORSKI M., PIOTROWSKA A. B., GOŁASZEWSKA K., PIOTROWSKI T. T., KĄTCKI J., RATAJCZAK J., JUNG W., PRZESŁAWSKI T., WAWRO A., WÓJCIK M., GACA J.: GaAlAsSb/GaInAsSb/GaSb Structures for Thermophotovoltaic Cells. Int. Congress on Optics and Optoelectronics, Warszawa 2005.
- [K13] SZERLING A., KOSIEL K., JEDLIŃSKA-WÓJCIK A., PLUSKA M., BUGAJSKI M.: Properties and Origin of Oval Defects in Epitaxial Structures Grown by MBE. X Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe", Szklarska Poręba, 17–21.05.2005.
- [K14] SZERLING A., KOSIEL K., JEDLIŃSKA-WÓJCIK A., PLUSKA M., BUGAJSKI M.: Investigation of Oval Defects in (In)(Ga)AlAs/GaAs Heterostructures by Spatially-Resolved Photoluminescence and Micro-Cathodoluminescence. 11th Int. Physics in Semiconductors (DRIP XI), Pekin, Chiny, 15–19.09.2005.

[K15] WZOREK M., KĄTCKI J., PŁUSKA M., RATAJCZAK J., JAROSZEWICZ B., DOMAŃSKI K., GRABIEC P.: Buried Amorphous-Layer Impact on Dislocation Densities in Silicon. XII Int. Conf. on Electron Microscopy of Solids (EM'2005), Kazimierz Dolny, 5–9.06.2005.

[K16] WZOREK M., KĄTCKI J., PŁUSKA M., RATAJCZAK J., JAROSZEWICZ B., DOMAŃSKI K., GRABIEC P.: TEM Study of Silicon Implanted with Fluorine and Boron Applied to Piezoresistors Manufacturing. XIV Int. Conf. on Microscopy of Semiconducting Materials, 11–14.04.2005 Oxford, Wielka Brytania.

[K17] WZOREK M., KĄTCKI J., PŁUSKA M., RATAJCZAK J., JAROSZEWICZ B., DOMAŃSKI K., GRABIEC P.: The Impact of a Buried Amorphous Layer on Dislocation Densities in Silicon. Autumn School on Materials Science and Electron Microscopy 2005, "Microscopy of Tomorrow's Industrial Materials, Berlin, Niemcy, 3–8.10.2005.

Patenty i zgłoszenia patentowe'2005

[PA1] MISIUK A., RATAJCZAK A., ANTONOVA I. V., POPOV V. P.: Sposób wytwarzania struktury półprzewodnikowej. Pat. RP nr P.335497.

[PA2] CZERWIŃSKI A., PŁUSKA M., RATAJCZAK J., KĄTCKI J.: Sposób pomiaru prądu wiązki elektronowej dla potrzeb ilościowej techniki prądu indukowanego wiązką elektronową (EBIC). Zgł. pat. nr P.378464 z dn. 16.12.2005.

[PA3] PŁUSKA M., CZERWIŃSKI A., RATAJCZAK J., KĄTCKI J.: Sposób eliminacji zakłóceń periodycznych w skaningowym mikroskopie elektronowym. Zgł. pat. nr P.378546 z dn. 28.12.2005.