

Ю.М. Богдановський, В.М. Мицишин

Масоперенос в системі тверде планарне джерело бору-пластина кремнію діаметром 300 мм

Національний університет „Львівська політехніка”,
вул. Ст. Бандери, 12, м. Львів, 79013, тел. 398627, 398565

Розглянуто механізм переносу газоподібного B_2O_3 в інертному середовищі азоту від твердих планарних джерел бору на основі алюмоборосилікатних сполук до пластин кремнію великого діаметра порядку 300 мм і більше. В температурному інтервалі 850-1100°C розраховано розподіл концентрацій B_2O_3 в проміжку між джерелом і пластиною кремнію, визначено коефіцієнти дифузії молекул B_2O_3 в атмосфері азоту. Показано, що при використанні розроблених планарних джерел бору концентрація B_2O_3 біля поверхні кремнію перевищує 90% концентрації B_2O_3 на поверхні джерела вже через 60 с, що набагато менше, ніж мінімальна тривалість технологічного процесу легування пластин кремнію бором.

Ключові слова: дифузія, кремнієва технологія, тверді планарні джерела бору та фосфору.

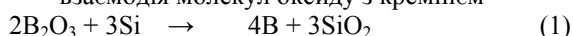
Стаття поступила до редакції 19.05.2003; прийнята до друку 23.10.2003.

I. Вступ

Використання твердих планарних джерел легуючих домішок забезпечує значно вищу однорідність дифузійних шарів на пластинках кремнію у порівнянні з методами, в яких газоподібні легуючі домішки вводяться в реакційну зону з зовні.

Формування дифузійного шару у кремнієвій підкладці відбувається за рахунок ряду процесів, що одночасно протікають у зоні реакції:

- виділення з поверхні твердого джерела газоподібного оксиду легуючого елемента (B_2O_3);
- дифузійного масопереносу оксиду до поверхні кремнієвої підкладки;
- взаємодія молекул оксиду з кремнієм



внаслідок чого на поверхні кремнію наростає шар скла SiO_2 п B_2O_3 , з якого атоми домішки дифундують у глибину підкладки.

Механізм росту скла на поверхні кремнієвої підкладки має дифузійний характер, тому товщина поверхневого склоподібного шару визначається коефіцієнтом дифузії молекул оксиду домішки та концентрацією газоподібного оксиду біля поверхні підкладки. Джерелом газоподібного оксиду легуючого елемента при легуванні пластин кремнію великого діаметру найбільш часто є тверді планарні джерела, тому відтворюваність параметрів дифузійних шарів в значній мірі залежить від концентрації B_2O_3 у газовій фазі, отже від кінетики виділення молекул оксиду твердим планарним джерелом дифузії та від швидкості масопереносу їх в

проміжку джерело-кремнієва підкладка.

У даній роботі запропоновано метод оцінки часу встановлення рівноважного тиску оксиду легуючого елемента в проміжку тверді планарні джерела бору-кремнієва підкладка після початку процесу дифузії та встановлення ізотермічних умов у реакційній зоні.

У стаціонарних умовах протікання процесу дифузії шар скла відіграє роль безмежного поверхневого джерела домішки. Кінетика росту скла та його склад визначаються механізмом дифузії молекул B_2O_3 до границі розділу скло-кремній та залежить від концентрації газоподібного оксиду біля поверхні підкладки. Такі умови забезпечуються лише у випадку тривалого часу дифузійного процесу.

При короткій тривалості процесу необхідно враховувати час встановлення стаціонарних умов у реакційній зоні. Для цього, при використанні джерел великого діаметру, порядку 300 мм і більше, необхідно оцінити такі параметри:

- швидкість переносу молекул оксиду від джерел до пластини кремнію;
- тиск оксидів легуючих домішок біля поверхні пластини кремнію у довільний момент часу.

II. Експериментально-розрахункова частина

Для твердих планарних джерел бору, які на сьогодні використовуються у кремнієвій технології, характерний або дифузійний перенос молекул B_2O_3 з глибини дифузанта до поверхні випаровування (для

склокерамічних джерел), або пряме випаровування оксиду плівки B_2O_3 з поверхні джерела (джерела на основі BN). При низьких температурах процеси дифузійного переносу сповільнюються і це не дозволяє забезпечити стабільний тиск пари оксидів на протязі тривалого часу.

На наш погляд, ефективним виходом є розробка джерел з високою поруватістю дифузанта. Зважаючи на це, нами були розроблені дифузанти бору для інтервалу температур 850-1150⁰C [1]. Термомеханічні властивості таких джерел може забезпечити термотеплостійка підкладка, на яку нанесений шар відповідного дифузанта. Перевага такого підходу до створення джерел проявляється ще і в тому, що при розробці джерела основна увага приділяється дифузійним, а не термомеханічним параметрам, що дозволяє виключити з його складу компоненти, які безпосередньо не впливають на дифузійні властивості джерела. Для наших джерел парціальний тиск оксиду залишається сталим доти, доки початкова маса джерел не зменшиться нижче критичного рівня. Для джерел бору на основі алюмоборосилікатних сполук – цей рівень становить величину порядку 80% (в залежності від типу джерела).

Зважаючи на це, ми використовуємо джерела бору тільки тоді, коли вони забезпечують в умовах проведення дифузійного процесу сталий тиск легуючої домішки біля джерела. При таких умовах можна оцінити швидкість переносу молекул легуючої домішки від джерела до пластини кремнію.

Припустимо, що пари домішок і інертний газ (в нашому випадку азот) утворюють ідеальну газову суміш. Розглянемо джерело в інертному газі. Пари оксиду – компонент „А” випаровуються і дифундують від джерела в простір, початково заповнений інертним газом – компонент „В”. Оскільки „А” випаровується, він витісняє „В” в тому ж напрямку.

Рівняння неперервності для компонентів „А” і „В” мають вигляд:

$$\frac{dC_A}{dt} = -\frac{dN_{AZ}}{dz}, \quad (2)$$

$$\frac{dC_B}{dt} = -\frac{dN_{BZ}}{dz}, \quad (2')$$

де: C_A, C_B – мольні густини компонентів „А” і „В”; N_{AZ}, N_{BZ} – потоки компонентів „А” і „В” відносно осі z ; z – координата відстані між джерелом та пластиною кремнію.

В результаті додавання цих рівнянь отримаємо:

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{d(N_{AZ}+N_{BZ})}{dz}.$$

Оскільки „А” і „В” утворюють ідеальну газову суміш, тому їх мольна густина стала і $dC/dt = 0$, а тому $(N_{AZ} + N_{BZ}) = \text{const}$

Для розв’язку задачі використовуємо перший закон дифузії Фіка для бінарних систем, виражений через мольний потік відносно нерухомих координат [2]:

$$N_{AZ} = -CD \frac{dX_A}{dz} + X_A(N_{AZ} + N_{BZ}), \quad (3)$$

де: C – мольна густина газової суміші (моль/см³) ($C = C_A + C_B$);

$X_A = C_A/C$ – мольна доля компонента „А”;

D_{AB} – коефіцієнт дифузії для бінарної системи.

У рівнянні (3) доданок $-CD \frac{dX_A}{dz}$ – це потік за рахунок дифузії, а доданок $X_A(N_{AZ} + N_{BZ})$ – потік за рахунок переміщення всієї маси газу.

Зрозуміло, що при $Z = 0$ речовина „В” не рухається, тому $N_{BZ} = 0$. Тоді з рівняння (3) отримаємо вираз для потоку „А” в цій же площині

$$N_{AO} = -\frac{CD_{AB}}{1-X_{AO}} \frac{dX_A}{dz} \Big|_{z=0}. \quad (4)$$

Тут індекс „0” вказує на те, що всі величини визначені для площини $z = 0$.

Тоді потік „А” для всіх z з врахуванням (4) матиме вигляд:

$$N_{AZ} = -CD_{AB} \frac{dX_A}{dz} - X_A \left(\frac{CD_{AB}}{1-X_{AO}} \frac{dX_A}{dz} \Big|_{z=0} \right). \quad (5)$$

Підставивши вираз (5) в рівняння (1), маємо:

$$\frac{dX_A}{dt} = CD_{AB} \frac{d^2 X_A}{dz^2} + \frac{CD_{AB}}{1-X_{AO}} \frac{dX_A}{dz} \Big|_{z=0} \frac{dX_A}{dz}. \quad (6)$$

Одержане рівняння необхідно розв’язувати при початковій умові:

$$\text{при } t = 0 \quad X_A = 0;$$

а також граничних умовах:

$$\text{при } z = 0 \quad X_A = X_{AO}$$

$$\text{при } z = \infty \quad X_A = 0.$$

Тут $X_{AO} = C_{AO}/C$ рівноважна концентрація у газовій фазі, яка відповідає тиску пари чистого компонента „А”, поділеному на загальний тиск $(P_A / (P_A + P_B))$.

При розв’язуванні рівняння (6) необхідно оцінити коефіцієнти дифузії B_2O_3 в азоті. Розрахунки бінарних коефіцієнтів дифузії для інтервалу температур 800-1100⁰C можна провести за формулою [3]:

$$D_{AB} = D_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^m,$$

де: $T_0 = 273$ К.

Оцінки показали, що для системи „ B_2O_3 – азот” параметри D_0 і m в цьому співвідношенні повинні бути взяті рівними 0,087 см²/с і 1,65 відповідно.

Для розв’язку рівняння (6) використовувалися числові методи [5]. У кінцевих різницях рівняння (6) матиме вигляд:

$$X_{Ai, k+1} = \frac{CD_{AB}\Delta t}{dz^2} [(X_{Ai-1, k} + X_{Ai+1, k}) + X_{Ai, k} \left(\frac{\Delta z^2}{CD_{AB}\Delta t} - 2 \right) + \frac{(X_{AO} - X_{A1, k})(X_{Ai-1, k} - X_{Ai, k})}{1 - X_{AO}}], \quad (7)$$

де: i – крок по координаті Δz ;

k – крок за часом Δt .

Можна підібрати такі значення Δt та Δz , що

$$\frac{\Delta z^2}{CD_{AB}\Delta t} = 2. \quad (8)$$

Тоді рівняння (7) перетвориться у вираз:

$$X_{Ai, k+1} = 0,5 \cdot [X_{Ai-1, k} + X_{Ai+1, k} + \frac{(X_{AO} - X_{A1, k})(X_{Ai-1, k} - X_{Ai, k})}{1 - X_{AO}}]. \quad (9)$$

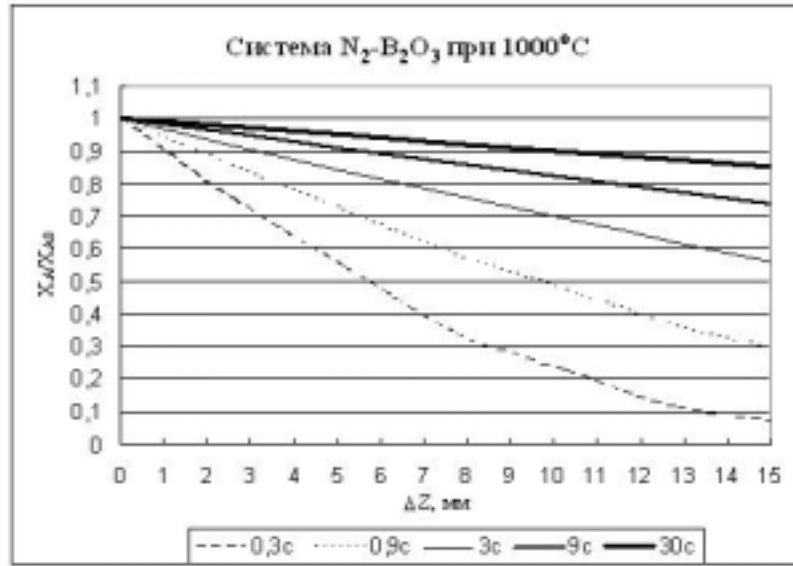


Рис. 1. Відносна концентрація V_2O_3 в залежності від відстані джерело – пластина кремнію для різних часів при температурі $1000^\circ C$.

Для візуалізації цих залежностей, для конкретного оксиду, ми задали крок за часом $\Delta t = 0,003$ с, а крок по координаті змінювався таким чином, щоб задовольнити умови (8). Розрахунки для температури $1000^\circ C$ у відносних одиницях показані на рис. 1.

Як видно з даних, наведених на рис 1, вже за 30 с навіть на відстані 15 мм концентрація V_2O_3 становить 85% від концентрації біля поверхні джерела. Якщо враховувати, що джерела і пластили кремнію нагріваються до робочої температури поступово, то можна вважати, що після встановлення постійної температури концентрація легуючої домішки біля поверхні кремнію приблизно дорівнює концентрації біля поверхні джерела.

В певний проміжок часу можна вважати, що на поверхні джерела підтримується відносна концентрація компоненту „А” X_{A0} , а біля поверхні пластили кремнію – X_{A1} . При квазістаціонарному режимі в системі встановлюється деякий потік компонента „А” при відсутності потоку компонента „В”. Тому в рівнянні (3) $N_{BZ} = 0$. Розв’язуючи його відносно $N_{AZ} = 0$, отримуємо:

$$N_{AZ} = -\frac{CD_{AB}}{1-X_A} \frac{dX_A}{dz} \quad (10)$$

Баланс маси безмежно малого елемента товщиною ΔZ призводить, у випадку квазістаціонарного стану, до співвідношення:

$$S N_{AZ} \Big|_Z - S N_{AZ} \Big|_{Z+\Delta Z} = 0, \quad (11)$$

в якому S – площа дифузанта.

Поділивши формулу (10) на $S \Delta Z$ та враховуючи, що $\Delta Z \rightarrow 0$, знаходимо

$$-\frac{dN_{AZ}}{dz} = 0. \quad (12)$$

Підставляючи N_{AZ} з рівняння (10) у формулу (12) отримуємо:

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{CD_{AB}}{1-X_A} \frac{dX_A}{dz} \right) = 0.$$

Вважаючи, що газова суміш ідеальна, D_{AB} не

залежить від концентрації, можна добуток $C \cdot D_{AB}$ винести за знак похідної:

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{1}{1-X_A} \frac{dX_A}{dz} \right) = 0.$$

Отримане рівняння є диференціальним рівнянням другого порядку, для профілю відносних концентрацій компонента „А”. Інтегрування дає

$$\frac{1}{1-X_A} \frac{dX_A}{dz} = C_1,$$

або

$$-\ln(1-X_A) = C_1 Z + C_2. \quad (13)$$

Обидві константи інтегрування можна визначити з таких умов:

$$\begin{aligned} \text{при } z=z_0 & \quad X_A = X_{A0} \\ z=z_1 & \quad X_A = X_{A1} \end{aligned}$$

Тоді

$$C_1 = \frac{\ln(1-X_{A0}) - \ln(1-X_{A1})}{Z_1 - Z_0} = \frac{\ln\left(\frac{1-X_{A0}}{1-X_{A1}}\right)}{Z_1 - Z_0},$$

$$C_2 = \frac{\ln(1-X_{A0}) - \ln(1-X_{A1})}{Z_1 - Z_0} = -\frac{Z_0}{Z_1 - Z_0} \ln \frac{1-X_{A0}}{1-X_{A1}} - \ln(1-X_{A0})$$

Після підстановки констант C_1 та C_2 в рівняння (13) знайдемо вираз для профілю концентрації:

$$\frac{1-X_A}{1-X_{A0}} = \left(\frac{1-X_{A1}}{1-X_{A0}} \right)^{\frac{(Z-Z_0)}{(Z_1-Z_0)}} \quad (14a)$$

і, відповідно, для тисків:

$$\frac{P-P_A}{P-P_{A0}} = \left(\frac{P-P_{A1}}{P-P_{A0}} \right)^{\frac{(Z-Z_0)}{(Z_1-Z_0)}}. \quad (14)$$

Розподіл тиску V_2O_3 між джерелом і пластиною кремнію для температури $T = 1000^\circ C$ і $\Delta Z = 10$ мм при $t = 5$ с, отриманий згідно рівняння (14), показаний на рис. 2. З рисунка видно, що нахил кривої тиску dP_A/dz є практично постійним відносно Z .

Швидкість масовіддачі від поверхні джерела знайдемо, використовуючи рівняння (4), (10)

$$N_{AZ} = N_{A0} = \frac{CD_{AB}}{Z_1 - Z_0} \ln \left(\frac{1-X_{A1}}{1-X_{A0}} \right) \Big|_{Z=Z_0}. \quad (15)$$

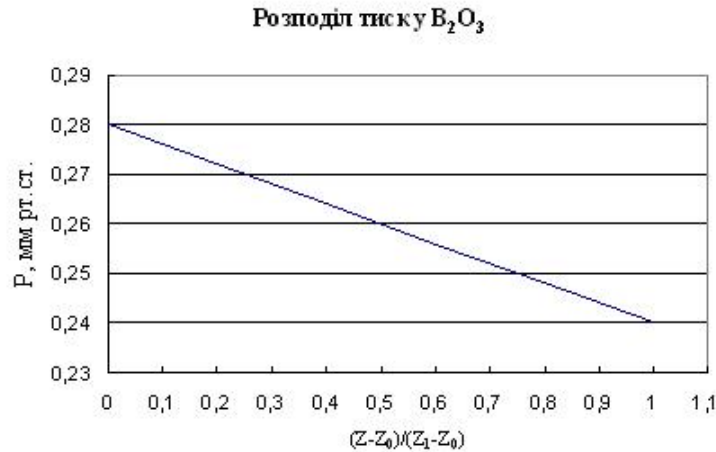


Рис. 2. Розподіл тиску B_2O_3 між джерелом ($(Z - Z_0)/(Z_1 - Z_0) = 0$) і пластиною кремнію ($(Z - Z_0)/(Z_1 - Z_0) = 1$).

Для розв'язку рівняння (15) необхідно знати концентрацію оксиду (парціальний тиск) на поверхні пластини кремнію, які визначаємо, розв'язуючи обернену задачу: за відомим потоком знайдемо концентрацію біля пластини кремнію.

У першому наближенні потік оксидів (B_2O_3) визначається зі швидкості росту плівки скла на поверхні кремнію. Вміст оксиду легуючої домішки у склі може бути різним, (наприклад, наші вимірювання вмісту P_2O_5 у фосфоросилікатному склі показали, що його концентрація не перевищує 13%). Тому для врахування кількості B_2O_3 в оксиді введемо коефіцієнт „к”, значення якого показує концентрацію „чистої” SiO_2 . Так само введемо „l” – коефіцієнт переходу легуючого оксиду крізь SiO_2 . (Для B_2O_3 за рівнянням (1) він дорівнює 0,67).

Мольний потік легуючого оксиду крізь плівку SiO_2 визначається виразом:

$$N_{AZ} = kl \frac{dx}{dt} \cdot \frac{\rho}{\mu}, \quad (16)$$

де: $\frac{dx}{dt}$ – швидкість росту оксиду на поверхні кремнію; ρ – густина SiO_2 ; μ – молярна маса SiO_2 .

Прирівнюючи вирази (15) і (16) і вводячи загальний та парціальний тиски, одержимо:

$$kl \frac{dx}{dt} \cdot \frac{\rho}{\mu} = \frac{pD_{AB}}{RT(z-z_0)} \ln \left(\frac{P-P_{A1}}{P-P_{A0}} \right).$$

Для даного моменту часу

$$\frac{P-P_{A1}}{P-P_{A0}} = \exp \left(\frac{kl\rho RT(z_1-z_0)}{\mu p D_{AB}} \cdot \frac{dx}{dt} \Big|_{t=\text{const}} \right). \quad (17)$$

Експериментальні дані з вимірювання товщини шару оксиду при використанні твердих джерел можна з достатньою точністю апроксимувати рівнянням:

$$d = At^y \exp \left(-\frac{B}{\Delta T} \right). \quad (18)$$

Тоді швидкість росту оксиду визначається як

$$V = A(1-y)t^{y-1} \exp \left(-\frac{B}{\Delta T} \right). \quad (19)$$

Підставимо (19) в (17) і одержимо:

$$\frac{P-P_{A1}}{P-P_{A0}} = \exp \left[\frac{kl\rho RT(z_1-z_0)}{\mu p D_{AB}} \times \right. \\ \left. \times A(1-y)t^{y-1} \exp \left(-\frac{B}{\Delta T} \right) \right]. \quad (20)$$

При узгодженні системи одиниць рівняння (20) приймає вигляд:

$$\frac{P-P_{A1}}{P-P_{A0}} = \exp \left[\frac{kl\rho RT(z_1-z_0)}{\mu p D_{0AB}} \left(\frac{T}{T_0} \right)^m \times \right. \\ \left. \times 10^6 A(1-y)t^{y-1} \exp \left(-\frac{B}{\Delta T} \right) \right], \quad (21)$$

де: ρ – густина SiO_2 , г/см³; R – універсальна газова стала, Дж/моль·К; T – абсолютна температура, К; z_1-z_0 – відстань джерело-пластина кремнію, см; μ – молярна маса SiO_2 , г/моль; P – загальний тиск, Па; D_{0AB} – бінарний коефіцієнт дифузії B_2O_3 в азоті при температурі T_0 , см²/с; t – час, с; $\Delta T = T - T_0$, К; m, k, l, A, y, B – коефіцієнти, які залежать від типу джерела.

З рівняння (21) знаходимо (при відомому P_{A0}) P_{A1} в довільний момент часу. Позначимо $P - P_{A1} = P_{B1}$; $P - P_{A0} = P_{B0}$; відношення $(P - P_{A1})/(P - P_{A0}) = N$.

$$\text{Тоді } \frac{P_{B1}}{P_{B0}} = N; \quad P_{B1} = P_{B0}N; \quad \text{і } \frac{P_{A1}}{P_{A0}} = \frac{P - N \cdot P_{B0}}{P - P_{B0}};$$

поділимо праву частину на P :

$$\frac{P_{A1}}{P_{A0}} = \frac{1 - N \cdot X_{B0}}{1 - X_{B0}} = \frac{1 - N}{1 - X_{B0}} + N = \\ = \frac{1 - N}{X_{A0}} + N = N - \frac{N-1}{X_{A0}}. \quad (22)$$

Запишемо вираз (21) у вигляді $N = e^x$. Відомо, що при малих „x” функцію e^x можна апроксимувати виразом $e^x = 1 + x$. Тоді вираз (22) запишеться у вигляді:

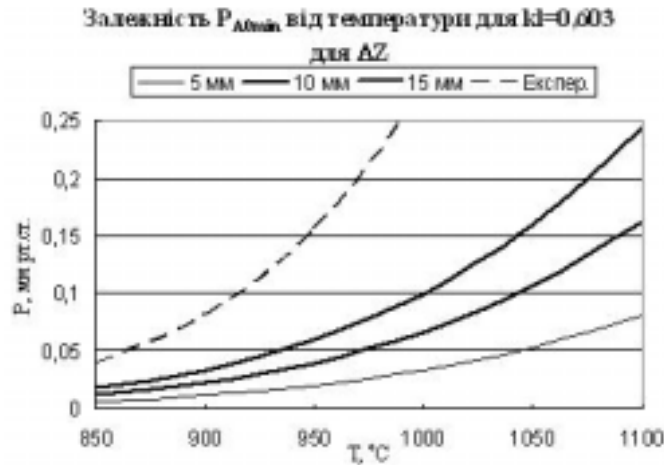


Рис. 3. Залежність мінімального тиску V_2O_3 від температури для $kl = 0,603$, $t = 5$ с при різних відстанях джерело – пластина кремнію (суцільні криві), та експериментальні дані тиску для реальних джерел (пунктирна лінія).

$$\frac{P_{Al}}{P_{A0}} = 1 + X - \frac{X}{X_{A0}}; \quad (23)$$

Для визначення відношення (23) необхідно знати X_{A0} (P_{A0}/P). Експериментальні результати з визначення складу і тиску рівноважної пари в залежності від температури для дифузантив на основі метафосфата алюмінію приведені в роботі [5]. З порівняльного аналізу результатів диференціально-термічного аналізу (ДТА) на дериватографі Q 1500 джерел на основі алюмоборосилікатних сполук і метафосфату алюмінію [6] в інтервалі температур 900-1100°C можна виразити рівноважний тиск V_2O_3 у вигляді:

$$\lg P(\text{Па}) = -8100/T(\text{К}) + 7,94 \quad (24)$$

Перепишемо вираз (21) у вигляді:

$$\frac{P - P_{Al}}{P - P_{A0}} = 1 + X;$$

$$P_{Al} = P - (P - P_{A0})(1 + X); \quad P_{Al} > 0;$$

тоді і $P - (P - P_{A0})(1 + X) > 0$;

розкриємо дужки і нехтуючи $P_{A0}X$, одержимо:

$$P_{A0} > PX. \quad (25)$$

Вираз (25) свідчить, що тиск V_2O_3 біля поверхні дифузанта повинен перевищувати добуток „X” на загальний тиск.

Для визначення швидкості росту боросилікатного скла на поверхні кремнію ми використовували як власні результати так і дані робіт [7]. Математична обробка результатів призвела до наступного рівняння залежності товщини оксиду (Å) від температури (К) і часу (с):

$$d = 0,2352 \cdot 10^6 t_c^{0,575} \exp\left(-\frac{10404}{T-273}\right). \quad (26)$$

Розрахунки за рівнянням (26) проводилися в інтервалі температур 850-1100°C та часу 15-120 хв.

Швидкість росту боросилікатного скла у

Таблиця

Результати розрахунку мінімального тиску V_2O_3 ($kl = 0,603$, $t = 5$ с) згідно з рівнянням (21) та експериментальні дані тиску реальних джерел (рівняння (24))

T, К	Мінімальний тиск V_2O_3 , в мм рт.ст.			Експеримент (рівн.(24))
	$(Z_0 - Z_1) = 5$ мм	$(Z_0 - Z_1) = 10$ мм	$(Z_0 - Z_1) = 15$ мм	
1123	0,0057	0,0115	0,0172	0,040
1173	0,0110	0,0220	0,0331	0,081
1223	0,0197	0,0394	0,0592	0,156
1273	0,0332	0,0664	0,0997	0,283
1323	0,0532	0,1063	0,1595	0,493
1373	0,0814	0,1629	0,2443	0,823

відповідності з рівнянням (19) буде:

$$V = 10^5 t_c^{-0,425} \exp\left(-\frac{10404}{T-273}\right). \quad (27)$$

Розрахунки за рівнянням (21) проводились за таких умов:

$\rho = 2,2 \text{ г/см}^3$; $\mu = 40 \text{ г/моль}$; $P = 10^5 \text{ Па}$;
 $R = 8,3 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$; $k = 0,67$, $l = 1, 0,9, 0,5$; $T = 1123, 1173, 1223, 1273, 1323, 1373 \text{ К}$; $t = 5, 10, 30, 60, 180, 600, 900 \text{ с}$. $D_{AB} = D_0(T/T_0)^m$, де D_0 для $\text{B}_2\text{O}_3 = 0,087 \text{ см}^2/\text{с}$, $m = 1,65$.

У таблиці та на рис. 3 приведені результати розрахунку тиску B_2O_3 (в мм рт. ст.) згідно з рівнянням (21), тобто його мінімально можливої величини, яка забезпечує необхідну швидкість росту боросилікатного скла на початку процесу дифузії ($kl = 0,603$; $t = 5 \text{ с}$), та за рівнянням (24), одержаним на основі узагальнення експериментальних результатів для реальних джерел.

З таблиці 1 та рис. 3 видно, що для всього інтервалу температур експериментальні значення тиску B_2O_3 значно (в 3,5-5 разів) перевищують мінімально-допустимі тиски, звідки випливає, що для даної швидкості росту боросилікатного скла:

– джерела на основі алюмоборосилікатних сполук на термостійких підкладках можна використовувати для відстаней джерело – пластина кремнію 15 мм і більше;

– збіднення джерела, яке ще буде давати задовільні результати легування пластин кремнію бором може перевищувати 20% маси.

Враховуючи (24), за рівнянням (23) проведено розрахунки залежності відносного тиску біля поверхні пластини кремнію для відстаней між джерелом і пластиною кремнію $\Delta Z = 5, 10, 15 \text{ мм}$ і температури 1000°C від часу. Результати розрахунків показані на рис. 4. З рис. 4 видно, що відносний тиск B_2O_3 в залежності від часу: а) зменшується із зменшенням вмісту B_2O_3 у боросилікатному склі; б) зменшується із збільшенням відстані джерело – пластина кремнію; в) збільшується із зростанням часу.

III. Висновки

В роботі аналізується механізм переносу газоподібного оксиду B_2O_3 від твердих планарних джерел бору на основі алюмоборосилікатних сполук до пластин кремнію діаметром 300 мм і більше, який враховує дифузію в твердому джерелі до поверхні, випаровування з поверхні і дифузію до пластини кремнію у інертному середовищі.

Визначені коефіцієнти дифузії молекул B_2O_3 в азоті для інтервалу температур $850\text{-}1100^\circ\text{C}$.

Одержано розподіл концентрацій B_2O_3 на проміжку між джерелом і пластиною кремнію. Показано, що характер цього розподілу залежить від тривалості процесу t і температури T .

Визначена залежність товщини боросилікатного скла яке формується на поверхні пластини кремнію в технологічних процесах легування, від температури і часу процесу дифузії за допомогою математичної обробки експериментальних результатів випробувань джерел бору. Визначена швидкість росту боросилікатного скла на поверхні пластин кремнію в початковій стадії процесу дифузії, на основі якої оцінено мінімальні тиски оксиду на поверхні джерела.

Експериментальні результати втрати маси джерелами в процесі експлуатації, а також дані ДТА дозволили оцінити рівноважний тиск B_2O_3 над джерелами на основі алюмоборосилікатних сполук. Показано, що для всього інтервалу температур експериментальні тиски в 3-5 разів перевищують мінімально-допустимі значення, при яких забезпечується необхідна швидкість росту боросилікатного скла для однорідного легування пластин кремнію.

Показано, що технологічно достатня концентрація B_2O_3 біля поверхні кремнію через 60 с перевищує 90% концентрації B_2O_3 на поверхні джерела для відстані джерело – пластина кремнію 15 мм.

Проведені в роботі розрахунки дозволяють зробити висновок, що тверді планарні джерела бору

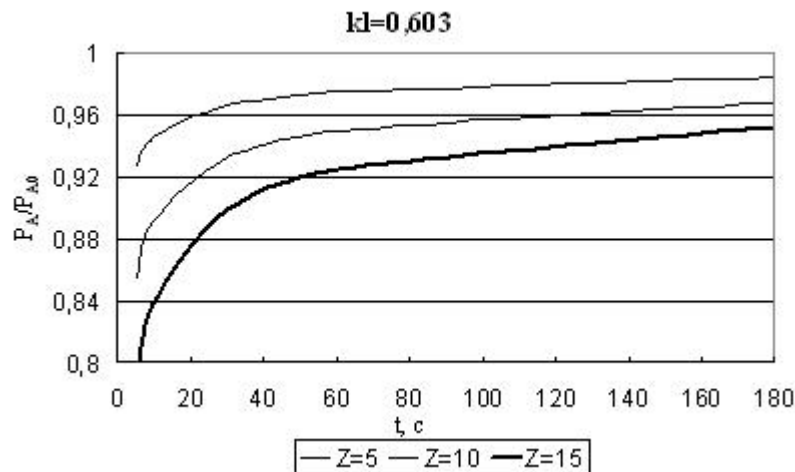


Рис. 4. Залежність відносного тиску B_2O_3 біля поверхні пластин кремнію від часу при різних відстанях джерело – пластина кремнію для $kl = 0,603$.

на основі алюмоборосилікатних сполук можна з успіхом застосовувати для дифузії у пластини кремнію діаметрами 300 мм і більше.

Автори висловлюють вдячність за всебічну підтримку та цінні поради при виконанні роботи професору Заячуку Дмитру Михайловичу.

- [1] В.А. Воронин, В.М. Мицишин, Т.И. Махова. Высокотемпературный твердый планарный источник для диффузии бора // *Вестник Львовского политехнического института. Теория и проектирование полупроводниковых и радиоэлектронных устройств*, **245**, сс. 130-132 (1990).
- [2] Р. Берд, В. Стьюарт, Е. Лайтфут. *Явления переноса*. Химия, М. 688 с. (1974).
- [3] W.H. Shepperd. Vapor phase deposition and etching of silicon // *J. Electrochem. Soc.*, **112**, pp. 983-988 (1965).
- [4] Б.Н. Юдаев. *Теплопередача*. Высш. шк., М. сс. 102-112 (1973).
- [5] Ю.Н. Богдановский, Л.З. Гасько. Исследование состава газовой фазы при диффузии фосфора с использованием твердых планарных источников // *Конструирование и технология микроэлектронной аппаратуры. Сб. научн. тр. МИЕТ*, (1981).
- [6] Ю.Н. Богдановский, Л.З. Гасько, Б.Р. Иващишин. Исследование термической диссоциации поликристаллического метафосфата алюминия // *Физическая электроника*, **38**, сс. 131-134 (1989).
- [7] Techneglas. Inc. Boron Plus. High Purity Planar Dopant Sources // *Technical Products*, <http://ftp2.techneglas.com/web2/products/dopant/boron2.htm> (1997).

Y.M. Bogdanovski, V.M. Myshchyshin

Masstransfer in System of Boron Solid Planar Sources and Silicon Plates with 300 mm Diameters

*National University "Lvivska Polytechnica",
12, Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine*

The mechanism of transfer in inertial environment of nitrogen is offered for gaseous B₂O₃ from the solid planar sources (SPS) of boron to the plates of silicon with such diameters as 300 mm and more. These SPS of boron were on the basis of alumina-boron-silicone substances (ABSS). In the temperature range 850–1100°C distribution of concentrations of B₂O₃ between SPS and plate of silicon was calculated as well as B₂O₃ diffusion coefficients were found in nitrogen. It was shown that at SPS use B₂O₃ concentration near the surface of silicon plate exceeds 90% of the B₂O₃ concentration on the surface of SPS after 60 seconds. This value is substantially less than duration of doping processing of silicon plate with boron.