

Влияние стоков собственных точечных дефектов на диффузию фосфора в кремнии

© О.В. Александров[¶]

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,
197376 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 11 сентября 2001 г. Принята к печати 25 апреля 2002 г.)

На основе модели диффузии фосфора в кремнии по дуальному парному механизму проведен количественный анализ влияния стоков, связанных со структурными дефектами. Показано, что учет стоков для собственных межузельных атомов приводит к замедлению ускоренной диффузии фосфора в области малых концентраций на хвосте концентрационного профиля. Влияние стоков наиболее сильно выражено при положении максимума их концентрации в области максимума генерации собственных межузельных атомов внутри диффузионного слоя. Из сравнения расчетов с экспериментальными данными определены параметры захвата собственных межузельных атомов на структурные дефекты, введенные диффузией фосфора и имплантацией электрически неактивных примесей Ge и N.

1. Введение

При диффузии фосфора с высокой поверхностной концентрацией наблюдается ряд особенностей, отличающих фосфор от других легирующих примесей в кремнии: плато на профиле в области высоких концентраций, перегиб и хвост в области низких концентраций, низкотемпературная диффузия, перераспределение других совместно диффундирующих примесей замещения в базе транзисторов (дип-эффект) и в глубоко залегающих скрытых слоях [1–3]. Для объяснения этих особенностей предложен ряд моделей, основанных на различных механизмах диффузии (см. обзор в [4]). Еще одной особенностью является замедление диффузии фосфора в кремнии структурными дефектами, введенными диффузией или имплантацией самой примеси фосфора [5–8], а также имплантацией электрически неактивных примесей Si [9], Ge [10], N и O [11]. Замедление проявляется наиболее явно в области малых концентраций на хвосте концентрационного профиля. В работах [6–8] было обращено внимание на то обстоятельство, что структурные дефекты приводят к замедлению ускоренной диффузии, характерной для высоких поверхностных концентраций фосфора. Для объяснения эффекта выдвигались самые различные причины. Так, в [1,2] замедление диффузии фосфора при высоких поверхностных концентрациях связывали с его преципитацией, а в [12] — с захватом примеси структурными дефектами. В пользу такого объяснения свидетельствовали нерегулярности, обнаруженные на концентрационных профилях фосфора, коррелирующие по глубине залегания со вторичными дефектами, образующимися при отжиге имплантированных слоев (дислокации, дислокационные петли, стержневые дефекты) [9,13]. Замедление диффузии фосфора при диффузионном введении Ge объяснялось авторами [5] компенсацией диффузионно-введенных напряжений, полагавшихся причиной ускоренной диффузии фосфора. В работах [6–8] эффект замедления связывался с захва-

том на дислокации избыточных собственных точечных дефектов (СТД), полагалось — вакансий, образующихся в слое, сильно легированном фосфором. В настоящее время установлено, что при диффузии фосфора с высокой поверхностной концентрацией, так же как и при термическом окислении кремния, генерируются избыточные собственные межузельные атомы (СМА) [3]. Согласно модели диффузии фосфора по дуальному парному механизму (посредством вакансионных PV и межузельных PI пар) [4], избыточные СМА образуются в результате диффузии и последующего распада нейтральных PI пар из области с высокой концентрацией фосфора. В этом случае наличие структурных дефектов, являющихся стоками для СТД, должно замедлять диффузию фосфора.

Цель настоящей работы — количественный анализ влияния стоков, связанных со структурными дефектами, на диффузию фосфора в кремнии на основе модели его диффузии по дуальному парному механизму.

2. Учет влияния стоков

Диффузия фосфора в кремнии по дуальному парному механизму, согласно модели [4], может быть описана двумя уравнениями для самого фосфора и для суммарной концентрации нейтральных PI пар и СМА с коэффициентами диффузии, зависящими от концентраций компонентов:

$$\frac{\partial C_P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_P \frac{\partial C_P}{\partial x} \right) - R_P, \quad (1)$$

$$\frac{\partial F_I}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{FI} \frac{\partial F_I}{\partial x} \right) - R_{FI}, \quad (2)$$

где x — координата, t — время, C_P — полная концентрация фосфора, D_P — коэффициент диффузии фосфора, зависящий от локальной концентрации носителей заряда и пересыщения по СТД, F_I — суммарная концентрация нейтральных PI пар и СМА, $F_I = F + I^0$, D_{FI} — их

[¶] E-mail: aleks_ov@mailbox.alkor.ru

коэффициент диффузии, $D_{FI} = (D_F F + D_I I^0)/F_I$, D_F и D_I — коэффициенты диффузии нейтральных PI пар и СМА соответственно. Наличие стоков для примеси фосфора учтем путем включения в правую часть уравнения (1) дополнительного члена R_P , а наличие стоков для PI пар и СМА — путем включения в правую часть уравнения (2) дополнительного члена R_{FI} , описывающих скорость ухода на стоки атомов фосфора, PI пар и СМА соответственно. Захват стоками фосфора полагаем либо обратимым, либо необратимым. В первом случае $R_P = k_{1P}C_{R0}C_P - k_{2P}C_{RR}$, где k_{1P} — константа скорости захвата атомов фосфора свободными стоками, k_{2P} — константа скорости возврата атомов фосфора заполненными стоками, C_{R0} — концентрация свободных (незаполненных) стоков (ловушек), C_{RR} — концентрация заполненных стоков. В состоянии локального равновесия диффузия с обратимым захватом на ловушки аналогична диффузии с образованием неподвижных комплексов и описывается эффективным коэффициентом диффузии, $D_{ef} = \Omega D_P$, где Ω — коэффициент замедления диффузии [14],

$$\Omega = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{C_P - C_R + 1/k_P}{\sqrt{(C_P - C_R + 1/k_P)^2 + 4C_R/k_P}} \right], \quad (3)$$

где C_R — полная концентрация ловушек ($C_R = C_{R0} + C_{RR}$), k_P — константа равновесия реакции обратимого захвата фосфора, $k_P = k_{1P}/k_{2P}$. В случае необратимого захвата $R_P = k_{1P}C_{R0}C_P$. Для процесса захвата фосфора, лимитированного диффузией, $k_{1P} = 4\pi r_P D_P$, где r_P — радиус взаимодействия атомов фосфора со стоками.

Захват стоками избыточных СМА и PI пар полагаем необратимым. В случае захвата стоками нейтральных СМА имеем $R_{FI} = k_{1I}C_{R0}(I - I_{eq})$, где k_{1I} — константа скорости захвата стоками избыточных СМА, I_{eq}^0 — термодинамически равновесная концентрация нейтральных СМА. Для процесса захвата, лимитированного диффузией, $k_{1I} = 4\pi r_I D_I$, где r_I — радиус взаимодействия СМА со стоками. Связь концентрации нейтральных СМА с концентрацией F_I имеет вид $F_I = (1 + k_{FI}n C_P^+)I^0$, где $k_{FI} = k_F k_I$, k_F — константа равновесия реакции образования — распада нейтральных PI пар, k_I — константа равновесия реакции перезарядки СМА, C_P^+ и n — концентрации ионизованного фосфора и электронов соответственно. В случае захвата стоками нейтральных PI пар имеем $R_{FI} = k_{1F}C_{R0}(F - F_{eq})$, где k_{1F} — константа скорости захвата стоками избыточных PI пар, F_{eq} — концентрация PI пар, соответствующая термодинамически равновесной концентрации СМА, $F_{eq} = k_{FI}n C_P^+ I_{eq}^0$. Для процесса захвата, лимитированного диффузией, $k_{1F} = 4\pi r_F D_F$, где r_F — радиус взаимодействия PI пар со стоками. Связь концентрации нейтральных PI пар с концентрацией F_I имеет вид $F_I = [1 + 1/(k_{FI}n C_P^+)]F$. Кроме того, при захвате стоками PI пар необходимо учесть последующее освобождение с них фосфора: $R_P = -R_{FI}$.

Уравнения диффузии (1) и (2) для фосфора, нейтральных PI пар и СМА с дополнительными членами R_P или R_{FI} решались численно методом конечных разностей с использованием неявной разностной схемы. Начальные и граничные условия задавались в соответствии с условиями экспериментов [8,10,11], в которых стоками являлись структурные дефекты, введенные диффузией фосфора [8], а также имплантацией ионов электрически неактивных примесей: Ge [10], N и O [11].

3. Результаты моделирования

Сравнение различных вариантов захвата атомов фосфора, избыточных СМА и PI пар на стоки, образованные имплантацией Ge, проводилось для условий эксперимента [10], в котором фосфор вводился в кремний методом ионной имплантации (45 кэВ , $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) отдельно или совместно с имплантацией Ge (125 кэВ , $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) при последующем отжиге (900°C , 10 мин в N_2). При отжиге имплантированного слоя первичные радиационные дефекты трансформируются во вторичные. Поскольку плотности структурных дефектов в эксперименте [10] не определялось, будем полагать, что распределение концентрации стоков связано с распределением концентрации более тяжелой имплантированной примеси Ge, создающей большее количество радиационных дефектов на один налетающий ион, $C_R(x, t) = k C_{Ge}(x, 0)$, где k — коэффициент пропорциональности. Распределения исходных концентраций обеих примесей P и Ge после имплантации полагаем подчиняющимися нормальному закону:

$$C(x, 0) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\Delta R_P} \exp \left[-\frac{(x - R_P)^2}{2\Delta R_P^2} \right], \quad (4)$$

где Q — количество (доза) внедренной примеси, R_P и ΔR_P — средний проецированный пробег и среднеквадратичное отклонение пробега („страгглинг“) брались из таблиц в [15]. Граничные условия при отжиге на поверхности (при $x = 0$) и на конце области решения (при $x = L$) для уравнений (1) и (2) имели вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_P(0, t)}{\partial x} &= \frac{\partial C_P(L, t)}{\partial x} = 0, \\ F_I(0, t) &= F_{IS}(t), \quad \frac{\partial F_I(L, t)}{\partial x} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где $F_{IS}(t) = [1 + k_{FI}n_S(t)C_{PS}^+(t)]I_S^0$, C_{PS}^+ и n_S — поверхностные концентрации ионизованного фосфора и электронов. Отметим, что в последнем выражении поверхностные концентрации носителей и ионизованного фосфора зависят от времени отжига, а поверхностная концентрация нейтральных СМА I_S^0 превышает термодинамически равновесную I_{eq}^0 в $\langle a \rangle_t$ раз, где $\langle a \rangle_t$ — усредненное по времени пересыщение по СТД, образующееся при отжиге введенных имплантацией радиационных дефектов.

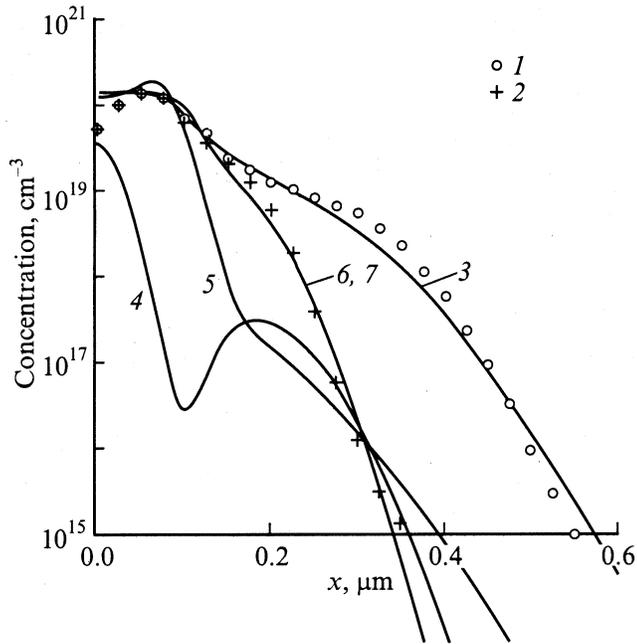


Рис. 1. Профили носителей заряда при отжиге (900°C , 10 мин в N_2) слоя кремния, имплантированного фосфором (45 кэВ , $5 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$) (1, 3), а также Ge (125 кэВ , $5 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$) (2, 4–7). Точки 1, 2 — эксперимент [10]; кривые 3–7 — расчет при: 3 — $C_R = 0$; 4–7 — $C_R = kC_{\text{Ge}}$; 4 — $k = 1$, $k_P = 3 \cdot 10^{-19}\text{ см}^3$; 5 — $kr_P = 1.5 \cdot 10^{-10}\text{ см}$; 6 — $kr_I = 3.4 \cdot 10^{-12}\text{ см}$; 7 — $kr_F = 1.7 \cdot 10^{-10}\text{ см}$.

Удовлетворительное совпадение расчетного распределения концентрации носителей по глубине в отсутствие стоков с экспериментальным распределением без имплантации Ge (рис. 1, точки 1) достигается при значении $\langle a \rangle_t = 4.2$ (рис. 1, кривая 3). При наличии имплантации Ge происходит подавление хвоста на распределении фосфора (рис. 1, точки 2) ниже концентрации перегиба ($C_k \cong 2 \cdot 10^{19}\text{ см}^{-3}$ при 900°C). Параметры взаимодействия со стоками (k_P , kr_P , kr_I и kr_F) подбирались при расчете таким образом, чтобы распределения фосфора проходили через точку $x_j \cong 0.31\text{ мкм}$ на уровне концентрации $1 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$. Как видно из рис. 1, расчетные профили фосфора как при обратимом (кривая 4), так и при необратимом (кривая 5) захвате фосфора на стоки по форме существенно отличаются от экспериментального (точки 2), в то время как при захвате избыточных СМА и PI пар расчетные профили (кривые 6, 7) достаточно хорошо описывают экспериментальный профиль, практически совпадая друг с другом. Совпадение с экспериментом в случае захвата СМА достигается при параметре захвата $kr_I = 3.4 \cdot 10^{-12}\text{ см}$, значительно меньше, чем в случае захвата PI пар $kr_F = 1.7 \cdot 10^{-10}\text{ см}$. Это означает, что захват на стоки СМА более эффективен, чем захват PI пар. В связи с этим результатом далее будем рассчитывать захват на стоки только СМА.

В условиях эксперимента [8] перед диффузией фосфора проводилась предварительная имплантация ионов

Ar⁺ с разными дозами (100 и 1000 мкКл/см²) и отжиг при разных температурах (1000 и 1100^oC). Последующая диффузия фосфора (1000^oC, 5 мин) приводила к преобразованию предварительно введенных дислокационных петель в криволинейные дислокации, нерегулярные дислокационные сетки и дислокационные клубки с плотностями дислокаций N_d от $1 \cdot 10^9$ до $5 \cdot 10^9\text{ см}^{-2}$ в зависимости от условий имплантации и отжига (вид дефектов и их плотности определялись методом просвечивающей электронной микроскопии). Полагаем, что дислокации в диффузионном слое распределены по нормальному закону, тогда объемная концентрация стоков определяется выражением

$$C_R(x, t) = \frac{\sqrt{N_d}}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-x_m)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (6)$$

где x_m и σ — соответственно глубина, соответствующая максимуму, и ширина распределения плотности дислокаций; a — межатомное расстояние ($a = 2.35 \cdot 10^{-8}\text{ см}$ в решетке кремния). Как было показано в [16], дислокации, образующиеся при диффузии, следуют за диффузионным фронтом, находясь на глубине $(0.3-0.5)x_j$, где x_j — глубина залегания $p-n$ -перехода. Поэтому в расчетах принимаем $x_m = 0.4x_j$, $\sigma = 0.1x_m$; в качестве глубины залегания x_j бралась координата, соответствующая уровню концентрации фосфора $1 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$. Граничные условия для уравнений (1) и (2) имели вид

$$\begin{aligned} C_P(0, t) &= C_{PS}, & \frac{\partial C_P(L, t)}{\partial x} &= 0, \\ F_I(0, t) &= F_{IS}, & \frac{\partial F_I(L, t)}{\partial x} &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где C_{PS} — поверхностная концентрация фосфора, $C_{PS} \cong 8 \cdot 10^{20}\text{ см}^{-3}$ ($n_S \cong 2.9 \cdot 10^{20}\text{ см}^{-3}$), $F_{IS} = I_{eq}^0 + F_{eq}$. Результаты расчетов профилей носителей заряда для стока избыточных СМА при разной плотности дислокаций при значении $kr_I = 2.3 \cdot 10^{-10}\text{ см}$ представлены на рис. 2 (сплошные линии) в сравнении с экспериментальными профилями из работы [8] (точки 1–4). Как видно из рисунка, с увеличением плотности дислокаций от $1 \cdot 10^9$ до $5 \cdot 10^9\text{ см}^{-2}$ расчет дает все более сильное подавление хвоста на профиле фосфора при концентрациях ниже концентрации перегиба ($C_k \cong 5 \cdot 10^{19}\text{ см}^{-3}$ при 1000°C) в хорошем соответствии с экспериментом. Отметим, что близкие значения параметра захвата СМА $kr_I = (2.3-7)10^{-10}\text{ см}$ получаются и для дислокаций несоответствия, введенных диффузией фосфора при температуре 1100°C , из обчета экспериментальных профилей, приводимых в работе [5]. Отметим сильное влияние на относительную глубину залегания x_j/x_{j0} (x_{j0} — глубина залегания в отсутствие дислокаций) положения максимума x_m (рис. 3, кривая 1) и слабое влияние ширины σ (рис. 3, кривая 2) распределения дислокаций. Первый результат обусловлен неоднородным распределением избыточных СМА по глубине диффузионного слоя как в отсутствие (рис. 3, кривая 3),

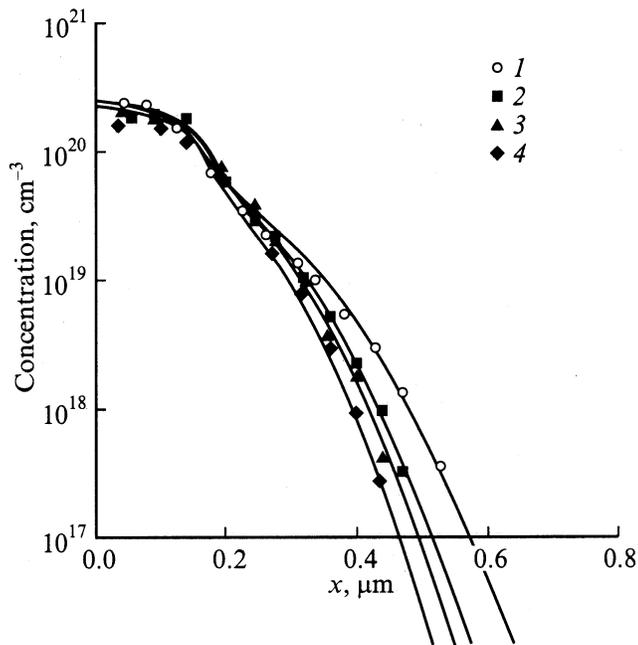


Рис. 2. Профили носителей заряда после диффузии фосфора (1000°C , 5 мин) при плотности дислокаций N_d , см^{-2} : 1 — 0, 2 — $1 \cdot 10^9$, 3 — $3 \cdot 10^9$, 4 — $5 \cdot 10^9$. Точки — эксперимент [8], сплошные линии — расчет при $kr_I = 2.3 \cdot 10^{-10}$ см.

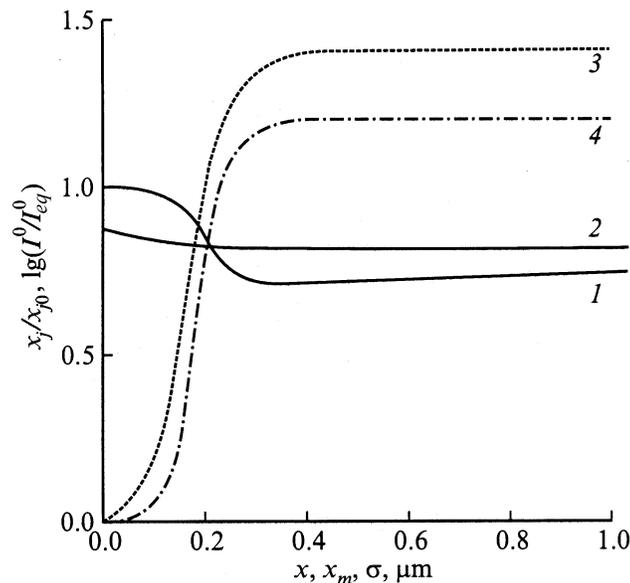


Рис. 3. Зависимости относительной глубины залегания x_j/x_{j0} от положения максимума x_m (1) и ширины σ (2) распределения плотности дислокаций. Пунктиром (3) показано распределение относительного пересыщения СМА I^0/I_{eq}^0 по глубине при $N_d = 0$, штрихпунктиром (4) — при $N_d = 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$.

так и в присутствии (рис. 3, кривая 4) дислокаций; влияние x_m наиболее велико в области максимальной генерации СМА при $x_m \cong 0.4x_{j0}$. Второй результат — сохранением интегральной концентрации стоков при из-

менении ширины распределения плотности дислокаций в выражении (6).

В эксперименте [11] исследовалось влияние имплантации примесей N и O на низкотемпературную ($500\text{--}600^{\circ}\text{C}$) диффузию фосфора из слоя, сформированного предварительной высокотемпературной ($950\text{--}1000^{\circ}\text{C}$, 5–35 мин) диффузией фосфора. Как и ранее, полагаем, что концентрация стоков определяется распределением концентрации имплантированной примеси $C_R(x, t) = kC_N(x, 0)$ вида (4). Граничные условия уравнений (1) и (2) имеют вид (5), в которых $F_{IS}(t) = [1 + k_{FI}n_S(t)C_{PS}^+(t)]I_{eq}^0$. Начальными условиями в этом случае, согласно модели [4], являются распределения $C_P(x)$ и $F_I(x)$ после окончания высокотемпературной стадии ($C_{PS}(0) \cong 6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $n_S(0) \cong 2.6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$). Расчетные профили носителей заряда для случая стока избыточных СМА в сравнении с экспериментальными представлены на рис. 4 до (кривая 1) и после (кривые 2, 3) низкотемпературной диффузии фосфора (600°C , 4 ч) в отсутствие (кривая 2) и в присутствии (кривая 3) имплантации ионов N^+ . Как видно из рисунка, имплантация ионов N^+ приводит к подавлению низкотемпературной диффузии фосфора в области хвоста распределения при концентрациях ниже концентрации перегиба ($C_k \cong 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при 600°C). Величина относительного продвижения глубины залегания $\Delta x_j/x_{j0}$ ($\Delta x_j = x_{j0} - x_j$, где x_{j0} и x_j — глубины залегания на уровне концентрации $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ после высоко- и низкотемпературных стадий соответственно)

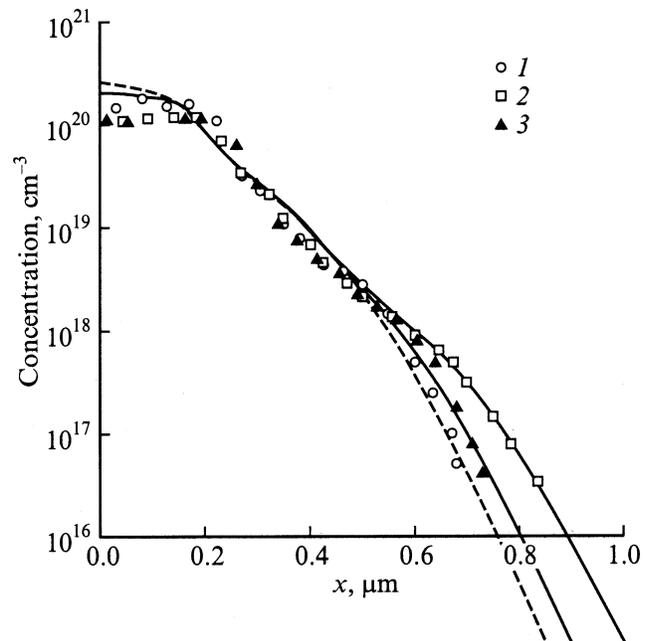


Рис. 4. Профили носителей заряда после высокотемпературной (1000°C , 5 мин) (1) и низкотемпературной (600°C , 4 ч) (2, 3) диффузии фосфора в отсутствие (1, 2) и в присутствии (3) имплантации ионов N^+ (100 кэВ , $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$). Точки — эксперимент [11], сплошные линии — расчет при $kr_I = 8 \cdot 10^{-14}$ см.

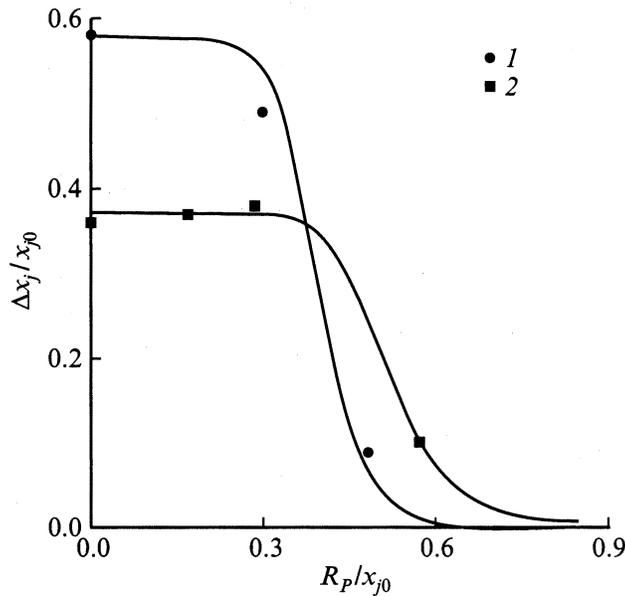


Рис. 5. Зависимость относительного продвижения $\Delta x_j/x_{j0}$ при низкотемпературной диффузии фосфора (500°C , 16 ч) от относительного пробега ионов N^+ при начальной глубине залегания x_{j0} , мкм: 1 — 0.3, 2 — 0.5. Точки — эксперимент [11], сплошные линии — расчет при kr_I , см: 1 — $6 \cdot 10^{-14}$, 2 — $4 \cdot 10^{-15}$.

сильно зависит от проецированного пробега R_p (рис. 5), определяемого вместе со страгглингом ΔR_p энергией имплантации. Наиболее сильное влияние имплантация ионов N^+ оказывает при значениях $R_p \cong (0.4-0.5)x_{j0}$, что соответствует области максимальной генерации избыточных СМА в диффузионном слое. Отметим, что, согласно данным работы [11], имплантация ионов кислорода при одинаковых дозах приводит примерно к такому же замедлению низкотемпературной диффузии фосфора, как и имплантация ионов азота.

4. Обсуждение результатов

Из сравнения профилей, рассчитанных при различных вариантах захвата на структурные дефекты, введенные имплантацией Ge (рис. 1, кривые 3–6) видно, что учет как обратимого, так и необратимого стока атомов фосфора (кривые 3, 4) не позволяет адекватно описать изменение формы концентрационного профиля фосфора. Только учет стока избыточных СМА и PI пар (кривые 5, 6) дает замедление диффузии фосфора в области хвоста концентрационного профиля и позволяет количественно его описать. Отметим одинаковую форму расчетных профилей фосфора, полученных при учете захвата на стоки избыточных СМА и PI пар (рис. 1, кривые 5, 6). Этот результат связан с тем, что при стоке PI пар также происходит поглощение избыточных СМА: $R_{FI} = k_{1F}C_R(F - F_{eq}) = k_{1F}C_R F_{eq}(I - I_{eq})/I_{eq}$. Количество же освобождающегося при этом фосфора

мало по сравнению с количеством диффундирующего фосфора, и поэтому его вклад практически незаметен. Отличие в параметрах захвата СМА и PI пар связано с более высокой концентрацией PI пар в области максимальной генерации СМА, а также в разнице их коэффициентов диффузии. Поскольку получено, что $kr_I \ll kr_F$, можно сделать вывод, что захват стоками СМА более эффективен, чем захват PI пар. Учет стока избыточных СМА позволяет описать замедление диффузии фосфора дислокациями, введенными при диффузии фосфора (рис. 2, кривая 2–4), а также замедление низкотемпературной диффузии фосфора структурными дефектами, введенными имплантацией ионов N^+ (рис. 4, кривая 3).

Точное определение радиуса взаимодействия стока с СМА, по-видимому, затруднено в связи с неопределенностью коэффициента пропорциональности k в параметре захвата. В случае ионной имплантации электрически неактивных примесей величина k^{-1} имеет физический смысл количества остаточных (после отжига) точечных дефектов m , пошедших на формирование одного стока. Поскольку радиус взаимодействия имеет порядок межатомного расстояния, имеем $m \sim 10^4$ при имплантации ионов Ge (например, дислокационные петли) и $m \approx 10^6$ при имплантации ионов N (например, микропоры). В случае, когда плотность дислокаций известна, физический смысл величины k^{-1} — это среднее расстояние (в единицах межатомного расстояния) между ступеньками на дислокациях, являющихся местами поглощения (или испускания) СТД. В нашем случае имеем $k^{-1} \approx 10^2$ для дислокаций несоответствия.

В модели Пантелеева [17,18] особенности диффузии фосфора связываются с возможностью существования части атомов фосфора в межузельной форме (P_i). Между PI парами и межузельным фосфором несомненно имеется сходство, обусловленное возможностью реакции замещения собственного узельного атома кремния межузельным атомом фосфора, $P_i + S_S \leftrightarrow P_S + S_i$, где S_S и S_i — собственный атом кремния в узле и в междоузлии кристаллической решетки кремния соответственно, P_S — атом фосфора в узле. Однако в поведении по отношению к стокам между ними можно ожидать различия. В модели [17] концентрация межузельных атомов фосфора полагалась достаточно высокой, поскольку с их равновесной растворимостью связывалось образование перегиба на профилях фосфора при $C_k \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Поэтому, в отличие от PI пар, в случае захвата стоками межузельных атомов фосфора можно было бы ожидать на них заметного накопления примеси и, как следствие, появления нерегулярностей на концентрационных профилях фосфора. Действительно, в некоторых работах [9,13] были обнаружены нерегулярности на профилях фосфора. Однако эти нерегулярности наблюдались только при имплантации достаточно больших доз примеси и только в высококонцентрационной области, т. е. в условиях, когда реализуется пересыщение твердого раствора узельных атомов фосфора в кремнии

и структурные дефекты могут становиться центрами преципитации.

Замедление диффузии фосфора атомами примеси Ge при их совместной диффузии связывалось с эффектом компенсации вводимых напряжений несоответствия [5,19], которые полагались причиной ускоренной диффузии либо сами непосредственно [5], либо посредством образующихся дислокаций [19]. Отметим однако, что напряжения несоответствия локализованы в сильно легированной части диффузионного слоя, в то время как ускорение диффузии наблюдается в низкоконтрационной части слоя, где напряжения малы, и распространяется на значительные расстояния в глубь образца [1–3], где напряжения несоответствия практически отсутствуют. В модели [4] причиной ускорения диффузии фосфора на хвосте концентрационного профиля и других примесей замещения за пределами диффузионного слоя являются избыточные СМА. Диффузионная длина СМА может достигать десятков и даже сотен микрометров в бездефектном кремнии и значительно падает при наличии структурных дефектов или других стоков.

5. Заключение

Таким образом, в рамках модели диффузии по дуальному парному механизму [4] проведен количественный анализ влияния стоков, связанных со структурными дефектами, на высоко- и низкотемпературную диффузию фосфора. Показано, что, в отличие от стока атомов фосфора, учет стоков для избыточных СМА или PI пар позволяет описать замедление диффузии в области малых концентраций на хвосте концентрационного профиля фосфора, при этом захват стоками СМА более эффективен, чем PI пар. Влияние стоков наиболее сильно выражено при положении максимума их концентрации в области максимума генерации СМА внутри диффузионного слоя, $x_m \cong (0.4–0.5)x_{j0}$. Оценены параметры захвата СМА на структурные дефекты, введенные диффузией фосфора, а также ионной имплантацией электрически неактивных примесей Ge и N.

Список литературы

- [1] S.M. Hu. In: *Atomic diffusion in semiconductors*, ed. by D. Shaw (London–N.Y., Plenum Press, 1973) ch. 5. [Пер.: *Атомная диффузия в полупроводниках*, под ред. Д. Шоу (М., Мир, 1975)].
- [2] S.M. Hu, P. Fahey, R.W. Dutton. *J. Appl. Phys.*, **54**, 6912 (1983).
- [3] P.M. Fahey, P.B. Griffin, J.D. Plummer. *Rev. Mod. Phys.*, **61**, 289 (1989).
- [4] О.В. Александров. *ФТП*, **31**, 1289 (2001).
- [5] S. Matsumoto, Y. Akao, K. Kohiama, T. Niimi. *J. Electrochem. Soc.*, **125**, 1840 (1978).
- [6] О.В. Александров. *Электрон. техн., сер. 6*, вып. 6 (143), 58 (1980).
- [7] О.В. Александров, Г.А. Гавриков, В.И. Прохоров. *Электрон. техн., сер. 2*, вып. 2 (145), 69 (1981).
- [8] О.В. Александров, Г.А. Гавриков, И.П. Матханова, В.И. Прохоров. В сб.: *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*, вып. 2 (16), 78 (1981).
- [9] M. Servidori, S. Solmi. *J. Appl. Phys.*, **65**, 98 (1989).
- [10] J.R. Pfeister, P.B. Griffin. *Appl. Phys. Lett.*, **52**, 471 (1988).
- [11] О.В. Александров, Р.З. Тумаров, Н.А. Кондратьев. *Матер. VI Всес. конф. „Взаимодействие атомных частиц с твердым телом“* (Минск, 1981) ч. 2, с. 51.
- [12] В.Т. Карманов, А.Ф. Хохлов, П.В. Павлов, Е.И. Зорин. *ФТП*, **11**, 1871 (1977).
- [13] D.K. Sadana, M. Strathman, J. Washburn, C.W. Magee, M. Maenpaa, G.R. Booker. *Appl. Phys. Lett.*, **37**, 615 (1980).
- [14] Р.Ш. Малкович. *Математика диффузии в полупроводниках* (СПб., Наука, 1999) с. 160.
- [15] X. Риссел, И. Руге. *Ионная имплантация*, пер. с нем под ред. М.И. Гусевой (М., Наука, 1983).
- [16] S. Prussin. *J. Appl. Phys.*, **32**, 1776 (1961).
- [17] В.А. Пантелеев. *ФТТ*, **21**, 3388 (1979).
- [18] В.А. Пантелеев, М.И. Василевский, Г.М. Големшток, В.И. Окулич. *ФТТ*, **28**, 3226 (1986).
- [19] Л.А. Коледов, Л.Н. Сергеев. В сб.: *Свойства легированных полупроводников* (М., Наука, 1977) с. 143.

Редактор Л.В. Беляков

Influence of sinks for intrinsic point defects on phosphorus diffusion in silicon

O.V. Aleksandrov

St. Petersburg State Electrotechnical University,
197376 St. Petersburg, Russia

Abstract On the basis of phosphorus in silicon diffusion model via the dual pair mechanism the quantitative analysis of influence of sinks connected to structural defects is carried out. It is shown that accounting of sinks for self interstitials results in retardation of enhanced phosphorus diffusion in the region of small concentration on a tail of the concentration profile. The influence of sinks most forces is expressed at a position of a maxima of their concentration in the region of a maxima generation self interstitials inside a diffusion layer. From comparison of calculations with experimental data the parameters of self interstitials capture on structural defects introduced by diffusion of phosphorus and by ion implantation of electrical inactive impurities Ge and N are defined.