



Kierownik: dr hab. inż. Andrzej CZERWIŃSKI, prof. nadzw. w ITE  
e-mail: aczerwin@ite.waw.pl, tel. (22) 548 77 64

Zespół: prof. dr hab. Janina Marciak-Kozłowska  
dr hab. inż. Tadeusz Piotrowski, e-mail: piotrows@ite.waw.pl  
dr inż. Jacek Ratajczak, e-mail: rataj@ite.waw.pl  
dr inż. Adam Łaszczyk, e-mail: laszcz@ite.waw.pl  
dr inż. Mariusz Pluska, e-mail: mpluska@ite.waw.pl  
mgr inż. Marek Wzorek, e-mail: mwzorek@ite.waw.pl

## 1. Prace prowadzone w 2012 r.

W 2012 r. w Zakładzie Badań Materiałów i Struktur Półprzewodnikowych realizowano następujące projekty naukowe:

- „Charakteryzacja oraz rozwój metod badania materiałów, struktur i przyrządów wytworzonych w procesach mikro- i nanotechnologii elektronicznych”. Etap III (projekt statutowy nr 1.08.059);
- „Innowacyjne technologie wielofunkcyjnych materiałów i struktur dla nanoelektroniki, fotoniki, spintroniki i technik sensorowych” (projekt badawczy InTechFun, projekt kluczowy w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, zadania „Charakteryzacja materiałów metodami mikroskopii elektronowej” i „Charakteryzacja struktur metodami mikroskopii elektronowej” (UDA-POIG.01.03.01 -00-159/08-01);
- „Badania wpływu reakcji metal-półprzewodnik na kontakty do węgla krzemu w celu opracowania metody uzyskiwania kontaktów omowych o niskiej rezystywności i jednorodnej mikrostrukturze” (projekt Iuventus Plus, MNiSW, 0625/IP2/2011/71).
- „Eliminacja zakłóceń skanowania w aparaturze technologiczno-badawczej wykorzystującej wiązkę elektronową lub jonową” (projekt Lider, LIDER/26/196/L-3/11/NCBR/2012).

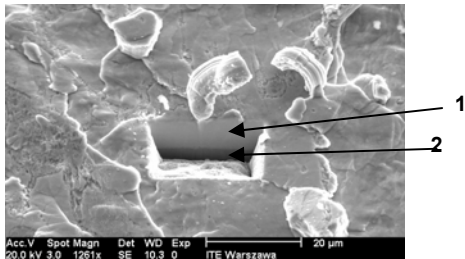
## 2. Skaningowa mikroskopia jonowa w FIB wykorzystana do obrazowania struktury materiałów

Podczas skanowania preparatu wiązką jonową w FIB (Focused Ion Beam) występują podobne lub analogiczne zjawiska fizyczne jak przy pobudzaniu preparatu wiązką elektronową: emisja elektronów wtórnych, wsteczne rozproszenie jonów, emisja promieniowania widzialnego i rentgenowskiego. Zjawiska te wykorzystuje się do obrazowania preparatu.

Przeprowadzone badania pozwoliły na określenie sposobu przygotowania preparatu oraz warunków pomiarowych umożliwiających obrazowanie w FIB nie tylko ukształtowania powierzchni preparatu (co jest analogiczne dla badań w SEM), ale również obrazowanie różnorodnej struktury krystalicznej materiału. W szczególności można obserwować różnie zorientowane poszczególne ziarna w obrębie jednego materiału. W typowym trybie pracy FIB, stosowanym podczas obrazowania przy pracach technologicznych w tym urządzeniu, nie widać zalet takiego obrazowania materiału pomimo literaturowych doniesień o tych możliwościach.

Prezentowaną metodę obrazowania materiałów i struktur wykorzystano do badania bezołowiowych cynowych stopów lutowniczych, którymi za pomocą lutowania ręcznego pokryto warstwę miedzi znajdującą się na laminacie szkano-epoksydowym. Eksperymenty prowadzone były na urządzeniu Helios NanoLab 600 DualBeam do trawienia zogniskowaną wiązką jonów oraz na skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) Philips XL 30.

W trakcie badań rejestrowano obrazy mikroskopowe w następujących trybach: elektronów wtórnych wzbudzonych wiązką elektronową (SE), elektronów wstecznie rozproszonych (BSE), elektronów wtórnych wzbudzonych wiązką jonową (SE w FIB), czyli skaningowej mikroskopii jonowej. Dwa pierwsze tryby testowane były zarówno na urządzeniu Helios NanoLab (dzięki kolumnie elektronowej SEM), jak i na mikroskopie Philips XL30, a tryb oparty na wiązce jonowej ( $\text{Ga}^+$ ) na urządzeniu FIB.

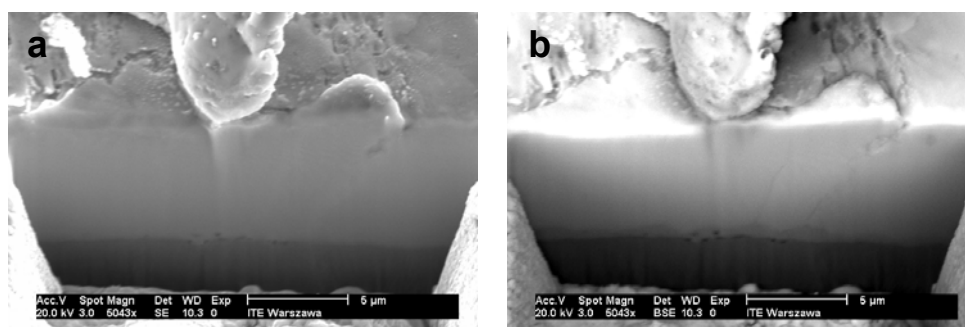


Rys 1. Prostokątny otwór wytrawiony za pomocą urządzenia FIB w celu obserwacji przekroju struktury. W trybie elektronów wtórnych można wyróżnić na przekroju warstwę lutu (1) oraz miedzi (2).

i dolną (ciemniejszą). Powiększone obrazy powierzchni przekroju powstałej w wyniku trawienia zarejestrowane w trybach SE oraz BSE przedstawiono na rys. 2a (SE) i 2b (BSE). Widać wyraźnie granicę między obszarem stopu lutowniczego oraz warstwą miedzi. Ponadto na obrazie zarejestrowanym w trybie BSE niewyraźnie widać warstwę pośrednią. Dodatkowe badania za pomocą spektroskopii rentgenowskiej pokazały, że jest to warstwa międzymetaliczna  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ .

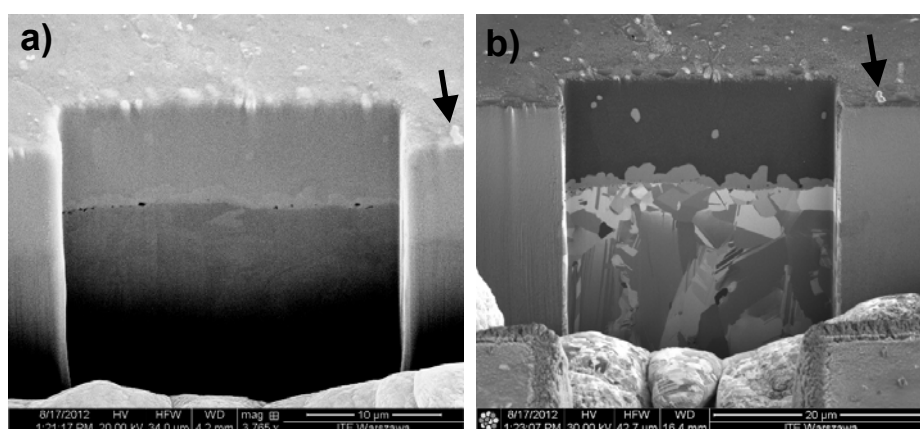
Porównanie obrazów uzyskanych na urządzeniu FIB w trybach elektronów wstecznie rozproszonych oraz elektronów wtórnych generowanych wiązką jonową (rys. 3) wykazuje, że znacznie lepszy kontrast materiałowy daje się uzyskać w tym drugim przypadku.

W celu zbadania struktury preparatu zawierającego różne materiały oraz ziarna tego samego materiału (bezołowiowego stopu lutowniczego na podłożu miedzianym) za pomocą wiązki jonowej wytrawiano prostokątne otwory umożliwiające obserwację przekrojów preparatów. Przykładowe zdjęcie takiego otworu zarejestrowane w trybie SE na mikroskopie Philips XL30 przedstawiono na rys. 1. W wyniku trawienia uwidocznił się przekrój struktury, na którym widać dwie warstwy górną (jaśniejszą)



Rys. 2. Powiększone obrazy struktury zarejestrowane w SEM (Philips XL30) w trybach: a) elektronów wtórnych, b) elektronów wstecznie rozproszonych. Obrazy dostarczają mało informacji o strukturze przekroju materiałów.

Przy wzbudzeniu wiązką jonów oprócz kontrastu wynikającego z różnych gęstości materiałów widać kontrast wynikający z różnego zorientowania poszczególnych ziaren krystalicznych w obrębie jednego materiału względem padającej wiązki (rys. 3b).

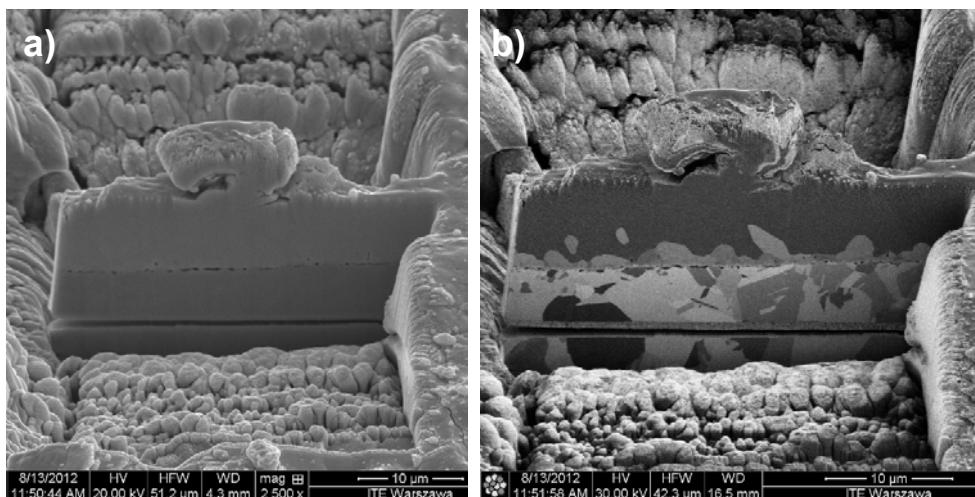


Rys. 3. Porównanie obrazów tej samej struktury uzyskanych na urządzeniu FIB: a) w trybie BSE przy wzbudzeniu wiązką elektronową, b) w trybie SE dla wzbudzenia wiązką jonową. Strzałką zaznaczono ten sam charakterystyczny punkt na powierzchni struktury.

W wyniku zjawiska tzw. kanałowania jonów, czyli łatwiejszego przemieszczania się jonów wzdłuż szczególnych kierunków krystalograficznych w materiale krystalicznym, głębokość wnikania jonów zależy od orientacji krystalograficznej ziaren, nawet w przypadku warstwy tego samego pierwiastka lub związku chemicznego. Jony, które lepiej kanałują w materiale, tworzą w miejscu padania mniej elektronów wtórnych i dlatego mniejszy sygnał dociera do detektora tych elektronów.

Również obraz tworzony przez elektrony wtórne docierające do detektora wygląda ciemniej dla stopu cyny niż dla wytrąceń międzymetalicznych. Kanałowanie jonów w wytrąceniach międzymetalicznych jest bowiem mniejsze niż w stopie cyny.

Na rys. 4 porównano dwa obrazy zarejestrowane w trybie SE różniące się rodzajem wiązki pobudzającej – elektronowej (rys. 4a) i jonowej (rys. 4b).



Rys. 4. Obrazy zarejestrowane przez detektor wtórnych elektronów podczas skanowania tej samej struktury wiązki: a) elektronową, b) jonową

Dla uwidocznienia ziaren materiału oraz różnych rodzajów materiału przez wiązkę jonów krytyczne jest odczyszczenie powierzchni przed badaniem. Gdy powierzchnia próbki nie jest odczyszczona, wówczas tworzenie elektronów wtórnych docierających do detektora nie zależy od zjawiska kanałowania (w materiale krystalicznym), lecz od amorficznej warstwy na powierzchni materiału. Stwierdzono, że aby uzyskać wyraźny kontrast tego typu, należy podczas trawienia ujawniającego przekrój struktury zastosować odpowiedni prąd wiązki. Do trawienia wzorów w strukturach o powierzchni rzędu  $100 \mu\text{m}^2$  stosuje się typowo prąd wiązki rzędu 2,8 nA. Przy tym prądzie uzyskuje się optymalny czas trawienia nieprzekraczający kilku minut.

Trawienie takie powoduje jednak amorfizację powierzchni trawionej struktury i zanieczyszczenie dookoła wytrawionych obszarów. Dlatego na końcowym etapie przygotowania struktury do badania należy – stosując znacznie niższy prąd wiązki (np. 9,7 pA) – oczyścić powierzchnię przekroju skanując ją tak, aby kąt między skanowaną powierzchnią a padającą wiązką był rzędu kilku stopni (wiązka prawie równoległa do badanej powierzchni).

W celu uniknięcia trawienia powierzchni preparatu podczas obrazowania z użyciem wiązki jonów zaleca się typowo prąd wiązki nieprzekraczający 28 pA. Taki prąd wprawdzie nie trawi powierzchni, ale powoduje jej amorfizację, co uniemożliwia obserwacje. Z tego powodu prąd wiązki jonów przy obrazowaniu musi być znacznie niższy (w zakresie ok. 1,5 pA) i tym mniejszy, im większa jest energia wiązki. Oprócz tego powierzchnia musi być uprzednio odczyszczona. Należy także zwracać uwagę na to, aby wcześniej nie została ona nadmiernie zanieczyszczona podczas trawienia.

Wyniki badań pokazały, że obrazowanie preparatów polegające na rejestracji elektronów wtórnych wzbudzanych wiązką jonową daje informacje nie tylko o topografii preparatu. Zawiera też kontrast materiałowy umożliwiając rozróżnianie obszarów zbudowanych z różnych pierwiastków chemicznych, a nawet poszczególnych ziaren krystalicznych (w obrębie jednego pierwiastka lub związku chemicznego) o różnym ich zorientowaniu względem padającej wiązki.

### **3. Przetwarzanie map XEDS STEM w celu eliminacji wpływu zmiennej grubości próbki oraz dokładnego uwidocznienia obszarów o różnych składach chemicznych**

Celem prac było opracowanie programu komputerowego usprawniającego analizę wyników uzyskanych metodą mapowania XEDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy). Pomiar metodą spektroskopii dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego jest stosowany do analizy składu chemicznego w badanym materiale. Mapowanie może być wykonywane w szczególności w trybie STEM (Scanning Transmission Electron Microscopy) transmisyjnego mikroskopu elektronowego. Intensywność mapy XEDS w danym punkcie zależy od ilości atomów danego pierwiastka chemicznego znajdujących się na drodze wiązki elektronów przez całą grubość próbki. Oznacza to, że sygnał XEDS zależy nie tylko od składu chemicznego w danym punkcie, lecz także od grubości próbki.

Aby zredukować efekt grubości preparatu, można wyznaczyć obraz będący ilorzem dwóch map XEDS uzyskanych z tego samego obszaru dla różnych pierwiastków obecnych w materiale. Przy przybliżeniu, że sygnał XEDS dla obydwu pierwiastków jest proporcjonalny do grubości materiału, ilorzem dwóch map powinno się wyeliminować wpływ zmiennej grubości próbki na intensywność mapy XEDS. Chociaż zależność sygnału od grubości nieco odbiega od liniowej, to uzyskany ilorzem w wystarczającym stopniu ogranicza omawiany efekt.

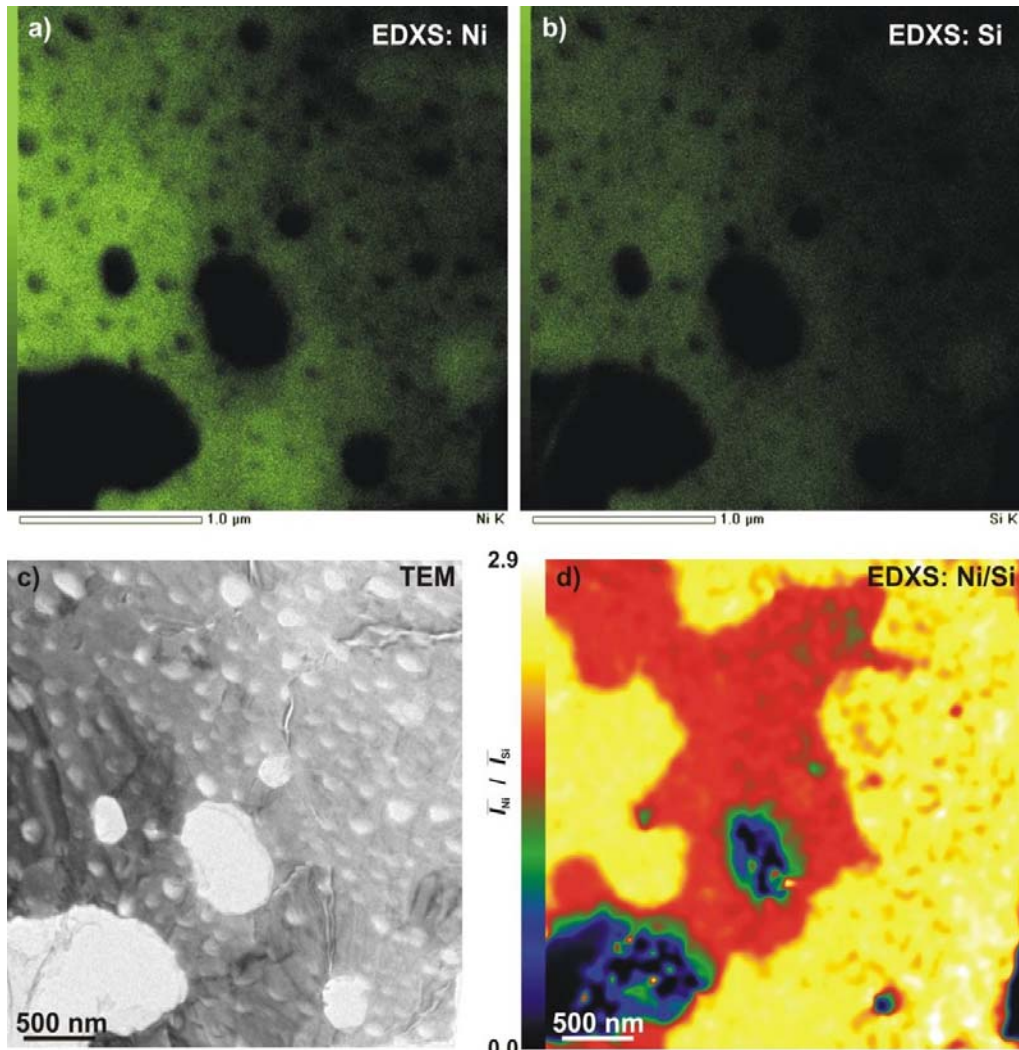
Ograniczenie efektu zmiennej grubości próbki ułatwia interpretację map XEDS. Ponadto przedstawienie ilorazu sygnałów pochodzących od dwóch pierwiastków pozwala na dokładniejsze rozróżnianie obszarów o różnych składach chemicznych.

W celu zautomatyzowania procesu wyznaczania ilorazu map opracowano skrypt pracujący w środowisku programu DigitalMicrograph (DM), popularnego wśród użytkowników transmisyjnej mikroskopii elektronowej.

Proces uzyskiwania map XEDS jest czasochłonny ze względu na słabą intensywność promieniowania rentgenowskiego pochodzącego od próbek badanych w transmisyjnym mikroskopie elektronowym, które mają postać cienkich folii (~50 ÷ 100 nm). Uzyskiwane obrazy są zaszumione i sąsiednie piksele mogą znacznie różnić się wartością, a nawet mieć wartość równą zero. Bezpośrednie wyznaczenie ilorazu map mogłyby prowadzić do wzmocnienia błędów, w tym na

skutek operacji dzielenia przez zero. Dlatego wejściowe mapy muszą zostać poddane wstępnemu filtrowaniu uśredniającemu. Skrypt wykonuje rozmycie gaussowskie analizowanych map według zadanego parametru sigma. Następnie wyznaczany jest obraz będący ilorazem dwóch map, a więc określający stosunek sygnałów XEDS pochodzących od dwóch pierwiastków chemicznych.

Przykład zastosowania skryptu przedstawiono na rys. 5. Na rys. 5a,b są pokazane przykładowe mapy XEDS odpowiednio dla niklu oraz dla krzemu uzyskane z tego samego obszaru próbki planarnej. Na rys. 5c przedstawiono obraz TEM obszaru, a na rys. 5d iloraz map uzyskany za pomocą opracowanego skryptu. Dzięki zastosowaniu skryptu obszary o różnych składach chemicznych są wyraźnie widoczne.

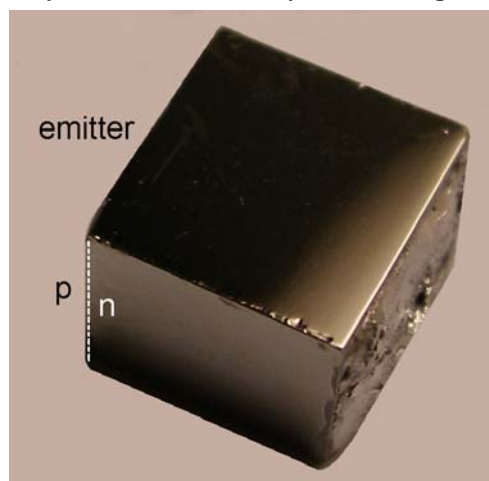


Rys. 5. Przykład zastosowania skryptu

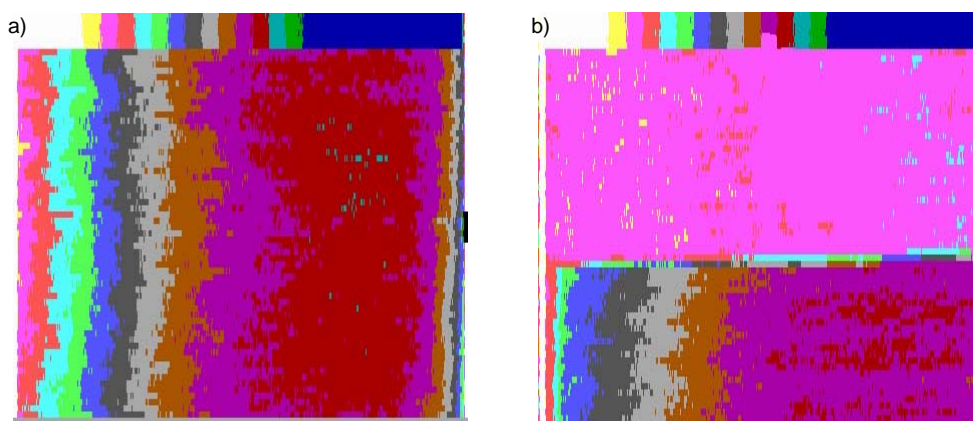
#### 4. Wyznaczanie parametrów rekombinacyjnych w strukturze diodowej z przestrzenno-czasowego rozkładu promieniowania termicznego

Przedstawiono możliwości zastosowania pomiaru rozkładu przestrzenno-czasowego promieniowania termicznego struktury złączonej p-n znajdującej się w jednorodnym polu temperaturowym wyższym od otoczenia, modulowanej obecnością nośników nadmiarowych wstrzykiwanych złączem, do wyznaczania prędkości rekombinacji powierzchniowej na kontakcie wstrzykującym emitera diody i do pomiaru długości drogi dyfuzji w bazie. Wykazano zgodność wyników doświadczalnych z wynikiem rozwiązania równań transportu.

Do pomiarów użyto germanowej struktury złączonej stosowanej jako modulator promieniowania podczerwonego, o wymiarach ok.  $5 \times 5 \times 6$  mm, ze złączem p-n wytworzonym na jednej z płaszczyzn i kontaktem omowym na przeciwległym końcu struktury. Dioda pracowała przy polaryzacji impulsowej w kierunku przewodzenia, a jej temperatura w całej objętości utrzymywana była poprzez nagrzewanie strumieniem nagrzanego powietrza w wybranej stałej temperaturze  $75^\circ\text{C}$  (rys. 6). Rejestrację termograficznego ob-



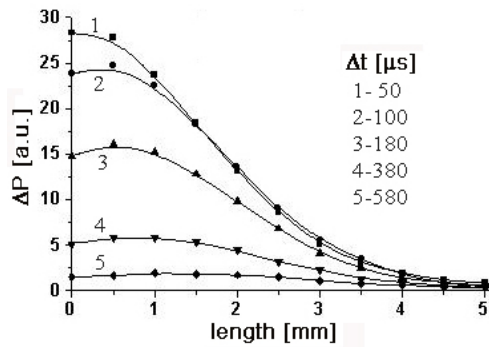
Rys. 6. Prostopadłościenna struktura diodowa modulatora promieniowania podczerwonego; boczna powierzchnia z prawej to kontakt omowy struktury odlutowanej od radiatora nagrzewającego. Pomiar promieniowania dokonywany jest od strony powierzchni górnej.



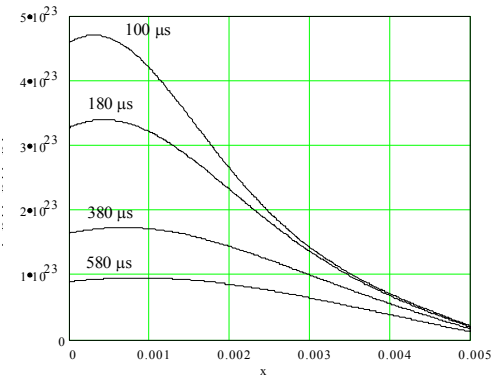
Rys. 7. Termowizyjny obraz bazy struktury przy przepływie prądu elektrycznego: a) 1 A, b) 0,5 A. Temperatura struktury  $75^\circ\text{C}$ . Rysunek (b) w górnej części przedstawia rozkład temperatury na zaczerpnionej części bazy. Złącze p-n zlokalizowane jest z lewej strony obrazu. Wyniki z kamery termowizyjnej AGA680-ITE.

szaru bazy wykonywano w kolejnych odstępach czasu od momentu wyłączenia prądu wstrzykującego nośniki ładunku

Na rys. 7 przedstawiono obserwowane statyczne obrazy termowizyjne obszaru bazy przy przepływie prądu elektrycznego 0,5 A i 1 A, a na rys. 8 wyniki pomiaru



Rys. 8. Rozkład strumienia promieniowania wzdłuż bazy diody zmierzony w kolejnych odstępach czasu od chwili wyłączenia polaryzacji. Temperatura struktury 75°C.



Rys. 9. Teoretyczne rozkłady koncentracji nośników dla kolejnych odstępów czasowych od chwili wyłączenia polaryzacji. Parametry dopasowania dla przebiegu doświadczalnego po czasie 100 μs:  $L_p = 950 \mu\text{m}$ ,  $s_1 = 80 \text{ cm/s}$ ,  $s_2 = 300 \text{ cm/s}$

natężenia promieniowania termicznego  $\Delta P$  związanego z obecnością nośników i ich rozkładem w czasie po kolejnych odstępach czasowych 50 μs, 100 μs, 180 μs, 380 μs i 580 μs od chwili wyłączenia prądu, uzyskane z oscyloskopowych pomiarów zmian natężenia promieniowania dla poszczególnych odległości od kontaktu wstrzykującego.

Uwzględniając składowe natężenia promieniowania wynikające z emisyjności, transmisji i odbicia oraz przyjmując, że współczynnik absorpcji optycznej  $\alpha$  na nośnikach swobodnych można zapisać jako iloczyn koncentracji nośników przez przekrój czynny na absorpcję  $\sigma$  ( $\alpha = p(x)\sigma$ ), uzyskamy dla danego nośnika przebieg zmian natężenia strumienia promieniowania wzdłuż bazy struktury.

Porównanie doświadczalnego zaniku natężenia promieniowania w czasie i przestrzeni po wyłączeniu zasilania (generacja = 0) z przebiegiem teoretycznym uzyskanym z rozwiązania równania ciągłości:

$$\frac{\partial \Delta p(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \Delta p(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\Delta p(x,t)}{\tau} \quad (1)$$

przy warunkach brzegowych postaci:

$$D \frac{\Delta p}{dx} = s_1 \Delta p (x = 0), \quad (2)$$

$$D \frac{\Delta p}{dx} = -s_2 \Delta p (x = w) \quad (3)$$

pozwała wyznaczyć czas życia nośników w bazie  $\tau$  oraz prędkości rekombinacji przy kontakcie wstrzykującym  $s_1$  i omowym  $s_2$ .  $D$  oznacza współczynnik dyfuzji dziur,  $w$  – długość bazy. Wyniki dopasowania przedstawiono na rys. 9. Przyjęto przekrój czynny na absorpcję dla dziur  $1 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$ .



## 5. Zjawiska transportu ciepła i ładunku w strukturach molekularnych i biologicznych

Zjawiska generacji i propagacji fal termicznych w strukturach molekularnych, w szczególności w nanorurkach węglowych, stanowią przykład procesów nanotermicznych (nano-heat phenomena). W ostatnich latach procesy te są przedmiotem intensywnych badań teoretycznych i doświadczalnych.

W 2010 r. grupa badawcza profesora M. Strano z MIT (*Nature Mater.* 9, 423, 2010) przedstawiła wyniki badań dotyczące generacji fal termicznych w nanorurkach węglowych. W rezultacie ogrzewania nanorurek węglowych za pomocą impulsu laserowego generowano falę termiczną, która poruszała się wzdłuż rurki. Generacja fal termicznych w nanorurkach stwarza nowe możliwości ich wykorzystania w nanoelektronice. W szczególności nanorurki oświetlone laserem mogą w przyszłości być wykorzystane jako nanoźródło prądu do zasilania nanoelementów.

Nasze prace dotyczące procesów termicznych wywołanych przez ultrakrótkie impulsy laserowe w nanostrukturach znalazły uznanie międzynarodowe. Wydawnictwo Old City Publishing z USA zaprosiło autorów do współredagowania specjalnego wydania *Lasers in Engineering* zawierającego prace prezentujące najnowsze osiągnięcia w tej dziedzinie (*Lasers in Engineering* 24, nr 1–2, 2012, Special Issue: *Attodynamics and Analysis with Ultra-short Laser Pulses*, Guest Editors: Janina Marciak-Kozłowska, Mirosław Kozłowski and Jonathan Lawrence).

W 2012 r. w ramach zadania statutowego analizowano generację i propagację fal termicznych w nanorurkach. Rozważano jednowymiarowy model nanorurki węglowej oświetlonej krótkotrwałym impulsem laserowym, porównywalnym z czasem relaksacji nośników. Wyznaczono pole temperatury  $T(x)$  dla przypadku transportu stacjonarnego. Do wyznaczenia temperatury w nanorurce można wtedy posłużyć się modelem Bellmana-Kalaby-Winga (model BKW), w którym korzysta się z uproszczonego równania typu równania Boltzmanna. W miejsce nieliniowego równania Boltzmanna stosuje się zlinearyzowany model, w którym zamiast funkcji rozkładu prędkości nośników rozważane są dwa strumienie nośników o stałych prędkościach różniących się tylko kierunkiem. Określamy je jako strumienie z prędkościami  $v_+$ ,  $v_-$  oraz temperaturami, odpowiednio  $T_+(x)$  oraz  $T_-(x)$ .

Zderzenia między cząstkami (obu strumieniami) opisujemy za pomocą przekroju czynnego  $\sigma$  (lub średniej drogi swobodnej  $\lambda = 1/\sigma$ ) oraz współczynnika  $k$ , który określa stopień elastyczności zderzeń. W modelu BKW zakłada się, że w każdym zderzeniu nośników generowanych jest  $2k$  nośników. Gdy  $k = 0,5$ , wtedy zderzenie definiujemy jako zderzenie elastyczne, gdy  $k \neq 0,5$ , zderzenie określa się jako zderzenie nieelastyczne. Zaletą modelu BKW jest możliwość opisu transportu zarówno dyfuzyjnego, jak falowego tym samym układem równań w zależności od przyjętej wartości współczynnika  $k$ .

Korzystając z modelu BKW wyprowadzono następujący układ równań dla temperatur  $T_+(x)$  oraz  $T_-(x)$ :

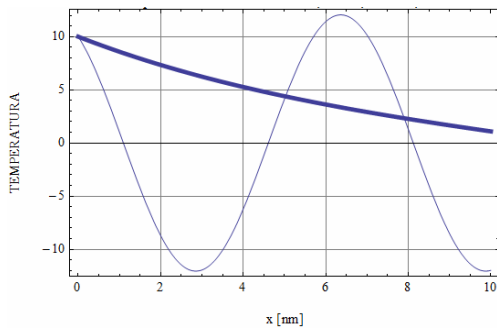
$$\begin{aligned} \frac{dT_+}{dx} &= -\sigma \left( (1-k)T_+ + kT_- \right), \\ -\frac{dT_-}{dx} &= \sigma \left( (k-1)T_- + kT_+ \right). \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie: funkcje  $T_{+,-}(x)$  – temperatura elektronów poruszających się odpowiednio w prawo oraz w lewo,  $\sigma$  – przekrój czynny na oddziaływanie elektronów (prawdopodobieństwo zderzenia),  $k$  – prawdopodobieństwo generacji elektronów  $0 < k < 1$ . W wyniku jednego zderzenia powstaje  $2k$  nośników, z których  $k$  porusza się w prawo, a drugie  $k$  nośników porusza się w lewo. Jeżeli  $k = 0,5$ , to nie ma absorpcji ani emisji dodatkowych nośników (rozpraszanie elastyczne, odpowiadające transportowi dyfuzyjnemu).

Przedstawiono rozwiązanie powyższego układu równań dla nanorurki węglowej długości 10 nm, przy następujących warunkach brzegowych (w przypadku stacjonarnym):

$$T_+(0) = T_0, \quad T_-(a) = 0. \quad (5)$$

Na rys. 10 przedstawiono wyniki obliczeń dla nanorurki długości 10 nm, temperatury początkowej  $T_0 = 10$  K oraz dwóch wartości współczynnika  $k$ , odpowiednio 0,49 i 0,9.



Rys. 10. Temperatura bezwzględna  $T$  [K] wzdłuż nanorurki długości  $a = 10$  nm, przy temperaturze na początku nanorurki równej  $T_0 = 10$  K. Porównanie rozkładów temperatury dla transportu dyfuzyjnego (przy  $k = 0,49$  na wykresie rozkład temperatury oznaczony grubą linią) oraz dla transportu falowego (przy  $k = 0,9$  na wykresie rozkład temperatury oznaczony cienką linią)

nanorurkach analizowano również uogólnienie hiperbolicznego równania transportu ciepła dla opisu procesów termicznych generowanych przez bardzo krótkie impulsy laserowe: attosekundowe ( $10^{-18}$  s), zeptosekundowe ( $10^{-21}$  s) oraz yoctosekundowe ( $10^{-24}$  s).

W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, że :

1. W nanorurkach ogrzewanych za pomocą krótkotrwałych impulsów laserowych (gdy czas trwania impulsu jest porównywalny z czasem relaksacji nośników) ciepło rozchodzi się w postaci fali termicznej

2. W rozważanym jednowymiarowym modelu nanorurki węglowej proces generacji fali termicznej zależy od dwóch czynników: prawdopodobieństwa zderzenia elektron-elektron oraz współczynnika generacji elektronów  $k$ . Fale termiczne są generowane, gdy  $k > 0,5$ .

W 2012 r. oprócz zagadnień związanych z generacją fal termicznych w nano-

W niedalekiej przyszłości we Francji zostanie zakończona budowa lasera emitującego ultrakrótkie impulsy z zakresu od  $10^{-18}$  s do  $10^{-24}$  s (Extreme Light Infrastructure ELI). W naszych pracach wykazano, że dominującym procesem termicznym generowanym przez laser ELI będzie fala termiczna.

### Publikacje'2012

- [P1] BARAŃSKA A., SZERLING A., KARBOWNIK P., HEJDUK K., BUGAJSKI M., ŁASZCZ A., GOŁASZEWSKA-MALEC K., FILIPOWSKI W.: Ohmic Contacts for Room-Temperature AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Lasers (QCL). *Opt. Appl.* (złoż. do red.).
- [P2] BARAŃSKA A., SZERLING A., KARBOWNIK P., BUGAJSKI M., HEJDUK K., ŁASZCZ A., GOŁASZEWSKA-MALEC K.: Kontakty omowe dla GaAs typu  $n^+$  w zastosowaniu dla AlGaAs/GaAs QCL. Mat. konf. XII Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe". Szklarska Poręba, 9–12.05.2012 (złoż. do red.).
- [P3] BĄK-MISIUK J., DYNOWSKA E., ROMANOWSKI P., MISIUK A., SADOWSKI J., CALIEBE W.: Pressure Variation of the Strain State of MnAs Nanoclusters Embedded in GaAs. *Acta Phys. Pol. A* 2012 vol. 121 nr 4 s. 903–905.
- [P4] BĄK-MISIUK J., ROMANOWSKI P., MISIUK A., SADOWSKI J., JAKIELA R., BARCZ A.: Effect of Stress on Structural Transformations in GaMnAs. *J. of Nanosci. a. Nanotechnol.* 2012 vol. 12 s. 8270–8273.
- [P5] BOROWICZ P., LATEK M., RZODKIEWICZ W., ŁASZCZ A., CZERWIŃSKI A., RATAJCZAK J.: Deep-Ultraviolet Raman Investigation of Silicon Oxide: Thin Film on Silicon Substrate Versus Bulk Material. *Advanc. in Natural Sci.: Nanosci. a. Nanotechnol.* 2012 vol. 3 s. 045003.
- [P6] BORYSIEWICZ M., KAMIŃSKA E., MYŚLIWIEC M., WZOREK M., KUCHUK A., BARCZ A., DYNOWSKA E., DI FORTE-POISSON M.-A., GIESEN C., PIOTROWSKA A.: Fundamentals and Practice of Metal Contacts to Wide Band Gap Semiconductor Devices. *Crystal Res. a. Technol.* 2012 vol. 47 nr 3 s. 261–272.
- [P7] CZERWIŃSKI A., SKWAREK A., PLUSKA M., RATAJCZAK J., WITEK K.: Tin Pest and Tin Oxidation on Tin-Rich Lead Free Alloys Investigated by Electron Microscopy Methods. *Solid St. Phenom.* 2012 vol. 186 s. 275–278.
- [P8] CZERWIŃSKI A., SKWAREK A., PLUSKA M., RATAJCZAK J., WITEK K.: Whisker Growth in Tin Alloys on Glass-Epoxy Laminate Studied by Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy. *Archiv. of Metall. a. Mater.* (złoż. do red.).
- [P9] EKIELSKI M., SIDOR Z., JUCHNIEWICZ M., PLUSKA M., WZOREK M., PIOTROWSKA A., KUCHARSKI R., KOLKOVSKY V., ŻYTKIEWICZ Z. R., GRUSZKA M.: Nanostemplowanie w zastosowaniu do wytwarzania struktur fonicznych w GaN. *Elektronika* 2012 vol. LIII nr 9 s. 16–19.
- [P10] EKIELSKI M., SIDOR Z., JUCHNIEWICZ M., PLUSKA M., WZOREK M., PIOTROWSKA A., KUCHARSKI R., KOLKOVSKY V., ŻYTKIEWICZ Z. R., GRUSZKA M.: Nanostemplowanie w zastosowaniu do wytwarzania struktur fonicznych w GaN. Mat. konf. XI Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 11–14.06.2012, s. 625–630.
- [P11] GUZIEWICZ M., KISIEL R., SZCZEPAŃSKI Z., WZOREK M.: Silver Metallization for SiC Die Assembly and Wire Connections. Proc. of the 11th Workshop on Expert Evaluation & Control of Compound Semiconductor Materials & Technologies. Porquerolles, Francja, 28.05–1.06.2012, s. 1–2.

- [P12] GUZIEWICZ M., SŁYSZ W., BORYSIEWICZ M., KRUSZKA R., SIDOR Z., JUCHNIEWICZ M., GOŁASZEWSKA-MALEC K., DOMAGAŁA J., RZODKIEWICZ W., RATAJCZAK J., BAR J., WĘGRZECKI M., SOBOLEWSKI R.: Technology of Ultrathin NbN and NbTiN Films for Superconducting Photodetectors. *Acta Phys. Pol. A* 2012 vol. 120 nr 6-A s. 76–79.
- [P13] GUZIEWICZ M., WZOREK M., KISIEL R.: Multilayer Metallization for SiC Die Assembly and Wire Bonding. Proc. of the 36th Int. Microelectronics and Packaging IMAPS-CPMT Poland Conf. Kołobrzeg, 26–29.09.2012 (złoż. do red.).
- [P14] JASIK A., SANKOWSKA I., REGIŃSKI K., MACHOWSKA-PODSIADŁO E., WAWRO A., WZOREK M., KRUSZKA R., JAKIEŁA R., KUBACKA-TRACZYK J., MOTYKA M., KANIEWSKI J.: MBE Growth of Type-II InAs/GaSb Superlattices for MWIR Detection. Chapter 3. [W] *Horizons in World Physics*. vol. 276. Nova Sci. Publ., New York, 2011, s. 101–144 oraz
- [P15] JASIK A., SANKOWSKA I., REGIŃSKI K., MACHOWSKA-PODSIADŁO E., WAWRO A., WZOREK M., KRUSZKA R., JAKIEŁA R., KUBACKA-TRACZYK J., MOTYKA M., KANIEWSKI J.: MBE Growth of Type-II InAs/GaSb Superlattices for MWIR Detection. Chapter 9 [W] *Crystal Growth: Theory, Mechanisms and Morphology*, Nova Sci. Publ. Inc., New York, 2011, s. 293–329.
- [P16] KOZŁOWSKI M., MARCIAK-KOZŁOWSKA J.: On the Temperature and Energy of the Brain Waves. Is there Any Connection with Early Universe? *Neuroquantology* 2012 vol. 10 nr 3 s. 443–452.
- [P17] KOZŁOWSKI M., MARCIAK-KOZŁOWSKA J.: Brain Photons as the Quanta of the Quantum String. *Neuroquantology* 2012 vol. 10 nr 3 s. 453–461.
- [P18] KUCHUK A., KLADKO V. P., GOŁASZEWSKA-MALEC K., GUZIEWICZ M., WZOREK M., PIOTROWSKA A.: The Formation Mechanism of Ni-Based Ohmic Contacts to 4H-n-SiC. *Mater. Sci. Forum* 2012 vol. 717-720 s. 833–836.
- [P19] ŁASZCZ A., CZERWIŃSKI A., RATAJCZAK J., TAUBE A., GIERALTOWSKA S., PIOTROWSKA A., KĄTCKI J.: Study of Oxides Formed in the HfO<sub>2</sub>/Si Structure for High-k Dielectric Applications. *Solid St. Phenom.* 2012 vol. 186 s. 78–81.
- [P20] MARCIAK-KOZŁOWSKA J., KOZŁOWSKI M.: Thermal Processes Generated in an In Vitro Cancer Tumour by Laser Pulses. *Lasers in Eng.* 2012 vol. 23 nr 1–2 s. 51–58
- [P21] MARCIAK-KOZŁOWSKA J., KOZŁOWSKI M.: Heat Waves Versus Diffusion in Atto-to-Yocto Second Laser Pulses Interaction with Matter. *Lasers in Eng.* (złoż. do red.).
- [P22] MARCIAK-KOZŁOWSKA J., KOZŁOWSKI M.: Schrödinger-Böhm Equation for Ultra Short Energy Pulse. *Lasers in Eng.* (złoż. do red.).
- [P23] MARCIAK-KOZŁOWSKA J., KOZŁOWSKI M.: Nano-Heat Phenomena in Carbon Nanotubes. *Lasers in Eng.* (złoż. do red.).
- [P24] MARCIAK-KOZŁOWSKA J., KOZŁOWSKI M.: On the Possible Description of the Massless Relativistic Particles in Graphene as the Solution of the Thermal Klein-Gordon Equation. *Lasers in Eng.* (złoż. do red.).
- [P25] MARONA L., GRZANKA S., CZERNECKI R., GOSS J., BOCKOWSKI M., PERLIN P., KRUSZEWSKI P., PŁUSKA M., CZERWIŃSKI A.: Estimation of the Recombination Coefficients in Aged InGaN Laser Diodes. *Gallium Nitride Materials and Devices VII* [W] *Proc. of SPIE* 2012 vol. 8262 s. 826217-1-8.
- [P26] MISIUK A., BAŁ-MISIUK J., BARCZ A., ROMANOWSKI P., TYSCHENKO I. E., ULYASHIN A. G., PRUJSZCZYK M.: Out-Diffusion of Hydrogen from Hydrogen Plasma-Processed Oxygen-Implanted Silicon. *Appl. Surf. Sci.* 2012 vol. 260 s. 54–58.

- [P27] OVSYANNIKOV S. V., KORBEJNIKOV I. V., MOROZOVA N. V., MISIUK A., ABROSIMOV N. V., SHCHENNIKOV V. V.: Smart Silicon: Switching between p- and n-Conduction under Compression. *App. Phys. Lett.* 2012 vol. 101 s. 062107.
- [P28] PŁUSKA M., CZERWIŃSKI A., RATAJCZAK J., SZERLING A., KĄTCKI J.: Defect Detection in Semiconductor Layers with Built-In Electric Field with the Use Cathodoluminescence. *Phys. B* 2012 vol. 407 s. 2854–2857.
- [P29] PŁUSKA M., CZERWIŃSKI A., RATAJCZAK J., SZERLING A., KĄTCKI J.: Cathodoluminescence and Electroluminescence of Semiconductor Structures in SEM. *Solid St. Phenom.* 2012 vol. 186 s. 20–23.
- [P30] RATAJCZAK J., HEJDUK K., LIPÍŃSKI M., PIOTROWSKI T., PŁUSKA M., ŁASZCZ A., CZERWIŃSKI A.: Study of Silicon Nanoparticles Formation in Silicon Nitride. *Solid St. Phenom.* 2012 vol. 186 s. 66–69.
- [P31] RECKINGER N., DUTU C.A., TANGUY Y., DUBOIS E., YAREKHA D.A., GODEY S., NOUGARET L., ŁASZCZ A., RATAJCZAK J., RASKIN J. P.: Comparative Study of Erbium Disilicide Thin Films Grown in situ under Ultrahigh Vacuum or ex situ with a Capping Layer. *Thin Solid Films* 2012 vol. 520 s. 4501–4505.
- [P32] SKWAREK A., PŁUSKA M., CZERWIŃSKI A., WITEK K.: Influence of Substrate Type on Tin Whisker Growth in Tin-Rich Lead-Free Solder Alloys. *Mater. Sci. a. Eng.B* 2012 vol. 177 s. 1286–1291.
- [P33] SKWAREK A., WITEK K., PŁUSKA M., RATAJCZAK J., CZERWIŃSKI A.: Dependence of Tin Whisker Growth on Copper and Oxygen Content on the Surface of Tin-Rich Lead Free Alloys. *Acta Phys. Pol. A* (złoż. do red.).
- [P34] SKWAREK A., WITEK K., PŁUSKA M., RATAJCZAK J., CZERWIŃSKI A.: Dependence of Tin Whisker Growth on Copper and Oxygen Content on the Surface of Tin-Rich Lead Free Alloys Proc. of the 2nd Int. Advances in Applied Physics a. Materials Sci. Congr. Antalya, Turcja, 26–29.04.2012 (złoż. do red.).
- [P35] STAROWICZ Z., LIPÍŃSKI M., BERENT K., PIOTROWSKI T.: Badania własności dwutlenku tytanu z nanocząsteczkami metalicznymi do zastosowań w fotowoltaice. Mat. konf. III Symp. "Fotowoltaika i transparentna elektronika - perspektywy rozwoju". Świeradów Zdrój, 29.03–1.04.2012, s. 127–132.
- [P36] STAROWICZ Z., LIPÍŃSKI M., PIOTROWSKI T.: Antireflection  $TiO_x$  Coating with Metal Nanoparticles for Silicon Solar Cells Proc. of the 27th Europ. Photovoltaic Solar Energy Conf. a. Exhib. Frankfurt (Main), Niemcy, 6–10.09.2012, s. 382–384 .
- [P37] SZERLING A., KOSIEL K., KARBOWNIK P., GUTOWSKI P., WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., PŁUSKA M., BUGAJSKI M.: Influence of the Mesa Performance on the Threshold Current and Slope Efficiency of AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Lasers. IEEE Proc. of NATO Advanced Research Workshop on Detection of Explosives and CBRN (Using Terahertz). Cesme, Turcja, 3–6.11.2012 (złoż. do red.).
- [P38] TYSCHENKO I. E., VOLODIN V. A., MISIUK A.: Crystallization of Hydrogenated Amorphous-Nanocrystalline Silicon Films under High-Pressure Annealing. *phys. stat. sol. c* 2012 vol. 9 nr 6 s. 1487–1489.
- [P39] VOLODIN V. A., BUGAEV K. O., GUTAKOVSKII A. K., FEDINA L. I., NEKLYUDOVA M. A., LATYSHEV A. V., MISIUK A.: Evolution of Silicon Nanoclusters and Hydrogen in  $SiN_x:H$  Films: Influence of High Hydrostatic Pressure under Annealing. *Thin Solid Films* 2012 vol. 520 s. 6207–6214.
- [P40] VOLODIN V. A., POPOV A.A., MISIUK A., RINNERT H., VERGNAT M.: Evolution of Silicon and Hydrogen Bonding in Silicon-Rich Nitride Films Prepared by Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition and Annealed under High Pressure. *Nanosci. a. Nanotechnol. Lett.* 2012 vol. 4 s. 364–368.

- [P41] WITEK K., PIOTROWSKI T., SKWAREK A.: Analysis of Polymer Foil Heaters as Infrared Radiation Sources. *Mater. Sci. a. Eng. B* 2012 vol. 177 s. 1373–1377.
- [P42] WITEK K., SKWAREK A., PIOTROWSKI T.: Application of Low-Temperature IR Polymer Heater Systems in Animal Breeding. [W] *Microelectronic Materials and Technologies*. Vol. 2, Wyd. Uczelniane Pol. Koszalińskiej, Koszalin, 2012, s. 104–112.
- [P43] WITEK K., SKWAREK A., PIOTROWSKI T.: Application of Low-Temperature IR Polymer Heater Systems in Animal Breeding. Proc. of the 36th Int. Microelectronics a. Packaging IMAPS-CPMT Poland Conf. Kołobrzeg, 26–29.09.2012 (złoż. do red.).
- [P44] WZOREK M., CZERWIŃSKI A., KUCHUK A., RATAJCZAK J., PIOTROWSKA A., KĄTCKI J.: Ni-Based Ohmic Contacts to Silicon Carbide Examined by Electron Microscopy. *Solid St. Phenom.* 2012 vol. 186 s. 82–85.

### Prezentacje'2012

- [K1] BARAŃSKA A., SZERLING A., KARBOWNIK P., BUGAJSKI M., HEJDUK K., ŁASZCZ A., GOLASZEWSKA-MALEC K.: Kontakty omowe dla GaAs typu  $n^+$  w zastosowaniu dla AlGaAs/GaAs QCL. XII Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe". Szklarska Poręba, 9–12.05.2012 (kom.).
- [K2] BĄK-MISIUK J., ROMANOWSKI P., DYNOWSKA E., SADOWSKI J., MISIUK A., CALIEBE W.: Variation of Strain in Granular GaAs:MnAs Layers. The 11th Biennial Conf. e on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging. St. Petersburg, Rosja, 14–20.09.2012 (plakat).
- [K3] CZERWIŃSKI A., SKWAREK A., PLUSKA M., RATAJCZAK J., WITEK K.: Whisker Growth in Tin Alloys on Glass-Epoxy Laminate Studied by Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy. 9th Polish-Japan. Joint Sem. on Micro and Nano Analysis. Sieniawa, 10–13.09.2012 (ref.).
- [K4] EKIELSKI M., SIDOR Z., JUCHNIEWICZ M., PLUSKA M., WZOREK M., PIOTROWSKA A., KUCHARSKI R., KOLKOVSKY V., ŻYTKIEWICZ Z.R., GRUSZKA M.: Nanostemplowanie w zastosowaniu do wytwarzania struktur fonicznych w GaN. XI Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 11–14.06.2012 (ref.).
- [K5] EKIELSKI M., SIDOR Z., JUCHNIEWICZ M., PLUSKA M., WZOREK M., PIOTROWSKA A.: Fabrication of Polymer Stamp for NIL Patterning of GaN. Nano3D-Kassel. Kassel, Niemcy, 12–19.10.2012 (plakat).
- [K6] GUZIEWICZ M., KISIEL R., SZCZEPAŃSKI Z., WZOREK M.: Silver Metallization for SiC Die Assembly and Wire Connections. 11th Workshop on Expert Evaluation & Control of Compound Semiconductor Materials & Technology. Porquerolles, Francja, 30.05–1.06.2012 (kom.).
- [K7] GUZIEWICZ M., WZOREK M., KISIEL R.: Multilayer Metallization for SiC Die Assembly and Wire Bonding. 36th Int. Microelectronics and Packaging Conf. IMAPS-CPMT Poland 2012. Kołobrzeg, 26–29.09.2012 (plakat).
- [K8] MACIEJEWSKA E., PAPIŚ-POLAKOWSKA E., TRAJNEROWICZ A., SZERLING A., KANIEWSKI J., JASIŃSKI A., REGIŃSKI K., WZOREK M., WAWRO A.: Dry Plasma and Wet Chemical Etching of Antymonides-Based Structures. XII Sem. "Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe". Szklarska Poręba, 9-12.05.2012 (plakat).
- [K9] ROMANOWSKI P., BĄK-MISIUK J., SOBCZAK J.W., DZIAWA P., DYNOWSKA E., SZCZEPAŃSKA A., MISIUK A.:  $Mn_4Si_7$  Nanoinclusions in Mn-Implanted Si. 11th Int. School a. Symp. on Synchrotron Radiation in Natural Science. Kraków-Tyniec, 20–25.05.2012 (plakat).

- [K10] ROMANOWSKI P., BAŁ-MISIUK J., DYNOWSKA E., MISIUK A.: Mn<sub>4</sub>Si<sub>7</sub> Nanoparticles Embedded in Si. 54 Konwers. Krystalograficzne. Wrocław, 5–7.07.2012 (kom.).
- [K11] SANKOWSKA I., JASIK A., SHALIMOV A., KUBACKA-TRACZYK J., WZOREK M., MACIEJEWSKA E., REGIŃSKI K.: Diffuse X-Ray Scattering from a II-Type InAs/GaSb Superlattices. The 11th Biennial Conf. on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging. St. Petersburg, Rosja, 14–20.09.2012 (plakat).
- [K12] SKWAREK A., WITEK K., PŁUSKA M., RATAJCZAK J., CZERWIŃSKI A.: Dependence of Tin Whisker Growth on Copper and Oxygen Content on the Surface of Tin-Rich Lead Free Alloys. 2nd Int. Advances in Applied Physics a. Materials Sci. Congr. Antalya, Turcja, 26–29.05.2012 (plakat).
- [K13] SŁYSZ W., GUZIEWICZ M., BORYSIEWICZ M., GOŁASZEWSKA-MALEC K., DOMAGAŁA J., SIDOR Z., JUCHNIEWICZ M., RATAJCZAK J., BAR J., WĘGRZECKI M., PANAS A., ŁASZCZ A., CZERWIŃSKI A., SOBOLEWSKI R.: Ultrathin NbN and NbTiN Nanostructures for Superconducting Photodetectors. Progress in Applied Surface, Interface and Thin Film Science 2012. Florencia, Włochy, 14–19.05.2012 (plakat).
- [K14] SŁYSZ W., GUZIEWICZ M., BORYSIEWICZ M., GOŁASZEWSKA-MALEC K., DOMAGAŁA J., SIDOR Z., JUCHNIEWICZ M., RATAJCZAK J., KOLKOVSKY V., BAR J., WĘGRZECKI M., PANAS A., WĘGRZECKA I., SIKORA F., ŁASZCZ A., CZERWIŃSKI A., SOBOLEWSKI R.: Superconducting Thin Films with High Critical Current Densities for Very Sensitive Photodetectors. IXth Int. Conf. on Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons. Kazimierz Dolny, 25–28.06.2012 (plakat).
- [K15] STAROWICZ Z., LIPIŃSKI M., BERENT K., PIOTROWSKI T.: Badania własności dwutlenku tytanu z nanocząsteczkami metalicznymi do zastosowań w fotowoltaice. III Symp. "Fotowoltaika i transparentna elektronika - perspektywy rozwoju". Świeradów Zdrój, 29.03–1.04.2012 (ref.).
- [K16] STAROWICZ Z., LIPIŃSKI M., PIOTROWSKI T.: Antireflection TiO<sub>x</sub> Coating with Plasmonic Metal Nanoparticles for Silicon Solar Cells", E-MRS 2012 Spring Meet. Strasbourg, Francja, 14–18.05.2012 (plakat).
- [K17] STAROWICZ Z., LIPIŃSKI M., PIOTROWSKI T.: Antireflection TiO<sub>x</sub> Coating with Metal Nanoparticles for Silicon Solar Cells. 27th Europ. Photovoltaic Solar Energy Conf. a. Exhib. Frankfurt (Main), Niemcy, 6–10.09.2012 (kom.).
- [K18] SZERLING A., KOSIEL K., KARBOWNIK P., GUTOWSKI P., WÓJCIK-JEDLIŃSKA A., PŁUSKA M., BUGAJSKI M.: Influence of the Mesa Performance on the Threshold Current and Slope Efficiency of AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Lasers. NATO Advanced Research Workshop on Detection of Explosives and CBRN (Using Terahertz). Cesme, Turcja, 3–6.11.2012 (ref.).
- [K19] WITEK K., SKWAREK A., PIOTROWSKI T.: Application of Low-Temperature IR Polymer Heater Systems in Animal Breeding. 36th Int. Microelectronics and Packaging Conf. IMAPS-CPMT Poland 2012. Kołobrzeg, 26–29.09.2012 (plakat).
- [K20] WZOREK M., GUZIEWICZ M., CZERWIŃSKI A., RATAJCZAK J., PIOTROWSKA A., KĄTCKI J.: Mikrostruktura wielowarstwowych metalizacji kontaktowych Ti/TaSiN/Ag oraz Ni/Au do n-SiC. XI Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 11–14.06.2012 (plakat).

## Patenty'2012

- [PA] PIOTROWSKI T.: Sposób pomiaru drogi dyfuzji nośników ładunku w półprzewodnikach oraz układ do stosowania tego sposobu. Zgł. pat. nr P.398549 z dn. 21.03.2012.
- [PA] PIOTROWSKI T.: Sposób wyznaczania absorpcji różnicowej podłoży półprzewodnikowych z cienkimi warstwami. Zgł. pat. nr P399594 z dn. 20.06.2012.