

Wysokorezystywne wzorce do pomiaru profilu rezystywności krzemowych warstw epitaksjalnych metodą oporności rozplywu w styku punktowym

Andrzej Brzozowski, Jerzy Sarnecki, Dariusz Lipiński, Halina Wodzińska

Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych

ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa;

e-mail: andrzej.brzozowski@itme.edu.pl

Streszczenie: Wykonano wzorce do kalibracji układu umożliwiającego wyznaczenie profilu rezystywności w krzemowych warstwach epitaksjalnych typu n i p o orientacji $\langle 111 \rangle$ i $\langle 100 \rangle$ z pomiarów rezystancji rozplywu styku punktowego (SR). Wykonane wzorce umożliwiają kalibrację systemu i zapewniają pomiar profilu rezystywności krzemowych warstw epitaksjalnych o rezystywności dochodzącej do 10 k Ω cm. Wdrożono procedury zawarte w instrukcjach ASTM dla przeprowadzenia pomiarów metodą sondy czterostrzowej rezystywności monokrystalicznych płytek krzemowych przeznaczonych na wzorce do kalibracji systemu SR.

Słowa kluczowe: rezystywność, oporność rozplywu, krzem monokrystaliczny, warstwa epitaksjalna

High resistivity standards for measurement of resistivity profile in silicon epitaxial layers by spreading resistance method

Abstract: Si standards for the calibration of a spreading resistance probe for measuring the resistivity profiles of n and p type $\langle 111 \rangle$ and $\langle 100 \rangle$ oriented silicon epitaxial wafers have been performed. These standards allow both the calibration of the SR system and the measurement of resistivity distribution in silicon epitaxial layers having resistivity of up to 10 k Ω cm. Procedures for measuring the resistivity of silicon wafers used as standards for the SR systems calibration by the Four-Point Probe method have been implemented in accordance with the ASTM instruction.

Key words: resistivity, spreading resistance, monocrystalline silicon, epitaxial layer

1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych parametrów niezbędnych do oceny jakości płytek krzemowych z warstwą epitaksjalną jest rozkład rezystywności w głąb warstwy epitaksjalnej, czyli innymi słowy profil koncentracji nośników większościowych.

Pomiar charakterystyk C-V struktur epitaksjalnych z użyciem sondy rtęciowej (1 Hg) pozwala na stosunkowo szybkie wyznaczenie rezystywności warstwy, choć przeważnie nie dla całej grubości warstwy a jedynie w specyficznych przypadkach dla obszaru przejścia podłoże - warstwa. Metodą CV można wyznaczyć profil rezystywności wyłącznie w strukturach epitaksjalnych typu n/n^+ lub p/p^+ . W przypadku wysokiej rezystywności warstwy epitaksjalnej ($\rho > 500 \Omega$ cm) i grubości kilkudziesięciu mikrometrów wartość rezystancji szeregowej struktury wynosi powyżej 1 k Ω , co powoduje, że wynik pomiarów jest niewiarygodny. Dla warstw epitaksjalnych o rezystywności poniżej 0,01 Ω cm nie można stosować metody CV z uwagi na niskie napięcie przebicia. Ponadto metoda CV z wykorzystaniem sondy rtęciowej jest nieprzydatna do wyznaczania profilu rezystywności dla warstw epitaksjalnych o przeciwnym typie przewodnictwa niż podłoże z uwagi na powstające na granicy podłoże - warstwa epitaksjalna złącze izolujące. Pomiar rezystywności warstwy, w przypadku takiej

struktury jest możliwy metodą czterostrzową, ale pod warunkiem znajomości położenia złącza izolującego.

Pomiar profilu rezystywności metodą „oporności rozplywu w styku punktowym” (*Spreading Resistance - SR*) na szlifach skośnych jest nie tylko metodą konkurencyjną do wymienionych metod, ale i nie mającą cechujących te metody ograniczeń. Metodą SR można mierzyć profile rezystywności od powierzchni warstwy bez względu na zbyt niską czy wysoką rezystywność warstwy epitaksjalnej.

Metoda SR jest również niezastąpiona przy pomiarach struktur wielowarstwowych, szczególnie struktur wysokorezystywnych i przy zmieniających się wewnątrz struktury typach przewodnictwa kolejnych warstw. Metodą tą można określić rezystywności poszczególnych warstw epitaksjalnych oraz ich grubości.

Pomiar metodą SR profilu rezystywności warstw epitaksjalnych czy też rezystywności monokrystalików krzemu jest wiarygodny pod warunkiem posiadania odpowiednich wzorców w postaci płytek monokrystalicznych o znanej rezystywności, typie przewodnictwa n lub p oraz określonej orientacji ($\langle 111 \rangle$ lub $\langle 100 \rangle$) [1 - 2]. System pomiarowy mierzy rezystancję rozplywu na nieznanym materiale krzemowym i z krzywej kalibracji wyznacza jego rezystywność. Pomiar profilu rezystywności w głąb warstw epitaksjalnych wykonuje się na szlifach skośnych.

Normy ASTM (American Society for Testing and Materials) F 525 [3] i F 672 [4] zalecają aby co najmniej dwa wzorce przypadały na każdą dekadę rezystywności

w zakresie rezystywności od 0,0005 Ωcm do 200 Ωcm . W Zakładzie Epitaksji ITME wykonano w ciągu ostatnich kilkunastu lat wzorce o rezystywnościach $> 2 \text{ k}\Omega\text{cm}$, tak aby rozszerzyć zakres pomiarowy głównie z myślą o wysokorezystywnych warstwach epitaksjalnych o grubości powyżej 100 μm wytwarzanych dla potrzeb programu RD 48 i RD 50 (*Radiation hard semiconductor devices for very high luminosity colliders*) realizowanego w CERN [5 - 8] jak i struktur v/n^+ z warstwami epitaksjalnymi o grubości $> 120 \mu\text{m}$ dla wytwarzanych w ITE detektorów cząstek naładowanych [9 - 10].

2. Zasady wykonania wzorców SR

Do pomiarów rezystywności epitaksjalnych warstw Si metodą SR wykorzystuje się w Zakładzie Epitaksji ITME wzorce wykonane przez amerykańskie biuro standardów (*NBS Standard Reference Material*). Dla krzemu typu n o orientacji $\langle 111 \rangle$ i $\langle 100 \rangle$ rezystywność wzorców mieści się w przedziale 0,001 – 200 Ωcm . Dla wzorców typu p o orientacji $\langle 111 \rangle$ przedział rezystywności jest nieco szerszy i mieści się od 0,0006 Ωcm do 210 Ωcm . Dla orientacji $\langle 100 \rangle$ rezystywności lokują się w zakresie od 0,0006 Ωcm do 77 Ωcm .

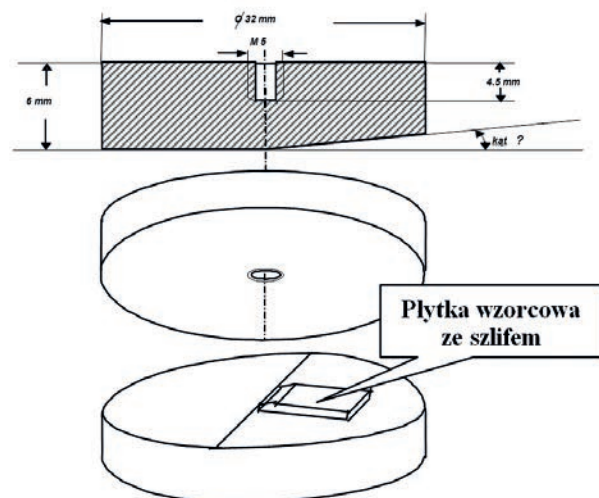
Ponieważ od kilkunastu lat wzorce krzemowe zarówno niskorezystywne jak i wysokorezystywne nie są dostępne na rynku, w Zakładzie Epitaksji ITME podjęto prace celem których było wykonanie wzorców w zakresie rezystywności od 200 Ωcm do 6000 Ωcm dla krzemu typu n i p o orientacji krystalograficznej $\langle 111 \rangle$ i $\langle 100 \rangle$.

Normy ASTM F 525 i F 672 określają zarówno postać, jak i sposób wykonania wzorców krzemowych. Powinny to być jednorodne płytki monokrystaliczne o określonym typie przewodnictwa i orientacji krystalograficznej, których rezystywność mierzona jest metodą czterostrzową zgodnie z normą ASTM F 84 [11]. Norma ta określa metodologię pomiarów parametrów elektrycznych i geometrycznych płytek krzemowych, z jakich wykonane zostaną wzorce oraz sposób opracowania dokumentacji pomiarowej. Płytkę krzemową służącą do wykonania wzorca powinna mieć dokładnie określoną grubość.

Do kalibracji systemu umożliwiającego pomiar profilu rezystywności w warstwach epitaksjalnych metodą „oporności rozplywu w styku punktowym” należy użyć monokrystaliczne płytki krzemowe o znanym typie przewodnictwa (n lub p), znanej orientacji ($\langle 111 \rangle$ lub $\langle 100 \rangle$) i rezystywności wyznaczonej z wymaganą dokładnością.

Jak już wspomniano wyżej normy ASTM zalecają, by liczba krzemowych wzorców stosowanych do kalibracji miernika wynosiła co najmniej dwa wzorce na dekadę rezystywności.

Do pomiaru wartości rezystywności płytek krzemowych zgodnie z zaleceniami normy ASTM F84 wykorzystano sondę czterostrzową, uwzględniając w ostatecznym wyniku poprawki geometryczne i temperaturowe. Próbkę o określonej wartości rezystywności i wymiarach



Rys. 1. Metalowe podstawki pod płytki wzorcowe.

Fig. 1. Metal holder for standard samples.

$\sim 5 \times 10 \text{ mm}$ wycięte z wzorcowych płytek krzemowych powinny być naklejone na metalowych podstawkach w kształcie krążków z jedną z płaszczyzn ściętą pod kątem $\sim 3^\circ$ (Rys. 1). Taka geometria podstawki umożliwi wykończenie na wzorcu krzemowym szlifu skośnego w procesie polerowania pastą diamentową i pozwala na wielokrotne odświeżanie powierzchni szlifu. Krążki można mocować do uchwytu polerki za pomocą której przeprowadza się polerowanie powierzchni szlifu przed kolejną kalibracją systemu SR.

Do pomiaru metodą sondy 4 – ostrzowej podstawka z naklejoną płytką umieszczona jest na metalowym stoliku z warstwą miki izolującą elektrycznie, zamontowanym pod głowicą wyposażonym w termometr (ASTM F 84) (Rys. 5).

3. Wyznaczanie rezystywności monokrystalicznych płytek krzemowych metodą sondy czterostrzowej

Pomiar rezystywności płytki krzemowej za pomocą sondy czterostrzowej polega na opuszczeniu czterech igieł sondy ustawionych liniowo na powierzchnię płytki i przepuszczeniu prądu o określonym natężeniu przez płytkę między zewnętrznymi igłami, natomiast między wewnętrznymi igłami mierzony jest spadek napięcia.

Dla cienkich płytek, gdy $w/S < 1$ wartość rezystywności R_o wyznacza się ze wzoru:

$$R_o(T) = FV/I, \quad (1)$$

gdzie:

$$F = F_2 w F(w/s) F_{sp}, \quad (2)$$

oraz:

- V - zmierzona wartość napięcia między ostrzami sondy,
- I - zadane natężenie prądu,
- w - grubość płytki ($w/S < 1$),
- S - średni rozstaw sond,
- F_2 - geometryczny współczynnik poprawkowy związany ze średnicą płytki,
- $F(w/s)$ - geometryczny współczynnik poprawkowy związany z grubością płytki,
- F_{sp} - współczynnik poprawkowy związany z niejednorodnym rozstawem sond w głowicy,
- D - średnica płytki krzemowej .

Wyznaczone wartości rezystywności należy przeliczyć i przedstawić w odniesieniu do temperatury pokojowej 23 °C. Tak więc:

$$Ro(23) = Ro(T)F_T, \quad (3)$$

$$F_T = 1 - C_T(T - 23), \quad (4)$$

gdzie: F_T jest temperaturowym współczynnikiem poprawkowym, a C_T jest współczynnikiem temperaturowym oporu krzemu przedstawionym w Tabeli 5 zawartej w normie ASTM F 84.

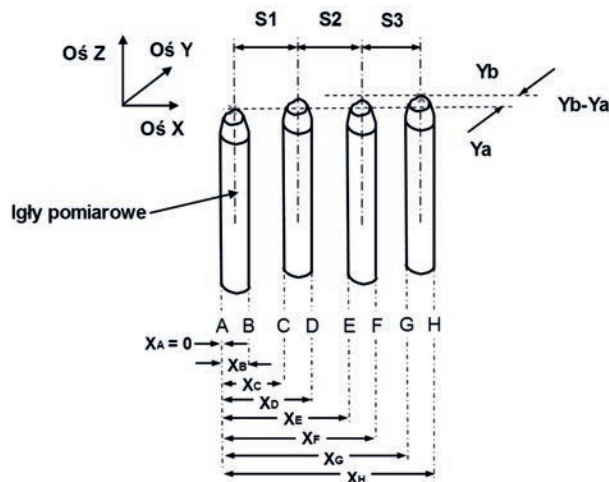
Pomiary rezystancji płytek, które będą wzorcami przy kalibracji układu pomiarowego SR, wykonano co najmniej dziesięciokrotnie, dla dwóch kierunków przepływu prądu elektrycznego w płytce, dla której uprzednio zmierzono grubość. Z tego też miejsca wycięto fragment płytki naklejany na podstawkę (Rys 1).

3.1. Pomiar odległości igieł w sondzie pomiarowej i wyznaczenie wartości współczynnika poprawkowego F_{sp}

Pomiary rezystywności płytek wzorcowych przeprowadzono stosując japońską sondę czteroostrzową f-my Kokusaj Electric model VR 20. Wykorzystano tylko linię pomiaru napięcia przy ustalonej wartości natężenia prądu (V/I). W mierniku zainstalowana jest głowica czteroostrzowa angielskiej f-my Kulicke & Soffa. Igiły wykonane są z węgla wolframu. Promień krzywizny ostrzy wynosi 40 μm , a obciążenie głowicy równe jest 200 g.

W celu oceny sondy i wyznaczenia współczynnika F_{sp} , zgodnie z zaleceniami normy ASTM F 84, wykonano dziesięć opuszczeń głowicy sondy na wypolerowaną płytkę arsenku indu. Materiał ten jest zdecydowanie bardziej miękki niż krzem, tak że igły pozostawiły na płytce wyraźne ślady ostrzy. Efektu takiego nie zaobserwowano dla płytki krzemowej mimo stosowania dużo większych obciążeń głowicy niż zalecane w praktyce pomiarowej. Zmierzono odległości środków igieł wzdłuż osi igieł (oś x) oraz średnie odchylenie igieł w kierunku prostopadłym do osi igieł (oś y) (Rys. 2).

Średnie odchylenie igieł w kierunku osi y wyniosło 0,017 mm, podczas gdy normy ASTM dopuszczają wartość



Rys. 2. Ustawienie igieł w sondzie pomiarowej.
Fig. 2. Needle setup in a 4-point probe.

odchylenia do 0,150 mm. Średnia odległość igieł w głowicy sondy czteroostrzowej $S = 1,0002$ mm, czyli w porównaniu z wartością nominalną 1 mm różnica wynosi 0,02 %. Wynik ten świadczy dobrze o jakości głowicy i jest efektem konstrukcji głowicy, w której igły pomiarowe poruszają się w rubinowych tulejach, zapewniających nawet po długim okresie pomiarów bardzo dobrą powtarzalność odległości między miejscami kontaktu igieł z mierzonym materiałem. Ze wzoru:

$$F_{sp} = 1 + 1,082 [1 - (S2/s)], \quad (5)$$

wyznaczono wartość współczynnika poprawkowego: $F_{sp} = 0,9987$.

3.2. Geometryczne współczynniki poprawkowe $F(w/s)$ i F_2 oraz temperaturowy współczynnik poprawkowy C_T

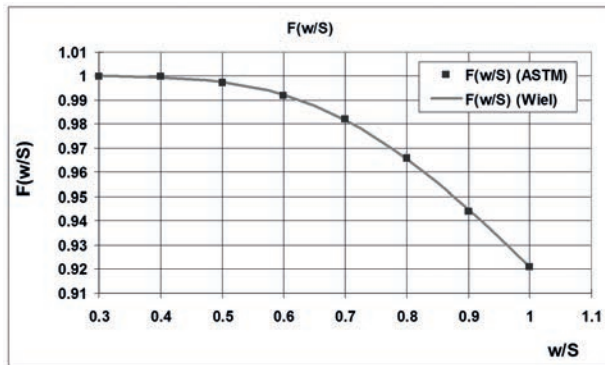
W celu usprawnienia pomiarów rezystywności, przedstawione w normie ASTM F84 tabele z wartościami współczynników poprawkowych przybliżono wielomianami trzeciego lub czwartego stopnia, a w programie Excel opracowano algorytmy do szybkiego przeliczania wyników pomiarowych. Szablony do wydruków danych pomiarowych (dokumentację pomiarową) opracowano zgodnie z zaleceniami przedstawionymi w normie ASTM F84.

Geometryczny współczynnik poprawkowy związany z grubością płytki $F(w/s)$ przybliżono funkcją, która jest wielomianem czwartego stopnia:

$$F(w/s) = A_0 + A_1(w/s) + A_2(w/s)^2 + A_3(w/s)^3 + A_4(w/s)^4, \quad (6)$$

gdzie: $A_0 = 1,0429286$, $A_1 = -0,36289322$, $A_2 = 1,0943182$, $A_3 = -1,3459596$, $A_4 = 0,49242424$.

Wynik tego przybliżenia przedstawiono na Rys. 3.



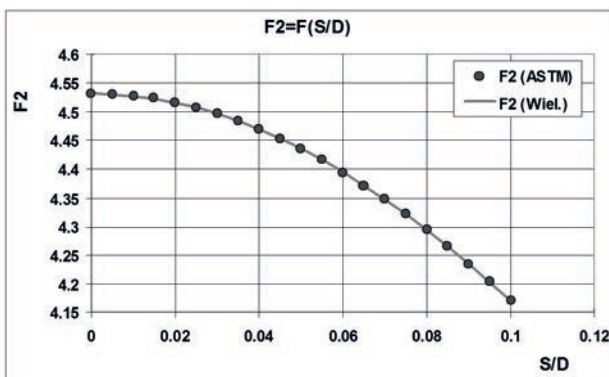
Rys. 3. Geometryczny współczynnik poprawkowy w funkcji w/S .
Fig. 3. Thickness correction factor versus w/S ratio.

Współczynnik poprawkowy związany z średnicą płytki F_2 przybliżono wielomianem trzeciego stopnia:

$$F_2 = A_0 + A_1(w/s) + A_2(w/s)^2 + A_3(w/s)^3, \quad (7)$$

gdzie: $A_0 = 4,531750$, $A_1 = 0,096280942$, $A_2 = -43,342810$, $A_3 = 62,948324$.

Porównanie stabelaryzowanych danych zawartych w normie ASTM F84 z przebiegiem krzywej aproksymującej przedstawia Rys. 4.



Rys. 4. Geometryczny współczynnik poprawkowy w funkcji S/D .
Fig. 4. Correction factor F_2 versus S/D ratio.

Wartości współczynnika temperaturowego oporu krzemu C_T zestawione w tabeli 5 w normie ASTM F 84 nie można było przybliżyć jedną prostą funkcją. W tym przypadku do szybkiego wyliczenia poprawek w arkuszu Excela zastosowano funkcję wyszukiwania (WYSZUKAJ PIONOWO), która dla wstępnie wyznaczonej rezystywności płytki, wyszukuje z pierwszej kolumny tabeli wartość rezystywności i „zwraca” wartość drugiej lub trzeciej kolumny, a więc wartość C_T dla krzemu typu n lub p .

Tak opracowane arkusze kalkulacyjne (osobno dla krzemu typu n i p) umożliwiły z pomiarów U/I przy uwzględnieniu omówionych współczynników poprawkowych, szybkie i bezbłędne wyznaczenie rezystywności w temperaturze pokojowej (23 °C) płytek krzemowych użytych do wykonania wzorców.

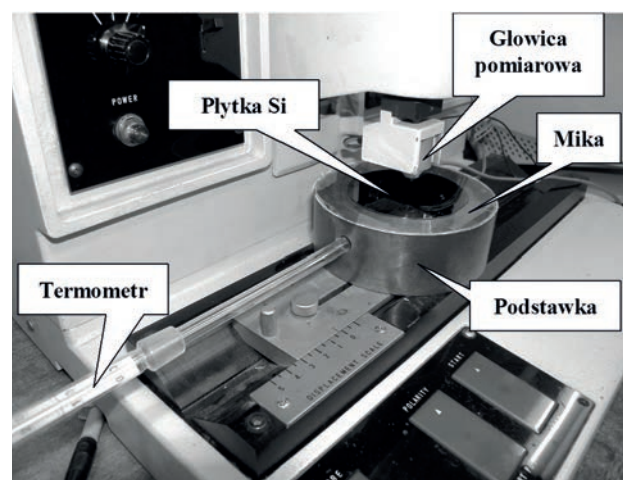
4. Pomiar rezystywności monokrystalicznych wzorców krzemowych

Rezystywność płytek krzemowych zmierzono za pomocą sondy czterostrzowej ze specjalnie do tego celu zainstalowanym i uziemionym metalowym stolikiem pokrytym miką z zamontowanym termometrem (Rys. 5).

Posiadany zestaw wzorców uzupełniony został o wzorce wykonane z krzemu monokrystalicznego: typu n i p o orientacji $\langle 111 \rangle$ oraz $\langle 100 \rangle$ i rezystywnościach od 200 Ωcm do 6000 Ωcm .

Przy takim doborze rezystywności nowe wzorce uzupełniają od strony wyższych rezystywności dotychczasowy zestaw wzorców (*NBS Standard Reference Material*), jakim dysponował Zakład Epitaksji ITME i umożliwiają pomiar profili rezystywności krzemowych warstw epitaksjalnych o wyższych rezystywnościach niż było to dotychczas możliwe.

Po około godzinnym okresie stabilizacji temperatury przeprowadzano pomiar spadku napięcia między wewnętrznymi igłami przepuszczając prąd o stałym natężeniu między zewnętrznymi igłami. Stosowano prąd o najmniejszej możliwej wartości natężenia 0,1 mA. Pomiar przeprowadzano od strony matowej (szlifowanej) płytki. Taka powierzchnia zapewniała z igłami kontakt o mniejszej rezystancji umożliwiającą otrzymanie zbliżonych wartości mierzonego napięcia przy zmianie kierunku przepływu prądu. Płytki mierzone były dziesięciokrotnie przy dwóch polaryzacjach igieł w miejscu, z którego następnie wycinano prostokąty o wymiarach $\sim 5 \times 10$ mm. Za pomocą termometru zainstalowanego w mosiężnym stoliku określano temperaturę pomiaru (Rys. 5) zgodnie z wymaganiami normy ASTM. Rezystywności płytek na wzorce wyznaczono z wykorzystaniem możliwości obliczeniowych arkusza kalkulacyjnego Excel.



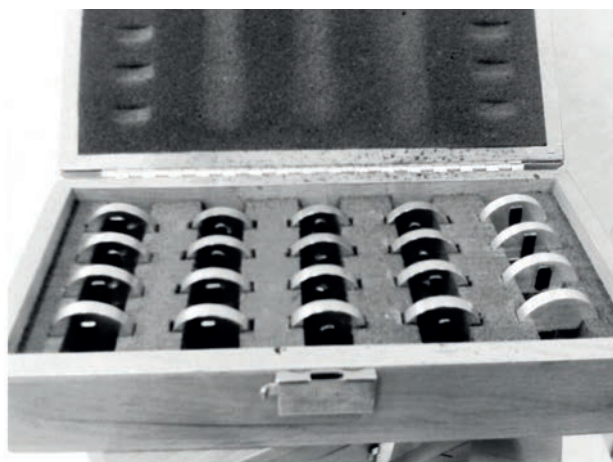
Rys. 5. Metalowy stolik z termometrem do pomiaru rezystywności monokrystalicznych płytek krzemowych.

Fig. 5. Metal table with a thermometer for measurement of the resistivity of silicon monocrystalline wafers.

Nr	Nazwa wzorca	Typ przewod.	Orientacja kryst.	Rezystywność	3 SD [%]
1	1N17	"N"	<111>	757,7	5,22
2	1N18	"N"	<111>	3279	16,1
3	1N19	"N"	<111>	6359	19,3
4	1P17	"P"	<111>	684,0	6,72
5	1P18	"P"	<111>	968,1	6,94
6	1P19	"P"	<111>	4517	5,70
7	0N17	"N"	<100>	542,0	17,9
8	0N18	"N"	<100>	1890	0,69
9	0N19	"N"	<100>	5896	5,39
10	0P17	"P"	<100>	111,9	4,29
11	0P18	"P"	<100>	428,9	3,72
12	0P19	"P"	<100>	3413	8,95
13	0P20	"P"	<100>	6181	6,06

Tab. 1. Zestawienie wykonanych wzorców do kalibracji systemu mierzącego profile rezystywności metodą oporności rozplywu w styku punktowym.

Tab. 1. List of standards made for the calibration of the system for measuring the resistivity profile by the spreading resistance method.



Rys. 6. Pudełko ze wzorcami do kalibracji systemu pomiarowego metodą oporności rozplywu w styku punktowym.

Fig. 6. Box of standards used for the calibration of the system by the spreading resistance method.

Wyniki pomiaru rezystywności przedstawiono w Tab. 1.

Zestaw wzorców wykonanych przez Amerykańskie Biuro Standardów (*NBS Standard Reference Material*) wraz z wzorcami wykonanymi w ITME przedstawiono na Rys. 6. Zdjęcie przedstawia komplet wzorców do pełnej kalibracji systemu dla krzemu typu *n* o orientacji <111>

5. Kalibracja systemu do pomiaru profilu rezystywności warstw epitaksjalnych metodą oporności rozplywu w styku punktowym

Pomiar rezystywności metodą oporności rozplywu w styku punktowym sprowadza się w praktyce do pomiaru rezystancji kontaktu ostrze - półprzewodnik. Rezystywność

próbki jest proporcjonalna do zmierzonej rezystancji, a współczynnikiem proporcjonalności jest wartość promienia efektywnego kontaktu.

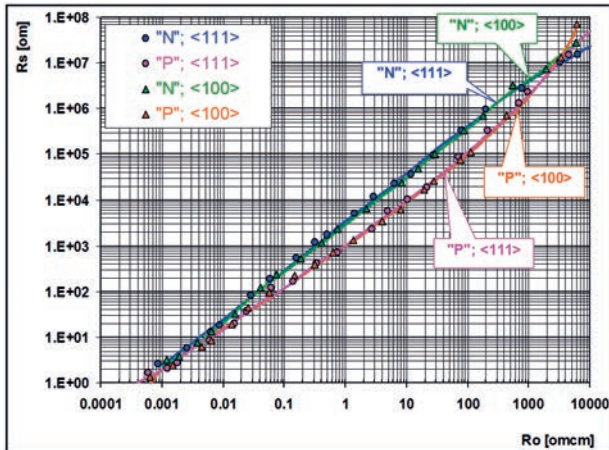
Ze względu na to, że ostrze pomiarowe tworzy z powierzchnią półprzewodnika szereg mikrokontaktów, których część jest omowa, a część prostująca, a ich liczba i stosunek ilościowy zależy od nacisku sond, od stanu mierzonej powierzchni półprzewodnika i promienia ostrza, nie można dokładnie wyliczyć wartości efektywnego promienia kontaktu. Wyznacza się go doświadczalnie poprzez pomiar zależności rezystancji rozplywu od znanej rezystywności wzorcowych płytek krzemowych.

Kalibracja systemu przeprowadzana jest po ustaleniu parametrów warstw, które będą mierzone, a więc typu przewodnictwa i orientacji krystalograficznej.

Kalibracja jak i pomiar powinny przebiegać w tych samych warunkach tj. w tej samej temperaturze, oświetleniu i wilgotności. Wzorce, jak i próbki powinny mieć identycznie przygotowane powierzchnie. Przed pomiarem powierzchnie wzorców odświeża się przez zdjęcie cienkiej warstwy tlenku, który powstaje z biegiem czasu na powierzchni wzorców. System pomiarowy wymaga powtórnego kalibrowania przy każdym uszkodzeniu igieł. Długie pomiary wymagają kontroli kalibracji ze względu na deformację (uklepywanie) igieł i zmianę powierzchni kontaktu igła-półprzewodnik. Ze względu na wpływ orientacji i typu przewodnictwa na twardość krzemu, wymagana jest kalibracja dla obu typów przewodnictwa *n* i *p* oraz orientacji krystalograficznej <111> i <100>.

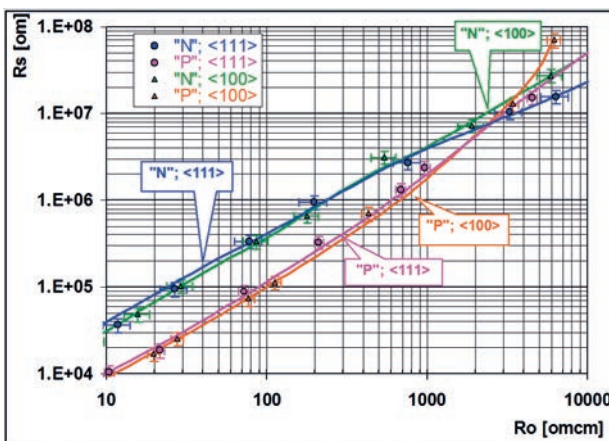
Zgodnie z normą ASTM F 525 krzywe kalibracyjne przybliża się dopasowanym do punktów doświadczalnych wielomianem lub linią łamaną, odcinkowo - prostą, łączącą najbliższe punkty doświadczalne.

Przykładowe krzywe kalibracyjne z uwzględnieniem wykonanych wysokorezystywnych wzorców przedstawiono na Rys. 7 - 8. W tym przypadku punkty doświadczalne przybliżono wielomianem trzeciego stopnia.



Rys. 7. Krzywe kalibracyjne dla dwóch typów przewodnictwa i orientacji. Pełny zakres kalibracji systemu SR.

Fig. 7. Calibration curves for n and p type silicon, with the $\langle 111 \rangle$ and $\langle 100 \rangle$ orientation. Full range of the SR systems calibration.



Rys. 8. Krzywe kalibracyjne dla dwóch typów przewodnictwa i orientacji. Wysokorezystywny zakres kalibracji systemu SR.

Fig. 8. Calibration curves for n and p type silicon, with the $\langle 111 \rangle$ and $\langle 100 \rangle$ orientation. High-resistivity range of the SR systems calibration.

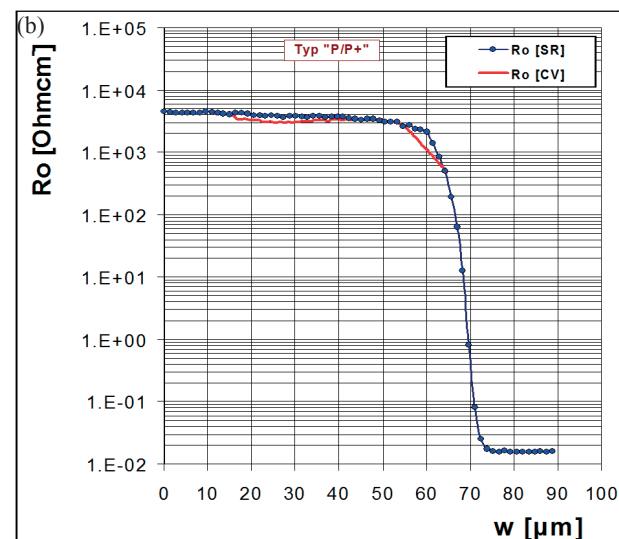
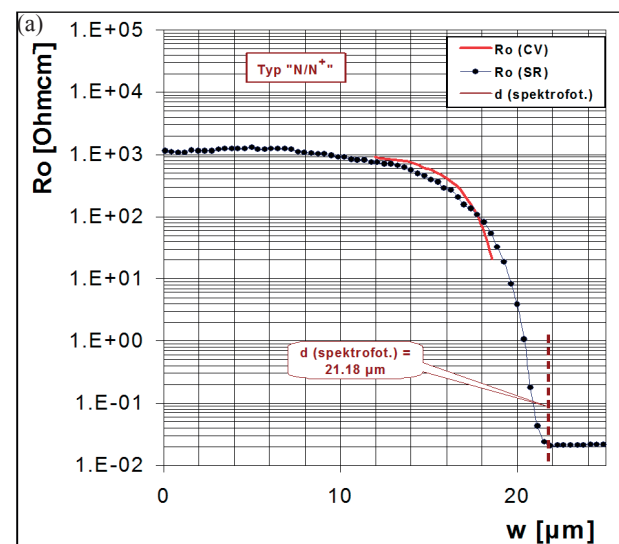
Na Rys. 8 naniesiono błędy pomiarowe rezystancji rozplywu i rezystywności wysokorezystywnych wzorców. Za wartość błędu przyjęto wartość maksymalnego potrójnego standardowego odchylenia pomiarów wartości rezystywności mierzonej za pomocą sondy czterostrzowej, jak i oporności rozplywu w styku punktowym dla poszczególnych typów przewodnictwa, jak i orientacji krystalograficznej. Wielomian trzeciego stopnia najlepiej przybliżył punkty doświadczalne.

6. Pomiar profilu rezystywności w wysokorezystywnych, krzemowych warstwach epitaksjalnych

Na Rys. 9a - 9b przedstawiono wyniki pomiarów profilu rezystywności wysokorezystywnych, krzemowych warstw epitaksjalnych.

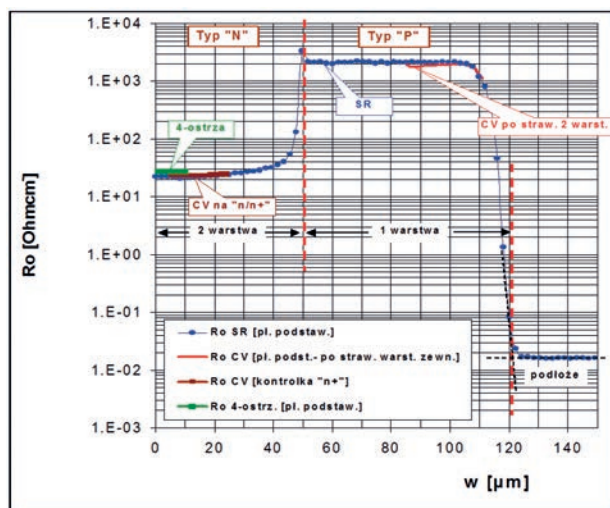
Pomiary wykonano metodą oporności rozplywu w styku punktowym i metodą CV. Przeprowadzono je po kalibracji miernika SR z uwzględnieniem wykonanych wysokorezystywnych wzorców. Do pomiarów rozkładu rezystywności przygotowano krzemowe struktury epitaksjalne z warstwami o takiej grubości, jaka nie wiąże się z koniecznością korygowania zmierzonego profilu rezystywności. W takim przypadku poprawki wynikające z przyjętej metody korekcji są mniejsze niż błąd pomiaru metody SR. Metody korekcji i stosowane procedury korekcyjne przedstawiono np. w pracach [12 - 13].

Na Rys. 10 przedstawiono pomiary profili rezystywności w wysokorezystywnych strukturach wielowarstwowych. Dla warstwy zewnętrznej (warstwa 2) przedstawiono wyniki pomiarów rezystywności metodą czterostrzową, metodą SR oraz wyznaczone z charakterystyki C-V dla struktury kontrolnej typu n/n^+ . Dla warstwy wewnętrznej



Rys. 9a - 9b. Profile rezystywności krzemowych, wysokorezystywnych warstw epitaksjalnych mierzone metodą oporności rozplywu w styku punktowym i metodą CV.

Fig. 9a - 9b. Resistivity profiles of high-resistivity epitaxial layers measured by the SR and CV method.



Rys. 10. Porównanie wyników pomiarów rezystywności w krzemowej wysokorezystywnej strukturze epitaksjalnej typu $n/p/p^+$.
Fig. 10. Comparison of resistivity results for a high-resistivity double-layer epitaxial structure.

nej (warstwa 1) przedstawiono wynik pomiaru profilu rezystywności wykonanego metodą oporności rozplywu w styku punktowym oraz pomiaru metodą CV po strawieniu warstwy zewnętrznej. Wartości rezystywności otrzymane w wyniku pomiarów wspomnianymi metodami wykazują zadawalającą zgodność, to znaczy mieszczą się w granicach błędów metody SR czyli $\pm 15\%$.

8. Podsumowanie

Wykonano wzorce do kalibracji systemu mierzącego metodą oporności w styku punktowym rezystywność krzemowych warstw epitaksjalnych typu n i p o orientacji $\langle 111 \rangle$ i $\langle 100 \rangle$. Wykonane wzorce umożliwiają kalibrację systemu i zapewniają pomiary rozkładu rezystywności krzemowych warstw epitaksjalnych o rezystywności do $10 \text{ k}\Omega\text{cm}$.

Dla przeprowadzenia pomiarów rezystywności metodą sondy czteroostrowej monokrystalicznych płytek krzemowych przeznaczonych do wykonania wzorców dla kalibracji systemu SR wdrożono procedury zawarte w instrukcjach ASTM.

Bibliografia

- [1] Mazur R. G., Dickey D. H.: Spreading resistance technique for resistivity measurements on silicon, *J. Electrochem. Soc.*, 1966, 113, 255 - 259
- [2] Morris B. L.: Some device applications of spre-

ading resistance measurements on epitaxial silicon, *J. Electrochem. Soc.*, 1974, 121, 422 - 426

- [3] Standard Test Method for Measuring Resistivity of Silicon Wafers Using a Spreading Resistance Probe, *Annual Book of ASTM Standards*, 1996, vol 10.05
- [4] Standard Test Method for Measuring Resistivity Profiles Perpendicular to the Surface of a Silicon Wafer Using a Spreading Resistance Probe, *Annual Book of ASTM Standards*, 1996, vol 10.05
- [5] Calvo D., De Remigis P., Osmic F., Riedler F., Stefanini G., Wheadon R.: Thinned epitaxial silicon hybrid pixel sensors for PANDA experiment, *Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A*, 2008, 594, 29 - 32
- [6] Kaska K., Moll M., Fahrner M., Study on $150 \mu\text{m}$ thick n - and p - type epitaxial silicon sensors irradiated with 24 GeV/c protons and 1 MeV neutrons, *Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A*, 2010, 612, 482 - 487
- [7] Khomenkov V., Bisello D., Bruzzi M., Candelori A., Litovchenko A., Piemonte C., Rando R., Ravotti F., Zorzi N.: Irradiation effects on thin epitaxial silicon detectors, *Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A*, 2006, 568, 61 - 66
- [8] Lindström G., Fretwurst E., Hönniger F., Kramberger G., Möller-Ivens M., Pintilie I., Schramm A., Radiation tolerance of epitaxial silicon detectors at very large proton fluences, *Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A*, 2006, 556, 451 - 458
- [9] Węgrzecki M., Bar J., Budzyński T., Cież M., Grabiec P., Kozłowski R., Kulawik J., Panas A., Sarnecki J., Słysz W., Szmigiel D., Węgrzecka I., Wielunski M., Witek K., Yakushev A., Zaborowski M.: Design and properties of silicon charged-particle detectors developed at the Institute of Electron Technology (ITE), *Proc. of SPIE*, vol. 8902 890212
- [10] Węgrzecka I., Panas A., Bar J., Budzyński T., Grabiec P., Kozłowski R., Sarnecki J., Słysz W., Szmigiel D., Węgrzecki, M., Zaborowski M.: Technology of silicon charged-particle detectors developed at the Institute of Electron Technology (ITE), *Proc. of SPIE*, vol. 8902 890211
- [11] Standard Test Method for Measuring Resistivity of Silicon Wafers With an in-Line Four-Point Probe, *Annual Book of ASTM Standards*, 1996, vol. 10.05
- [12] Pułtorak J., Sikorski S., Piotrowski T.: Metodyka pomiaru rozkładu rezystywności krzemu poprzez pomiar rezystancji rozplywu. *Prace Instytutu Technologii Elektronicznej CEMI*, 1990, 2, 1 - 11
- [13] Brzozowski A., Oczkiewicz B.: Korekcja profilu rezystywności przy wykorzystaniu metody rezystancji rozplywu, *Materiały Elektroniczne*, 1987, 2, 37 - 45