

Wyznaczanie rezystancji powierzchniowej warstwy emiterowej ogniwa słonecznego z wykorzystaniem efektywnych wartości współczynnika dyfuzji niezależnego od koncentracji domieszki

Streszczenie. W niniejszym artykule poddano weryfikacji wyznaczone przez autorów efektywne wartości współczynnika dyfuzji fosforu w krzemie. W ramach przeprowadzonych badań, w różnych temperaturach procesu domieszkowania dyfuzyjnego, wytworzono warstwy emiterowe na podłożach krzemowych a następnie dokonano pomiarów rezystancji powierzchniowej. W kolejnym etapie wyniki pomiarów porównano z wartościami obliczonymi z wykorzystaniem efektywnych wartości współczynnika dyfuzji.

Abstract. In this paper was verified effective diffusion coefficient of phosphorus in silicon. As part of the research have been produced emitter layers on silicon wafers and then sheet resistance were measured. In a next step the measurement results are compared with the values calculated using the effective diffusion coefficient. (Determination of the sheet resistance of solar cell emitter layer using effective concentration-independent diffusion coefficient).

Słowa kluczowe: ogniwo słoneczne, warstwa emiterowa, rezystancja powierzchniowa, domieszkowanie dyfuzyjne.

Keywords: solar cell, emitter layer, sheet resistance, diffusion doping.

Wprowadzenie

Jednym z podstawowych etapów produkcji krystalicznego, krzemowego ogniwa słonecznego jest wytworzenie warstwy emiterowej. Najczęściej dokonuje się tego w procesie domieszkowania dyfuzyjnego. Wytworzona warstwa emiterowa powinna zapewnić możliwość konwersji fotowoltaicznej na najwyższym możliwym poziomie, przy czym etap wytwarzania warstwy emiterowej musi uwzględniać konieczność wytworzenia kontaktów elektrycznych pozwalających na przepływ wygenerowanego prądu. W ramach przeprowadzonych badań wytworzono warstwy emiterowe z wykorzystaniem rozwirowywanych szkliv domieszkowych wytworzonych według procedury opisanej w [1]. Badania nad domieszkowaniem dyfuzyjnym warstwy emiterowej ogniwa słonecznego z wykorzystaniem szkliv rozwirowywanych są prowadzone w wielu ośrodkach [2, 3, 4, 5] i dlatego autorzy zdecydowali się na wykorzystywane właśnie tego rodzaju źródła domieszki. Po etapie domieszkowania dyfuzyjnego usunięto szklivo i dokonano pomiarów rezystancji powierzchniowej warstw emiterowych. Z drugiej strony wykonano obliczenia rezystancji na podstawie profili koncentracji wyznaczonych z wykorzystaniem efektywnych wartości współczynnika dyfuzji [6].

Tabela 1. Średnia rezystancja powierzchniowa R_s [Ω/\square] wytworzonych warstw emiterowych

Czas procesu dyfuzji [min.]	Temperatura procesu dyfuzji [°C]						
	900	910	920	930	940	950	960
5	39,2	35,8	27,7	22,7	23,7	18,2	17,5
10	21,7	19,6	16,4	14,1	13,5	11,6	11,4

Warunki wytwarzania warstwy emiterowej ogniwa słonecznego

Warstwy emiterowe ogniwa słonecznych wytworzono z wykorzystaniem roztworów domieszkowych opartych na kwasie ortofosforowym, tetraetoksylian, etanolu i wodzie [1]. Roztwór domieszkowy nanoszono na płytki krzemu monokrystalicznego metodą rozwirowania (spin-on), a następnie suszono przez 20 minut w temperaturze 250°C. Domieszkowanie dyfuzyjne z tak uformowanej warstwy domieszki przeprowadzono w temperaturach: 900°C, 910°C, 920°C, 930°C, 940°C, 950°C i 960°C. Czasy procesu wynosiły: 5 oraz 10 minut. Pomiary rezystancji powierzchniowej zostały wykonane z wykorzystaniem stacjonarnej sondy czterostrzowej (zestaw urządzeń:

ResTest™ 2208 i ResTest™ 2101) a uśrednione wyniki umieszczono w tabeli 1.

Model matematyczny wykorzystywany w obliczeniach

Ze względu na fakt, że wytworzone warstwy emiterowe można traktować jako struktury płaskorównoległe to proces domieszkowania dyfuzyjnego można traktować jako jednowymiarowy i opisać go drugim równaniem Ficka w postaci [7]:

$$(1) \quad \frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial N}{\partial x} \right)$$

gdzie: N – koncentracja atomów domieszki, t – czas, D – współczynnik dyfuzji.

W niniejszych rozważaniach przyjęto niezależność współczynnika dyfuzji od koncentracji domieszki:

$$(2) \quad \frac{\partial D}{\partial x} = 0$$

co pozwala zapisać równanie (1) w postaci:

$$(3) \quad \frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}$$

Zakładając, że w czasie procesu domieszkowania dyfuzyjnego warstwy emiterowej ogniwa są spełnione następujące warunki:

- koncentracja na powierzchni półprzewodnika jest stała w czasie trwania procesu dyfuzji,
- koncentracja początkowa we wnętrzu półprzewodnika jest mała w porównaniu z koncentracją na powierzchni, to profil koncentracji dyfundowanej domieszki można opisać zależnością [7]:

$$(4) \quad N(x, t) = N_s \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

gdzie: N_s – koncentracja atomów domieszki na powierzchni półprzewodnika, erfc – uzupełniająca funkcja błęd.

W kolejnym kroku obliczeń przyjęto współczynnik dyfuzji z efektywnymi wartościami dyfuzyjności i energii aktywacji [1]:

$$(5) \quad D = D_{0ef} \cdot \exp\left(\frac{-E_{Aef}}{kT}\right) = 2,64 \cdot 10^{-6} [m^2 / s] \cdot \exp\left(\frac{-2,63 [eV]}{kT}\right)$$

gdzie: D_{0ef} – efektywna dyfuzyjność, E_{Aef} – efektywna energia aktywacji.

Rezystancję powierzchniową R_S warstwy emiterowej wyznaczono na podstawie zależności [8]:

$$(6) \quad R_S = \frac{1}{q \cdot \int_0^{x_j} N(x) \cdot \mu_n(x) dx}$$

gdzie: x_j – głębokość położenia złącza, μ_n – ruchliwość elektronów, q – ładunek elektronu.

Ruchliwość elektronów można obliczyć z zależności [9]:

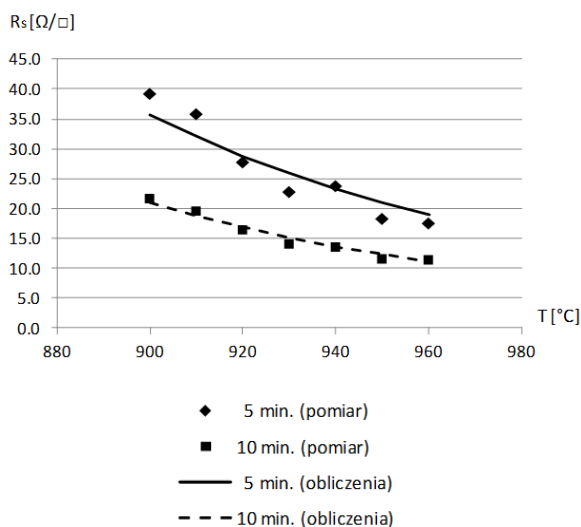
$$(7) \quad \mu_n(x) = 0.0092 + \frac{0.1268}{1 + \left(\frac{N(x)}{1.3 \cdot 10^{23}} \right)^{0.91}}$$

Tabela 2. Rezystancja powierzchniowa R_S [Ω/\square] obliczona na podstawie wzorów 1-7

Czas procesu dyfuzji [min.]	Temperatura procesu dyfuzji [$^{\circ}\text{C}$]						
	900	910	920	930	940	950	960
5	35,8	32,0	28,8	25,9	23,3	21,0	19,0
10	20,9	18,8	16,8	15,1	13,6	12,3	11,1

Porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń

Wyniki pomiarów rezystancji powierzchniowej wytworzonych struktur oraz wartości wyznaczone na podstawie wyżej przedstawionych wzorów umieszczono na rysunku 1.



Rys. 1. Zależność średniej wartości rezystancji powierzchniowej R_S od temperatury T procesu domieszkowania dyfuzyjnego

W przypadku serii próbek wykonywanych dla czasu 10 minut uzyskano bardzo dobrą zgodność pomiędzy eksperymentem a obliczeniami. W przypadku procesów przeprowadzonych w czasie 5 minut różnice pomiędzy eksperymentem a obliczeniami są znacznie większe jednak wydają się możliwe do zaakceptowania.

Podsumowanie

Ze względu na fakt, że pomiar rezystancji powierzchniowej jest pomiarem nieniszczącym to może on być wykonany jako pomiar kontrolny po etapie domieszkowania dyfuzyjnego warstwy emiterowej. Dzięki temu można zweryfikować oczekiwaną wartość rezystancji powierzchniowej z wartością obliczoną. Uzyskana dobra zgodność pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarów wskazuje na zasadność zaproponowanych przez autorów efektywnych wartości dyfuzyjności i energii aktywacji dla współczynnika dyfuzji niezależnego od koncentracji domieszki w zastosowaniu do wyznaczania rezystancji powierzchniowej warstwy emiterowej ogniwa słonecznego.

Niniejsza praca była finansowana z funduszu Badań Kierunkowych Instytutu Elektroniki Politechniki Śląskiej.

LITERATURA

- [1] Filipowski W., Waczyński K., Wróbel E., Drabczyk K., Badania nad możliwościami jednorodnego domieszkowania warstwy emiterowej struktury fotowoltaicznej w niskiej temperaturze procesu dyfuzji, *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania*, vol. 51, nr 5, 60-62, 2010
- [2] Iyengar V., Nayak B., Gupta M., Silicon PV devices based on a single step for doping, anti-reflection and surface passivation, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 94, Issue 12, December 2010, 2205-2211
- [3] Singha B., Solanki C., Study of boron precipitates formed during front side emitter formation with boron spin on dopant (BSOD) diffusion in ntype c- Si solar cells, *Energy Procedia* 57 (2014) 117-125
- [4] Yadav A., Singh G., Nekovei R., c-Si solar cells formed from spin-on phosphoric acid and boric acid, *Renewable Energy*, Volume 80, August 2015, 80-84
- [5] Tang Y., Zhoua C., Wang W., Zhaoa Y., Zhoua S., Feic J., Cao H., N+ emitters realized using Ammonium Dihydrogen Phosphate for silicon solar cells, *Solar Energy*, Volume 95, September 2013, 265-270
- [6] Filipowski W., Waczyński K., Wróbel E., Skwarek A., Drabczyk K., Efektywne wartości współczynnika dyfuzji dla modelu domieszkowania dyfuzyjnego warstwy emiterowej ogniwa słonecznego, *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania*, vol. 52, nr 4, str. 57-59, 2011
- [7] Crank J., *The mathematics of diffusion*, Clarendon Press, Oxford 1975
- [8] Wolf H., *Półprzewodniki*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1975
- [9] Kuźmicz W., *Projektowanie analogowych układów scalonych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1981

Autorzy: dr inż. Wojciech Filipowski, Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: wojciech.filipowski@polsl.pl; mgr inż. Anna Filipowska, Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, Politechnika Śląska, Katedra Biosensorów i Przetwarzania Sygnałów Biomedycznych, ul. Roosevelta 40, 41-800 Zabrze; dr inż. Krzysztof Waczyński, Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: kwaczynski@polsl.pl; dr inż. Edyta Wróbel, Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice; dr inż. Weronika Izydorczyk, Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: veronika.izydorczyk@polsl.pl.