
**KATEDRA PRZYRZĄDÓW
PÓŁPRZEWODNIKOWYCH I OPTOELEKTRONICZNYCH**

Laboratorium Mikrotechnologii

Inżynieria Wytwarzania

Ćwiczenie 1

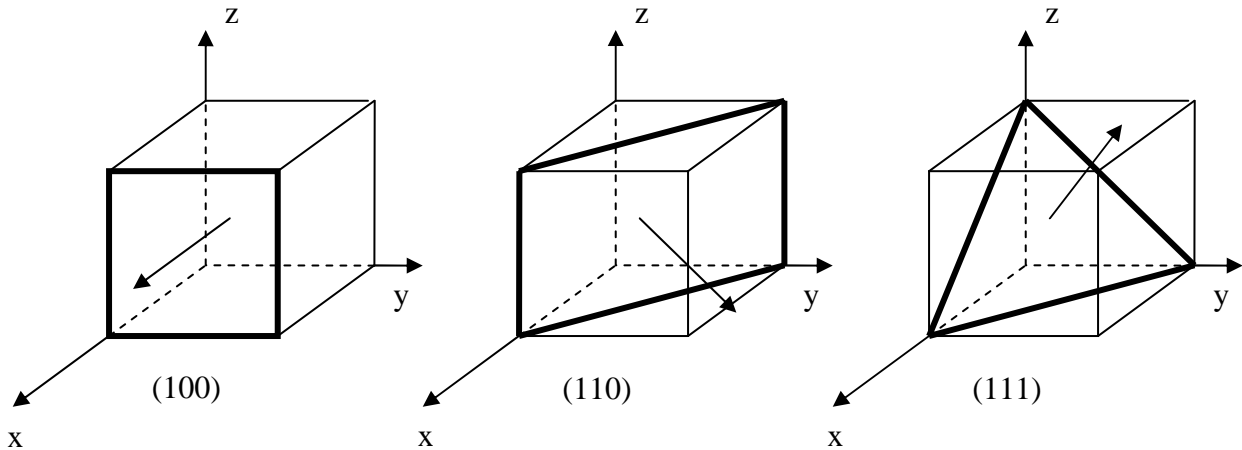
Sonda czterostrzowa

1. Podstawy teoretyczne

1.1. Podłoża półprzewodnikowe

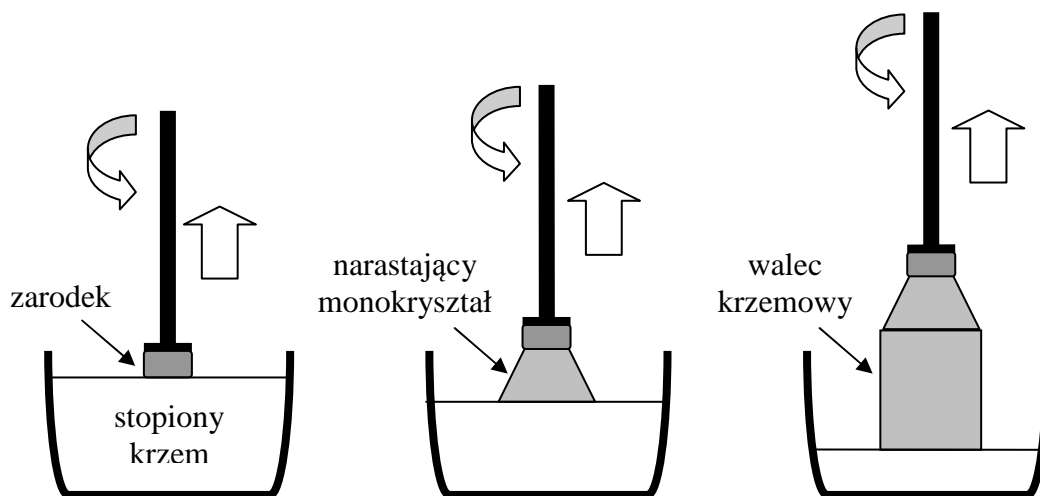
Do produkcji diod, tranzystorów i układów scalonych stosuje się materiały półprzewodnikowe z IV grupy układu okresowego pierwiastków: przede wszystkim krzem (Si) i w bardzo ograniczonym stopniu german (Ge), węgiel krzemu (SiC) oraz związki grupy III-V takie jak arsenek galu (GaAs), fosforek galu (GaP), fosforek indu (InP), fosforek galu (GaN) – głównie na elementy optoelektroniki.

Krzem jest jasno błyszczącym, metalicznym, twardym materiałem. Krystalizuje w sieci kubicznej, tworząc regularne, ściennie centrowane kryształy. Oznaczenia orientacji płaszczyzn w kryształach dokonuje się za pomocą wskaźników Millera. Ułożenie trzech podstawowych płaszczyzn krystalograficznych (100), (111), (110) przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Podstawowe płaszczyzny krystalograficzne krzemu.

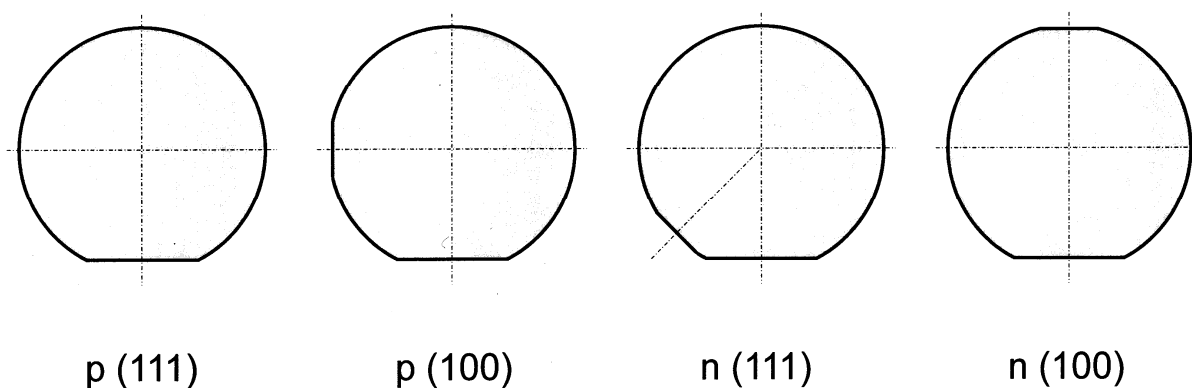
W planarnej technologii mikroelektroniki krzem monokrystaliczny stosuje się w postaci podłoży krzemowych, czyli płaskich, jedno- lub dwustronnie wypolerowanych płytek o średnicy od 1” do 12” i grubości kilkuset mikrometrów. Do wytworzenia podłoża stosuje się najczęściej **metodę Czochralskiego** wyciągania monokryształu (rys.2). W metodzie tej do powierzchni czołowej wolno obracanego trzpienia przytwierdza się mały monokryształ krzemu nazywany zarodkiem krystalizacji. Orientacja płaskiej powierzchni czołowej tego kryształu najczęściej jest zgodna z płaszczyzną (100), (111), (110). Zarodek opuszcza się na trzpieniu do wnętrza tygla, w którym znajduje się czysty krzem w postaci płynnej (temperatura powyżej 1410°C). Po delikatnym zetknięciu czoła zarodka z powierzchnią cieczy, bardzo powoli podnosi się trzpień, stale go obracając.



Rys.2. Wyciąganie monokryształu metodą Czochralskiego.

Podnoszenie następuje w tempie krystalizowania się materiału. Monokryształ rozrasta się i zwiększa swą średnicę. Proces jest powolny (1 – 40 mm/h), a w jego wyniku powstaje w miarę regularny walec o długości do kilkuset centymetrów i ciężarze przekraczającym kilkadziesiąt kilogramów. Do płynnego krzemu często dodaje się pierwiastek domieszkujący (III lub V grupy układu okresowego), którego atomy wbudowując się w powstającą strukturę kryształu definiują typ przewodnictwa danego półprzewodnika. Pierwiastki te to bor, aluminium, gal, ind (domieszki akceptorowe - powstaje półprzewodnik typu p) oraz fosfor, arsen, antymon (domieszki donorowe - powstaje półprzewodnik typu n). Po ostudzeniu blok materiału poddaje się skomplikowanej obróbce mechanicznej i chemicznej, aby podzielić go na cienkie płytki o polerowanej powierzchni.

W celu jednoznacznego określenia typu przewodnictwa i orientacji krystalograficznej powierzchni roboczej podłoża wykonuje się tzw. **ścięcia główne** (bazowe) i **ścięcia pomocnicze** poprzez zeszlifowanie krawędzi płytek. Ścięcie główne jest zawsze dłuższe i wykonywane wzdłuż wybranej krawędzi krystalograficznej, natomiast ścięcie pomocnicze jest krótsze i umownie oznacza typ przewodnictwa podłoża (rys.3.). Na przykład dla podłoża (100) typu p dłuższe ścięcie jest wykonane zgodnie z kierunkiem krystalograficznych $\langle 110 \rangle$, zaś pomocnicze jest krótsze i prostopadłe do głównego.



Rys. 3. Ścięcia główne i pomocnicze na podłożach krzemowych.

1.2. Zmiana typu przewodnictwa i rozkładu domieszek

Typ przewodnictwa i koncentracja domieszek dla każdego podłoża krzemowego jest ustalany już w trakcie jego powstawania, czyli w procesie wyciągania monokryształu. Zmianę typu domieszkowania, warunkującą wykonanie nawet najprostszego przyrządu półprzewodnikowego, można uzyskać poprzez wprowadzenie do sieci krystalograficznej domieszki przeciwnego typu niż ta, która się w nim już znajduje. Aby jednak doszło do zmiany typu przewodnictwa koncentracja nowo wprowadzanej domieszki musi być większa od tej, jaka była oryginalnie w podłożu, przy czym po wykonaniu takiego zadania efektywnie działa elektrycznie w podłożu jedynie różnica koncentracji obu typów domieszek. Oznacza to w praktyce, że niezależnie od sposobu praktycznej realizacji **zmiana typu przewodnictwa w podłożu krzemowym jest związana ze wzrostem koncentracji domieszek w podłożu**. Z tego powodu koncentracja domieszek w produkowanych podłożach jest niska i zawiera się najczęściej w granicach $10^{14} - 10^{16} \text{ 1/cm}^3$.

Można wyróżnić dwa sposoby wprowadzania domieszek: poprzez **dyfuzję termiczną**, w której atomy domieszek przesuwiają się w półprzewodniku wskutek chaotycznych ruchów cieplnych, oraz przez **implantację jonów**, w której jony domieszek rozpędzane są w silnym polu elektrycznym i „wbijane” do wnętrza sieci krystalograficznej podłoża. Obie te metody wzajemnie się uzupełniają i są stosowane w zależności od potrzeb konstrukcyjnych.

Metodą dyfuzji można wykonywać warstwy domieszkowane o szerokim zakresie grubości i koncentracji powierzchniowych domieszek oraz różnym rozkładzie koncentracji domieszek (ale w ograniczonym zakresie). Wykorzystując zjawisko maskowania dyfuzji domieszek przez warstwę dielektryczną można wykonywać obszary dyfuzyjne o wymaganym rozkładzie przestrzennym. Dyfuzja,

podobnie jak utlenianie termiczne podłoży krzemowych, jest procesem wysokotemperaturowym prowadzonym w piecu dyfuzyjnym.

Metodą implantacji jonów można wykonywać stosunkowo płytko położone warstwy domieszkowane o szerokim zakresie koncentracji powierzchniowych domieszki i praktycznie dowolnym rozkładzie koncentracji domieszki. Implantacja jest procesem niskotemperaturowym i wymaga kosztownej i skomplikowanej aparatury. Ze względu na pojawiające się w tym procesie uszkodzenia struktury krystalicznej krzemu oraz w celu elektrycznej aktywacji domieszek stosowanie implantacji wiąże się zwykle z koniecznością późniejszego wygrzewania poimplantacyjnego. Zaletą tej metody jest duża precyzja i powtarzalność procesów domieszkowania.

1.3. Teoria dyfuzji

Dyfuzja w ciele stałym jest to ruch atomów w sieci krystalicznej podłoża wywołany różnicą ich koncentracji w różnych obszarach tej sieci. Jeżeli rozkład atomów w sieci krystalicznej jest niejednorodny, to zachodzi proces dyfuzji. Proces ten jest silnie zależny od temperatury i im większa jest temperatura ciała stałego, tym szybciej ten ruch zachodzi. Aby w praktyce można było to zjawisko wykorzystać do wprowadzania do podłoża krzemowego atomów domieszek i zmiany ich rozkładu niezbędna jest odpowiednio wysoka temperatura, czyli co najmniej 900°C.

Ruch danego typu atomów w interesującym kierunku w danym podłożu i w danej temperaturze można opisać matematycznie jako strumień przepływających atomów j [1/cm²s]. Strumień ten jest proporcjonalny do gradientu ich koncentracji w zadanym kierunku w tym miejscu sieci krystalicznej $\frac{\partial N}{\partial x}$ ze współczynnikiem nazywanym **współczynnikiem dyfuzji** D , tj.:

$$j = -D \frac{\partial N}{\partial x} \quad (1.1)$$

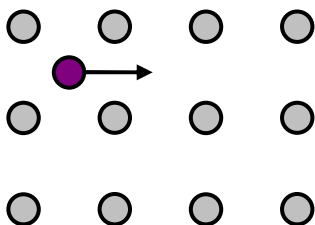
Po zastosowaniu równania ciągłości do tego opisu strumienia otrzymuje się kolejne równanie, tym razem opisujące zmiany koncentracji cząstek dyfundujących w czasie:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{dj}{dx} = -D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (1.2)$$

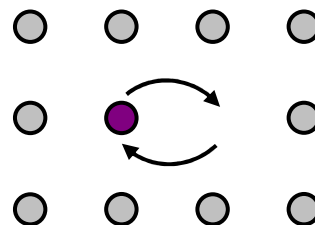
Zależności (1.1) i (1.2) to powszechnie znane **I i II prawo Ficka**, opisujące podstawowe zależności procesu dyfuzji.

W sieci krystalicznej najbardziej prawdopodobne są dwa mechanizmy zachodzenia procesu dyfuzji:

- **dyfuzja międzywęzłowa** – polegająca na przeskakiwaniu atomów z jednej pozycji międzywęzłowej do drugiej, bez zajmowania pozycji w węzłach sieci krystalograficznej (rys.5)
- **dyfuzja podstawieniowa** po wakansjach – zachodząca dzięki obecności defektów w kryształach (rys.6).



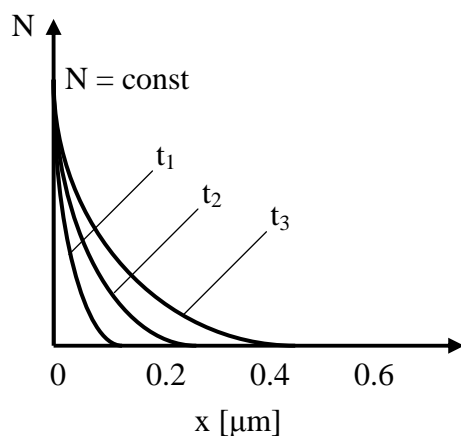
Rys. 5. Dyfuzja międzywęzłowa



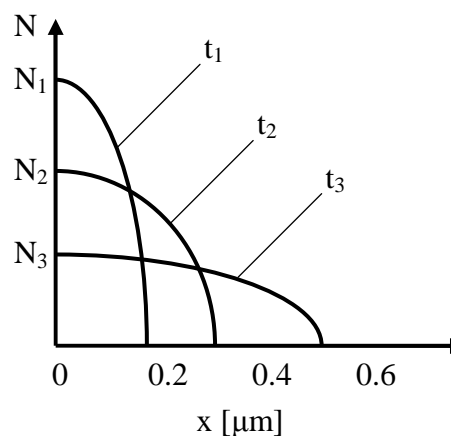
Rys. 6. Dyfuzja podstawieniowa

Ze względu na sposób dostarczania atomów domieszek do powierzchni podłoża, można wyróżnić dwa przypadki:

- **źródło nieskończone (predyfuzja)** – domieszka dostarczana jest do powierzchni podłoża bez przerwy, bez żadnych ograniczeń – w konsekwencji koncentracja atomów na powierzchni jest w trakcie procesu stała (rys. 7)
- **źródło skończone (redyfuzja)** – całkowita liczba atomów domieszki (doza) w płytce i na jej powierzchni jest stała w ciągu całego procesu, a atomów na powierzchni podłoża ubywa w wyniku dyfuzji atomów w głąb płytki (rys. 8).



Rys.7. Dyfuzja ze źródła nieskończonego



Rys.8. Dyfuzja ze źródła skończonego (redyfuzja)

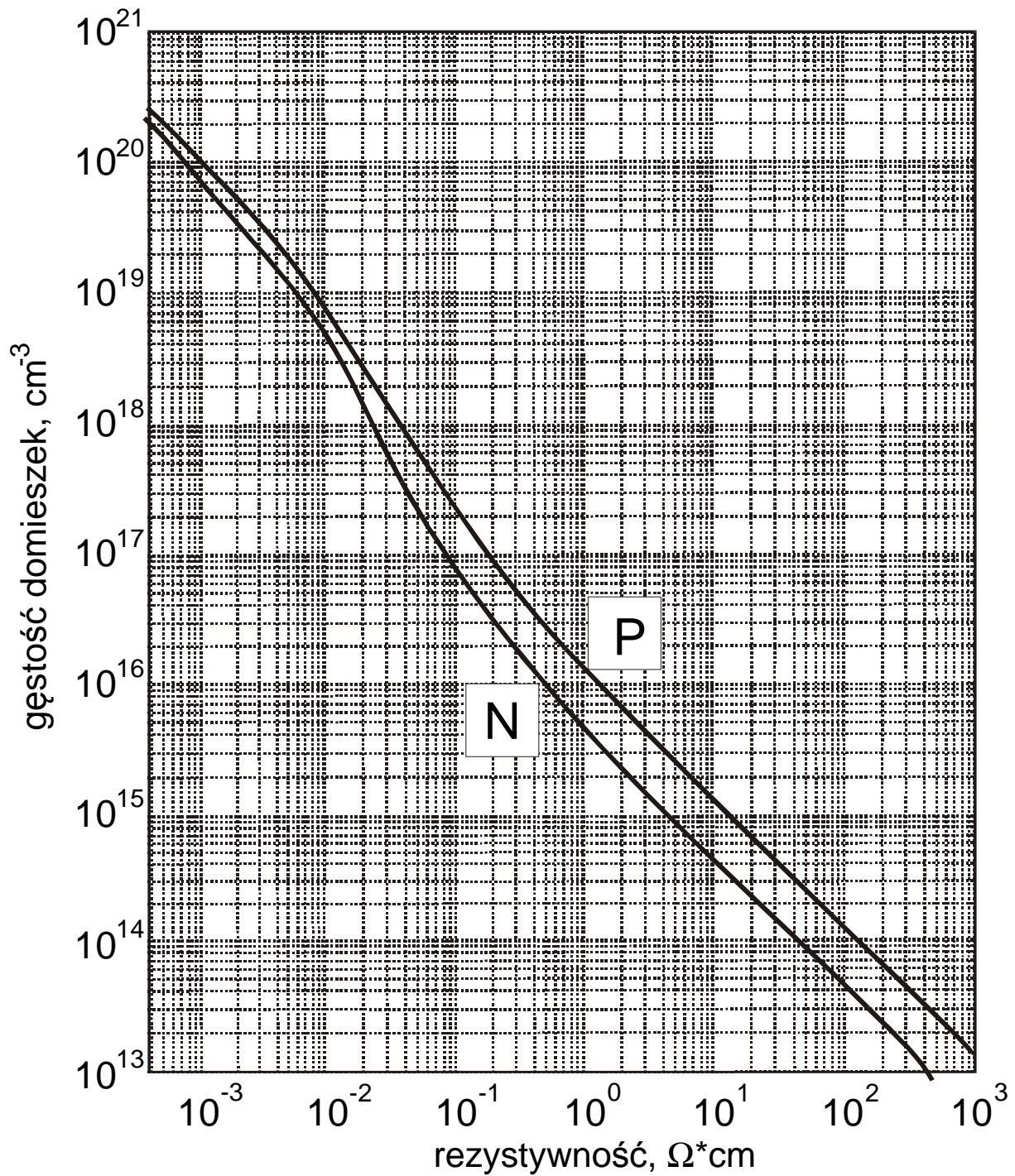
Podstawowym zadaniem, jakie stawia procesom domieszkowania technologia jest w pełni kontrolowane wytwarzanie rozkładów domieszek w podłożu krzemowym, stąd też znajomość początkowej koncentracji domieszek w podłożu jest niezwykle istotna. W praktyce można sterować tylko trzema zależnymi od siebie parametrami procesu dyfuzji (koncentracją powierzchniową domieszki, dawką domieszki i głębokością złącza), stąd też poprzez dyfuzję można uzyskać jedynie charakterystyczny dla tej metody profil rozkładu domieszki w podłożu. Dopiero implantacja jonów daje możliwość sterowania niezależnie tymi parametrami i uzyskiwanie praktycznie dowolnych rozkładów domieszek w szerokim zakresie.

1.4. Charakteryzacja podłoży półprzewodnikowych

Rezystywność materiału półprzewodnikowego, będąca jednoznacznie funkcją koncentracji domieszek (rys.7), jest jednym z kluczowych parametrów charakteryzujących podłoża krzemowe. Parametr ten pozwala na określenie:

- koncentracji domieszek podłoża przed i po procesach dyfuzji
- jednorodności powierzchniowej koncentracji domieszek
- głębokości złącza i rozkładu koncentracji domieszek w warstwach domieszkowanych (profil domieszkowania)

Do wyznaczania rezystywności podłoży półprzewodnikowych powszechnie stosuje się pomiar metodą sondy czterostrzowej.

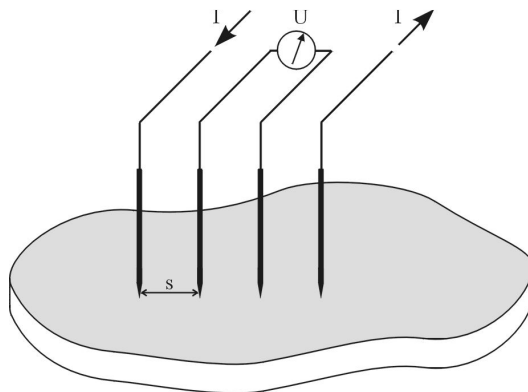


Rys.7. Zależność rezystywności krzemu od koncentracji domieszek akceptorowych i donorowych.

1.4.1. Budowa i zasada działania sondy czterostrzowej

Sonda czterostrzowa jest przyrządem umożliwiającym pomiar rezystancji powierzchniowej R podłoży półprzewodnikowych. Zasadę pomiaru obrazuje rysunek 8.

Do mierzonej płytki krzemowej dociskana jest głowica pomiarowa posiadająca 4 ostrza leżące w jednej linii i równoodległe od siebie. Przez ostrza zewnętrzne wymuszany jest przepływ prądu o znanej wartości I . W wyniku tego, w płytce powstaje pewien rozkład potencjału elektrycznego, zdeterminowany jej geometrią oraz rezystywnością. Między ostrzami wewnętrznymi powstaje w związku z tym różnica



Rys.8. Zasada pomiaru sondą czterostrzową.

potencjałów U . Wielkością mierzoną przez sondę jest **rezystancja powierzchniowa** $R=U/I$, mająca wymiar oporu elektrycznego. **Średnią rezystywność** ρ próbki o grubości g określamy ze wzoru:

$$\rho = K * \frac{U}{I} * g \quad (1.3)$$

gdzie K - współczynnik korekcyjny związany z geometrią płytki i głowicy pomiarowej, obliczany teoretycznie. Dla płytki nieskończenie rozległej jego wartość wynosi:

$$K_{\infty} = \frac{\pi}{\ln 2} \approx 4.53 \quad (1.4)$$

Dla podłoży krzemowych o średnicy 1" wartość współczynnika K wynosi 4.36, dla płytki 2" $K=4,49$, zaś dla płytek 3" i większych $K=4.53$. Wzór (1.4) jest spełniony jeżeli mierzona płytka jest dostatecznie cienka: obliczono, że gdy

$$\frac{g}{s} < 0,5 \quad (1.5)$$

gdzie s - odległość między ostrzami, to błąd popełniany przy pomiarze nie przekracza 0.26 % i może być zanedbany. Typowo, odległość s jest rzędu 1 mm, co oznacza, że sondę czterostrzową możemy stosować do pomiaru rezystywności:

- płytek podłożowych (ich grubość zazwyczaj nie przekracza 0.5 mm)
- płytek z warstwą epitaksjalną
- płytek domieszkowanych w procesach dyfuzji i implantacji jonami.

W dwu ostatnich przypadkach mamy do czynienia z grubościami nie przekraczającymi kilkudziesięciu μm . Znając rezystywność danego podłoża oraz jego typ przewodnictwa (pierwiastek domieszkujący), korzystając z zależności przedstawionej na rys. 7 możemy określić **koncentrację domieszek** w półprzewodniku.

Istotnym ograniczeniem metody jest konieczność zagwarantowania, że prąd pomiarowy I będzie przepływał **wyłącznie** przez mierzoną próbkę. W przypadku płytki podłożowej wystarczy umieszczenie jej na izolowanym stoliku pomiarowym. W przypadku warstw epitaksjalnych i domieszkowanych, pomiar będzie możliwy jedynie wtedy, gdy warstwy te będą miały przeciwny typ przewodnictwa w stosunku do płytki, na której zostały wytworzone. Izolację zapewni wtedy złącze ($p-n$ lub $n-p$), oddzielające mierzoną warstwę od podłoża. Nie będzie natomiast możliwy np. pomiar warstwy n^+ w strukturze $n^+ - n$.

2. Wykonanie ćwiczenia

2.1. Cel ćwiczenia

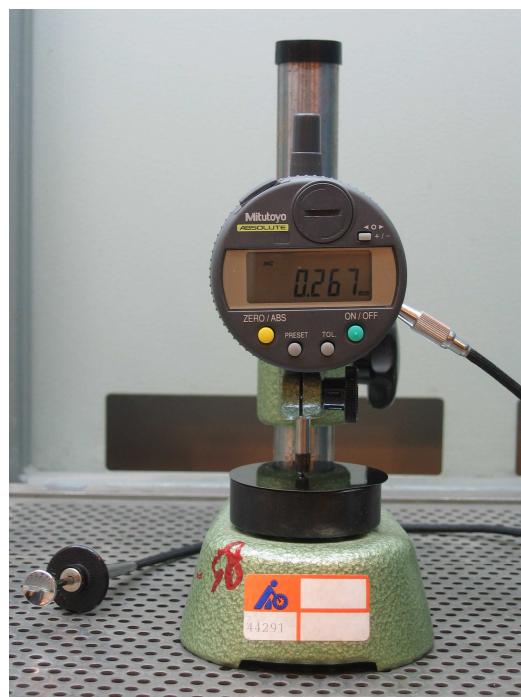
Celem ćwiczenia jest charakteryzacja podłoży krzemowych za pomocą sondy czterostrzowej. Należy określić średnicę, typ przewodnictwa i orientację krystalograficzną płytek krzemowych, zmierzyć ich grubość i rezystywność powierzchniową, a na podstawie zebranych danych określić koncentrację domieszek w każdym z podłoży.

2.2. Pomiar rezystywności metodą czterostrzową, wyznaczenie koncentracji domieszek.

Uwaga. Płytki krzemowe są kruche – należy obchodzić się z nimi delikatnie i zawsze posługiwać się pęsetą.

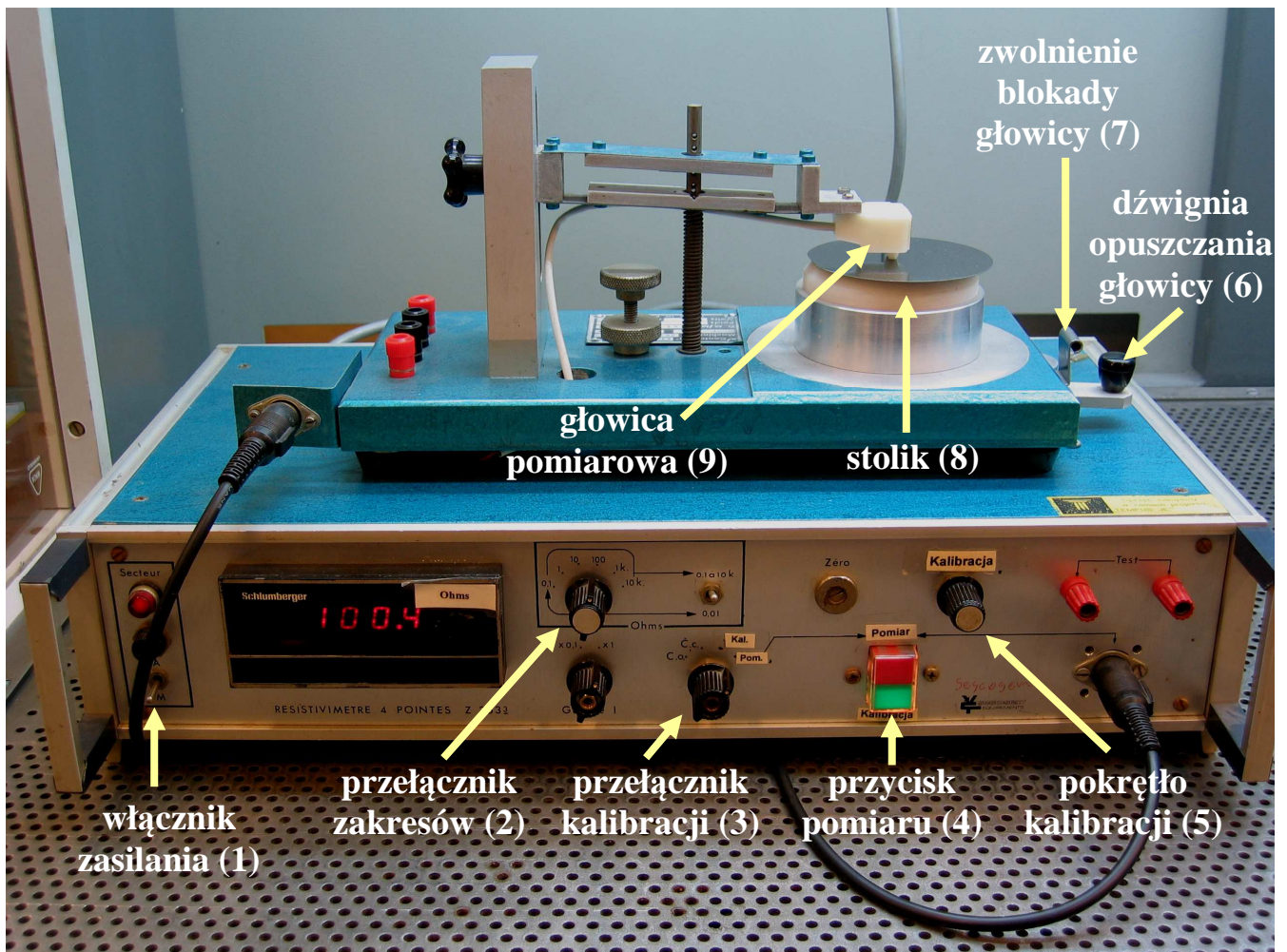
W celu wykonania ćwiczenia należy:

- Określić i zanotować średnicę, typ przewodnictwa i orientację krystalograficzną przygotowanych podłoży.
- Zmierzyć grubość każdej płytki za pomocą mikromierza elektronicznego (rys.9)
 - włączyć (przycisk "On/Off") i wyzerować mikromierz (przycisk "Zero")
 - przy pomocy wężyka spustowego unieść głowicę mikromierza,
 - za pomocą pęsety** umieścić płytkę centralnie na stoliku przyrządu
 - delikatnie** opuścić głowicę i odczytać grubość z wyświetlacza
 - dla każdej płytki pomiar powtórzyć co najmniej pięciokrotnie, za każdym razem nieco przesuwając płytkę
 - określić średnią grubość każdej płytki
 - wyłączyć mikromierz
- Zmierzyć rezystancję powierzchniową każdej płytki za pomocą sondy czterostrzowej (rys.10):
 - włączyć zasilanie sondy (**1, rys. 10**)
 - za pomocą pęsety** umieścić płytkę na stoliku (**8**) tak, aby głowica pomiarowa (**9**) sondy znajdowała się nad jej geometrycznym środkiem
 - delikatnie** docisnąć głowicę sondy przy pomocy dźwigni (**6**)
 - przełącznikiem zakresów (**2**) wybrać zakres pomiarowy 100Ω
 - przełącznik "pomiar-kalibracja" ustawić w położeniu "kalibracja"
 - odczytać wskazanie na wyświetlaczu.
 - przełącznik "pomiar-kalibracja" (**3**) ustawić w położenie "pomiar".
 - pokrętkiem "kalibracja" (**5**) doprowadzić do ustawienia na wyświetlaczu tej samej wartości, którą odczytaliśmy w położeniu "kalibracja"; oznaczać to będzie, że przyrząd skompensował wszystkie dodatkowe rezystancje (połączenia przewodów itp.) i będzie mierzyć wyłącznie interesującą nas wartość U/I. (w przypadku, gdy kalibracja się nie powiedzie, należy zmienić zakres pomiarowy - rezystywność próbki nie mieści się w dotychczasowym - i powtórzyć procedurę)
 - wcisnąć i przytrzymać podświetlany przycisk "pomiar-kalibracja" (**4**)
 - po ustaleniu się wskazania odczytać wartość U/I (odczyt rezystancji powierzchniowej w Ω)
 - zwolnić blokadę głowicy (**7** - w prawo)
 - powtórzyć pięciokrotnie pomiar dla każdej płytki, za każdym razem przesuwając podłoże względem głowicy pomiarowej



Rys. 9. Mikromierz elektroniczny

- do obliczeń przyjąć wartość średnią z pomiarów dla każdej pytki
 - wyłączyć zasilanie sondy.
4. Na podstawie zebranych danych określić rezystywność każdej płytki krzemowej
 5. Korzystając z rys. 7 określić koncentrację domieszek w każdym z badanych podłoży.



Rys.10. Sonda czterostrzowa.

3. Sprawozdanie

W sprawozdaniu należy zamieścić opis przebiegu ćwiczenia, wyniki pomiarów i obliczeń. Na podstawie zależności z rys. 7 określić koncentrację domieszek w każdej badanej płytce krzemowej. Zamieścić własne wnioski i spostrzeżenia.

4. Literatura

1. R. Beck, *Technologia kremowa*, PWN, Warszawa, 1991
2. Praca zbiorowa, *Procesy Technologiczne w elektronice półprzewodnikowej*, WNT, Warszawa, 1980