INSTYTUT TECHNOLOGII ELEKTRONOWEJ
PRZY NAUKOWO-PRODUKCYJNYM CENTRUM PÓŁPRZEWODNIKÓW

**SYMPOZJUM
NAUKOWE
TORUŃ
3 października 1973**

NOWOCZESNE TECHNOLOGIE W MIKROELEKTRONICE

referaty
i komunikaty

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE
WARSZAWA 1974

B.M. Wilamowski
Instytut Technologii Elektronicznej
Politechniki Gdańskiej

D1

ZMIANY REZYSTANCJI NA KWADRAT WARSTW DYFUZYJNYCH W PROCESIE REDYSTRYBUCJI DOMIESZEK *

1. Wstęp

Najczęściej stosowanymi warstwami rezystywnymi w układach scalonych są warstwy bazy. Proces dyfuzji tych warstw przebiega dwustopniowo. Najpierw występuje proces predyfuzji, w którym wprowadza się pewną ilość domieszek do półprzewodnika. Następnie przeprowadza się proces redystrybucji, często też nazywany procesem redyfuzji, w którym domieszki dyfundują w głąb półprzewodnika. W procesie redyfuzji rezystancja na kwadrat warstwy domieszkowanej borem zwykle wzrasta o kilkadziesiąt procent. Zmiana ta jest wynikiem przedostawania się części domieszek do tlenku wskutek utleniania powierzchni. Jednocześnie wzrost ruchliwości nośników na skutek zmniejszenia się efektywnej koncentracji domieszek kompensuje częściowo efekt wzrostu rezystancji warstwy.

Zjawiska zachodzące na granicy tlenek - półprzewodnik w trakcie utleniania były przedmiotem wielu analiz. A.S. Grove i współpracownicy [1],[2],[3] oraz J.M. Shannon [4] badali zjawisko segregacji domieszek w wyniku utleniania powierzchni jednorodnych płytek krzemu. Próba rozwiązania tego problemu z wykorzystaniem maszyny cyfrowej dla warstw dyfuzyjnych była podejmowana przez T. Kato i Y. Nishi [5]. Ostatnio zagadnienie to było przedmiotem prac J.S. Huanga i L.C. Gelliverna [6] oraz S. Margalita i współpracowników [7]. Brak jest jednak nadal całościowego opracowania problemu, a sterowanie procesami technologicznymi przebiega na drodze czysto empirycznej.

* Komunikat nie był wygłoszony na Sympozjum, został natomiast zakwalifikowany przez Komitet Naukowy do wydania w materiałach konferencyjnych.

Poniżej podana jest propozycja rozwiązania zagadnienia prowadząca do podania procedury dla przeprowadzenia procesu redystrybucji w celu uzyskania warstw dyfuzyjnych o wymaganych parametrach.

Wiadomo, że rezystancja na kwadrat warstwy dyfuzyjnej wyraża się wzorem:

$$R_{\square} = \frac{1}{\int_0^x q N \mu \, dx} = \frac{1}{q \bar{\mu} Q} \qquad /1/$$

gdzie:

$$\bar{\mu} = \frac{\int_0^x N(x)\mu(x)\,dx}{\int_0^x N(x)\,dx}$$ - efektywna ruchliwość nośnika w warstwie,

$$Q = \int_0^x N(x)\,dx$$ - ładunek domieszek na warstwie na jednostkę powierzchni.

Korzystając z wyrażenia /1/, można napisać, że po procesie redyfuzji rezystancja na kwadrat warstwy dyfuzyjnej wynosi:

$$R_{\square_2} = R_{\square_1} \frac{\bar{\mu}_1 Q_1}{\bar{\mu}_2 Q_2} \qquad /2/$$

gdzie indeksy 1 i 2 oznaczają odpowiednio parametry przed i po procesie redystrybucji. Wyrażenie /2/ można napisać również w postaci:

$$R_{\square_2} = R_{\square_1} \frac{1}{g_\mu g_Q} \qquad /3/$$

gdzie:

$$g_\mu = \frac{\bar{\mu}_2}{\bar{\mu}_1}$$ - współczynnik korekcji wynikający ze zmiany efektywnej ruchliwości,

$$g_Q = \frac{Q_2}{Q_1}$$ - współczynnik korekcji wynikający ze zmiany ładunku domieszek w warstwie.

Analiza każdego z wymienionych współczynników korekcji zostanie przeprowadzona oddzielnie.

2. Współczynnik korekcji wynikający ze zmian efektywnej ruchliwości

Zależność ruchliwości nośników od koncentracji domieszek można aproksymować wyrażeniem podanym przez Prince'a [8] o postaci:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{N_0}{N}\right)^b \qquad /4/$$

gdzie: b - współczynnik o wartości 0.27.

Przy założeniu gaussowskiego rozkładu domieszek w warstwie dyfuzyjnej i po uwzględnieniu zależności /4/ wyrażenie na efektywną ruchliwość nośników w warstwie można doprowadzić do postaci:

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_p}{\sqrt{1+b}} \qquad /5/$$

gdzie: μ_p - ruchliwość nośników przy powierzchni.

Korzystając z zależności /4/ i /5/ dla gaussowskich rozkładów domieszek, można określić współczynnik korekcji g_μ jako:

$$g_\mu = \left(\frac{N_{p_1}}{N_{p_2}}\right)^b \qquad /6/$$

lub

$$g_\mu = \left(\sqrt{\frac{D_2 t_2}{D_1 t_1}} + 1\right)^{\frac{b}{2}} \qquad /7/$$

3. Współczynnik korekcji wynikający ze zmian ładunku domieszek w warstwie

Proces redyfuzji domieszek przebiega zwykle w atmosferze utleniającej. W wyniku utleniania domieszkowanego krzemu część domieszek przedostaje się z półprzewodnika do tworzącego się na jego powierzchni tlenku krzemu. W efekcie, w czasie procesu ładunek domieszek w krzemie maleje.

$$Q_2 = Q_1 - Q_{SiO_2} \qquad /8/$$

i współczynnik korekcji g_Q wyraża się wzorem:

$$g_Q = 1 - \frac{Q_{SiO_2}}{Q_1} \qquad /9/$$

Ilość domieszek przedostających się do tlenku w miarę tworzenia się warstwy tlenku maleje ze względu na obniżanie się koncentracji powierzchniowej domieszek w trakcie trwania procesu redystrybucji.

Koncentracja domieszek w tlenku N_{SiO_2} wyraża się zależnością:

$$N_{SiO_2}(x) = k_1 \frac{N_{p_1}}{\sqrt{\frac{D_2 t_2}{D_1 t_1} + 1}} = k_1 \frac{N_{p_1}}{\sqrt{\frac{D_2 x}{B D_1 t_1} + 1}} \qquad /10/$$

gdzie:

N_{p_1} - koncentracja powierzchniowa domieszek przed procesem redystrybucji,

$L_{d_1} = \sqrt{D_1 t_1}$ - długość dyfuzji dla procesu predyfuzji,

$L_{d_2} = \sqrt{D_2 t_2}$ - długość dyfuzji w procesie redystrybucji,

$x = \sqrt{B t_2}$ - grubość tlenku,

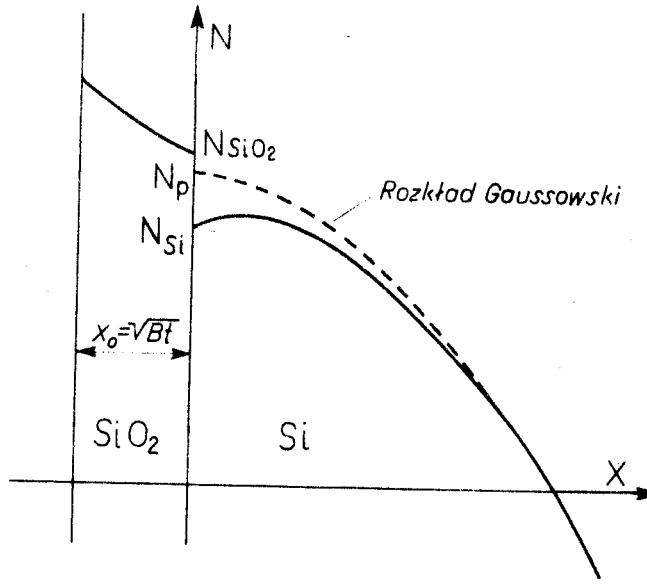
k_1 - współczynnik proporcjonalności,

D_1, D_2 - stałe dyfuzji domieszek w krzemie,

B - współczynnik określający szybkość powstawania warstwy tlenku.

Współczynnik proporcjonalności k_1 zależy od współczynnika segregacji domieszek na granicy krzem-tlenek $m = \frac{N_{Si}}{N_{SiO_2}}$ i od stosunku $\frac{N_p}{N_{Si}}$ /rys.1/.

Ponieważ współczynnik k_1 w rzeczywistości w niewielkim tylko stopniu zależy od stosunku szybkości dyfuzji do szybkości utleniania, w przedstawionej analizie przyjęto k_1 = const. Parametr ten określany jest w sposób eksperymentalny.



Rys. 1. Rozkład koncentracji domieszek na granicy tlenek-krzem

Ładunek domieszek Q_{SiO_2}, jaki znajduje się w warstwie tlenku, można otrzymać przez scałkowanie wyrażenia /10/:

$$Q_{SiO_2} = k_1 N_{p1} L_{d1} \sqrt{\frac{B}{D}} \operatorname{arsh} \frac{L_{d2}}{L_{d1}} \qquad /11/$$

Początkowy ładunek domieszek w warstwie dyfuzyjnej przed procesem redystrybucji wynosił:

$$Q_1 = k_2 N_{p1} L_{d1} \qquad /12/$$

gdzie k_2 - współczynnik proporcjonalności.

Ostatecznie współczynnik korekcji g_Q po podstawieniu /11/ i /12/ do /9/ wyraża się zależnością:

$$g_Q = 1 - K\sqrt{\frac{B}{D_2}} \operatorname{arsh} \frac{L_{d2}}{L_{d1}} = 1 - \sqrt{\frac{B}{D_2}}\, K \operatorname{arsh}\left(\sqrt{\frac{D_2}{B}}\, \frac{x}{L_{d1}}\right) \qquad /13/$$

gdzie: $K = \frac{k_1}{k_2}$ - współczynnik proporcjonalności,

x - grubość tlenku.

Zależność /13/ jest słuszna dla przypadku, gdy przed procesem redystrybucji usunięto tlenek z powierzchni krzemu i nastę-

pnie przeprowadzono proces przy stałej wilgotności tlenu w piecu.

Często jednak po procesie predyfuzji tlenek pozostaje na powierzchni. W tym przypadku analiza nieco się komplikuje, ale ostatecznie współczynnik korekcji g_Q przy założeniu, że przed procesem redystrybucji krzem pokryty był warstwą tlenku o grubości x_1, wyraża się wzorem:

$$g_Q = 1 - K\sqrt{\frac{B}{D_2}}\ \ln \frac{x + \sqrt{Bt + L_{d_1}^2 \frac{B}{D_2}}}{x + L_{d_1}\sqrt{\frac{B}{D_2}}} \qquad /14/$$

Ogólnie, proces redystrybucji można prowadzić w n etapach o różnej wilgotności tlenu, zwykle jednak w tej samej temperaturze. Korzystając z wyrażenia /14/, można wyprowadzić ogólne wyrażenie na współczynnik korekcji g_Q dla procesu redystrybucji przebiegającego w n etapach:

$$g_Q = 1 - \sum_1^n K\sqrt{\frac{B_n}{D_n}}\ \ln \frac{x_n - \sqrt{B_n t_n + L_{d_{n-1}}^2 \frac{B_n}{D_n}}}{x_{n-1} + \sqrt{L_{d_{n-1}}^2 \frac{B_n}{D_n}}} \qquad /15/$$

gdzie:

B_n - współczynnik określający szybkość utleniania dla n-tego procesu,

D_n - stała dyfuzja domieszek w krzemie w n-tym procesie,

x_n - grubość tlenku krzemu po n-tym procesie,

x_{n-1} - grubość tlenku krzemu przed n-tym procesem,

t_n - czas trwania n-tego procesu,

$L_{d_{n-1}}$ - długość dyfuzji warstwy wdyfundowanej przed n-tym procesem,

K - współczynnik proporcjonalności.

W przypadku procesu redystrybucji boru prowadzonego w temperaturze 1150° i temperaturze wody 70-90°C na podstawie danych eksperymentalnych określono wartość współczynnika K równą 0,35.

4. Wnioski

Przeprowadzone powyżej rozważania są pewnym krokiem na drodze do projektowania procesu redystrybucji domieszek w ten sposób, żeby przy różnych parametrach warstwy dyfuzyjnej po procesie predyfuzji można było zaprojektować proces redystrybucji, tak by po tym procesie warstwy dyfuzyjne miały jednakowe i zamierzone parametry. Pełną procedurę projektowania można podać w oparciu o wyprowadzone zależności: /3/, /7/, /13/, /14/,/15/.

Literatura

1. A.S. Grove, O. Leistiko, C.T. Sah, Redistribution of acceptor and donor impurities during thermal oxidation of silicon, J.appl. Phys., 35, 2695-2701, 1964.
2. B.E. Deal, A.S. Grove, E. Snow, C.T. Sah Observation of impurity redistribution during thermal oxidation of silicon, J. Electrochem. Soc., 112, 308-314,1965.
3. B.E. Deal, A.S. Grove, General relationship for the thermal oxidation of silicon, J. appl. Phys., 36, 3770-3778, 1964.
4. J.M. Shannon, DC measurement of the impurity profile beneath the gate of an MOS transistor, The 5-th Solid State Device Conference, Lancaster 1971.
5. T. Kato, Y. Nishi, Redistribution of diffused boron in silicon by thermal oxidation, Jap. J. appl. Phys., 3, 377-383, 1964.
6. J.S. Huang, L.C. Welliver, On the redistribution of boron in diffused layer during thermal oxidation, J.Electrochem. Soc., 117, 1577-1580, 1970.
7. S. Margalit, A. Neugroschel, A. Baarlev, Redistribution of boron and phosphorous in silicon after two oxidation steps used in MOS fabrication, Trans. Electron Devices, ED-19, 861-868, 1972.
8. M.B. Prince, Drift mobilities in semiconductors II silicon, Phys. Rev., 93, 1204-1206, 1954.