

## ФРАКТАЛЬНО-ДИФФУЗИОННЫЕ $p-n$ -ПЕРЕХОДЫ В КРЕМНИИ

Баграев Н. Т., Клячкин Л. Е., Маляренко А. М., Суханов В. Л.

Исследованы процессы легирования кремния бором в условиях kick-out и диссоциативного вакансионного механизмов диффузии. Путем варьирования характеристик поверхности был установлен критерий доминирования одного или другого диффузионных механизмов, благодаря чему были обнаружены условия их паритета, при которых наблюдается торможение диффузии. Это позволило реализовать квантово-размерные  $p-n$ -переходы фрактального типа, обладающие высокой внешней квантовой эффективностью в широком спектральном диапазоне и низкими темновыми токами утечки.

В настоящее время появилась возможность управлять паритетом kick-out и диссоциативного вакансионного механизмов диффузии путем изменения характеристик поверхности монокристалла кремния [1-4]. Например, при окислении поверхности в условиях высоких температур в объем монокристалла генерируется избыточный поток собственных междуузельных атомов, который стимулирует диффузию легирующих примесей (фосфора, бора) по kick-out-механизму [1].

Продолжительное окисление в сочетании с низкими температурами диффузии приводит к доминированию диссоциативного вакансионного механизма, который наиболее ярко проявляется при легировании кремния сурьмой [1, 3].

До сих пор, однако, неясно, существует ли область паритета диффузионных механизмов и какого вида диффузионные профили можно получить в ее рамках. Кроме того, представляет интерес получение данных об относительных скоростях диффузии легирующих примесей (фосфора, бора) в условиях сильной стимуляции kick-out и диссоциативного вакансионного механизмов. Данные исследования являются первой демонстрацией обнаружения условий паритета диссоциативного вакансионного и kick-out-механизмов, при которых наблюдается резкое торможение диффузии (полная аннигиляция вакансий и собственных междуузельных атомов вблизи поверхности). Это позволило при соблюдении режимов эффективного геттерирования в объеме кристалла реализовать квантово-размерные диффузионные профили и  $p-n$ -переходы. Наряду с низкими темновыми токами утечки квантово-размерные  $p-n$ -переходы обладают высокой внешней квантовой эффективностью, величина которой для различных длин волн спектрального диапазона может быть оптимизирована путем варьирования глубины  $p-n$ -перехода и концентрации легирующей примеси в квантово-размерном профиле.

Применение тонких слоев окисла и высоких температур диффузии стимулирует преимущественную генерацию собственных междуузельных атомов окисленной поверхности и тем самым резко ускоряет диффузию примесей (бора, фосфора, мышьяка), проникающих в кремниевый монокристалл по kick-out-механизму [1, 3]



где  $X_i$ ,  $X_s$  — легирующие компоненты в междуузельной и узельной позициях соответственно, а  $I$  — собственный междуузельный атом. Напротив, использование толстых слоев окисла и низких температур диффузии приводит к доминированию диссоциативного вакансионного механизма диффузии легирующей примеси [1]



где  $V$  — вакансия. Кроме того, избыточные потоки собственных междуузельных атомов и вакансий играют важную роль в трехступенчатом цикле геттерирования в объеме кристалла [5, 6] и, что наиболее важно, в процессах совместного геттерирования в условиях диффузии легирующей примеси, которое резко улучшает параметры полупроводниковых приборов [7].

Конкуренция kick-out и диссоциативного вакансионного механизмов диффузии в условиях варьирования толщины окисла ( $d_{\text{SiO}_2}$ ) и температуры диффузии позволяет рассчитывать на получение квантово-размерных диффузионных профилей и  $p$ — $n$ -переходов. С другой стороны, определение толщины окисла и температуры диффузии, при которых реализуются минимальные по глубине диффузионные профили, явилось бы доказательством существования условий для смены механизма диффузии.

В настоящей работе существование условий для паритета kick-out и диссоциативного вакансионного механизмов диффузии было продемонстрировано на примере изучения диффузии бора в монокристаллическом кремнии при различных толщинах окисла и температурах диффузии.

Экспериментально определенные условия баланса данных механизмов диффузии позволили впервые реализовать квантово-размерные диффузионные профили и  $p$ — $n$ -переходы фрактального типа. Показано, что характеристики квантово-размерных диффузионных профилей взаимосвязаны с условиями получения сверхнизких токов утечки в квантово-размерных  $p$ — $n$ -переходах.

Коэффициент диффузии легирующей примеси в условиях окисления монокристаллической поверхности определяется вкладом как kick-out ( $D_I$ ), так и диссоциативного вакансионного ( $D_V$ ) механизмов [8]:

$$D_{\text{ox}} = D_I \frac{C_I}{C_I^{eq}} + D_V \frac{C_V}{C_V^{eq}}, \quad (3)$$

где  $C_I$ ,  $C_V$  — концентрации собственных междуузельных атомов и вакансий, генерируемых окисленной поверхностью;  $C_I^{eq}$ ,  $C_V^{eq}$  — их равновесные значения в объеме.

Если ввести в рассмотрение коэффициенты относительного вклада kick-out ( $\Phi_I = D_I/D$ ) и диссоциативного вакансионного ( $\Phi_V = D_V/D = 1 - \Phi_I$ ) механизмов диффузии ( $D = D_I + D_V$ ), а также отношения избыточных концентраций собственных междуузельных атомов ( $s_I = \frac{C_I - C_I^{eq}}{C_I^{eq}}$ ) и вакансий ( $s_V = \frac{C_V - C_V^{eq}}{C_V^{eq}}$ ), то нетрудно видеть, что можно достигнуть значительного ускорения диффузии как при  $D_I \gg D_V$ , так и при  $D_V \gg D_I$ :

$$D_{\text{ox}} = D(1 + \Delta_{\text{ox}}), \quad (4)$$

где

$$\Delta_{\text{ox}} = \frac{D_{\text{ox}} - D}{D} = \Phi_I s_I + \Phi_V s_V. \quad (5)$$

В области высоких температур диффузии доминирует kick-out-механизм ( $\Phi_I > 0.5$ ), в то время как при низких температурах — диссоциативный вакансионный ( $\Phi_V > 0.5$ ) [1].

В случае  $\Phi_I = \Phi_V = 0.5$  усиление диффузии ( $\Delta_{\text{ox}} > 0$ ) может быть достигнуто только при избыточной генерации собственных междуузельных атомов ( $s_I > 0$ ,  $s_V < 0$ ) или вакансий ( $s_I < 0$ ,  $s_V > 0$ ). Как отмечалось выше, баланс между  $s_I$  и  $s_V$  достигается в условиях варьирования толщины окисла. Например, если  $s_I = s_V = 0$ ,  $\Delta_{\text{ox}} = 0$ , то ускорения диффузии не происходит ни при каких температурах. Таким образом, варьируя  $d_{\text{SiO}_2}$ , можно минимизировать  $D_{\text{ox}} \rightarrow D$  при различных температурах диффузии. Наиболее легко этот минимум может быть достигнут в области паритета диффузионных механизмов ( $\Phi_I = \Phi_V$ ). Резкое ускорение диффузии возникает при  $\Phi_I > \Phi_V$  и  $s_I > 0$ , что соответствует применению тонких окислов и высоких температур. Аналогичный эффект наблюдается при  $\Phi_V > \Phi_I$ ,  $s_V > 0$  (использование толстых окислов и низких температур диффузии). Таким образом, экспериментальная реализация паритета диффузионных механизмов ( $\Phi_I \approx \Phi_V$ ) и полной аннигиляции вакансий и соб-

ственных междоузельных атомов ( $s_I = s_V = 0$ ) рабочей поверхности позволяет рассчитывать на получение квантово-размерных диффузионных профилей  $p$ - $n$ -переходов.

Диффузия бора проводилась в пластины монокристаллического кремния (толщиной 350 мкм) сопротивлением 20 Ом·см ориентации (100). Рабочая и обратная стороны поверхности пластин маскировались слоем окисла. В процессе экспериментов варьировались толщина слоя окисла, температура диффузии ( $T_d$ ) и процентное содержание хлора вблизи рабочей поверхности. Диффу-

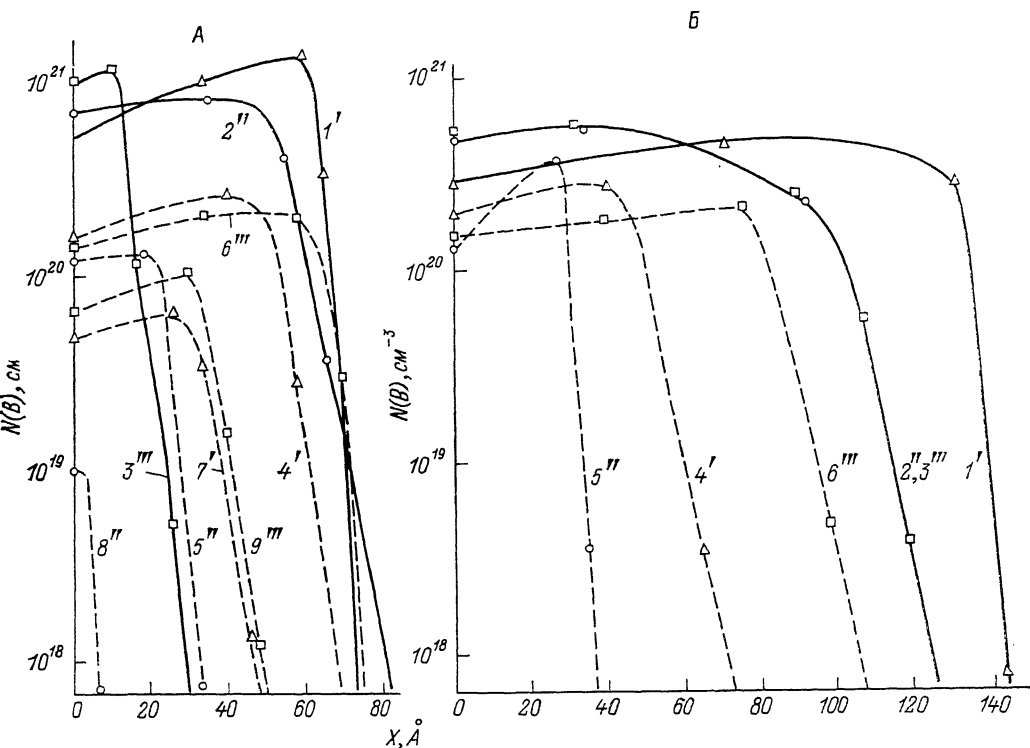


Рис. 1. Квантово-размерные диффузионные профили бора в кремнии  $n$ -типа, полученные при малых (А) и больших (Б) концентрациях хлора и разных температурах диффузии.  $T_d$ , °C: 1-3 — 950, 4-6 — 900, 7-9 — 850. Штрих —  $d_{SiO_2}/d_0 = 0.62$ ; два штриха — 1.0; три штриха — 1.28.  $d_0$  — критическая толщина окисла, при которой происходит смена типа собственных дефектов, генерируемых окисленной поверхностью (при  $d_{SiO_2} < d_0$  окисленная поверхность кремния генерирует избыточный поток междоузельных атомов, при  $d_{SiO_2} > d_0$  — избыточный поток вакансий). Значение  $d_0$  определяется совокупностью условий состояния поверхности (составом атмосферы, предварительной обработкой).

зионные профили определялись с помощью прецизионного послойного сравливания. При этом на каждом этапе измерялись вольт-фарадные характеристики в системе полупроводник—электролит, а также поверхностное сопротивление четырехзондовым методом. Значения темнового тока утечки  $p$ - $n$ -переходов определялись на обратных ветвях вольт-амперных характеристик. Спектры внешней квантовой эффективности ( $\eta$ )  $p$ - $n$ -переходов в диапазоне длин волн 220—1200 нм были получены путем их сравнения с аналогичными спектрами эталонированных кремниевых фотодиодов.

На рис. 1 представлены диффузионные профили бора в кремнии  $n$ -типа, полученные при различных толщинах слоя окисла и температурах диффузии. Для всех использованных температур диффузии было обнаружено anomальное уменьшение глубины залегания  $p$ - $n$ -перехода при  $d_{SiO_2}/d_0 = 1$  (рис. 1). Это свидетельствует о смене механизма диффузии легирующей примеси при увеличении толщины слоя окисла. В образцах, маскированных тонким слоем окисла, диффузия осуществляется по kick-out-механизму, благодаря чему наблюдаются

при прочих равных условиях [см. (3)—(5)] максимальные глубины залегания  $p-n$ -перехода (рис. 1, кривые 1, 4, 7). С увеличением толщины слоя окисла ( $d_{SiO_2}/d_0 \rightarrow 1$ ) стимулируется практически полная аннигиляция междоузельных атомов кремния и вакансий вблизи поверхности [ $s_I = s_V = 0$ , см. (3)—(5)]. В этих условиях наблюдается резкое торможение диффузии в объем монокристалла (рис. 1, А, кривые 3, 5, 8 и рис. 1, В, кривая 5). Наиболее ярко это проявляется при низких температурах диффузии (рис. 1, А, кривая 8), при которых осуществляется паритет между kick-out и диссоциативным вакансионным механизмами диффузии ( $\Phi_I = \Phi_V = 0.5$ ). При  $d_{SiO_2}/d_0 > 1$  диссоциативный вакансионный механизм диффузии легирующей примеси доминирует при температурах диффузии

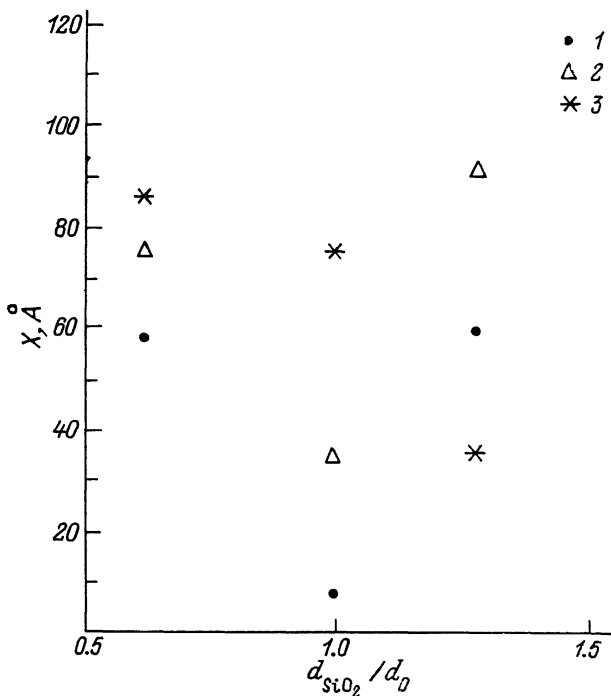


Рис. 2. Зависимости глубины залегания  $p+n$ -переходов, полученных при малых концентрациях хлора, от величины  $d_{SiO_2}/d_0$ .

$T_d$ , °C: 1 — 850, 2 — 900, 3 — 950.

850—900 °C ( $\Phi_V > \Phi_I$ ) [1, 7], что индуцирует избыточный поток вакансий с поверхности [ $S_V > S_I$ , см. (3)—(5)] и снова приводит к заглоблению  $p-n$ -перехода (рис. 1, А, кривые 6, 9 и рис. 1, В, кривая 6).

При температуре диффузии 950 °C однако ( $d_{SiO_2}/d_0 > 1$ ) наступает только паритет между диссоциативным вакансионным и kick-out-механизмами диффузии ( $s_I \approx s_V$ ), что, как описано выше, резко тормозит диффузию легирующей примеси (рис. 1, А, кривая 3).

Таким образом, варьируя температуру диффузии и толщину окисного слоя, можно управлять глубиной диффузионного профиля и концентрацией легирующей примеси в достаточно широких пределах.

Концентрационные профили на рис. 1, строго говоря, не являются классически диффузионными и их резкость свидетельствует о фрактальном характере диффузии легирующей примеси. Иными словами, диффузия легирующей примеси обусловлена эффектом «увлечения», связанными с избыточными потоками вакансий или собственных междоузельных атомов. Поэтому фрактальная диффузия представляет собой движение фронта легирующей примеси с поверхности, скорость перемещения которого определяется величиной избыточного потока собственных междоузельных атомов или вакансий и описывается в идеологии фрактала [9, 10]. Естественно, что в условиях паритета выше-

указанных диффузионных механизмов скорость движения фрактального профиля будет минимальной (рис. 1, 2). Кроме того, скорость движения фрактального профиля и его крутизна могут регулироваться в зависимости от процентного содержания хлора в атмосфере, который управляет процессами аннигиляции собственных междоузельных атомов и вакансий вблизи поверхности (рис. 1) [3, 4]. Следует отметить, что наличие хлора вблизи рабочей поверхности в процессе диффузии стимулирует дополнительную генерацию вакансий в объеме кристалла. Если  $\Phi_V > \Phi_I$  и  $s_V > 0$ , то увеличение процентного содержания хлора автоматически увеличивает глубину диффузионного профиля (рис. 1, Б, кривая

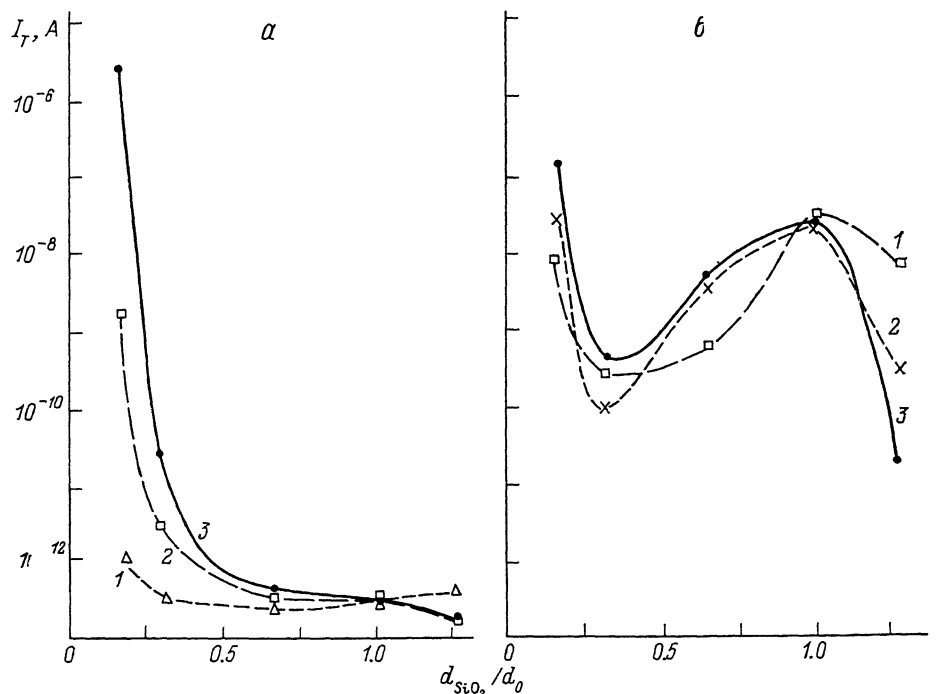


Рис. 3. Зависимости темновых токов утечки  $p^+ - n - n^+$ -фотодиодов [7] (а) и квантово-размерных  $p - n$ -переходов (б) от величины  $d_{\text{SiO}_2}/d_0$  при  $U_{\text{обп}} = 1$  В.

$T_d$ , °C: 1 — 950, 2 — 900, 3 — 850.

б). В области доминирования kick-out-механизма диффузии ( $\Phi_I > \Phi_V$ ) при наличии высоких температур и малых толщин окисла ( $s_I > 0$ ) диффузия легирующей примеси ускоряется вследствие процессов геттерирования (рис. 1, Б, кривая 1) [3, 4]. В этом случае аннигиляция собственных междоузельных атомов и вакансий происходит уже не только вблизи поверхности, но и в значительной части объема кристалла, благодаря чему возникает дополнительный поток собственных междоузельных атомов кремния в объем, который увлекает примеси, диффундирующие по kick-out-механизму. Иными словами,  $D_I$  зависит также от процентного содержания хлора, которое оптимизирует условия геттерирования.

Важная роль паритета kick-out и диссоциативного вакансионного механизмов диффузии отражается также в величине темнового тока утечки при обратном смещении на  $p - n$ -переходе (рис. 3, а, б). Относительно высокие значения тока утечки (площадь  $p - n$ -перехода  $25 \text{ мм}^2$ ) при малых значениях  $d_{\text{SiO}_2}/d_0$  обусловлены возникновением мелких и глубоких дефектов в области  $p - n$ -перехода в условиях избыточного потока собственных междоузельных атомов [7] (в этом случае не были достигнуты оптимальные условия геттерирования [7]). С увеличением толщины окисла происходило улучшение условий геттерирования, что стимулировало уменьшение концентрации дефектов в приповерхностной области и соответствующее снижение тока утечки [7] (рис. 3). Наиболее наглядно это отражено в случае  $p^+ - n - n^+$ -структур (рис. 3, а [7]),

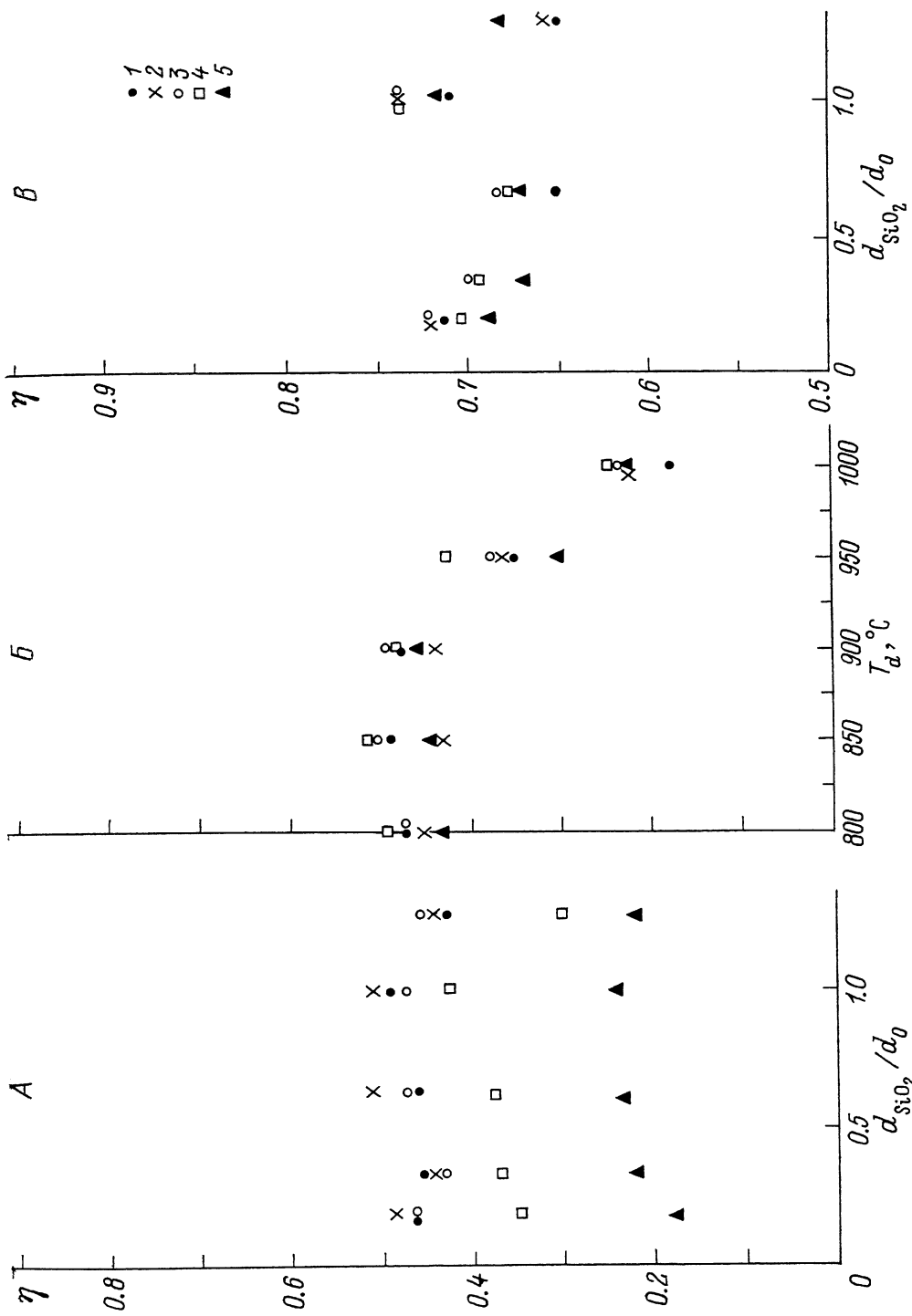


Рис. 4. Зависимости внешней квантовой эффективности квантово-размерных  $p$ - $n$ -переходов от величины  $d_{\text{SiO}_2}/d_0$  ( $\lambda$ , нм; А — 400, В — 800) и температур диффузии (В —  $\lambda = 400$  нм).  
 4 — малые, 5 — большие концентрации хлора. А, В)  $T_d$ , °С: 1 — 800, 2 — 850, 3 — 900, 4 — 950, 5 — 1000. Б)  $d_{\text{SiO}_2}/d_0$ : 1 — 0.17, 2 — 0.31, 3 — 0.62, 4 — 1.0, 5 — 1.28.

которые не являлись квантово-размерными (толщина  $p^+$ -области  $\sim 300$  Å). В случае квантово-размерных  $p^+ - n$ -переходов, однако, при  $d_{\text{SiO}_2}/d_0 \approx 1$  наблюдается резкое увеличение темнового тока утечки (рис. 3, б), что связано с минимизацией глубины фрактальной профилей (рис. 1, А, кривые 3, 5, 8 и рис. 2) и резко усиливающимися из-за этого рекомбинационно-генерационных процессов на поверхности. При  $d_{\text{SiO}_2}/d_0 > 1$ , с одной стороны, выполняются оптимальные условия геттерирования (рис. 3, а, б), а, с другой стороны, из-за доминирования диссоциативного вакансионного механизма ( $\Phi_V > \Phi_I$ ,  $s_V > 0$ ) квантово-размерные  $p - n$ -переходы уже не являются сверхмелкими (рис. 1). Совокупность этих факторов позволила впервые получить малолумирующие квантово-размерные  $p - n$ -переходы при  $d_{\text{SiO}_2}/d_0 > 1$ . На рис. 4, 5, А-В и рис. 6 приведены зависимости внешней квантовой эффективности от толщины слоя окисла и температуры легирующей примеси. При интенсивном поглощении монохроматического света в приповерхностных слоях ( $\lambda = 400$  нм) максимум внешней квантовой эффективности наблюдался в образцах с  $p - n$ -переходами, полученными при низкой температуре диффузии. В этом случае  $\eta$  максимальна при  $d_{\text{SiO}_2}/d_0 \approx 1$ , что соответствует паритету вышерассмотренных диффузионных механизмов, в условиях которого при  $T_a = 850$  °С (рис. 1) глубина профиля и концентрация легирующей примеси минимальны. Поэтому снижение  $\eta$  за счет потерь в сильно легированной области  $p - n$ -перехода незначительно. Следует отметить, что эффективность геттерирования при  $\lambda = 400$  нм не играет особой роли, поскольку светочувствительная область локализована вблизи поверхности. В этих условиях ( $d_{\text{SiO}_2}/d_0 \approx 1$ ,  $T_a = 850$  °С), однако, темновой ток утечки может возрастать из-за интенсивной рекомбинации на поверхности (рис. 3, б). В области доминирования как kick-out ( $d_{\text{SiO}_2}/d_0 < 1$ ), так и диссоциативного вакансионного ( $d_{\text{SiO}_2}/d_0 > 1$ ) механизмов диффузии при  $T_a = 850$  °С наблюдается увеличение глубины  $p - n$ -перехода, сопровождаемое сильным подъемом концентрации легирующей примеси (рис. 1, А). При этом значение  $\eta$  уменьшается за счет потерь света в сильно легированной приповерхностной области (см. кривую рис. 4, А). При увеличении температуры паритет диффузионных механизмов сдвигается в область  $d_{\text{SiO}_2}/d_0 > 1$  (рис. 1, А). Кроме того, в условиях kick-out-механизма диффузии, доминирующего в этом случае, возрастает концентрация легирующей примеси внутри диффузионного профиля (рис. 3, а). Это также приводит к снижению  $\eta$  из-за потерь света в сильно легированной приповерхностной области в образцах, полученных при  $T_a > 850$  °С (рис. 4, В). Последний эффект, как ни странно, наиболее ярко проявляется вблизи области паритетов диффузионных механизмов при  $d_{\text{SiO}_2}/d_0 > 1$ ,  $T_a = 950$  °С, поскольку в этом случае реализована очень высокая концентрация легирующей примеси внутри узкого квантово-размерного профиля (рис. 1, А). Факт сильных потерь света в приповерхностной области подтверждается соответствующей спектральной зависимостью коэффициента отражения  $R(\lambda)$  (рис. 7). Вышеописанный механизм потерь  $\eta$  в приповерхностных сильно легированных слоях в меньшей степени существен в инфракрасной области спектра поглощения (рис. 4, В). Вполне логично, что в этом случае нивелируется зависимость  $\eta$  от  $T_a$ , так как глубины квантово-размерных  $p - n$ -переходов на рис. 1, А существенно меньше глубины поглощения света при  $\lambda = 800$  нм. Максимальное значение  $\eta$  при  $\lambda = 800$  нм наблюдалось при  $d_{\text{SiO}_2}/d_0 = 1$ , поскольку в условиях паритета диффузионных механизмов осуществляется наиболее эффективное геттерирование в объеме кристалла (рис. 4, В) [7]. При этом вблизи поверхности происходит почти полная аннигиляция вакансий и собственных междоузельных атомов, а в объеме кристалла равновесные собственные междоузельные атомы формируют баттерфляй-дефекты, являющиеся эффективными геттерами остаточных примесей и дефектов [5, 6]. При  $d_{\text{SiO}_2}/d_0 < 1$  эффективность геттерирования несколько снижается из-за формирования геттеров в области  $p - n$ -перехода, поскольку существует избыточный поток собственных междоузельных атомов с поверхности. Аналогичное снижение  $\eta$  при  $d_{\text{SiO}_2}/d_0 > 1$  происходит из-за уменьшения в объеме концентрации собственных междоузельных атомов кремния, поскольку поверхность в этом случае генерирует избыточную концентрацию вакансий, несколько снижающих эффективность геттерирования в объеме (рис. 4, В).

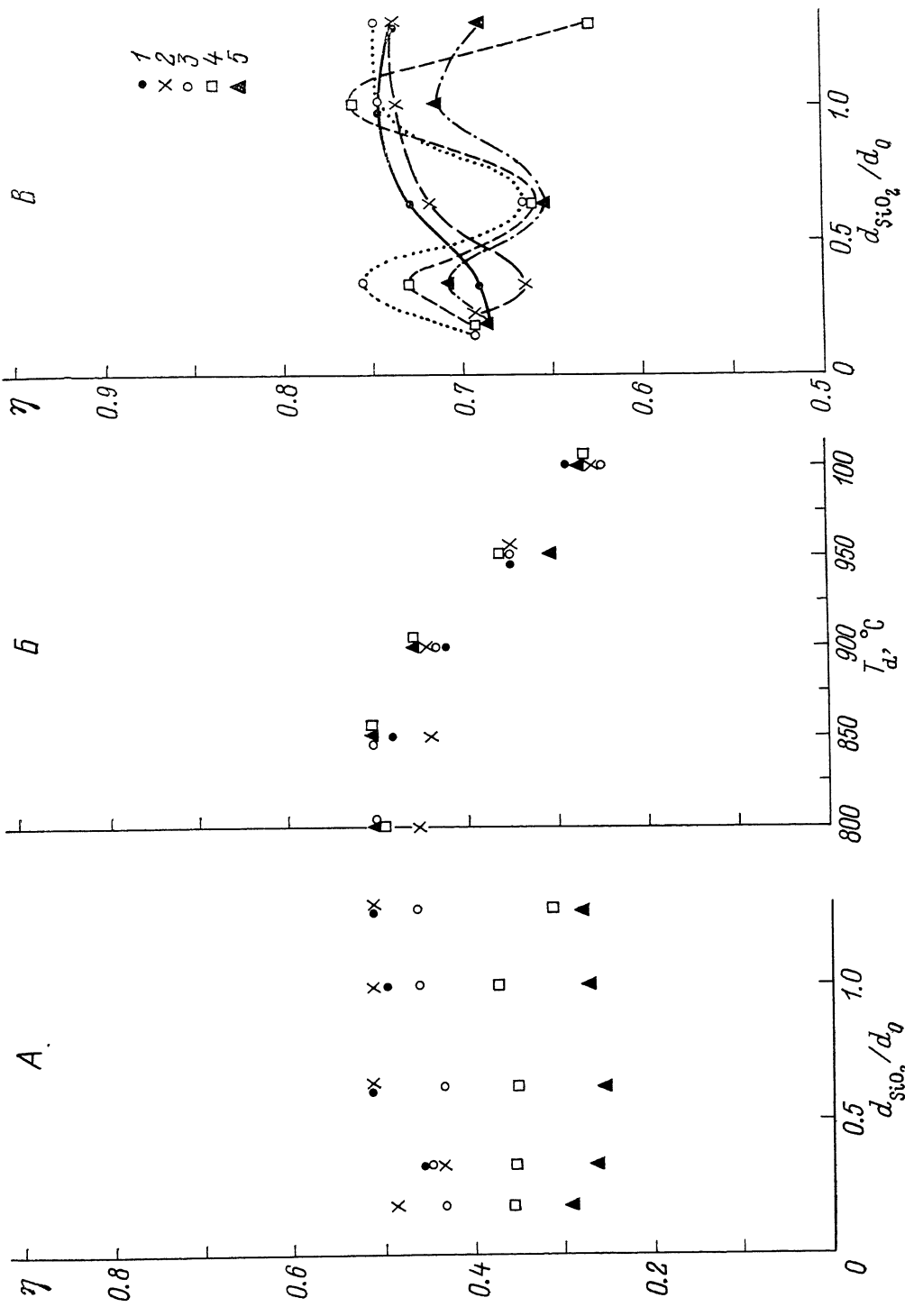


Рис. 5.  
То же, что и на рис. 4.



Увеличение концентрации хлора в процессе диффузии легирующей примеси также влияет на эффективность процесса геттерирования (рис. 5). Этот эффект несуществен при  $\lambda=400$  нм, где основные потери  $\eta$ , как описано выше, обусловлены рассеянием света в сильно легированной области. Его, однако, следует учитывать при  $\lambda=800$  нм, поскольку присутствие хлора вблизи поверхности стимулирует избыточную концентрацию вакансий в объеме кристалла. При использовании высоких температур диффузии это приводит к формированию второго максимума в зависимости  $\eta=f(d_{\text{SiO}_2}/d_0)$  при малых значениях  $d_{\text{SiO}_2}/d_0$ . Иными словами, имеются две области эффективного геттерирования. При малых значениях  $d_{\text{SiO}_2}/d_0$  геттерирование осуществляется за счет генерации поверхностью избыточной концентрации собственных междуузельных ато-

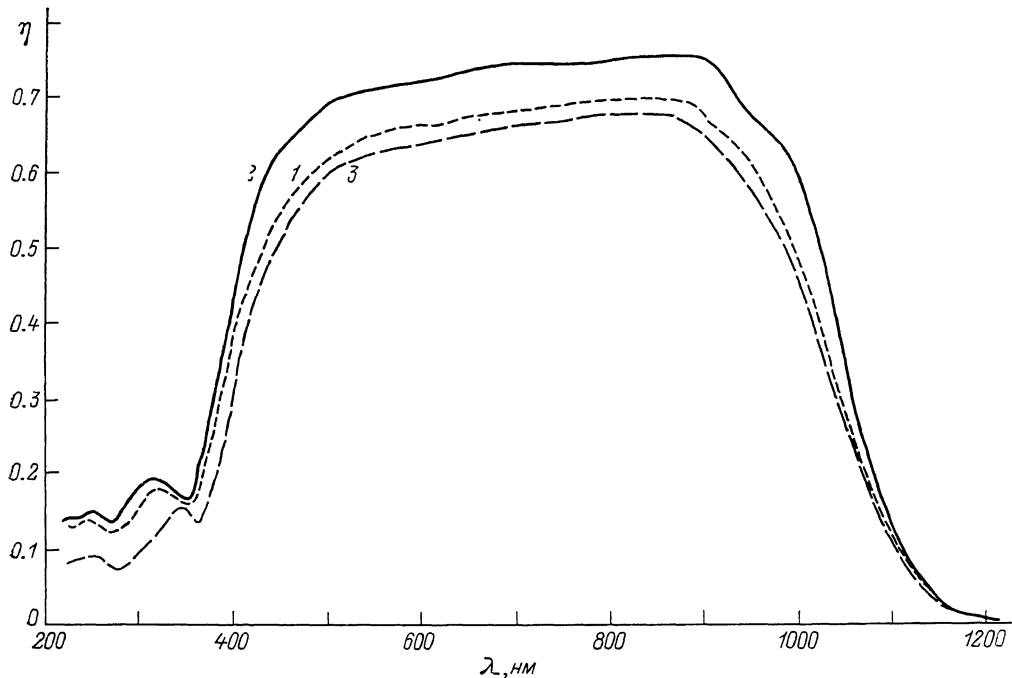


Рис. 6. Спектры внешней квантовой эффективности квантово-размерных  $p-n$ -переходов.  $d_{\text{SiO}_2}/d_0$ : 1 — 0.31, 2 — 1.0, 3 — 1.28.

мов, которые формируют в объеме геттеризирующие микродефекты. Отсутствие геттеризирующих микродефектов в области  $p-n$ -перехода обеспечивается дополнительной генерацией вакансий в приповерхностной области из-за присутствия хлора (см. сравнительный анализ рис. 4, В и 5, В). При  $d_{\text{SiO}_2}/d_0=1$ , как описано выше, обеспечиваются условия полной аннигиляции вакансий и междуузельных атомов вблизи поверхности (концентрация хлора в этом случае большой роли не играет), а геттерирование осуществляется за счет кластерообразования равновесных междуузельных атомов.

Варьирование толщины окисного слоя и температуры диффузии легирующей примеси позволило установить условия доминирования kick-out и диссоциативного вакансионного механизмов в кремнии. В области паритета диффузионных механизмов наблюдается сильное торможение диффузии. Причем при низких температурах резкое сужение диффузионного профиля сопровождается снижением концентрации легирующей примеси. Представляет интерес, что скорости движения диффузионного фронта при доминировании того или иного из вышеуказанных диффузионных механизмов отличаются незначительно. Совокупность полученных данных об условиях стимулированной фрактальной диффузии позволила впервые реализовать квантово-размерные  $p-n$ -переходы, обладающие низкими темновыми токами утечки и высокой внешней квантовой эффективностью в широком спектральном диапазоне. Значения темновых токов

утечки и  $\eta$  определяются процессами диффузии легирующей примеси и геттерирования в объеме кристалла. В длинноволновой области спектра значение  $\eta$  определяется условиями эффективного геттерирования, которые, в частности, оптимальны в области паритета вышеуказанных диффузионных механизмов.

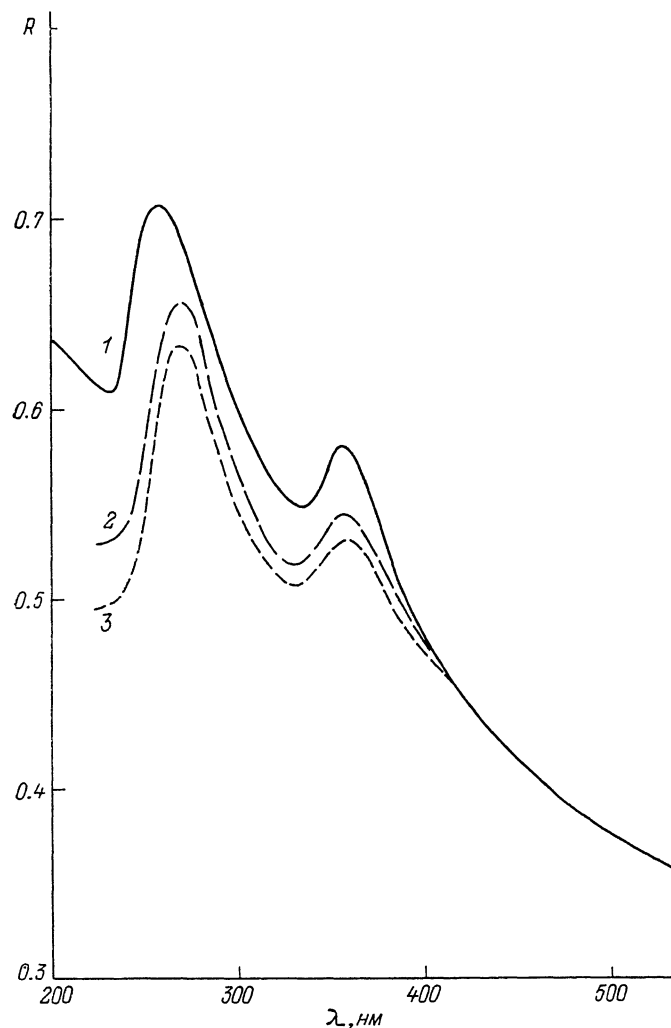


Рис. 7. Зависимости коэффициента отражения от длины волны.

1 — нелегированный кремний [1]; квантово-размерный  $p^+ - n$ -переход, полученный при  $T_d = 850$  (2) и  $900$  °C (3).

В коротковолновой области спектра процессы геттерирования не играют существенной роли, поскольку свет поглощается вблизи поверхности. В этом случае дополнительные потери  $\eta$  связаны с рассеянием света в сильно легированной приповерхностной области. Электрофизические и оптические характеристики квантово-размерных  $p - n$ -переходов могут варьировать в широких пределах в зависимости от условий фрактальной диффузии легирующей примеси.

#### Список литературы

- [1] Frank W., Gosele U., Mehrer H., Seeger A. // *Dif. Cryst. Sol.* N. Y., 1984. P. 63—142.
- [2] Fair R. B. // *Dif. Def. Data.* 1984. V. 37. N 1. P. 1—24.
- [3] Gosele U., Tan T. Y. // *Def. Dif. Forum.* 1988. V. 59. N 1. P. 1—16.
- [4] Stolwijk N. A., Perret M., Mehrer H. // *Def. Dif. Forum.* 1988. V. 59. N 1. P. 79—98.
- [5] Nauka K., Lagowski J., Gatos H. C., Ueda O. // *J. Appl. Phys.* 1986. V. 60. N 2. P. 615—621.
- [6] Ueda O., Nauka K., Lagowski J., Gatos H. C. // *J. Appl. Phys.* 1986. V. 60. N 2. P. 622—628.

- [7] Баграев Н. Т., Клячкин Л. Е., Маляренко А. М., Половцев И. С., Суханов В. Л. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 9. С. 1563—1573.
- [8] Antoniadis D. A // J. Electrochem. Soc. 1982. V. 129. N 5. P. 1093—1097.
- [9] Rosso M., Gouyet J. F., Sapoval B. // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 57. N 25. P. 3195—3198.
- [10] Kolb M., Gouyet J. F., Sapoval B. // Europhys. Lett. 1987. V. 3. N 1. P. 33—38.
- [11] Philipp H. R. // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. N 6. P. 2835—2839.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Получена 24.09.1990  
Принята к печати 3.12.1990

---