

01;06

Аналитическая модель диффузионного перераспределения ионно-имплантированной примеси в подзатворной области МОП-транзистора

© *Е.Н. Бормонтов, Ю.И. Брызгунов, В.П. Леженин*

Воронежский государственный университет
E-mail: phme22-1@main.vsu.ru

Поступило в Редакцию 29 июля 2002 г.

Решена задача о диффузионном перераспределении имплантированной примеси в системе двуокись кремния — кремний в процессе термического отжига с учетом различия параметров двух сред и сегрегации примеси на границе их раздела.

Широкое использование ионной имплантации в технологии микроэлектроники определяет необходимость разработки моделей МОП (металл–окисел–полупроводник) элементов интегральных схем (ИС) с учетом неоднородного распределения имплантированной примеси, оказывающего существенное влияние на электрические параметры МОП-структуры. Аналитические модели, подобные [1], позволяют получить явные выражения для рабочих характеристик МОП-прибора, однако точность их невысока из-за использования грубых аппроксимаций реального профиля легирующей примеси (в виде ступенчатой или импульсной функций). С другой стороны, численные модели с более реальными профилями примеси зависят от большого числа плохо определяемых параметров и малоприспособны для выбора технологических режимов формирования ионно-легированных МОП-элементов ИС. Сохранить „технологическую прозрачность“ входящих в модель параметров и сократить затраты машинного времени позволяет полуаналитическое моделирование ионно-легированных МОП-транзисторов [2–4], в котором обычно используется гауссовская аппроксимация, хорошо описывающая распределение примеси непосредственно после имплантации [5]. Использование этой аппроксимации в полуаналитических

моделях требует физического обоснования, так как последующие термообработки для разгонки и активации примеси приводят к диффузионному перераспределению имплантированной примеси. В работе дан анализ такого перераспределения в системе $\text{SiO}_2\text{-Si}$ с учетом различия параметров двух сред и сегрегации примеси на границе их раздела, позволяющий установить условия, в которых результирующий профиль примеси можно аппроксимировать суперпозицией модифицированных распределений Гаусса.

При изготовлении МОП-транзисторов обычно применяется ионное легирование бором, фосфором и мышьяком. Для устранения эффекта каналирования и регулирования глубины залегания ионов имплантацию примеси, как правило, проводят через тонкий аморфный слой окисла, функцию которого обычно выполняет подзатворный диэлектрик. Система $\text{SiO}_2\text{-Si}$ является двухслойной мишенью, имеющей близкие атомные номера и массы, поэтому для нее можно воспользоваться простой моделью Ишивары [6], согласно которой распределение ионно-легированной примеси $N_0(x)$ непосредственно после имплантации имеет вид функции Гаусса

$$N_0(x) = N_B + \frac{D_I}{\sqrt{2\pi} \Delta R_{\text{PSi}}} \exp \left[-\frac{(x_C - x)^2}{2\Delta R_{\text{PSi}}^2} \right], \quad (1)$$

где N_B — базовая концентрация примеси в полупроводниковой подложке, D_I — доза имплантированных ионов, ΔR_{PSi} — среднеквадратичное отклонение ионов в кремнии, $x_C = (R_{\text{PSiO}_2} - d_{\text{SiO}_2})\Delta R_{\text{PSi}}/\Delta R_{\text{PSiO}_2}$ — центр тяжести имплантированной примеси, R_{PSiO_2} — средняя длина пробега ионов в окисле, d_{SiO_2} — толщина подзатворного окисла, ΔR_{PSiO_2} — среднеквадратичное отклонение ионов в окисле.

Для нахождения результирующего профиля распределения имплантированной примеси с учетом диффузионных и сегрегационных явлений вблизи границы раздела окисел-кремний необходимо решить уравнение диффузии (Фика)

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

где N — концентрация примеси, D — коэффициент диффузии.

Так как имплантация в подзатворную область МОП-приборов проводится через слой окисла с толщиной порядка R_{PSiO_2} , максимум распределения имплантированной примеси x_C лежит вблизи границы

раздела окисел–полупроводник и для точного нахождения результирующего профиля необходимо решение уравнения (2) в двух областях — в полупроводнике и окисле. Однако ширина запрещенной зоны SiO₂ составляет около 8 eV, поэтому используемые для имплантации легирующие примеси (бор, фосфор, мышьяк, сурьма) при температуре эксплуатации МОП-приборов (~ 300 К) неактивны, их заряд равен нулю и не входит в уравнение Пуассона. Следовательно, для моделирования МОП-приборов достаточно знать распределение примеси только в полупроводнике.

В случае низкотемпературного кратковременного отжига, применяемого на конечных стадиях изготовления МОП ИС для активации малых доз имплантированной примеси при корректировке порогового напряжения МОП-транзистора обогащенного типа, профиль распределения изменяется незначительно. В этом случае диффузионная длина примеси $L = \sqrt{D_{Si}t} \ll \Delta R_{P_{Si}}$ (D_{Si} — коэффициент диффузии примеси в кремнии, t — время отжига), поэтому при учете диффузионного перераспределения среду можно считать однородной и бесконечной. Решение уравнения Фика (2) с начальным условием в виде гауссовского распределения (1) представляет собой также гауссовскую функцию с модифицированным стандартным отклонением $\sigma = \sqrt{\Delta R_{P_{Si}}^2 + 2Dt}$ [4]:

$$N(x, t) = N_B + \frac{D_I}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x_C - x)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (3)$$

С другой стороны, при формировании встроенного канала транзистора обедненного типа применяется длительная высокотемпературная разгонка имплантированной примеси. При этом ее диффузионная длина L может превосходить $\Delta R_{P_{Si}}$, и при нахождении результирующего профиля необходимо учитывать неоднородность среды.

Так как толщина подзатворного диэлектрика составляет 20–50 nm и значительно превышает характерные для современной технологии диффузионные длины используемых имплантантов в окисле $L = \sqrt{D_{SiO_2}t} < 10$ nm (D_{SiO_2} — коэффициент диффузии примеси в двуокиси кремния), то при решении уравнения Фика область диэлектрика можно считать полубесконечной, так же как и область полупроводника с толщиной порядка сотен микрометров. Таким образом, уравнение Фика с соответствующими граничными условиями для данной структуры

имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial N_i}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 N_i}{\partial x^2}, & x \leq 0; \\ \frac{\partial N_s}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 N_s}{\partial x^2}, & x \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} D_i \frac{\partial N_i}{\partial x} = D_s \frac{\partial N_s}{\partial x}, & x = 0, t > 0; \\ \mu N_i = N_s, & x = 0, t > 0; \\ N_i = 0, & x \rightarrow -\infty, t \geq 0; \\ N_s = 0, & x \rightarrow +\infty, t \geq 0. \end{cases} \quad (5)$$

В формулах (4) и (5) индекс i относится к окислу, индекс s — к полупроводнику, μ — коэффициент сегрегации примеси на границе раздела окисел–полупроводник.

Начальным условием к системе (4), (5) выбирается распределение примеси по модели Ишивары, имеющее гауссову форму (1). Как уже отмечалось, толщина подзатворного окисла в современных приборах не превышает 50 nm. Характерные энергии имплантируемых ионов бора — 40–60 keV, фосфора — порядка 100 keV. При таких энергиях максимум распределения примеси x_C лежит на глубине более $1.5\Delta R_{PSi}$, поэтому практически вся имплантированная примесь (более 95%) попадает в кремний. Так как в окисле содержится менее 5% имплантированной примеси, ее начальным распределением в этой области можно пренебречь и для нахождения результирующего профиля ограничиться решением задачи (4), (5), (1) только в области полупроводника.

Система (4), (5) представляет собой краевую задачу третьего рода для уравнения параболического типа. Решение данной задачи представляется в виде суммы решений только начальной задачи $N_1(x, t)$ и только граничной задачи $N_2(x, t)$:

$$N(x, t) = N_1(x, t) + \gamma N_2(x, t), \quad (6)$$

где $\gamma = (\mu - \sqrt{D_{SiO_2}/D_{Si}})/(\mu + \sqrt{D_{SiO_2}/D_{Si}})$ — коэффициент „влияния границы раздела“.

Задача решается методом функции источника [7]:

$$N_1(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \int_0^{\infty} N_0(\xi) \exp\left[-\frac{(x-\xi)^2}{4Dt}\right] d\xi, \quad (7)$$

$$N_2(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \int_0^{\infty} N_0(\xi) \exp\left[-\frac{(x+\xi)^2}{4Dt}\right] d\xi. \quad (8)$$

Подставляя в (7), (8) начальное распределение $N_0(\xi)$ в виде (1), получим

$$\begin{aligned} N(x, t) = & \frac{N_B}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right] + \frac{D_I}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x_C-x)^2}{2\sigma^2}\right] \\ & \times \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{\frac{x_C}{\Delta R_{\text{PSi}}} + \frac{x}{2Dt}}{2\sqrt{\frac{1}{2\Delta R_{\text{PSi}}^2} + \frac{1}{4Dt}}}\right) \right\} \\ & + \gamma \left[\frac{N_B}{2} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right] + \frac{D_I}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x_C+x)^2}{2\sigma^2}\right] \right. \\ & \left. \times \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{\frac{x_C}{\Delta R_{\text{PSi}}} - \frac{x}{2Dt}}{2\sqrt{\frac{1}{2\Delta R_{\text{PSi}}^2} + \frac{1}{4Dt}}}\right) \right\} \right]. \quad (9) \end{aligned}$$

В выражении (9) $\sigma = \sqrt{\Delta R_{\text{PSi}}^2 + 2Dt}$ — „модифицированное“ стандартное отклонение.

Проанализируем полученное соотношение. Решение представляет собой сумму двух функций $N_1(x, t)$ и $N_2(x, t)$, симметричных относительно границы раздела окисел–кремний, причем второе слагаемое входит в (9) с коэффициентом γ , лежащим в диапазоне $[-1; 1]$. Поскольку максимум распределения расположен в области полупроводника ($x_C > 0$), то $N_1(x, t) > N_2(x, t)$ при всех $x > 0$, а при $x = 0$ $N_1(x, t) = N_2(x, t)$ (рис. 1). Обозначим множители в фигурных скобках в выражении (9) через $f_1(x, t)$ и $f_2(x, t)$, а входящие в (9) функции Гаусса через $N_1^*(x)$ и $N_2^*(x)$ соответственно. Функции $N_1^*(x)$ и $N_2^*(x)$, $f_1(x, t)$ и $f_2(x, t)$ также попарно симметричны относительно границы раздела окисел–кремний.

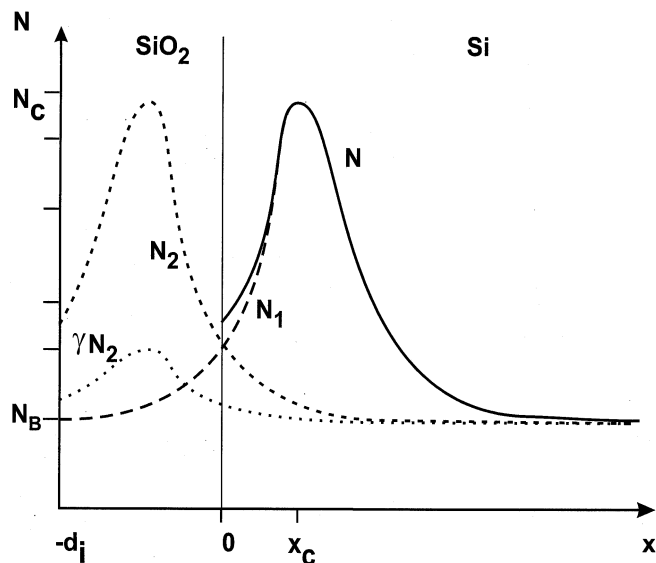


Рис. 1. Графики функций $N(x)$, $N_1(x)$, $N_2(x)$ и $\gamma N_2(x)$ с типичными для бора параметрами имплантации и термообработки: $x_c = 0.1 \mu\text{m}$, $\Delta R_{\text{PSi}} = 0.05 \mu\text{m}$, $L = 0.065 \mu\text{m}$, $\gamma = 0.1$.

Функции $f_1(x, t)$ и $f_2(x, t)$ зависят от начальных параметров распределения x_c и ΔR_{PSi} и диффузионной длины примеси в кремнии $L = \sqrt{D_{\text{Si}}t}$. При формировании встроенных каналов обычно проводится двухстадийная разгонка имплантированной примеси со следующими типичными параметрами: для бора (p -канал) температура первого отжига $T_1 = 950^\circ\text{C}$, время $t_1 = 70 \text{ min}$; температура второго отжига $T_2 = 1000^\circ\text{C}$, время $t_2 = 20 \text{ min}$; для фосфора (n -канал) $T_1 = 950^\circ\text{C}$, $t_1 = 100 \text{ min}$; $T_2 = 1000^\circ\text{C}$, $t_2 = 30 \text{ min}$. При этом диффузионная длина как бора, так и фосфора $L = \sqrt{D_1 t_1 + D_2 t_2} \approx 0.065 \mu\text{m}$. Типичные значения x_c и ΔR_{PSi} составляют соответственно 0.1 и 0.05 μm как для бора, так и для фосфора. Функция $f_1(x)$ асимптотически стремится к 1 с ростом x и превышает 0.93 при всех $x > 0$, поэтому с погрешностью не более 7% ее можно принять равной единице. Функция $N_2(x)$ представляет собой произведение функции $f_2(x)$ на быстро

убывающую с ростом x функцию Гаусса $N_2^*(x)$ (рис. 1), поэтому вклад функции $N_2(x)$ в общую концентрацию $N(x)$ быстро уменьшается в глубь полупроводника и, следовательно, без большой потери точности функцию $f_2(x)$ также можно принять равной единице. Изменение базовой концентрации примеси N_B вследствие сегрегации значительно только в приграничной области на глубине до диффузионной длины L , однако этим можно пренебречь, так как концентрация имплантированной примеси в этой области на порядок превосходит N_B . Таким образом, результирующее распределение легирующей примеси в кремнии после термообработки можно представить в виде

$$N(x, t) = N_B + \frac{D_I}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x_C - x)^2}{2\sigma^2}\right] + \gamma \frac{D_I}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x_C + x)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (10)$$

Выражение (10) уже является дважды интегрируемой функцией, однако его можно упростить, приняв во внимание значение γ при реальных температурах термообработок. Из выражения $\gamma = (\mu - \sqrt{D_{\text{SiO}_2}/D_{\text{Si}}})/(\mu + \sqrt{D_{\text{SiO}_2}/D_{\text{Si}}})$ видно, что γ лежит в интервале от -1 до 1 , что соответствует полностью открытой и полностью закрытой границам [5]. Принято считать [8], что для бора граница раздела Si-SiO₂ является открытой ($\gamma = -1$), для фосфора — закрытой ($\gamma = 1$). Однако поскольку коэффициенты диффузии и сегрегации зависят от температуры, коэффициент γ также является температурно-зависимой величиной [9]. График температурной зависимости коэффициента влияния границы раздела для бора приведен на рис. 2. Из него видно, что при температурах больше 950°C $\gamma \leq 0.1$. Таким образом, учитывая, что $\gamma \leq 0.1$, можно записать окончательное выражение для распределения бора в кремнии после длительной высокотемпературной разгонки, которое выполняется с погрешностью, не превышающей 10% [10]:

$$N(x, t) = N_B + \frac{D_I}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x_C - x)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (11)$$

Выражение (11) по виду не отличается от (3), однако стандартное отклонение σ в случае длительной высокотемпературной разгонки в основном определяется не ΔR_{PSi} , а параметрами термообработки (температурами и временами отжига, определяющими диффузионную длину бора в кремнии).

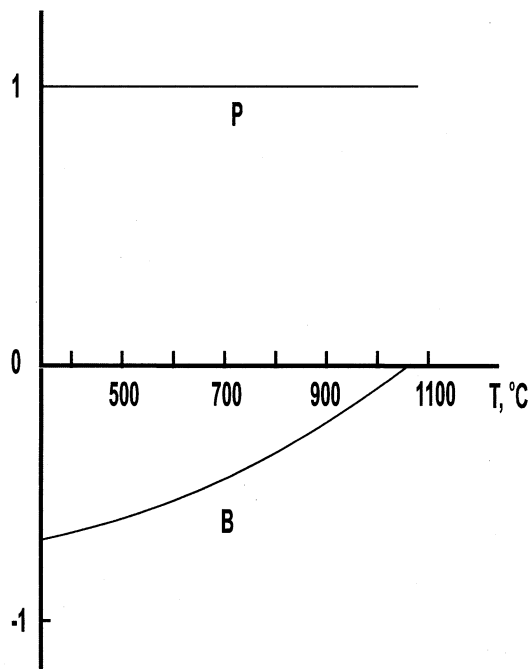


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента „влияния границы“ γ для бора и фосфора.

В отличие от бора, коэффициент сегрегации фосфора на границе раздела Si-SiO₂ – $\mu \gg \sqrt{D_{\text{SiO}_2}/D_{\text{Si}}}$ при любых температурах [8], следовательно, коэффициент „влияния границы“ практически не зависит от температуры и равен единице, поэтому выражение (11) нельзя использовать для описания профиля распределения фосфора вблизи границы окисел–кремний, а следует использовать выражение (10).

Таким образом, в большинстве практически важных случаев профиль имплантированной примеси имеет вид дважды интегрируемой функции, что удобно для моделирования МОП-приборов. Подчеркнем, что выбор гауссовского распределения для аппроксимации профиля легирующей примеси в данной модели не случаен. Несмотря на то, что реальные имплантационные профили несколько асимметричны и более

адекватно описываются функциями с моментами выше второго порядка (например, функцией Пирсона-IV), их использование в полуаналитическом моделировании затрудняется невозможностью интегрирования уравнения Пуассона в аналитических и специальных функциях. В то же время точности описания профиля функцией Гаусса вполне достаточно для моделирования электрических параметров МОП-приборов, что подтверждается экспериментальными данными [3,4].

Список литературы

- [1] *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. Т. 2 / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 456 с.
- [2] *Крупкина Т.Ю.* // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1985. Т. 28. № 12. С. 31–34.
- [3] *Бормонтов Е.Н., Леженин В.П.* // Микроэлектроника. 1995. Т. 24. № 5. С. 343–348.
- [4] *Бормонтов Е.Н., Леженин В.П., Сай И.В.* // Микроэлектроника. 1997. Т. 26. № 1. С. 38–41.
- [5] *Руссел Х., Руге И.* Ионная имплантация / Пер. с нем. М.: Наука, 1983. 425 с.
- [6] *Ishivara H. et al.* Ion implantation in semiconductors. N.Y.: Plenum Press, 1975. 345 p.
- [7] *Тихонов Н.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. М.: Физматгиз, 1951. 680 с.
- [8] *Бубенников А.Н.* Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. М.: Высш. школа, 1989. 320 с.
- [9] *Bormontov E.N., Lezhenin V.P.* // 1997 MRS Spring Meeting. San Francisco. Symposium E. Abstract # 10425.
- [10] *Bormontov E.N., Lezhenin V.P., Lukashkov V.V.* // Proc. of the 5th Int. Conf. on Simulation of Devices and Technologies. Obninsk, 1996. P. 103.