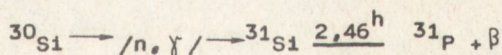


Marta PAWŁOWSKA, Andrzej BUKOWSKI, Stanisława STRZELECKA,
Paweł KAMIŃSKI

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

Badanie niejednorodności w bezdyslokacyjnych monokryształach krzemu po transmutacji neutronowej

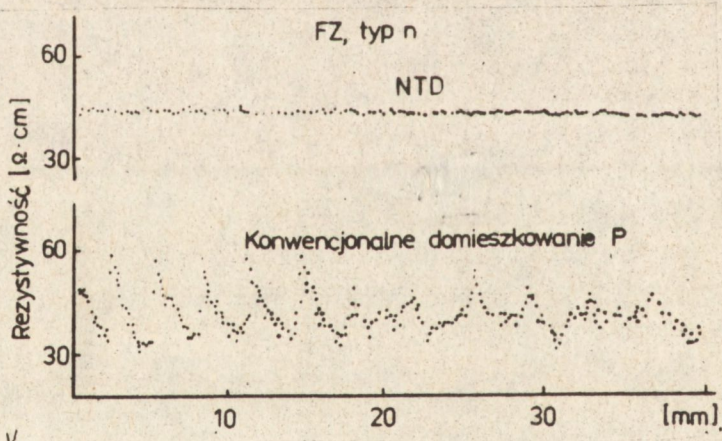
Opanowanie techniki procesów monokryształizacji krzemu pozwala na otrzymywanie monokryształów bezdyslokacyjnych, jednakże warunki termodynamiczne procesu wzrostu stwarzają możliwość niejednorodnego rozkładu domieszki oraz powstawanie defektów strukturalnych typu niedyslokacyjnego. Dla monokryształów n-Si domieszkowanych fosforem istotną poprawę w kierunku równomiernego rozkładu domieszki, a więc uzyskanie monokryształu o bardziej jednorodnym rozkładzie oporności, wnosi metoda transmutacji neutronowej /NTD - Neutron Transmutation Doping/. Wykorzystano tu możliwość przekształcenia jednego z izotopów Si w izotop P pod wpływem naświetlania neutronami termicznymi, zgodnie z reakcją:



Ze względu na mały współczynnik absorpcji neutronów w Si otrzymuje się jednorodny rozkład domieszki fosforowej. Przy domieszkowaniu monokryształów metodą konwencjonalną, tj. wprowadzając domieszkę w procesie monokryształizacji, na powierzchni granicznej ciało stałe-ciecz istnieje możliwość uprzywilejowanego rozkładu domieszki. Na rozkład ten ma wpływ szereg czynników: szybkość wzrostu monokryształu i jego ruchu obrotowego, konwekcja, wahania temperaturowe na powierzchni granicznej ciało stałe-ciecz. Wynikiem tych zjawisk jest niejednorodny rozkład rezystywności. Pomiary jednorodności rezystywności metodą rozplwy rezystywności w monokryształach domieszkowanych

konwencjonalnie wskazują na wahanie wartości rezystywności do około 40%. W monokryształach domieszkowanych metodą NTD wahania te są na granicy możliwości pomiaru metodą rozpląwu rezystywności, tj. ok. 5%.

Celem pracy było badanie doskonałości strukturalnej i jednorodności bezdyslokacyjnych monokryształów Si otrzymanych metodą beztyglową, domieszkowanych poprzez transmutację neutronową o rezystywności $\rho \approx 50 \Omega \cdot \text{cm}$. Badano również wyjściowe monokryształy o rezystywności $\rho \approx 1000 \Omega \cdot \text{cm}$ oraz, w celach porównawczych, monokryształy domieszkowane metodą konwencjonalną, tj. domieszkowane fosforem w procesie monokrysztalizacji. Do badań stosowano jedną z metod skaningowego mikroskopu elektronowego /SEM-CCM/ - obrazy mikroskopowe zbieranego ładunku w półprzewodniku w obszarach z barierami metal-półprzewodnik /bariery Schottky'ego/ oraz obserwacje mikroskopowe po selektywnym trawieniu chemicznym. Badania wykonywano na płytkach wycinanych równolegle do osi wzrostu monokryształów - płaszczyzny /110/, oraz na płytkach wycinanych prostopadłe do osi wzrostu monokryształów - płaszczyzny /111/. Mikroskopowe obrazy SEM-CCM w obszarach barier metal-półprzewodnik otrzymywano za pomocą mikroskopu skaningowego JEOL-JSM2. Na badanych płytkach wykonywano również pomiary niejednorodności rezystywności metodą rozpląwu rezystywności. Przykładowe rozkłady rezystywności dla kryształów domieszkowanych metodą NTD i konwencjonalną przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przykłady wyników pomiarów rezystywności wzdłuż promienia płytek wycinanych prostopadłe do osi wzrostu z kryształów domieszkowanych metodą NTD i konwencjonalną

Badania metodą SEM-CCM wykonywano na płytkach z monokryształów domieszkowanych metodą NTD o poprawnym obrazie doskonałości strukturalnej /monokryształ A/ oraz na płytkach z monokryształu odrzuconego ze względu na występowanie pasmowych rozkładów mikrodefektów typu niedyslokacyjnego /monokryształ B/.

Na rys. 2 przedstawiono przykład uzyskiwanych obrazów SEM-CCM w obszarze barier metal-półprzewodnik /rys. 2a/ oraz obrazu mikrostruktury ujawnionej selektywnym trawieniem chemicznym /rys. 2b/ na płaszczyźnie /110/ równoległej do osi wzrostu monokryształu A.

Na obrazach SEM-CCM obserwuje się niejednorodną wydajność zbierania ładunku w analizowanych obszarach barier Schottky'ego. Obserwuje się ciemne pasma o obniżonej wydajności zbierania ładunku /rys. 2a/. Geometria rozkładu pasm odpowiada geometrii rozkładu prążków segregacji domieszki. Rozkład tych prążków, widoczny po selektywnym trawieniu chemicznym, podano na rys. 2b.

Na rys. 3 przedstawiono przykład uzyskiwanych analogicznych obrazów w monokryształ B odrzuconym ze względu na występowanie mikrodefektów strukturalnych.

Na rys. 3a występują pasma o obniżonej wydajności zbierania ładunku, podobnie jak w przypadku monokryształu A o poprawnych cechach doskonałości strukturalnej /rys. 2a/. Jednakże po selektywnym trawieniu chemicznym obraz mikrostruktury ujawnia występowanie pasmowych zgrupowań płytkich jamek trawienia związanych z mikrodefektami typu niedyslokacyjnego. Obrazy SEM-CCM w przedstawionych monokryształach A i B są podobne. Odległości pasm o obniżonej wydajności zbierania ładunku wynoszą około $250+300 \mu\text{m}$. Nie zaobserwowano wpływu ujawnionych mikrodefektów /kryształ B/ na obrazy zbieranego ładunku. Prawdopodobnie nie mają one wpływu na przyspieszoną rekombinację generowanych wiązkę elektronową nośników prądu.

W monokryształe wyjściowym do uzyskania monokryształu A, który miał rezystywność $\rho \approx 1000 \Omega \cdot \text{cm}$, obserwowano podobny efekt niejednorodnej wydajności zbierania ładunku w obszarze barier metal-półprzewodnik /rys. 4/.

Obserwowane pasma obniżonej wydajności zbierania ładunku są bardziej kontrastowe. W celu porównania przytoczono również na rys. 5 obrazy SEM-CCM na płaszczyźnie /110/ monokryształu otrzymywanego metodą beztyglową, domieszkowanego metodą konwencjonalną o rezystywności $\rho \approx 50 \Omega \cdot \text{cm}$ odpowiadającej rezystywności monokryształów domieszkowanych metodą NTD.

Obserwowane pasma obniżonej wydajności zbierania ładunku są zdecydowanie bardziej kontrastowe w porównaniu do pasm występujących

w poprzednio przedstawianych przykładach dla monokryształów domieszkowanych metodą NTD /rys. 2 i 3/.

Analiza podstaw fizycznych obrazów SEM-CCM, warunków procesów monokrysztalizacji oraz warunków badań obrazów zbieranego ładunku w obszarze barier Schottky'ego [1, 2, 3] pozwala na wysunięcie wniosku, że obserwowane pasma obniżonej wydajności zbierania ładunku w obrazach SEM-CCM są obrazem niejednorodnego rozkładu domieszki i zanieczyszczeń występujących w kryształach. Pasma te mają większe zagęszczenia niż wynikałoby to z warunków wzrostu kryształu. Obserwowane zwiększone zagęszczenia można wytłumaczyć konwekcją w procesie krysztalizacji [1].

Przypuszczenie, że pasma o różnej wydajności zbierania ładunku są związane z niejednorodnym rozkładem domieszki wynika z analizy mechanizmu powstawania obrazów SEM-CCM. Szerokość warstwy zubożonej ładunku przestrzennego przy barierze metal-półprzewodnik w przypadku badanych monokryształów wynosiła $\omega_3 \approx 50 \Omega \cdot \text{cm} \approx 2,5 \mu\text{m}$, $\omega_2 \approx 1000 \Omega \cdot \text{cm} \approx 15 \mu\text{m}$. Obserwacje wykonywano przy energiach wiązki elektronów $E_0 = 8+15 \text{ keV}$. Odpowiada to zasięgowi wiązki elektronów $R \approx 0,8+3 \mu\text{m}$. Szerokość warstwy zubożonej ładunku przestrzennego była więc większa lub zbliżona do zasięgu sfery generacji nadmiarowych par nośników prądu. Na proces powstawania obrazu miał więc wpływ mechanizm dryftu nośników w polu elektrycznym bariery. W obszarach większego natężenia pola nośniki prądu były zbierane bardziej efektywnie /jasne obszary/. Jasnym obszarom na przedstawionych obrazach odpowiadają obszary o niższej rezystywności, ponieważ natężenie pola przy barierze E_{max} jest odwrotnie proporcjonalne do rezystywności

$$E_{\text{max}} = \frac{2U_d}{0,5 \sqrt{\rho U_d}}$$

U_d - potencjał bariery metal-półprzewodnik.

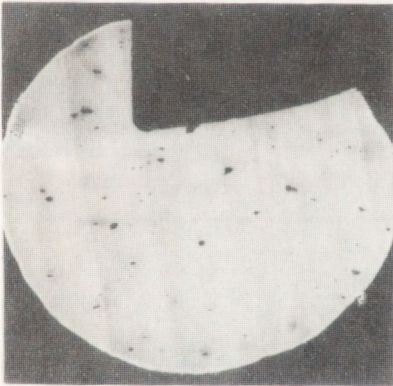
Analogiczne obrazy uzyskiwano w wyjściowym monokryształie oraz po transmutacji neutronowej. Sam proces monokrysztalizacji /nawet dla wysokorezystywnego materiału o koncentracji domieszki $10^{12}+10^{13}$ atomów/cm³/ pozostawia trwały niejednorodny rozkład domieszki. Obrazy SEM-CCM są więc bardziej czułą metodą badania rozkładu domieszek w porównaniu z innymi metodami /np. z metodą rozplýwu rezystywności/. Kontrasty pasm występujących w materiale wysokorezystywnym nie wiążą się z większą niejednorodnością lecz z większą czułością metody SEM-CCM dla tego zakresu rezystywności [1].

Zwiększone kontrasty obserwowane w kryształach domieszkowanym konwencjonalnie w porównaniu do domieszkowanego metodą NTD wiążą się



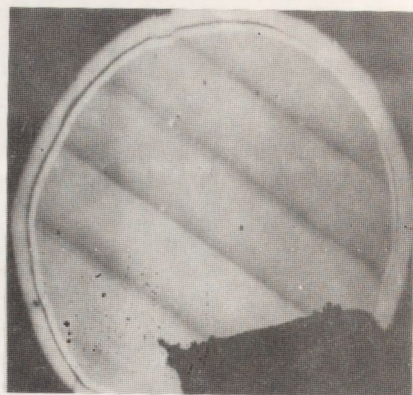
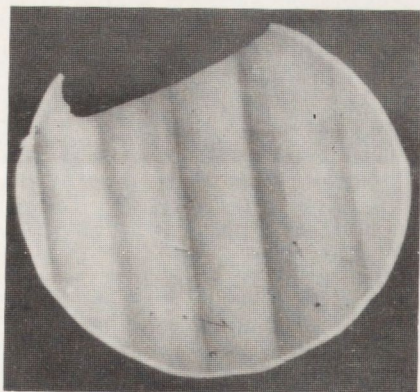
Rys. 2. Przykład obrazów SEM-CCM

- a) mikrostruktura po selektywnym trawieniu chemicznym,
- b) na płaszczyźnie (110) monokryształu A

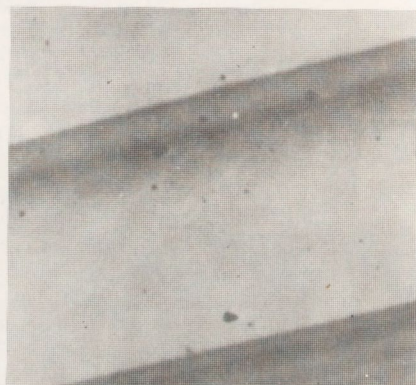
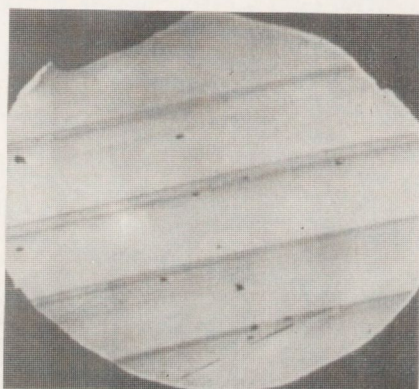


Rys. 3. Przykład obrazów SEM-CCM

- a) makrostruktura po selektywnym trawieniu chemicznym,
- b) na płaszczyźnie (110) monokryształu B



Rys. 4. Przykłady obrazów SEM-CCM w monokryształe wyjściowym do uzyskania monokryształu A



Rys. 5. Przykłady obrazów SEM-CCM w monokryształe domieszkowanym metodą konwencjonalną

z większą niejednorodnością rozkładu domieszki, ponieważ domieszka była związana z niekorzystnymi zjawiskami towarzyszącymi procesowi monokryształizacji.

LITERATURA

1. de Kock A.J.R., Ferris S.D., Kimmerling L.C., Leamy H.J., J. Appl. Phys., Vol. 48, 701 /1977/.
2. Kittler M., Kristall u. Technik, Vol. 15, 185 /1980/, 575 /1980/.
3. Leamy H.J., J. Appl. Phys., Vol. 53 /R51/ /1982/.

Artykuł publikowany jest także w języku angielskim, w materiałach sympozjum: "Identification of defects in semiconductors" - 7th International Summer School Defects in Crystals.

Instytut Fizyki PAN, Szczyrk, 1985.05.23.