

Instytut Fizyki UMCS
Zakład Fizyki Jądrowej

Kierownik: prof. dr Włodzimierz Żuk

Juliusz SIELANKO, Marek SOWA, Witold SZYSZKO,
Włodzimierz ŻUK

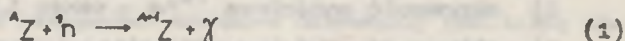
**Zastosowanie metody aktywacji neutronowej w badaniach
rozkładu arsenu implantowanego do krzemu**

Применение метода нейтронного активационного анализа для исследований
распределения мышьяка внедренного в кремний

Application of Radioactivation Analysis for the Determination of the
Range Distribution of Arsenic Implanted in Silicon

WSTĘP

Metoda aktywacji jest jedną z bardziej użytecznych metod określenia rozkładu domieszek wprowadzanych drogą dyfuzji lub implantacji jonów do półprzewodników [1]. Polega ona na uzyskiwaniu radioaktywnych izotopów w rezultacie reakcji jądrowych, zachodzących pomiędzy wysokoenergetycznymi cząstkami (neutrony, protony, deuterony, cząstki α i γ itd.) i atomami tarczy. Spośród wielu reakcji najczęściej stosowana jest reakcja typu (n, γ) z termicznymi neutronami z reaktora, ze względu na możliwość uzyskania bardzo intensywnego strumienia neutronów. Reakcja typu (n, γ) ogólnie opisana może być równaniem:



gdzie: Z jest liczbą atomową, A - masową danego pierwiastka.

Aktywność próbki po naświetleniu neutronami wyrażona jest zależnością:

$$A_k = 6,02 \cdot 10^{23} (W \cdot \phi / M) \cdot f \cdot \delta \cdot (1 - e^{-0,693 T / \tau})$$

gdzie: A_k - aktywność próbki,

W - masa próbki,

M - masa atomowa,

f - strumień neutronów,

δ - przekrój czynny na aktywację,

τ - połowiczny czas rozpadu,

T - czas aktywacji,

ϕ - względna zawartość aktywowanego izotopu.

Metoda aktywacji neutronowej ma szereg zalet. W porównaniu z innymi metodami określania rozkładu domieszek charakteryzuje się bardzo wysoką czułością, nie wprowadza żadnych dodatkowych wtórnych zanieczyszczeń itd.

W pracy opisano zastosowanie tej metody w badaniach rozkładu koncentracji arsenu implantowanego do polikrystalicznego krzemu. ^{75}As w strumieniu termicznych neutronów aktywuje się głównie do ^{76}As , którego półokres rozpadu wynosi 26,4 godz. Przekrój czynny na reakcję (n, γ) wynosił w tym przypadku $4,3 \pm 0,2$ barna. Radioaktywny izotop arsenu rozpada się do $^{76}_{33}\text{Se}$ z emisją β^- oraz γ o energii 550 keV (główna linia), 650 keV, 1210 keV i inne [2].

METODA POMIARU

Próbki o strukturze poli Si - SiO_2 - Si implantowano stabilnym izotopem ^{75}As o energii 50 keV z dozą 10^{16} j/cm². Grubość poli-Si w próbkach wynosiła około 5000 Å, SiO_2 1500 Å. Obie warstwy naniesione były na podłożu z monokryształu Si <111> i oporności 3-5 Ωcm.

Po implantacji i obróbce termicznej próbki aktywowano w Instytucie Badań Jądrowych w Świerku. Warunki aktywacji były następujące:

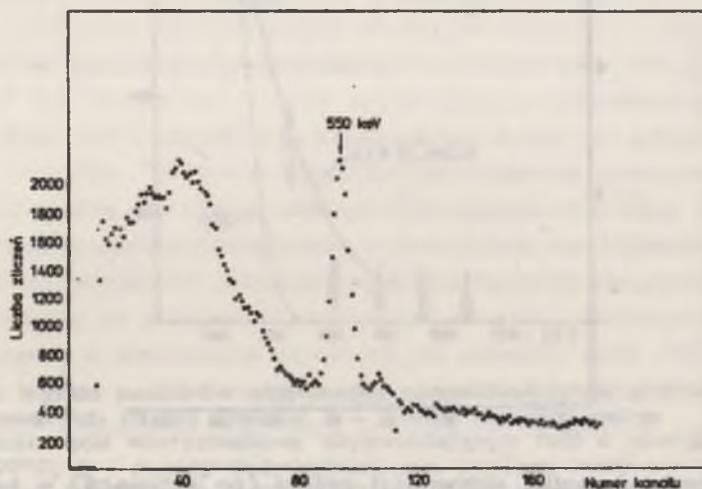
- 1) strumień neutronów - $6 \cdot 10^{13}$ 1/cm² .
- 2) czas naświetlania - 30 min ;
- 3) aktywność wyjściowa ^{76}As - około $1,3 \mu\text{Ci/cm}^2$;
- 4) aktywność wyjściowa Si (różne izotopy) - około $2 \frac{\text{mCi}}{\text{cm}^2}$.

Ze względu na krótki czas połowicznego rozpadu izotopów Si (około 2 godz.) w porównaniu z półokresem rozpadu ^{76}As , pomiary rozkładów domieszek rozpoczęto po upływie 48 godz. od momentu

zaaktywowania domieszki. Po tym czasie tło pochodzące od zaaktywowanych atomów Si jest około $3 \cdot 10^3$ razy mniejsze od promieniowania radioaktywnego arsenu 76.

Pomiary aktywności pozostałościowej przeprowadzono za pomocą wielokanałowego analizatora amplitudy NTA 512-3 z detektorem scyntylacyjnym (kryształ NaJ (TL)). Do usuwania cienkich warstw z powierzchni próbek wykorzystano technikę rozpylania jonowego [3].

Na ryc. 1 przedstawiono widmo arsenu (po aktywacji) zaimplantowanego do poli-Si. Widoczny jest wyraźny wierzchołek odpowiadający linii γ o energii 550 keV. Ze względu na możliwość aktywacji

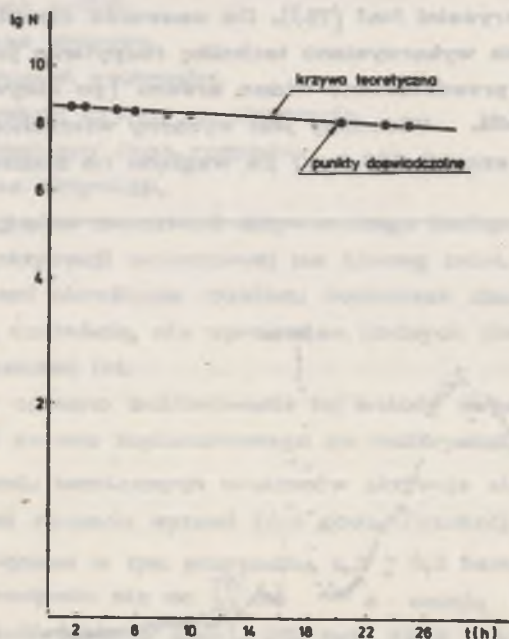


Ryc. 1. Widmo próbki poli-Si implantowanej ^{75}As po aktywacji neutronowej; wierzchołek odpowiada linii o energii 550 keV

innych, obcych, domieszek w krzemie (wprowadzanych już w procesie produkcyjnym), przy badaniach aktywności pozostałościowej korzystano z dwóch metod pomiaru. Pierwsza polegała na obliczaniu aktywności odpowiadającej wyłącznie zliczeniom pod wierzchołkiem linii 550 keV arsenu (suma zliczeń pod wierzchołkiem jest proporcjonalna do zawartości ^{75}As w próbce). W drugiej metodzie sumowano liczbę zliczeń ze wszystkich kanałów, uwzględniając również tło komptonowskie (w tym przypadku mierzona aktywność jest sumą aktywności ^{76}As oraz innych domieszek w próbce). W obu przypadkach uwzględniano poprawkę związaną z rozpadem ^{76}As w czasie.

Jak okazało się, wyniki pomiarów z obu metod pokrywają się w granicach błęd pomiaru. Fakt ten potwierdzają również pomiary

zaniku aktywności w funkcji czasu, przeprowadzone dla próbki, która nie była poddawana procesowi rozpylania. Wyniki pomiarów oraz krzywą teoretyczną przedstawiono na ryc. 2. Dobra

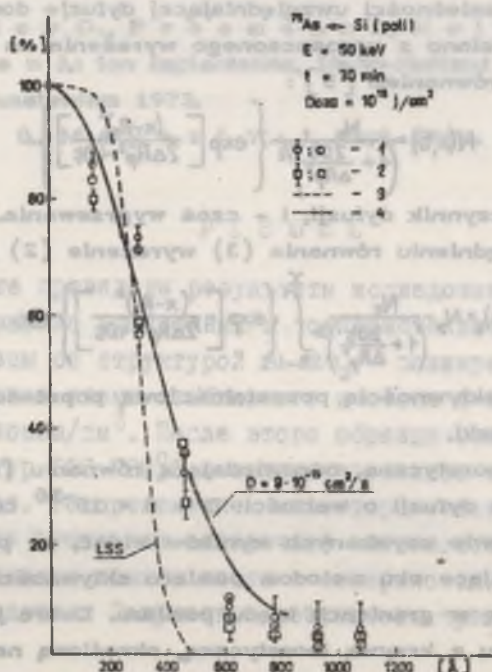


Ryc. 2. Pomiaru zaniku aktywności próbki (po aktywacji) w funkcji czasu; linia ciągła przedstawia krzywą teoretyczną wykreśloną dla izotopu ^{76}As

zgodność punktów eksperymentalnych z krzywą teoretyczną wskazuje, że radioaktywność próbki wynika jedynie z rozpadu ^{76}As , a tło pochodzące od innych domieszek w krzemie (i samego krzemu) jest znikomo małe.

WYNIKI POMIARÓW I WNIOSKI

Pomiary aktywności pozostałościowej próbek poli-Si implantowanych jonami ^{75}As przedstawiono na ryc. 3. Arsen implantowany był z energią 50 keV i dawką 10^{16} j/cm^2 . Po implantacji próbki wygrzewano w piecu przepływowym w atmosferze argonu w ciągu 30 min. Temperatura wygrzewania wynosiła 600°C i 700°C . Na ryc. 3 zaznaczono punkty pomiarowe, odpowiadające aktywności pozostałościowej uzyskanej z analizy wierzchołka linii o energii 550 keV oraz z suma-



Ryc. 3. Wyniki pomiarów aktywności pozostałościowej próbek poli-Si implantowanych jonami arsenu; 1 - punkty doświadczalne z pomiaru aktywności pod wierzchołkiem odpowiadającym linii o energii 550 keV, $T = 600^\circ\text{C}$, 2 - punkty doświadczalne z pomiaru sumy zliczeń ze wszystkich kanałów, $T = 700^\circ\text{C}$, 3 - krzywa teoretyczna (LSS), 4 - krzywa teoretyczna wykreślona na podstawie równania 3 dla współczynnika dyfuzji $D = 9 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{s}$.

rycznej liczby zliczeń, odpowiadającej całkowitej aktywności próbki (z uwzględnieniem ewentualnego tła powstającego od zanieczyszczeń).

Na ryc. 3 zamieszczono również krzywą teoretyczną, wykreśloną na podstawie teorii LSS [4]. W tym przypadku przyjęto wartość zasięgu rzutowanego - $R_p = 315,5 \text{ Å}$ oraz standardową dewiację $\Delta R_p = 70 \text{ Å}$. Krzywą wykreślono na podstawie zależności:

$$i(x) = N_0 - N_0 \int_0^x e^{-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}} dx \quad (2)$$

gdzie $i(x)$ jest aktywnością pozostałościową wyrażoną w procentach, N_0 - dozą zaimplantowanej domieszki (w tym przypadku - 100 %), N_0 - koncentracją w wierzchołku rozkładu, $N_0 = \frac{0,4 N_0}{\Delta R_p}$.

Na ryc. 3 przedstawiono także krzywą teoretyczną, wykreśloną na podstawie zależności uwzględniającej dyfuzję domieszki. W tym przypadku skorzystano z uproszczonego wyrażenia na rozkład domieszki, opisany równaniem [5]:

$$N(x,t) = \frac{N_0}{\left(1 + \frac{2Dt}{\Delta R_p^2}\right)^{1/2}} \left\{ \exp \left[-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2 + 4Dt} \right] \right\} \quad (3)$$

gdzie: D - współczynnik dyfuzji, t - czas wygrzewania.

Po uwzględnieniu równania (3) wyrażenie (2) przyjmie postać:

$$I(x)_D = N_0 \frac{N_0}{\left(1 + \frac{2Dt}{\Delta R_p^2}\right)^{1/2}} \int_0^x \left\{ \exp \left[-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2 + 4Dt} \right] \right\} dx \quad (4)$$

gdzie $I(x)_D$ jest aktywnością pozostałościową poprawioną ze względu na dyfuzję domieszki.

Krzywą teoretyczną, odpowiadającą równaniu (4), wykreślono dla współczynnika dyfuzji o wartości: $D = 9 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{s}$.

Na podstawie uzyskanych wyników widać, że punkty doświadczalne, odpowiadające obu metodom pomiaru aktywności pozostałościowej, pokrywają się w granicach błędu pomiaru. Dobra jest też zgodność eksperymentu z krzywą teoretyczną, określoną na podstawie równania (4). Stąd wniosek, że aktywacja neutronowa w przypadku krzemu implantowanego arsenem stanowi bardzo dobrą metodę określania rozkładu domieszki. Nie jest też konieczne stosowanie wielokanałowego analizatora amplitudy do pomiaru aktywności pozostałościowej (w przypadku próbek wysokooporowych implantowanych z dużą dawką arsenu), ponieważ po upływie 48 godz. od momentu aktywacji to pochodzące od izotopów radioaktywnych krzemu i ewentualnych jego zanieczyszczeń mieści się w granicach błędu pomiaru.

*

Autorzy składają wyrazy podziękowania magistrum A. Wasilkowi, J. Ciemniewskiemu i K. Kissczakowi za implantację próbek.

PIŚMIENNICTWO

1. K u d o K.: Proceedings of the 5th Conference on Solid State Devices, Tokyo 1974.
2. Д ж е л е п о в Б.С., П е к е р Л.К.: Схемы распада радиоактивных ядер, Изд. Академии Наук СССР, Москва 1958.
3. S i e l a n k o J., M e l d i x o n J., S z y z k o W., B a z y l u k D., Ż u k W.: Proceedings of the International

Conference on Ion Implantation in Semiconductors, Budapest 1975.

4. Dearnley G., Freeman J., Nelson R. S., Stephen J.: Ion Implantation, North-Holland Publishing Company, Amsterdam 1973.

5. Meyer O., Meyer J. W.: J. Appl. Phys. 41, 4166 (1970).

РЕЗЮМЕ

В работе приведены результаты исследований распределения атомов мышьяка внедренных в поликристаллический кремний.

В образцы со структурой Si-SiO_2 - поликристаллический имплантировались атомы стабильного изотопа с энергией 50 кэВ и дозой 10^{16} ионов/ см^2 . После этого образцы отжигались в диапазоне температур 600-700°C и активизировались на нейтронном пучке реактора. Распределение имплантированного мышьяка исследовалось путем измерения остаточной активности ^{76}As при постепенном снятии тонких слоев с поверхности образца методом ионного распыления. Полученные результаты сравниваются с теорией.

S U M M A R Y

Range distribution of As implanted into polycrystalline silicon has been studied. The ^{75}As ions with the energy of 50 keV and dose 10^{16} were implanted into poly Si - SiO_2 - Si structures, and the annealings at 600°C and 700°C temperatures were carried out. After the ion implantation the radioactivation of arsenide was performed in nuclear reactor by means of reaction with neutron flux. The measurements were made by combination of residual activity measurements and ion etching removal technique. The experimental results were compared with the theoretical ones.

