

Karol NOWYSZ, Andrzej BUKOWSKI, Stanisława STRZELECKA,  
Barbara SURMA, Ryszard JABŁOŃSKI, Paweł KAMIŃSKI

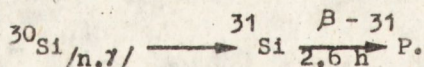
INSTYTUT TECHNOLOGII MATERIAŁÓW ELEKTRONICZNYCH  
ul. Konstruktorska 6, 02-673 Warszawa

## Elektrycznie czynne defekty w krzemie domieszkowanym fosforem poprzez neutronową transmutację krzem-fosfor

### 1. WSTĘP

Krzem monokrystaliczny, domieszkowany fosforem poprzez neutronową transmutację określonej liczby atomów krzemu w atomy fosforu /Neutron Transmutation Doped Silicon - Si-NTD/ jest uważany obecnie za jeden z produktów mających wiele zalet, wśród oferowanych na rynkach światowych krzemu. Przede wszystkim cechuje go bardzo jednorodne rozlokowanie fosforu zarówno w makro- jak i w mikroobzarach.

Podczas napromieniowywania kryształów krzemu neutronami termicznymi, zachodzącego w kanale reaktora jądrowego, jeden z naturalnych izotopów krzemu  $^{30}\text{Si}$ , którego przeciętna zawartość w kryształach wynosi ok. 3,12%, podlega przemianom w fosfor wg reakcji [1]:



Wymienić należy co najmniej dwie korzyści wynikające z zastosowań krzemu domieszkowanego neutronowo. Pierwszą, ekonomiczną, jest uzyskanie elementów półprzewodnikowych o parametrach umożliwiających zakwalifikowanie ich do tzw. klas projektowanych. Drugą, jakościową, jest możliwość wytwarzania elementów wysokonapięciowych /np. diod mocy lub tyrystorów/ o parametrach użytkowych niemożliwych do osiągnięcia na bazie materiału domieszkowanego w sposób konwencjonalny, tzn. poprzez wprowadzanie fosforu bezpośrednio w procesie wzrostu kryształu.



Pomimo, że Si-NTD jest zasadniczo o wyższej jakości od krzemu domieszkowanego metodą konwencjonalną to materiał ten można również zróżnicować pod względem klas jakościowych. Jedną z przyczyn jakościowych różnic tego materiału są tzw. defekty radiacyjne, których resztkowe ilości pozostają nawet po długotrwałych wygrzewaniach, przywracających uporządkowanie sieci silnie zaburzonej w procesie napromieniowania. W poddanym radiacji krzemie, tak przed jak i w czasie obróbek termicznych, występują oddziaływania pomiędzy defektami, zaś ich mechanizmy są bardzo złożone. Wśród wielu różnorodnych kombinacji do istotnych rodzajów oddziaływań zaliczyć należy:

- oddziaływanie strumienia neutronów z zawartymi w krzemie zanieczyszczeniami, będące przyczyną powstawania bardzo stabilnych termicznie kompleksów, złożonych z atomów tych zanieczyszczeń, wakansów oraz międzywęzłowych atomów Si;
- oddziaływanie defektów /zazwyczaj skupisk wakansów/ istniejących w materiale przed napromieniowaniem z defektami radiacyjnymi powstającymi głównie w wyniku bezpośrednich zderzeń neutronów z rozmieszczonymi w sieci jądrami atomów Si.

Oba rodzaje oddziaływań są zależne od energetycznego spektrum neutronów w bombardującej wiązce.

W niniejszym opracowaniu skupiono się nad badaniami elektrycznie czynnych defektów radiacyjnych istniejących w materiale bezpośrednio po napromieniowaniu oraz po różnego rodzaju obróbkach termicznych.

Badania przeprowadzono przy wykorzystaniu następujących metod:

1. Absorpcji w podczerwieni w szerokim zakresie długości fal oraz w temperaturach 300 K i 77 K.
2. Elektronowego rezonansu paramagnetycznego /EPR/.
3. Niestacjonarnej spektroskopii pojemnościowej /DLTS/.
4. Pomiarów rezystywności - przeprowadzonych w celu określenia zmian rezystywności napromieniowanego krzemu w zależności od temperatury izochronicznego wygrzewania.

Do badań użyto specjalnie przygotowanych próbek, pochodzących z kryształów napromieniowywanych strumieniem neutronów /w którym zawartość prędkich neutronów wynosiła od 1% do 7%/ oraz próbek z materiałów wytworzonych w celach handlowych, napromieniowywanych strumieniem neutronów o zawartości prędkich neutronów poniżej 1%.

## 2. WIDMA ABSORPCYJNE MONOKRYSTAŁÓW KRZEMU NAPROMIENIOWANYCH NEUTRONAMI

Bezpośrednio po napromieniowaniu strumieniem neutronów termicznych otrzymywany krzem jest typu p o rezystywności  $10^5 + 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ . Tak duża rezystywność jest spowodowana kompensacyjnym działaniem elektrycznie ak-



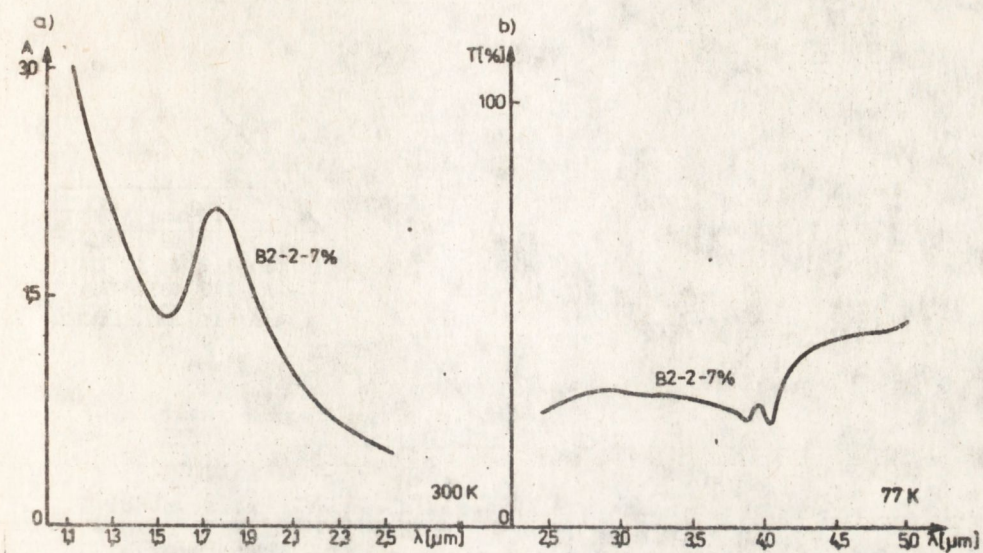
tywnych defektów radiacyjnych oraz niską ruchliwością nośników ładunku. Defekty te, głównie różnego rodzaju kompleksy złożone z wakansów i atomów międzywęziowych, powstają na skutek zderzeń prędkich neutronów z atomami Si oraz pod wpływem oddziaływania na te atomy kwantów promieniowania  $\gamma$  a także cząstek emitowanych podczas rozpadu  $\beta^-$ . Energia neutronów prędkich jest większa od 100 keV i znacznie przewyższa energię neutronów termicznych wynoszącą  $0,01 \pm 0,1$  eV. W procesie generacji defektów radiacyjnych istotną rolę odgrywa również energia, którą otrzymują jądra atomów krzemu przechodząc ze stanu wzbudzonego, powstałego po pochłonięciu neutronu termicznego, do stanu podstawowego, emitując przy tym kwanty promieniowania  $\gamma$ . Energia ta może być w prosty sposób wyznaczona z praw zachowania energii i pędu. Zgodnie z danymi literaturowymi [2] jej wartość średnia wynosi około 1 keV. Tak więc, łatwo można stwierdzić, że sprężyste rozpraszanie prędkich neutronów na jądrach atomów Si zacznie być dominującym mechanizmem defektotwórczym już przy jednoprocentowej zawartości prędkich neutronów w strumieniu neutronów bombardujących kryształ.

Otrzymane wyniki eksperymentalne są w pełni zgodne z przeprowadzoną powyżej analizą. Badania widm absorpcyjnych /transmisyjnych/ w zależności od procentowej zawartości prędkich neutronów w strumieniu napromieniowującym kryształ zostały przeprowadzone za pomocą spektrofotometru firmy Perkin Elmer 325, pracującego w zakresie długości fal  $2 \pm 50$   $\mu\text{m}$  i spektrofotometru firmy Beckman, pracującego w zakresie długości fal  $0,3 \pm 3$   $\mu\text{m}$ . Do badań stosowano obustronnie polerowane próbki o grubości  $2 \pm 10$  mm. Próbki wycinano z kryształów napromieniowywanych strumieniem neutronów, w którym zawartość prędkich neutronów wynosiła odpowiednio 1±2%, 3%, 7%. Wyniki przeprowadzonych pomiarów przedstawiono na rys. 1±6.

We wszystkich badanych kryształach bezpośrednio po napromieniowaniu występują dwa pasma absorpcyjne. Pierwsze pasmo jest obserwowane w temperaturze pokojowej i charakteryzuje się długością fali równą 1,78  $\mu\text{m}$ . Drugie pasmo jest obserwowane w temperaturze ciekłego azotu i charakteryzuje się długością fali z przedziału 3,3±3,9  $\mu\text{m}$ . Zgodnie z danymi literaturowymi [3,4] absorpcja przy  $\lambda = 1,78$   $\mu\text{m}$  jest wywołana optycznymi przejściami elektronów z poziomu  $E_c - 0,7$  eV do pasma przewodnictwa. Przejścia te są możliwe dzięki obecności diwakansów i powodują zmianę ich stanu ładunkowego ze stanu  $V_2^0$  do stanu  $V_2^+$ . Absorpcja występująca przy długości fali z przedziału 3,3±3,9  $\mu\text{m}$  jest wywołana przejściami elektronów z poziomu  $E_c - 0,32 \pm 0,38$  eV do pasma przewodnictwa. Poziom ten może być również przyporządkowany zmianie stanu ładunkowego diwakansów, które w tym przypadku przechodzą ze stanu  $V_2^0$  do stanu  $V_2^-$  [2,3].

Jak wynika z danych przedstawionych na rys. 1 strumień neutronów, zawierający 7% neutronów prędkich, wytworzył w materiale znaczną liczbę



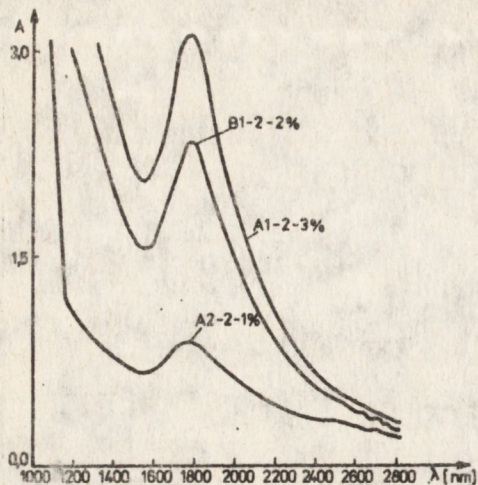


Rys. 1. Widma absorpcyjne Si-NTD po napromieniowaniu strumieniem neutronów termicznych, w którym zawartość prędkich neutronów wynosiła 7%: a/ pomiar w temperaturze 300 K, b/ pomiar w temperaturze 77 K

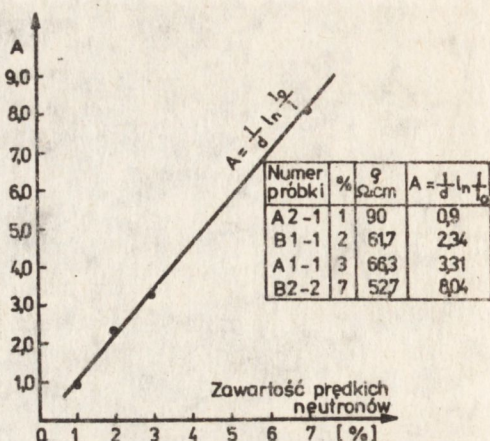
diwakansów, znajdujących się w stanie neutralnym i niewielką liczbę diwakansów podwójnie zjonizowanych. Spadek intensywności pasma absorpcyjnego, obserwowanego przy  $\lambda = 1,78 \mu\text{m}$ , wraz ze spadkiem zawartości prędkich neutronów w bombardującej wiązce /rys. 2/ świadczy o dominującym wpływie prędkich neutronów na koncentrację generowanych radiacyjnie neutralnych diwakansów. Zależność intensywności pasma absorpcyjnego od zawartości prędkich neutronów w strumieniu napromieniowującym, określanej niezależnie na podstawie tzw. liczby kadmowej, pozwoliła na wykonanie wykresu kalibracyjnego, przedstawionego na rys. 3. Wykres ten jest ilustracją zależności przedstawionej na rys. 2, przeliczonej na 1 mm, uznany za jednostkę grubości próbki. Otrzymana prosta była sprawdzana za pomocą specjalnie przygotowanych 35 próbek i mogła być wykorzystana do oceny jakości strumienia neutronów przy wytwarzaniu Si-NTD.

Intensywność pasma absorpcyjnego, obserwowanego przy długości fali z przedziału  $3,3 \div 3,9 \mu\text{m}$ , również maleje wraz ze spadkiem zawartości neutronów prędkich w wiązce neutronów emitowanych z reaktora /rys. 4/. Fakt ten świadczy o istotnym wpływie prędkich neutronów również na proces generacji diwakansów dwukrotnie naładowanych. Tak więc, radiacyjne

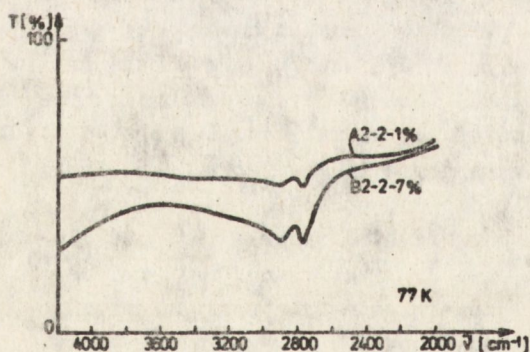




Rys. 2. Ilustracja zmian widma absorpcyjnego Si-NTD pod wpływem wzrostu zawartości prędkich neutronów w strumieniu neutronów termicznych. Pomiar w temperaturze 300 K w zakresie długości fal 1,2+2,8  $\mu\text{m}$



Rys. 3. Zależność intensywności absorpcji Si-NTD, obserwowanej w temperaturze 300 K przy długości fali 1,78  $\mu\text{m}$ , od zawartości prędkich neutronów w strumieniu neutronów termicznych

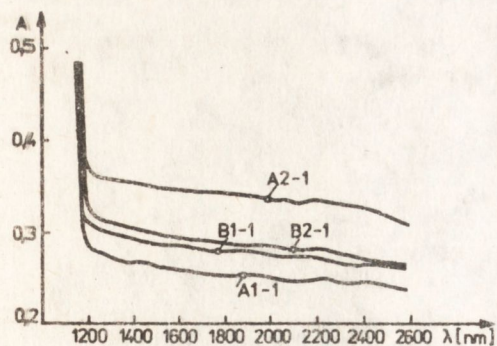


Rys. 4. Ilustracja zmian widma transmisyjnego Si-NTD w zależności od zawartości prędkich neutronów w strumieniu neutronów termicznych. Pomiar w temperaturze 77 K w zakresie długości fal 2,6+5  $\mu\text{m}$

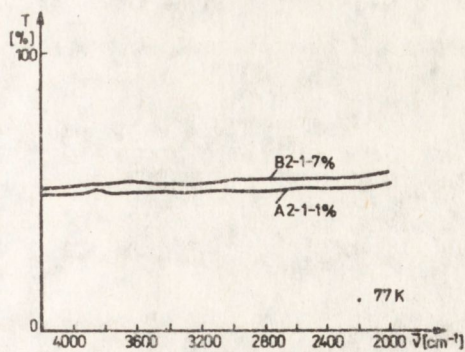
diwakanse występujące w Si-NTD powstają w wyniku przemieszczeń atomów Si z pozycji węzłowych, spowodowanych sprężystym rozpraszaniem prędkich neutronów na jądrach tych atomów.

Diwakanse, obserwowane za pośrednictwem widm absorpcyjnych, anihilują





Rys. 5. Widma absorpcyjne monokryształów Si-NTD napromieniowanych przy różnej zawartości prędkich neutronów w strumieniu neutronów termicznych, a następnie wygrzewanych w temperaturze 750°C. Pomiar w temperaturze 300 K w zakresie długości fal 1,2+2,6 μm



Rys. 6. Widma transmisyjne monokryształów Si-NTD napromieniowywanych przy różnej zawartości prędkich neutronów, wygrzewanych w temperaturze 750°C. Pomiar w temperaturze 300 K w zakresie długości fal 2,6+5 μm

podczas wygrzewania kryształów w temperaturze 750°C. Jak wynika z przebiegu krzywych, przedstawionych na rys. 5 i 6, omawiane powyżej pasma absorpcyjne nie występują w przypadku kryształów wygrzewanych.

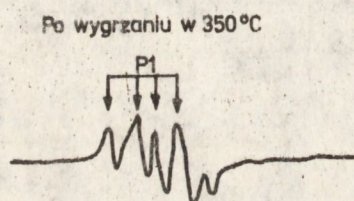
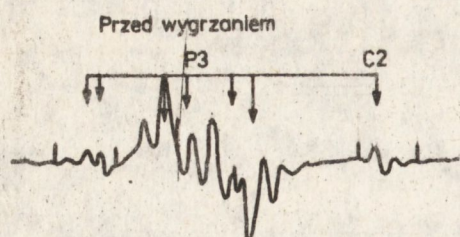
### 3. WIDMA EPR MONOKRYSZTAŁÓW Si-NTD

Jak wykazały badania widm absorpcyjnych, defekty powstałe w procesie napromieniowania krzemu neutronami są usuwane poprzez odpowiednie wygrzewanie. Warunki obróbki termicznej, określone poprzez temperaturę i czas wygrzewania, umożliwiające całkowite wyeliminowanie defektów radiacyjnych, są zależne od sposobu napromieniowywania i rodzaju reaktora [5]. Metodami EPR można przeanalizować skuteczność działania poszczególnych etapów wygrzewania na usuwanie defektów oraz identyfikować je na podstawie analizy ich widm rezonansowych.

Badania były przeprowadzone za pomocą próbek wyciętych z kryształów Si a następnie napromieniowywanych taką dawką neutronów, aby koncentracja fosforu wynosiła  $4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  i  $4,5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . Próbkę miały formę walca o długości 5 mm i średnicy 3 mm. Dno walca było płaszczyzną o orientacji /110/. Przed pomiarami próbki były trawione w mieszaninie 95%  $\text{HNO}_3$  + 5%  $\text{HF}$ . Pomiary wykonano na spektrometrze SE/X-2542Z Padiopon w paśmie X przy temperaturze pokojowej. Ze względu na złożony charakter widma po-



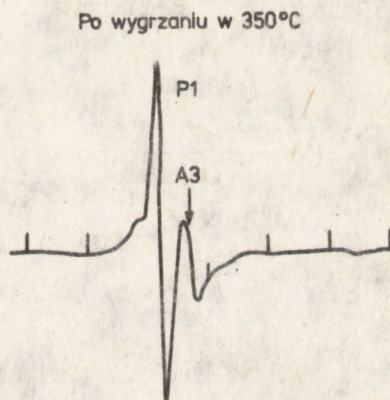
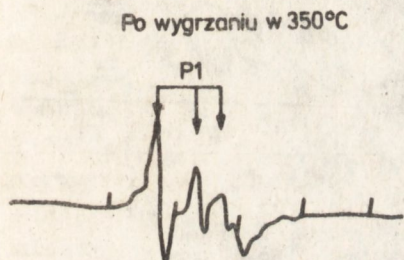
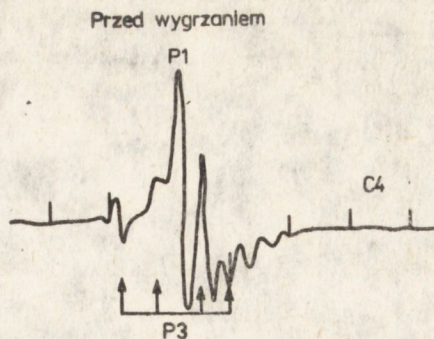
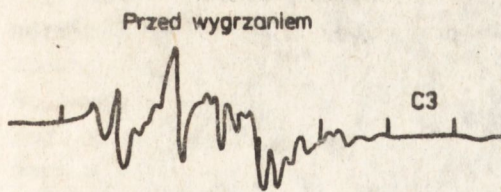
miary przeprowadzono w trzech krystalograficznych kierunkach: C2 -  $[110]$ , C3 -  $[111]$ , C4 -  $[001]$ . Szerokość linii wynosiła około 120 A/m. Otrzyma-  
ne widma EPR przedstawiono na rys. 7+9.



Rys. 7. Porównanie linii rezonansowych dla niewygrzewanego i wygrzewanego Si-NTD. Kierunek pola H równoległy do osi C<sub>2</sub> (H ||  $[110]$ )

Analizując te widma można powiedzieć, że dominującymi defektami w napromieniowanych próbkach były centra P3, złożone z czterech wakan-  
sów  $V_4$  oraz centra P1, złożone z pięciu wakan-  
sów  $V_5$ . W procesie wy-  
grzewania koncentracja centrów P3 maleje i przy temperaturze wygrzewa-  
nia 200°C centra te całkowicie zanikają. Koncentracja centrów P1 roś-  
nie wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania i osiąga maksimum przy  
temperaturze około 350°C. Dalszy wzrost temperatury wygrzewania powo-  
duje zmniejszanie się koncentracji tych defektów i przy temperaturze  
wygrzewania 500°C w widmie EPR, mierzonym w temperaturze 300 K, nie są  
one obserwowane.





Rys. 8. Porównanie linii rezonansowych dla niewygrzewanego i wygrzewanego Si-NTD. Kierunek pola H równoległy do osi  $C_3$  ( $H \parallel [111]$ )

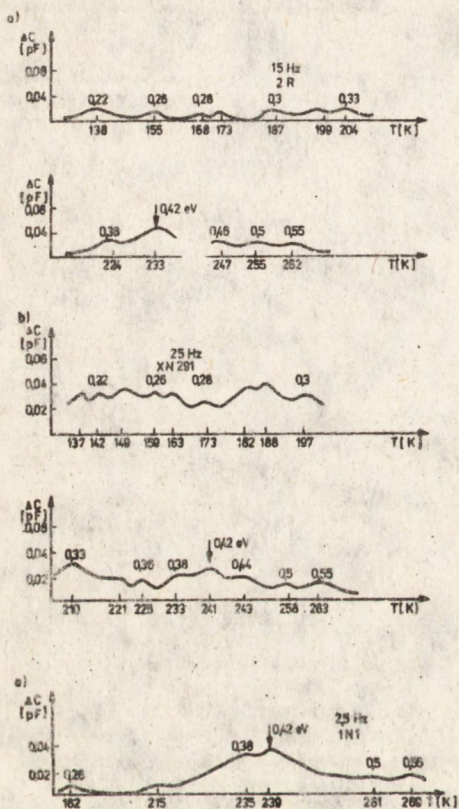
Rys. 9. Porównanie linii rezonansowych dla niewygrzewanego i wygrzewanego Si-NTD. Kierunek pola H równoległy do osi  $C_4$  ( $H \parallel [001]$ )

#### 4. WIDMA DLTS MONOKRYSTAŁÓW Si-NTD

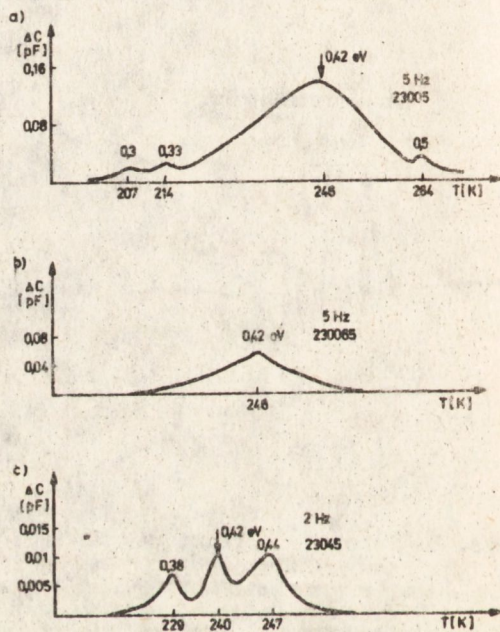
Do badań widm głębokich poziomów wykorzystano kryształy Si-NTD, które były poddane odpowiedniej obróbce termicznej i stanowiły materiał handlowy, przydatny do wytwarzania przyrządów półprzewodnikowych. Przeprowadzenie badań takiego materiału możliwe było dzięki bardzo dużej czułości metody DLTS, pozwalającej na badanie centrów defektowych o koncentracji o 5 rzędów wielkości niższej od koncentracji płytkich domieszek. W celu porównania jakości materiału wytwarzanego przez różnych wytwórców, badania głębokich poziomów przeprowadzono również dla kryształów Si-NTD pochodzenia zagranicznego. Próbkę w postaci diod Schottky'ego



były wykonywane poprzez naporowanie złota w próżni około  $10^{-7}$  Tr<sup>\*/</sup>. Pomiar przeprowadzono za pomocą własnego zestawu pomiarowego, którego szczegółowy opis został przedstawiony w pracy [6]. Typowe widma głębokich poziomów są pokazane na rys. 10 i 11.



Rys. 10. Widma głębokich poziomów dla Si-NTD po obróbce termicznej. Porównanie materiału krajowego z materiałami pochodzenia zagranicznego: a/ kryształ produkcji ZSRR, b/ kryształ produkcji CSRS, c/ kryształ produkcji krajowej



Rys. 11. Widma głębokich poziomów dla Si-NTD wygrzewanego w temperaturze 750°C. Porównanie materiałów krajowych: a/ kryształ nr 23005, b/ kryształ nr 23065, c/ kryształ nr 23045

Jak wynika z powyższych widm DLTS, nawet po obróbce w 750°C istnieje w Si-NTD wiele różnych centrów defektowych, których koncentracja jest rzędu  $10^{10}$  cm<sup>-3</sup>. Centra te są prawdopodobnie w większości pochodzenia

\*/ 1 Tr  $\approx 1,33 \cdot 10^2$  Pa /przeliczenie dotyczy całego artykułu/



radiacyjnego i wprowadzają szereg dyskretnych, położonych blisko siebie poziomów energetycznych, wypełniających górną część przerwy zabronionej. Różnice pomiędzy widmami otrzymanymi dla poszczególnych kryształów są spowodowane zarówno różnicami w strukturze defektowej materiałów wyjściowych jak i różnymi warunkami procesu transmutacji i obróbki termicznej. W przypadku kryształów krajowych, które napromieniowywano i wygrzewano w jednakowych warunkach, głównym czynnikiem wpływającym na zróżnicowanie widm głębokich poziomów jest różna zawartość węgla i tlenu w materiale wyjściowym. Obecność tych zanieczyszczeń wpływa na proces migracji punktowych defektów radiacyjnych [2,4], a więc pośrednio na ich anihilację.

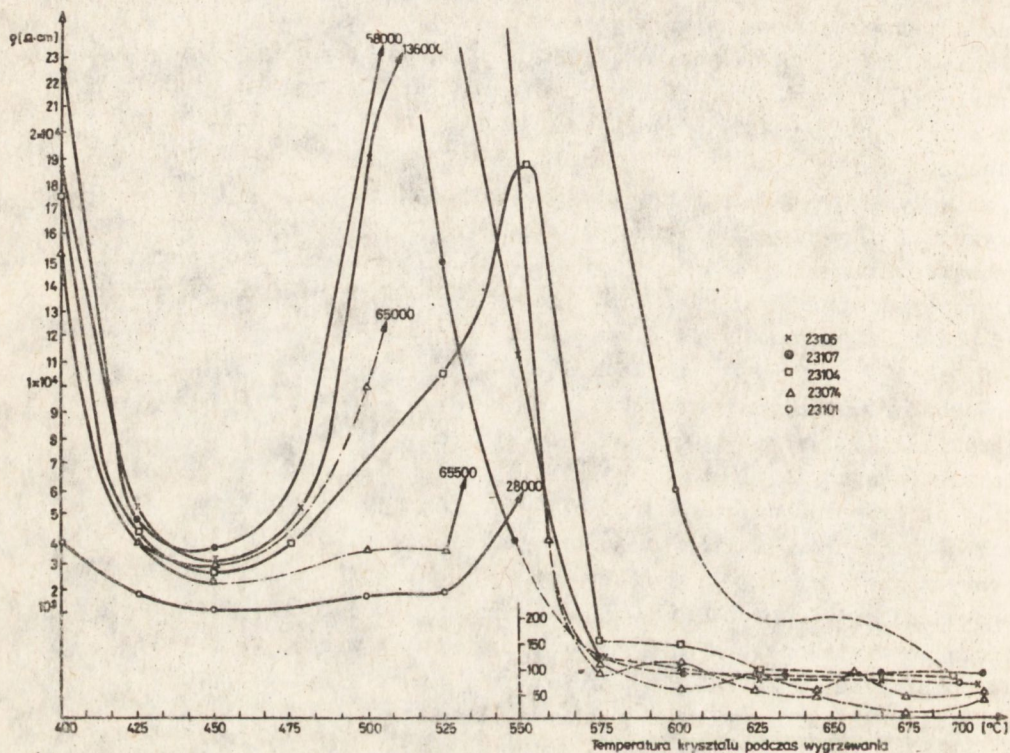
We wszystkich badanych kryształach istnieją centra defektowe charakteryzujące się energią aktywacji  $0,42 \pm 0,04$  eV i przekrojem czynnym na wychwyt elektronów  $\sigma_n = 1 \cdot 10^{-16}$  cm<sup>2</sup>. Są one obserwowane w postaci dominującego maksimum w widmie DLTS. Koncentracja tych centrów, które mogą być podwójnie naładowanymi diwakansami [2], zawiera się w przedziale  $2 \cdot 10^{10} \pm 2 \cdot 10^{11}$  cm<sup>-3</sup>. W kryształach Si-NTD, wyprodukowanych w ITME, są obserwowane również centra defektowe E<sub>1</sub> i E<sub>7</sub>, charakteryzujące się energią aktywacji 0,17 eV i 0,53 eV, dla których przekrój czynny na wychwyt elektronów wynosił odpowiednio  $5,1 \cdot 10^{-16}$  cm<sup>2</sup> i  $2,6 \cdot 10^{-12}$  cm<sup>2</sup> [7]. Oba rodzaje centrów inaczej zachowują się w funkcji czasu ich zapełniania. W przypadku centrów, z którymi jest związany poziom E<sub>c</sub> - 0,17 eV, proces wychwytu jest typowy dla defektów punktowych, zaś w przypadku centrów wprowadzających poziom E<sub>c</sub> - 0,53 eV, proces ten jest opisywany zależnością logarytmiczną. Wyniki te sugerują, że centra E<sub>1</sub> są prawdopodobnie kompleksami wakans-tlen, zaś centra E<sub>7</sub> są przypuszczalnie zlokalizowanymi skupiskami wakansów wzajemnie na siebie oddziaływujących [2,4].

##### 5. ZMIANY REZYSTYWNOSCI MONOKRYSTAŁÓW Si-NTD POD WPŁYWEM IZOCHRONICZNEGO WYGRZEWANIA

Krzem domieszkowany metodą neutronową charakteryzuje się małą niejednorodnością rezystywności wynoszącą 3÷6%. Przeprowadzone przez nas pomiary wykazały jednak pewne różnice pomiędzy kryształkami, mimo że własności materiału wyjściowego były jednakowe /jednakowa zawartość boru i fosforu a zawartość tlenu i węgla poniżej granicy wykrywalności aktualnie stosowanych metod/. Również technologie otrzymywania monokryształów i technologia napromieniowania i wygrzewania były jednakowe. Zjawisko to należy wiązać z resztkowymi, elektrycznie nieaktywnymi domieszkami znajdującymi się w materiale wyjściowym. Takimi zanieczyszczeniami są przede wszystkim atomy tlenu i węgla, pomimo że ich koncentracja jest niższa od  $5 \cdot 10^{15}$  cm<sup>-3</sup>.



Wyniki pomiarów rezystywności po cyklach obróbek termicznych, przeprowadzonych w zakresie temperatur  $400\text{--}900^{\circ}\text{C}$  przez  $0,5\text{ h}$ , są przedstawione na rys. 12. Dla wszystkich próbek obserwuje się minimum rezystywności przy temperaturze  $450^{\circ}\text{C}$ . Różne wielkości rezystywności dla różnych próbek są związane z różną rezystywnością materiału wyjściowego.



Rys. 12. Przebiegi zmian rezystywności różnych monokryształów Si-NTD w zależności od temperatury wygrzewania

Obserwowane efekty o charakterze akceptorowym należy wiązać z kompleksami typu defekt krystalograficzny-tlen. Na takie kompleksy wskazują również autorzy pracy [8], którzy stwierdzili ponadto, że ich koncentracja może być rzędu  $1,2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ . W temperaturze  $500\text{--}700^{\circ}\text{C}$  następuje konwersja typu przewodnictwa, co jest związane przede wszystkim z rozpadem defektów tlenowych. Różnice zmian rezystywności przy temperaturze  $600\text{--}800^{\circ}\text{C}$  należy wiązać z różną koncentracją węgla. Oddziaływanie węgla ma bardziej złożony charakter. Na skutek oddziaływania z neutronami węgiel zajmuje międzywęzłowe położenie i wiąże się w kompleksy z różnego rodzaju defektami, tworząc elektrycznie aktywne centra o dużej stabilności. Zagadnienie to wymaga dalszych złożonych badań.



## 6. PODSUMOWANIE

Pomimo, iż obecnie osiągnięto znaczny postęp w stosowaniu Si-NTD do wytwarzania elementów półprzewodnikowych, szczególnie elementów mocy, to dla dalszego doskonalenia jakości należy używać materiału wyjściowego o podwyższonej czystości, charakteryzującego się przede wszystkim bardzo małą zawartością tlenu, węgla i zanieczyszczeń metalicznych. Niektóre firmy zachodnie stawiają następujące wymagania: zawartość tlenu i węgla poniżej  $10^{12}$  at/cm<sup>3</sup>, zawartość zanieczyszczeń metalicznych na poziomie  $10^9$  at/cm<sup>3</sup>, a także domieszek donorowych poniżej  $5 \cdot 10^{12}$  at/cm<sup>3</sup> i akceptorowych poniżej  $3 \cdot 10^{12}$  at/cm<sup>3</sup>. Wymagania te można osiągnąć rozwijając technologię polikrystalicznego krzemu o wysokiej jakości oraz stosując zmodernizowane urządzenia i technologie otrzymywania monokryształów a także nowoczesne metody kontroli ich jakości.

Jednocześnie należy stosować strumień neutronów o małej zawartości neutronów prędkich oraz prowadzić napromieniowywanie materiału w obniżonych temperaturach.

/Tekst ogłoszony na I Konferencji Technologii Elektronowej ELTE' 84, 13-16 czerwca 1984 w Rydni/



#### LITERATURA

1. Stein H.J.: Neutron transmutation doping in semiconductors, Ed. J. Meese, Plenum Press, New York, 1979.
2. Woprosy radiacyjnej technologii półprzewodników - Sbornik statiej pod red. Smirnowa L.S., Izd. Nauka, Nowosybirsk, 1980.
3. Informacja z firmy Topsisil.
4. Konozenko I.D., Semeniuk A.K., Hirwicz W.I.: Radiacyjnyje efekty w kremnii, Izd. Naukowa Dumka, Kijew, 1974.
5. Young R.T. i inni: J. Phys. 49, 9, 4752, 1978.
6. Lamperski J., Kamiński P.: Materiały Elektroniczne 3, 39, 7, 1981.
7. Gregorkiewicz T., Iwanowski R., Dobaczewski L.: Identyfikacja defektów radiacyjnych w krzemie domieszkowanym neutronowo. Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej, IF PAN, 1983.
8. Corbett J.W. i inni: Phys. Rev., 121, 1015, 1961.