

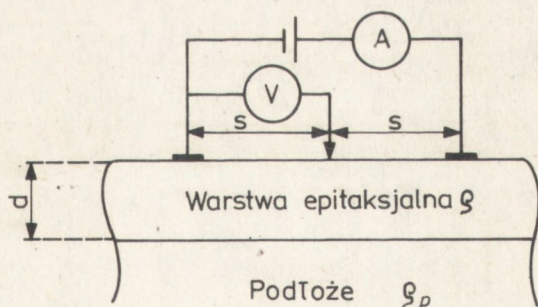
## Korekcja profilu rezystywności przy wykorzystaniu metody rezystancji rozplywu

### 1. WSTĘP

Do pomiaru rezystywności krzemowych warstw epitaksjalnych wykorzystuje się następujące metody: pomiar sondą czterostrzową, pomiar oporu rozplywu w styku punktowym oraz metody oparte na charakterystykach C-V. Spośród tych metod metoda pomiaru oporu rozplywu w styku punktowym jest szczególnie użyteczna i stwarza najszersze możliwości: pozwala na pomiar rozkładu rezystywności w całej strukturze epitaksjalnej - od podłoża do jej powierzchni, bez względu na typ przewodnictwa, grubość i rezystywność poszczególnych obszarów warstwy epitaksjalnej. Jest to jedyna metoda pozwalająca na pomiar rozkładu rezystywności w strukturach epitaksjalnych typu  $p^+/p/n$  lub  $n^+/n/p$ , znajdujących ostatnio szerokie zastosowanie do produkcji przyrządów półprzewodnikowych.

Dodatkową zaletą tej metody jest mały obszar wnikania pola elektrycznego, co powoduje, że w pojedynczym pomiarze bierze udział mały obszar materiału. Daje to możliwość dokładniejszego wyznaczania rozkładu rezystywności wzdłuż i w głąb warstwy.

Schemat metody pomiarowej przy użyciu sondy trójstrzowej dla warstwy o jednorodnej rezystywności nałożonej na podłoże o innej rezystywności został przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Schemat układu do pomiaru rezystancji rozplywu metodą trójsondową

Spadek potencjału w przedstawionym układzie wyraża się wzorem:

$$U = \frac{I \rho_w F}{4a} \quad /1/$$

gdzie:  $I$  - natężenie prądu,

$\rho_w$  - rezystywność warstwy

$a$  - efektywny promień sondy

$F$  - współczynnik korekcji, będący funkcją grubości warstwy ( $d$ ), odstępów sond ( $s$ ), efektywnego promienia ostrza ( $a$ ) oraz rezystywności podłoża ( $\rho_p$ )

Wzór /1/ jest słuszny przy spełnionych założeniach:

- 1/ Kontakt metal-półprzewodnik jest kontaktem omowym o małej rezystywności.
- 2/ Wydzielające się na skutek przepływu prądu przez styk ciepło Joule'a nie powoduje zmian rezystywności.
- 3/ Powierzchnia kontaktu metal-półprzewodnik jest powtarzalna podczas pomiarów [17].

Powyższe założenia są spełnione, jeśli przyłożone napięcie będzie dostatecznie małe (15 mV), a ostrze pomiarowe wykonane jest z materiału nie ulegającego łatwo deformacjom.

Określenie rozkładu rezystywności w głąb warstwy odbywa się na szlifach skośnych. Zmierzony w ten sposób profil rezystancji rozplywu należy następnie przetworzyć na profil lokalnej rezystywności (czyli dokonać korekcji).

Teoretyczne podstawy wyliczania współczynnika korekcji  $F$  dla pomiaru rezystywności warstwy półprzewodnikowej nałożonej na podłoże o innej rezystywności podali Schuman i Gardner [1, 2]. Metody wyliczenia współczynnika korekcji przedstawili autorzy prac [3, 4, 5, 6, 7]. Szybką, uproszczoną metodę korekcji rezystywności dla złącz typu p-n podano w pracy [8], a dla złącz l-h i złącz z barierą izolującą w pracy [9]. Porównanie metod korekcji pomiarów zaproponowane przez P.A. Schumana i E.E. Gardniera oraz przez D.H. Dickey'a [10] przedstawiono w pracach [11, 12, 13].

W niniejszej pracy zastosowano metodę korekcyjną zaproponowaną przez Schumana i Gardniera. Zaproponowany został program realizujący korekcję profilu oraz przedyskutowano warunki, przy których procedura korekcyjna pozwala uzyskać profile zbliżone do rzeczywistych. Jako przykład zastosowania tej metody wyznaczono profile rezystywności dla różnych struktur epitaksjalnych.

## 2. KOREKCJA POMIARU PROFILU REZYSTYWNOCI WARSTW EPITAKSJALNYCH

Schuman i Gardner podali analityczną postać wzoru określającego wartość współczynnika korekcyjnego  $F$  dla trójsondowej metody pomiarowej przedstawionej na rys. 1:

$$F = \frac{4}{\pi} \int_0^{\infty} A \left( \frac{J_1/t/}{t^2} + \frac{J_0/S \cdot t/}{2t} - \frac{J_0/0,5S \cdot t/}{t} \right) \sin(t) dt \quad /2/$$

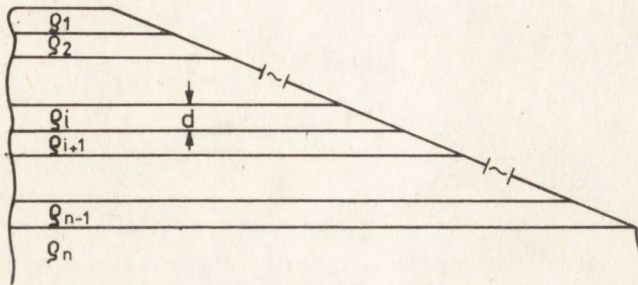
gdzie:  $S = \frac{2 \cdot s}{a}$

$A = f(s, a, d, \rho, p)$

$s$  - odległość sond pomiarowych

$a$  - efektywny promień kontaktu

$d$  - grubość warstwy.



Rys. 2. Schemat wielowarstwowego przybliżenia materiału o zmiennej rezystywności

Przedstawiony przez nich model pozwala na korekcję profilu rezystywności warstwy na szlifie skośnym przy podziale warstwy na szereg jednorodnych warstwek (rys. 2), przy spełnionych założeniach:

- wszystkie warstwy są tego samego typu przewodnictwa, a dla złączeń p-n przyjmuje się  $\rho$  podłoża =  $\rho$
- rezystywność każdej z warstw jest stała,
- pomijalne są efekty styku warstwek o różnych rezystywnościach, na granicach między warstwami spełnione jest prawo Laplace'a,
- rozptyw prądu przy kontakcie metal-półprzewodnik może być modelowany rozkładem pola elektrostatycznego.

Przy opracowywaniu programu korekcyjnego na EMC przyjęto iteracyjną metodę zaproponowaną przez Choo, Leanga i Kuana [14]. W metodzie tej w kolejnych iteracjach dobiera się tak wartość korygowanej rezystywności i-tej warstwy, aby uzyskać zamierzony spadek napięcia na sondach. W tym celu włączyli oni korygowaną rezystywność i-tej warstwy pod całkę czynnika korekcyjnego.

$$U_i = \frac{I}{4a} \int_0^{\infty} T_i R dt \quad /3/$$

gdzie:

$$R = \frac{J_1(t)}{t^2} + \frac{J_0(S \cdot t)}{2t} - \frac{J_0(0,5S \cdot t)}{t}$$

$$T_i = \rho_i A_i = \frac{W \cdot \rho_i + T_{i+1}}{1 + W \frac{T_{i+1}}{\rho_i}} \quad /4/$$

$$W = \frac{1 - \exp\left(\frac{-2t d}{a}\right)}{1 + \exp\left(\frac{-2t d}{a}\right)} \quad /5/$$

$$T_n = \rho_n = \rho \text{ podłoża}$$

$$i = n-1, n-2, \dots, 2, 1$$

Korekcja profilu rozpoczyna się od rezystywności podłoża, która nie jest korygowana.

W przypadku struktury wielowarstwowej ze złączami p-n należy ją podzielić na obszary jednego typu rezystywności i korygować je oddzielnie.

### 3. PROGRAM OBLICZENIOWY

Opisany program obliczeniowy został przystosowany do EMC o pamięci nie mniejszej niż 64k. Jest on napisany w języku FORTRAN IV, w wersji realizowanej przez maszyny IBM-360 i RIAD. Program składa się z dziesięciu bloków realizujących kolejno następujące funkcje:

1. Czyta parametry sond: odstęp sond (ss) oraz efektywny promień sondy (as).
2. Zgodnie z procedurą zawartą w pracy [4], obszar zmiennej podcałkowej t ze wzoru /3/ został podzielony na trzy zakresy i w węzłach całkowania t<sub>j</sub> wyliczany jest następujący wektor:

$$R_j = \left( \frac{J_1/t_j}{t_j} + \frac{J_0/S \cdot t_j}{2} - J_0/0,5 S t_j \right) \frac{\sin/t_j}{t_j} \quad /8/$$

3. Wczytuje dane: ilość punktów pomiarowych (ILP), skok sondy (SKOK), tangens kąta nachylenia (TNG) oraz zmienne logiczne określające typ rezystywności warstwy (TYP) i decydujące o ewentualnym wygładzeniu danych (WGL).
4. Czyta macierz danych punktów pomiarowych DAN(i) i przelicza je na nieskorygowane rezystywności  $\rho_{pi}$ :

$$\rho_{pi} = 4a \frac{U}{I}$$

5. Przy wartości TRUE zmiennej WGL wygładza dane. Wygładzenie danych realizowane jest przez procedurę WYGPARG metodą pięciopunktową.
6. W węzłach całkowania t<sub>j</sub> wylicza wektor:

$$W_j = \frac{1 - \exp\left(\frac{-2d t_j}{a}\right)}{1 + \exp\left(\frac{-2d t_j}{a}\right)}$$

7. Program wykonuje korekcję wartości kolejnych punktów doświadczalnych (metoda iteracyjna), zaczynając od drugiego:
- w węzłach całkowania  $t_j$  wylicza macierz:

$$T_j = \frac{T'_j + W_j \varphi_{i+1}}{1 + \frac{W_j T'_j}{\varphi_{i+1}}}$$

gdzie:  $T'_j$  - poprzednia wartość  $T_j$ ,  
 $\varphi_{i+1}$  - skorygowana rezystywność  $i+1$ -punktu; dla drugiego punktu (pierwszego korygowanego) przyjęto:

$$T'_j = \varphi_{pn} = \varphi \text{ podłoża}$$

- ustala krok iteracji XDR
- iteracyjnie poszukuje punktu zerowego funkcji

$$FCR(\varphi)_i = \int_0^{\infty} TWR(t) dt - \varphi_{pi}$$

przy czym procedura realizująca całkowanie (CORF) wylicza dla każdej iteracji wektor

$$TWR_j = \frac{W_j \varphi_i + T_j}{1 + \frac{W_j T_j}{\varphi_i}} R_j$$

gdzie:  $\varphi_i$  jest aktualną wartością rezystywności  $i$ -tej warstwy w trakcie iteracji.

Iteracja jest prowadzona przez procedurę REGULA, wykorzystującą metodę szukania zer funkcji jednej zmiennej [15]. Dla uniknięcia przejścia na ujemne wartości, rezystywność jest zapisana w postaci wykładniczej.

8. Przelicza macierz nieskorygowanych i skorygowanych rezystywności na koncentrację domieszki za pomocą procedury SEV wykorzystując aproksymację Severina [16].
9. Drukuje dane i wyniki.
10. Czyta zmienne logiczne KON i ZMN sterujące dalszą pracą programu. Jeśli zmienna KON ma wartość FALSE, program kończy obliczenia. Dla wartości TRUE rozpoczyna korekcję dla następnego zbioru danych (od punktu 1. programu dla wartości TRUE zmiennej ZMN, a od punktu 3. w sytuacji przeciwnej).

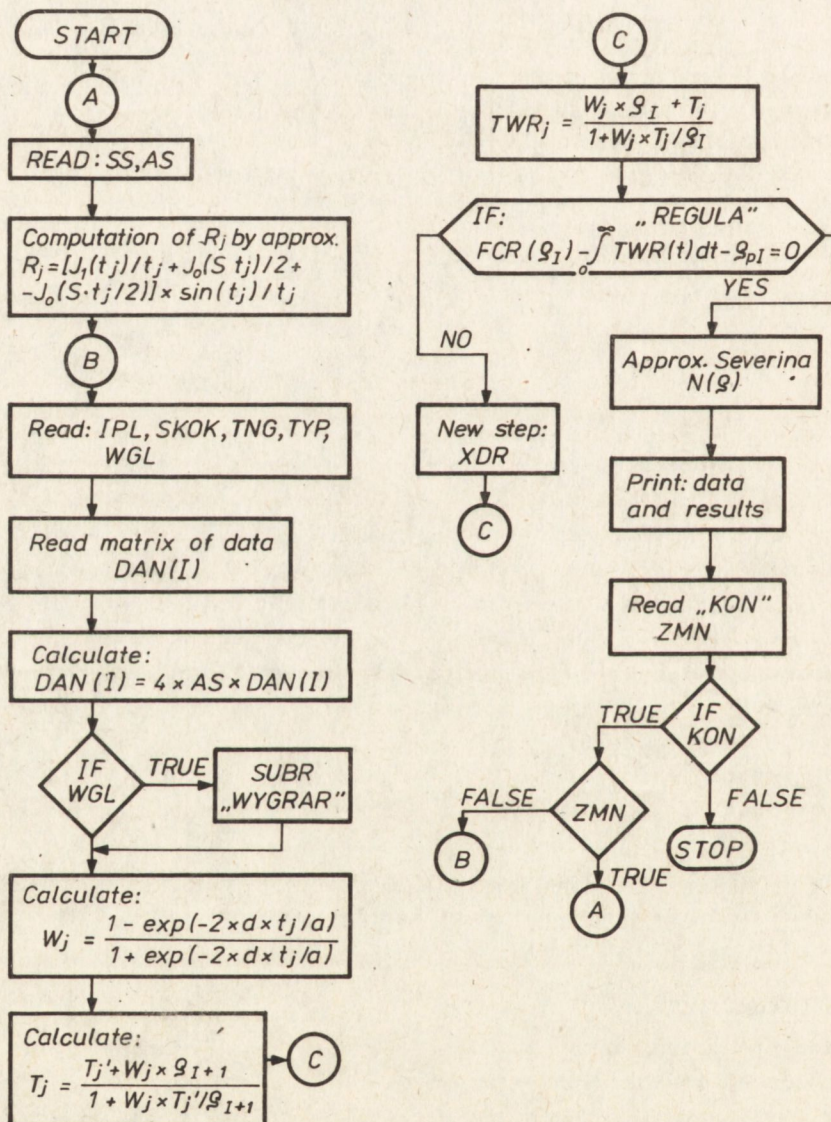
#### 4. CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Pomiary rezystancji rozplywu przeprowadzono na krzemowych warstwach epitaksjalnych (osadzonych na niskorezystywnym podłożu) ze szlifem skośnym, wykonanym za pomocą pasty diamentowej o gradacji ziarna  $0+1 \mu\text{m}$ .

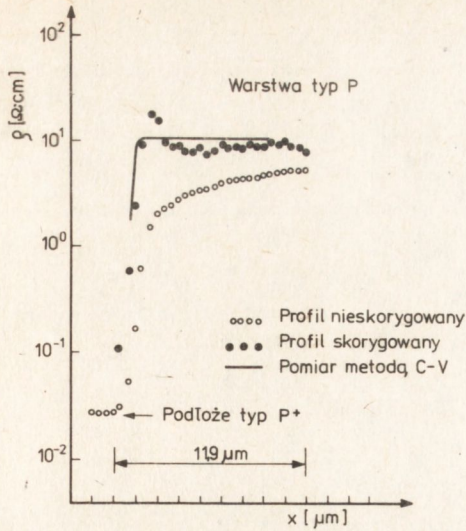
Profil rezystancji rozplýwu mierzono na automatycznym profilografie, w którym dwa boczne kontakty omowe na płytce tworzył naniesiony stop galu z cynkiem. Sondą pomiarową było ostrze z węgliku wolframu o promieniu krzywizny około 5  $\mu\text{m}$ . Miernik wycechowano na grubych krzemowych płytkach monokrystalicznych, na których rezystywność wyznaczano metodą sondy czterostrzowej. Krzywe cechowania  $R_s = R_s(\varphi)$  przybliżono wielomianem trzeciego stopnia.

Ponieważ metodą rezystywności rozplýwu jest niszcząca, pomiary nie mogą być powtarzane dokładnie w tym samym punkcie. Powtarzalność wyników sprawdzano na dwóch równoległych ścieżkach odległych o około 50  $\mu\text{m}$ .

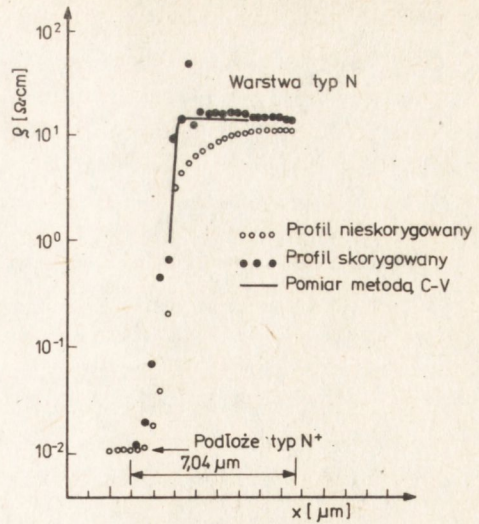
Algorytm programu korekcyjnego



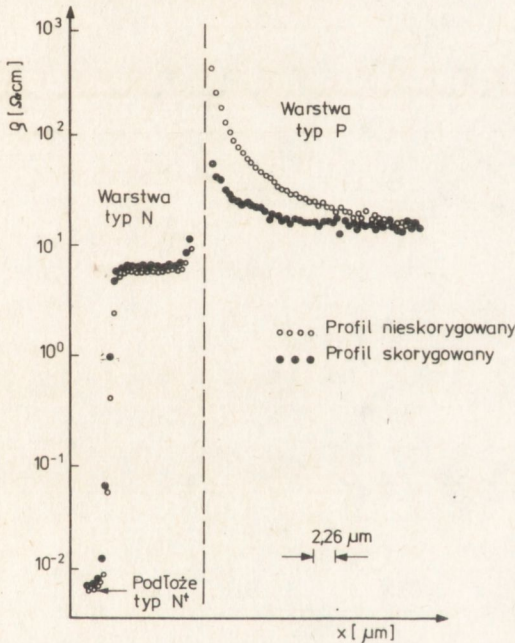
Rys. 3. Algorytm programu korekcyjnego



Rys. 4. Profil rezystywności warstwy epitaksjalnej p/p<sup>+</sup>



Rys. 5. Profil rezystywności warstwy epitaksjalnej n/n<sup>+</sup>



Rys. 6. Profil rezystywności wielowarstwowej struktury epitaksjalnej p/n/n<sup>+</sup>

Otrzymane profile rezystancji rozplýwu były wygładzane przez program korygujący.

Korekcje profili wykonano na komputerze IBM-360. Obliczone zostały czynniki korekcyjne, przy wartości stosunku  $s/a=600$ . Dla porównania wyników, na badanych płytkach zmierzono rozkład koncentracji metodą C-V przy użyciu sondy rtęciowej. Zmierzone oraz skorygowane profile rezystywności otrzymane metodą rozplýwu, oraz dla porównania profile z pomiarów C-V dla warstwy typu p przedstawiono na rys. 4, natomiast dla warstwy typu n na rys. 5. Na rys. 6 przedstawiono pomiary rezystancji rozplýwu na warstwie epitaksjalnej ze złączem izolującym p-n.

## 5. OMÓWIENIE WYNIKÓW

Porównanie profili rezystywności otrzymanych metodą rezystancji rozplýwu z wynikami metody C-V (w obszarach, gdzie pomiary C-V są możliwe) pozwalają stwierdzi, że zastosowana metoda korekcyjna w znacznym stopniu eliminuje systematyczny błąd pomiaru rezystywności, wynikający z różnej rezystywności podłoża. Największe różnice między wynikami stosowanych dwu metod występują na granicy podłoże-warstwa, gdzie gradient koncentracji domieszek oraz rezystywności jest bardzo duży.

Na błąd wyznaczanego metod rozplýwu profilu rezystancji wpływ mają takie czynniki:

- dokładność kalibracji  $R_s(\varphi)$ ,
- powtarzalność stanu powierzchni,
- dokładność pomiaru głębokości złączka,
- poprawność procedury korekcyjnej.

Głębokość złączka "z" wyznacza się na podstawie pomiar kąta szlif. Błąd wyznaczenia szacuje się na podstawie wzoru:

$$\delta_z = (0,05z + 0,1) \mu\text{m}$$

gdzie pierwszy składnik wynika z błędu wyznaczenia kąta szlif, a drugi odpowiada błędowi w określeniu krawędzi szlif. Dla przedstawionych wynik błąd w wyznaczeniu krawędzi złączka oszacowany został na około 6%.

Powtarzalność pomiar rezystancji rozplýwu dla  $\varrho < 5 \Omega \text{ cm}$  jest rzędu 5%. Przy wyższych opornościach większy wpływ wywiera jakość powierzchni (np. zaadsorbowane na powierzchni cząsteczki wody). Dokładność przedstawionych pomiar rezystancji rozplýwu szacuje się na 10%. Dla warstw ze zczkiem izolującym błąd ten może być większy.

Błąd w wyznaczeniu promienia efektywnego oszacowany został na 1-10%.

Omówione dotychczas przyczyny błędów dotyczą w różnym stopniu całego zakresu pomiarowego. Inna sytuacja zachodzi dla błędów wynikających z korekcji. J. Albertson [17] sugerowa, że miar błędu czynnika korekcji jest zmiana rezystywności na drodze rwej połowie grubości warstwy.

$$\frac{\varrho(x) - \varrho(x-d/2)}{\varrho(x)}$$

Czynniki korekcyjne zawierają więc systematyczne błędy wynikające z dyskretyzacji ośrodka, bdcego w rzeczywistości ośrodkiem ciągłym. Powoduje to, że dla warstw epitaksjalnych największe błędy w wartościach korygowanej rezystywności zachodzą w obszarze przejcia podłoże-warstwa, gdzie występuje duży gradient rezystywności. Widoczne jest to na rys. 4 i 5 jako zawiszenie rezystywności w obszarze przejcia. Poniew przy korekcji i-1-punktu korzysta się z wartości skorygowanej  $\varrho_1$ , błędy są przenoszone na kolejne punkty.

Przedstawiona metoda jest bardzo czuła na błędy wejściowych danych rezystywności, wynikające np. z niedoskonałości powierzchni. Dlatego



istotne jest "wygładzenie" wyników, nawet jeśli wizualnie układają się one na jednej krzywej. Należy jednak pamiętać, że zbyt intensywne wygładzanie powoduje utratę informacji o rzeczywistym rozkładzie rezystywności w próbce.

## 6. WNIOSKI

1. Opracowany został program korekcji profili rezystywności (mierzonych metodą rezystancji rozprężu na szlifach skośnych). Zmierzone i skorygowane profile testowane były przez porównanie z profilami rezystywności otrzymanymi z metody C-V (w zakresie, w którym pomiary C-V są możliwe). Wyniki obu metod były w dużym stopniu zgodne.  
Stwierdzono, że w obszarach, gdzie gradient rezystywności jest duży, w skorygowanych profilach mogą występować nieznaczne efekty przekorygowania. Dla wyeliminowania tych efektów proponuje się, w miarę możliwości, zagęszczenie punktów pomiarowych na szlifie.
2. Zastosowanie przedstawionej metody pozwala wyznaczać zbliżone do rzeczywistych profile rezystywności w głąb wielowarstwowych struktur epitaksjalnych. Dla wielowarstwowych struktur epitaksjalnych z barierą izolującą metoda ta staje się jedyną umożliwiającą wyznaczenie pełnego i poprawnego profilu rezystywności.

## LITERATURA

1. Schuman P.A., Gardner E.E.: "Sol. St. Electron." 12.37 /1969/
2. Schuman P.A., Gardner E.E.: "J. Electrochem. Soc." 116.87 /1969/
3. Yeh T.H., Khkokhani K.H.: "J. Electrochem. Soc." 116.1461 /1969/
4. Hu S.M.: "Sol. St. Electron." 15s.809 /1972/
5. Bernard E.: "J. Electrochem. Soc." 121.442 /1974/
6. Lee G.A.: "Spreading Res. Symposium, Proceedings of a Symposium Held at NBS" Gaithersburg, Jun. 13-14 /1974/
7. Choo S.C., Leong M.S., Kuan K.L.: "Sol. St. Electrochem. Soc." 1751 /1976/
8. Kudeh O., Uda K., Ikushima Y., Kamoshida M.: "J. Electrochem Soc." 1751 /1976/
9. Morris B.L., Langer P.H. - jak w poz. 6
10. Dickey D.H., Ehrstein I.R.: NBS Special Pub. 400-48 pp15-18 /1979/
11. Alberts J.: "J. Electrochem Soc." vol. 127, No. 10 /1980/
12. Alberts J.: "J. Electrochem. Soc." vol. 129 No. 3 /1982/
13. Alberts J.: "Sol. St. Electron." vol. 23, 1197-1205 /1980/
14. Choo S.C., Leong M.S., Kuan K.L.: "Sol. St. Electron." 19.561 /1976/
15. Scheid F.: "Theory and Problems of Numerical Analysis" Mo. Grow-Hill Book Co. New York /1968/
16. Severin I.C.: "Bell Sys. Technol. J." 41. 387 /1962/
17. Brzozowski A., Tomaszewski J.: "Materiały Elektron." 3/4 /35/36/ /1981/

(Tekst dostarczony 1987.04.15)