

Krzysztof ŁAMIK

WYKORZYSTANIE ZALEŻNOŚCI REZYSTANCJI POWIERZCHNIOWEJ
OD CZASU DYFUZJI, DLA OCENY MECHANIZMU DOMIESZKOWANIA
KRZEMU FOSFOREM ZE STAŁYCH PŁYTKOWYCH ŹRÓDEŁ

Streszczenie. W artykule przedyskutowano zależność pomiędzy rezyistancją powierzchniową a czasem domieszkowania, dla procesów pre-dyfuzyj prowadzonych przy użyciu stałego płytkowego źródła fosforu. Przedstawione wyniki doświadczalne dowodzą, że pomimo znacznych uproszczeń zależność ta może być wykorzystana dla wstępnej oceny me-chanizmu domieszkowania.

1. Wstęp

Wprowadzenie do użycia w technologii wykonywania mikroelektronicznych struktur półprzewodnikowych stałych płytkowych źródeł domieszek, w wielu przypadkach znacznie uprościło dotychczas stosowane technologie domiesz-kowania z wykorzystaniem źródeł ciekłych lub gazowych. Powszechnie stoso-wane są już stałe płytkowe źródła boru BN [1]. W ostatnich latach opraco-wano również płytkowe źródła fosforu będące spiekami pirofosforanów z ceramicznym lepiszczem [2-4]. Źródła te wykazują wiele istotnych zalet w porównaniu ze stosowanymi do tej pory ciekłymi źródłami domieszek fosforu ($POCl_3$, PCl_3). Stałe płytkowe źródło fosforu jest nietoksyczne, nie wyma-ga skomplikowanych instalacji gazowych i jest łatwe w stosowaniu dzięki małej wrażliwości na zmiany prędkości przepływu gazu nośnego.

Zastąpienie ciekłych źródeł stałym płytkowym źródłem fosforu w proce-sie domieszkowania krzemu, wymaga starannego i precyzyjnego sprawdzenia i porównanie parametrów warstw dyfundowanych przy użyciu nowej technologii, z wynikami dotychczas uzyskiwanymi. Szczególne znaczenie ma tutaj wpływ zarówno samej technologii wykonania źródła, jak i techniki domieszkowania (temperatura, czas domieszkowania, szybkość przepływu gazu nośnego, odle-głość między źródłem a płytką krzemową) na takie parametry, jak: poziom domieszkowania, jednorodność domieszkowania powierzchni płytki i rozkład koncentracji w głąb materiału.

Zagadnienia te przedstawione zostały w pracach Jonesa i innych [3] oraz Monkowskiego i Stacha [5]. Badania tych autorów dotyczą źródeł PH 1050 wyprodukowanych przez Carbocorundum Company, jednak w dużej części pokrywają się one z wynikami badań nad krajowymi stałymi płytkowymi źród-łami domieszek fosforu prowadzonymi w Instytucie Fizyki Politechniki Ślą-skiej.

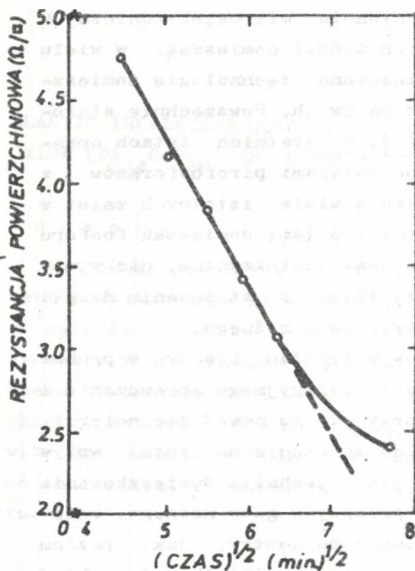
2. Zależność rezystancji powierzchniowej od czasu dyfuzji

Jednym z głównych problemów powstających przy ocenie przydatności nowych źródeł jest określenie mechanizmu domieszkowania. Procesy predyfuzyj prowadzi się utrzymując najczęściej stałą koncentrację fosforu w szkliwie fosforowo krzemowym tworzącym się na powierzchni płytki, mówimy wtedy o dyfuzji z nieograniczonego źródła domieszki [6]. Rozkład koncentracji domieszki w głąb półprzewodnika opisany jest wtedy zależnością

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (1)$$

gdzie:

- $N(x, t)$ - koncentracja atomów domieszki,
- x - odległość od powierzchni płytki,
- t - czas domieszkowania,
- N_0 - koncentracja domieszki na powierzchni płytki,
- D - współczynnik dyfuzji.



Rys. 1. Zależność rezystancji powierzchniowej od pierwiastka kwadratowego z czasu dyfuzji w temp. 1050°C przy przepływie gazu nośnego 0,5 l/min (zaczepnięto z pracy [3])

W celu sprawdzenia modelu domieszkowania Jones i inni w swojej pracy [3 rys. 7] przedstawili zależność rezystancji powierzchniowej od pierwiastka kwadratowego z czasu domieszkowania co pokazane jest na rys. 1. Z odstępstwa od liniowej zależności rezystancji powierzchniowej dla czasu dyfuzji 60 min autorzy wyciągają wnioski o tworzeniu się na powierzchni krzemu nowej fazy Si-P powodującej zaburzenia w rozkładzie domieszek. Wnioski te oparte są na błędnym założeniu, gdyż rezystancja powierzchniowa nie jest liniową funkcją pierwiastka kwadratowego z czasu dyfuzji, dla żadnego z mogących mieć tutaj zastosowanie modeli dyfuzji.

Rozpatrzmy typowy przypadek domieszkowania fosforem krzemu typu "p" o koncentracji początkowej boru rzędu $10^{-15} - 10^{-16}$ at/cm³ (odpowiada to rezystywności wyjściowej płytek krzemowych rzędu kilku Ω cm).

Przy założeniu stałej koncentracji fosforu na powierzchni krzemu w cza-

sie domieszkowania, rozkład koncentracji domieszki fosforu w głąb płytki opisany będzie zależnością (1). Rezystancja powierzchniowa wyrazi się wzorem:

$$R_s = \frac{1}{G_s} \quad (2)$$

1

$$G_s = e \int_0^{x_1} \mu(\xi) n(\xi) d\xi \quad (3)$$

gdzie:

- R_s - rezystancja powierzchniowa,
- G_s - konduktancja powierzchniowa,
- e - ładunek elektronu,
- $\mu(\xi)$ - ruchliwość nośników prądu,
- $n(\xi)$ - koncentracja nośników prądu,
- x_1 - głębokość złącza.

Koncentrację nośników prądu możemy opisać jako:

$$n(\xi) = r(N_p(\xi) - N_b) \quad (4)$$

gdzie:

- $N_p(\xi)$ - koncentracja atomów fosforu opisana wzorem (1),
- N_b - koncentracja początkowa akceptorów,
- r - część nieskompensowanych atomów domieszki, które są zjonizowane (aktywne elektrycznie). Dla koncentracji fosforu poniżej 10^{20} at/cm³ $r \approx 1$ [8], [9], [10].

Można jednak zauważyć, że na konduktancję powierzchniową najsilniej wpływa obszar dużych koncentracji (w typowych przypadkach koncentracja donorów w obszarze złącza zmienia się o 3-4 rzędy wielkości). Dlatego też nie popełnimy większego błędu zaniebując w obliczeniach początkową koncentrację akceptorów i rozciągając dla wygody matematycznej górną granicę całkowania do nieskończoności (dla głębokości większej od głębokości złącza ilość domieszki donorowej jest pomijalnie mała).

Zależność (3) można wtedy zapisać:

$$G_s = e \int_0^{\infty} \mu(\xi) N_p(\xi) d\xi \quad (5)$$

Analizując krzywe Irvina [7] można stwierdzić, że ruchliwość elektronów gwałtownie zmienia się dla zakresu koncentracji domieszki powyżej 10^{20} at/cm³. Jednakże późniejsze Mousty'ego i innych [8] oraz Baccaraniego i

Ostoji [9] krytykują to zakrzywienie wykresów Irvina i wykazują, że dla krzemu domieszkowanego fosforem krzywe te zawyżają koncentrację elektronów dla rezystywności poniżej $5 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$, gdyż jedynie część domieszki dla dużych koncentracji jest aktywna elektrycznie. Ci sami autorzy dowodzą, że ruchliwość elektronów jest wielkością stałą już dla koncentracji domieszki większej niż $2 \times 10^{19} \text{at/cm}^3$. Również inni autorzy przyjmują i potwierdzają te sugestie [10]. Ponieważ jednak obszar złącza o koncentracji fosforu poniżej $2 \times 10^{19} \text{at/cm}^3$ jest jeszcze istotny dla niniejszego rozumowania, dlatego pewna zmiana ruchliwości w zależności od koncentracji fosforu musi być uwzględniona przez wprowadzenie ruchliwości średniej.

Uwzględniając powyższe założenia możemy wzór (5) napisać w postaci:

$$G_s = e\bar{\mu}N_0 \int_0^{\infty} \operatorname{erfc} \frac{\xi}{2\sqrt{Dt}} d\xi, \quad (6)$$

gdzie:

$\bar{\mu}$ - ruchliwość średnia.

Równanie (6) po rozwiązaniu [1] przyjmuje postać:

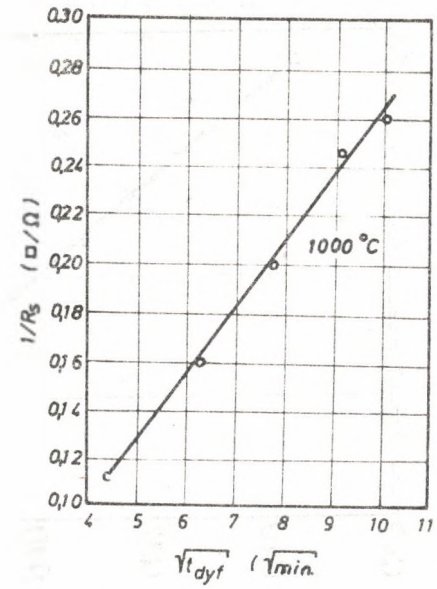
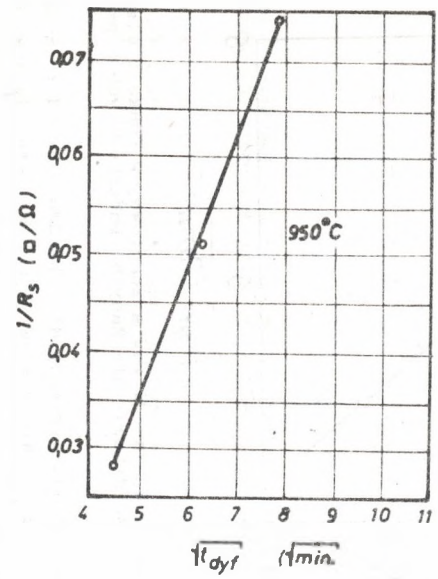
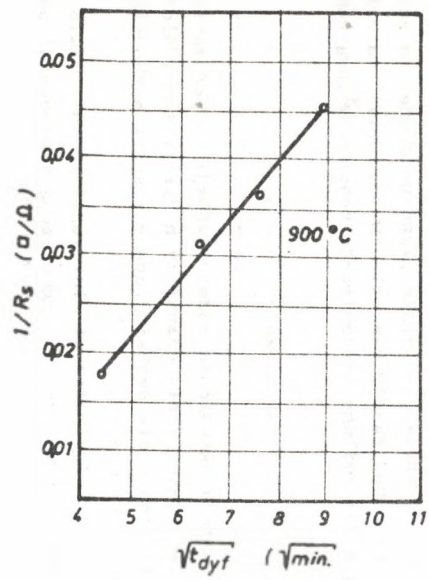
$$G_s = 2e\bar{\mu}N_0 \sqrt{\frac{Dt}{\pi}}. \quad (7)$$

Wzór (7) wykazuje nam, że nie R_s jak sugerowano w pracy [3], lecz $1/R_s$ z pewnym przybliżeniem powinno być liniowo zależne od pierwiątka kwadratowego z czasu dyfuzji.

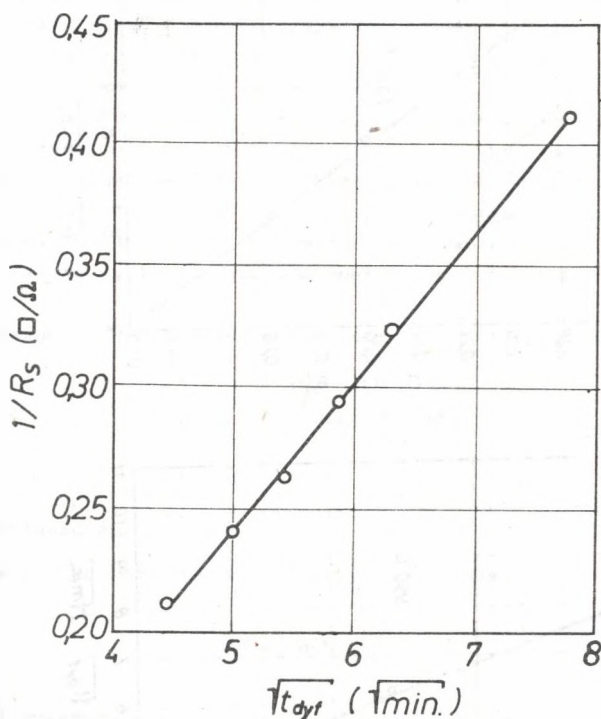
3. Wyniki doświadczalne

Na rysunku 2 przedstawiono wykresy zależności $1/R_s$ w funkcji \sqrt{t} dla trzech temperatur i typowych czasów domieszkowania, dla źródeł wykonanych w Instytucie Fizyki Politechniki Śląskiej. Dyfuzję prowadzono w typowych warunkach stosując przepływ gazu nośnego (Ar) 0,5 l/min, odległość pomiędzy źródłem a płytką 3 mm. Pomiaru wykonano sondą czterostrzową IKM 4 o odstępnie ostrzy 1 mm.

Na rysunku 3 przedstawiono zależność $1/R_s$ w funkcji \sqrt{t} dla wyników przedstawionych w pracy [3]. Dane do wykresu odczytano z rys. 1 [3 rys. 7]. Jak widać w obydwu przypadkach (rys. 2 i 3) wyznaczona doświadczalnie zależność $1/R_s$ w funkcji \sqrt{t} wykazuje dobrą zależność liniową, co świadczy o słusznym założonym modelu dyfuzji i stałej koncentracji powierzchniowej atomów domieszki.



Rys. 2. Zależność konduktancji powierzchniowej w funkcji pierwiastka kwadratowego z czasu dyfuzji dla domieszki w trzech różnych temperaturach przy użyciu źródeł wykonanych w Instytucie Fizyki Politechniki Śląskiej



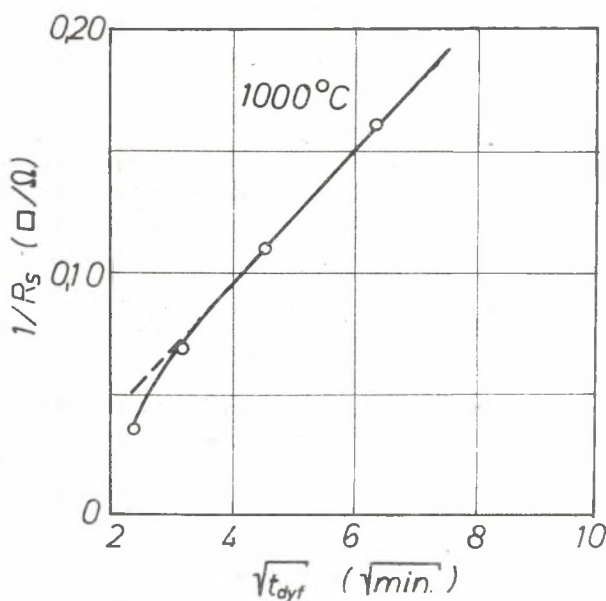
Rys. 3. Zależność konduktancji powierzchniowej w funkcji pierwiastka kwadratowego z czasu dyfuzji dla danych opublikowanych w pracy [3]

Nieco inaczej wygląda sytuacja dla bardzo krótkich czasów dyfuzji, przedstawiona na rys. 4. Krótkie czasy dyfuzji stosuje się dla wytworzenia związków bardzo płtykich, np. przy wytwarzaniu fotoogniw krzemowych. W tym przypadku obserwujemy pewne odstępstwo od liniowej zależności opisanej równaniem (7). Odstępstwo to wynika prawdopodobnie ze stosunkowo dużej bezwładności cieplnej kasety kwarcowej wypełnionej materiałem do dyfuzji i związaną z tym zmienną koncentracją powierzchniową domieszki.

4. Podsumowanie

Przedstawiona metoda określania modelu dyfuzji na podstawie zależności $1/R_s$ w funkcji \sqrt{t} , pomimo wielu oczywistych uproszczeń i niedokładności, wykazuje dużą przydatność dla szybkiej oceny zjawisk zachodzących w czasie procesów domieszkowania.

Wszelkie odstępstwa od zależności liniowej, jak to miało miejsce w przypadku przedstawionym na rys. 4, sygnalizują konieczność podjęcia bar-



Rys. 4. Zależność konduktancji powierzchniowej w funkcji pierwiastka kwadratowego z czasu dyfuzji dla krótkich czasów dyfuzji

dziej szczegółowych badań, takich jak np. wyznaczenie pełnego profilu koncentracji dla określenia mechanizmu domieszkiwania.

LITERATURA

- [1] Procesy technologiczne w elektronice półprzewodnikowej. Praca zbiorowa, WNT, Warszawa 1980.
- [2] Patent USA 3852 086.
- [3] N. Jones, D.M. Metz, J. Stach, R.E. Tressler: J. Electrochem. Soc., 123, 1976, s. 1565.
- [4] I. Flakus, S. Kończak, K. Waczyński, M. Rećko: Materiały Elektroniczne, 25, 1979, 40.
- [5] J. Monkowski, J. Stach: Solid State Electron., 19, 1976, 38.
- [6] B.I. Bołtaks: Diffuzija w półprzewodnikach, Moskwa, Fizmatgiz, 1961.
- [7] J.C. Irvin: Bell Syst. Techn. J., 41, 1962, 387.
- [8] F. Mousty, P. Ostoja, L. Passari: J. Appl. Phys., 45, 1974, 4576.
- [9] G. Baccarani, P. Ostoja: Solid State Electron., 18, 1975, 579.
- [10] R.B. Fair, J.C.C. Tsai: J. Electrochem. Soc., 124, 1977, 1107.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ОТ ВРЕМЕНИ ДИФФУЗИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕХАНИЗМА ЛЕГИРОВАНИЯ КРЕМНИЯ
ФОСФОРОМ ИЗ ТВЕРДЫХ ПЛАСТИНЧАТЫХ ИСТОЧНИКОВ

Р е з ю м е

В статье представлена зависимость поверхностного сопротивления от времени легирования для процессов диффузии проводимых с применением пластинчатых источников примесей фосфора. Представленные опытные данные показывают, что несмотря на значительные упрощения эта зависимость может быть использована для предварительной оценки механизма легирования.

A UTILIZATION OF DEPENDENCE OF SHEET RESISTANCE UPON DIFFUSION TIME
FOR EVALUATION OF DOPING MECHANISM OF SILICON WITH PHOSPHORUS FROM
SOLID PLANAR SOURCE

S u m m a r y

A relationship between sheet resistance and doping time is discussed for prediffusion process carried out with the use of solid planar phosphorus source. Experimental results are presented here which indicate that in spite of simplification this relationship can be used in introductory evaluation of doping mechanism.

Recenzent: Doc. dr hab. Sławomir Kończak

Wpłynęło: 19.09.1982 r.