

Радиационная проводимость в самоупорядоченных кремниевых квантовых ямах

© А.Н. Андронов*, Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, С.В. Робозеров*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 20 ноября 1998 г. Принята к печати 8 декабря 1998 г.)

Электронно-лучевая диагностика используется для изучения самоупорядоченных квантовых ям, которые формируются внутри сверхмелких кремниевых $p^+ - n$ -переходов в условиях неравновесной диффузии бора. Исследуется энергетическая зависимость и вольт-амперные характеристики коэффициента радиационной проводимости при относительном доминировании как продольных, так и поперечных квантовых ям, ориентированных соответственно параллельно и перпендикулярно плоскости $p - n$ -перехода. Вольт-амперные характеристики радиационной проводимости впервые демонстрируются как при обратном, так и при прямом смещении кремниевого $p^+ - n$ -перехода, что стало возможным благодаря наличию самоупорядоченных поперечных квантовых ям внутри сверхмелкого p^+ -диффузионного профиля, тогда как самоупорядоченные продольные квантовые ямы способствуют возникновению радиационной проводимости только при обратном смещении $p^+ - n$ -перехода. Распределение по глубине кристалла вероятности разделения электронно-дырочных пар, полученное с помощью энергетических зависимостей радиационной проводимости, идентифицирует эффекты ударного размножения неравновесных носителей вследствие пространственного разделения электронов и дырок в поле $p^+ - n$ -перехода, содержащего самоупорядоченные поперечные квантовые ямы.

1. Введение

Практическое использование в рамках кремниевой планарной диффузионной технологии эффектов увлечения легирующих примесей избыточными потоками вакансий или собственных межузельных атомов сделало возможным получение сверхмелких ($5 \div 20$ нм) диффузионных профилей бора и фосфора с резкой границей [1,2]. Уровень легирования, глубина и свойства сверхмелких диффузионных профилей зависят от кристаллографической ориентации монокристаллического кремния, температуры диффузии и толщины предварительно нанесенного окисла, граница раздела которого с кремнием (Si-SiO_2) является источником генерации собственных межузельных атомов и вакансий, стимулирующих соответственно *kick-out* (КО) и вакансионные механизмы примесной диффузии [1–6].

Изучение особенностей циклотронного резонанса и квантованной проводимости показало, что сверхмелкие $p - n$ -переходы, полученные на поверхности монокристаллического кремния в условиях сильного обменного взаимодействия легирующей примеси с собственными межузельными атомами (КО диффузионный механизм), состоят из поперечных квантовых ям, ориентированных в кристаллографическом направлении [111], тогда как увлечение примесных атомов вакансиями (вакансионные диффузионные механизмы) приводит к доминированию внутри сверхмелких диффузионных профилей поперечных квантовых ям, ориентированных в направлении [100] [1,7,8]. В условиях паритета КО и вакансионных диффузионных механизмов были получены наиболее мелкие диффузионные профили (~ 5 нм), ко-

торые преимущественно состояли из продольных квантовых ям, ориентированных параллельно плоскости $p - n$ -перехода [7,8].

В настоящей работе представлены результаты исследований влияния самоупорядоченных поперечных и продольных квантовых ям на вольт-амперные (ВАХ) и энергетические характеристики радиационной проводимости, генерируемой в условиях зондирования p^+ -диффузионных профилей электронами малых и средних энергий. Используемая экспериментальная методика позволяет определить распределение по глубине кристалла вероятности разделения электронно-дырочных пар полем $p - n$ -перехода, что дает возможность идентифицировать процессы ударного размножения неравновесных носителей внутри самоупорядоченных квантовых ям, а также регистрировать ВАХ радиационной проводимости как при обратном, так и при прямом смещении $p - n$ -перехода.

2. Получение сверхмелких $p^+ - n$ -переходов в условиях неравновесной диффузии в кремнии

В качестве основы при получении сверхмелких $p^+ - n$ -переходов использовались пластины монокристаллического кремния n -типа с ориентацией (111), толщиной 350 мкм с удельным сопротивлением $\rho \cong 90 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Предварительно обе стороны пластины окислялись в атмосфере сухого кислорода при 1150°C , после чего с помощью фотолитографии в слое окисла на рабочей стороне пластины вскрывались круглые окна диаметром 3 мм, в которые проводилась кратковременная

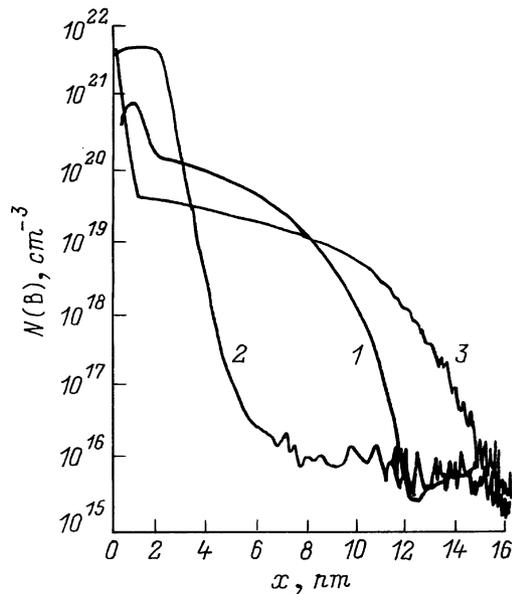


Рис. 1. Профили концентрации бора в кремниевых p^+ - n -переходах, полученных при температурах диффузии T_{dif} , °C: 1 — 800, 2 — 900 и 3 — 1100 на поверхности кремния (111), легированного фосфором в концентрации $N(P) = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

(4 мин) диффузия бора из газовой фазы. В ходе исследований варьировались значения температуры диффузии (800 и 900 °C) при неизменной толщине предварительно нанесенного поверхностного окисла, что позволяло моделировать условия КО и вакансионных механизмов примесной диффузии [1–6]. Толщина предварительно нанесенного окисла на обеих сторонах пластин была больше $d_0 \cong 0.44 \text{ мкм}$, что стимулировало дополнительную инжекцию вакансий границей раздела Si–SiO₂ в процессе примесной диффузии [1,9,10]. Кроме того, высокий уровень концентрации неравновесных вакансий, ответственных за эффекты увлечения легирующей примеси, обеспечивался в процессе диффузии добавочной подпиткой борсодержащей газовой фазы сухим кислородом и хлористыми соединениями. На завершающей стадии технологического процесса по периметру окон и с обратной стороны пластин формировались омические контакты. Профили концентрации легирующей примеси измерялись с помощью масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) (см. рис. 1) [2,11].

При температурах диффузии $T_{\text{dif}} = 800^\circ\text{C}$ бор проникает в кремний вследствие увлечения примесных атомов вакансиями кремния [1,6,9,10]. В этом случае, как и при доминировании КО-механизма, наблюдается ускорение процесса примесной диффузии (рис. 1, кривая 1). Резкое торможение диффузии бора наблюдается при температуре диффузии $T_{\text{dif}} = 900^\circ\text{C}$ (рис. 1, кривая 2), в области паритета вышеуказанных диффузионных механизмов [9,10], вследствие интенсивной аннигиляции собственных межузельных атомов и вакансий вблизи рабо-

чей поверхности кремниевой пластины. Форма диффузионных профилей, полученных в условиях кратковременной неравновесной диффузии, отлична от классической; причем сверхрезкие профили бора формируются как в случае подавления примесной диффузии, так и при ее ускорении, что идентифицирует наличие фрактального механизма диффузионного легирования в условиях сильного взаимодействия потоков примеси и собственных дефектов, интенсивность которого определяется формой деформационного потенциала на поверхности раздела Si–SiO₂ [9,10].

3. Методика исследования радиационной проводимости сверхмелких кремниевых p^+ - n -переходов

Малая глубина диффузионного p^+ -профиля ($5 \div 20 \text{ нм}$) в сверхмелких кремниевых p^+ - n -переходах определяет целесообразность использования для исследования их радиационной проводимости сфокусированного электронного луча, зондирующего приповерхностную область электронами малых и средних энергий [9,10,12,13]. Изменяя энергию электронного луча (E_p) в диапазоне от 0.1 до 3.0 кэВ, можно плавно варьировать глубину зондирования от 2 до 250 нм [9,10]. Для того чтобы отделить наведенный ток от темнового, измерения ВАХ и энергетических зависимостей коэффициента радиационной проводимости проводились при синусоидальной модуляции первичного потока электронов с частотой 1 кГц. Контрольные опыты при использовании постоянного тока подтвердили, что при таких частотах уже успевает установиться стационарное значение коэффициента радиационной проводимости γ . Управляемый ЭВМ электронный луч сканировал изучаемую поверхность, что позволяло проводить измерения коэффициента γ в равномерно отстоящих друг от друга точках и, соответственно, получать изображение этой поверхности при различной энергии первичного электронного луча. Предварительные исследования [9,10] показали, что сверхмелкие p^+ - n -переходы, полученные при наличии толстого окисла на поверхности монокристаллического кремния, который обеспечивал доминирование вакансионных механизмов, характеризуются высокой степенью однородности распределения коэффициента γ вдоль поверхности p^+ -диффузионного профиля.

Обработка экспериментальных энергетических зависимостей коэффициента радиационной проводимости $\gamma(E_p)$ с помощью регуляризирующих алгоритмов теории некорректных задач позволяет восстановить неизвестную функцию собирания неравновесных носителей $f(x)$,

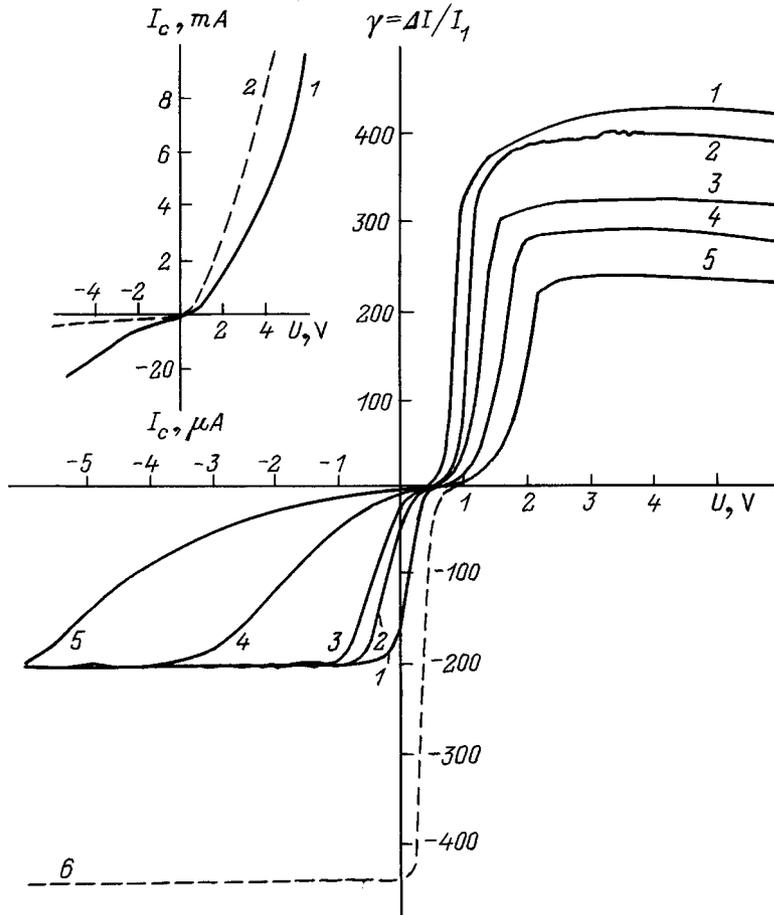


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики коэффициента радиационной проводимости $\gamma(U)$ для p^+n -переходов, полученных при температурах диффузии 800 (1–5) и 900°С (6) на поверхности кремния (111), легированного фосфором в концентрации $N(P) = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Обозначения, принятые на рисунке: $\Delta I = I - I_1$, где I_1 — первичный ток, I — стационарный ток, индуцируемый электронным лучом. Значения I_1 , мкА: 1 — 0.5, 2, 6 — 1.0, 3 — 1.9, 4 — 5.0, 5 — 10. На вставке — вольт-амперные характеристики $I_c(U)$ исследованных p^+n -переходов при T_{dif} , °С: 1 — 800, 2 — 900.

входящую в интегральное уравнение

$$\gamma(E_p) = \int_0^{\infty} \frac{g(E_p, x)}{\Delta \varepsilon} f(x) dx, \quad (1)$$

где $g(E_p, x)$ — одномерная функция распределения удельных потерь энергии первичными электронами по глубине в кремнии; $\Delta \varepsilon$ — средняя энергия, затрачиваемая на образование одной электронно-дырочной пары; $f(x)$ — функция собирания p - n -перехода [12,13], которая определяет количество возбужденных на глубине x электронно-дырочных пар, способных давать вклад в наведенный ток. При использовании электронного облучения с энергией 0.1 ÷ 3.0 кэВ рассмотрение $f(x)$ ограничивается непосредственно рамками области пространственного заряда p - n -перехода. Поведение $f(x)$ в этой области отражает вероятность разделения электронно-дырочных пар полем p - n -перехода и определяется прежде всего временем жизни неравновесных носителей

и распределением электрического поля, а также в случае немонотонного поведения позволяет идентифицировать процессы лавинного возрастания коэффициента γ вследствие пространственного разделения неравновесных электронов и дырок.

4. Вольт-амперные характеристики радиационной проводимости в самоупорядоченных квантовых ямах на поверхности кремния (111)

На рис. 2 представлены ВАХ радиационной проводимости $\gamma = f(U)$ сверхмелких p^+n -переходов, сформированных при низких температурах диффузии бора на поверхности монокристаллических пластин кремния (111) n -типа проводимости. ВАХ радиационной проводимости p^+n -перехода, полученного при температуре диффузии $T_{\text{dif}} = 900^\circ\text{C}$, наблюдается только при его обратном смещении. Причем коэффициент радиационной про-

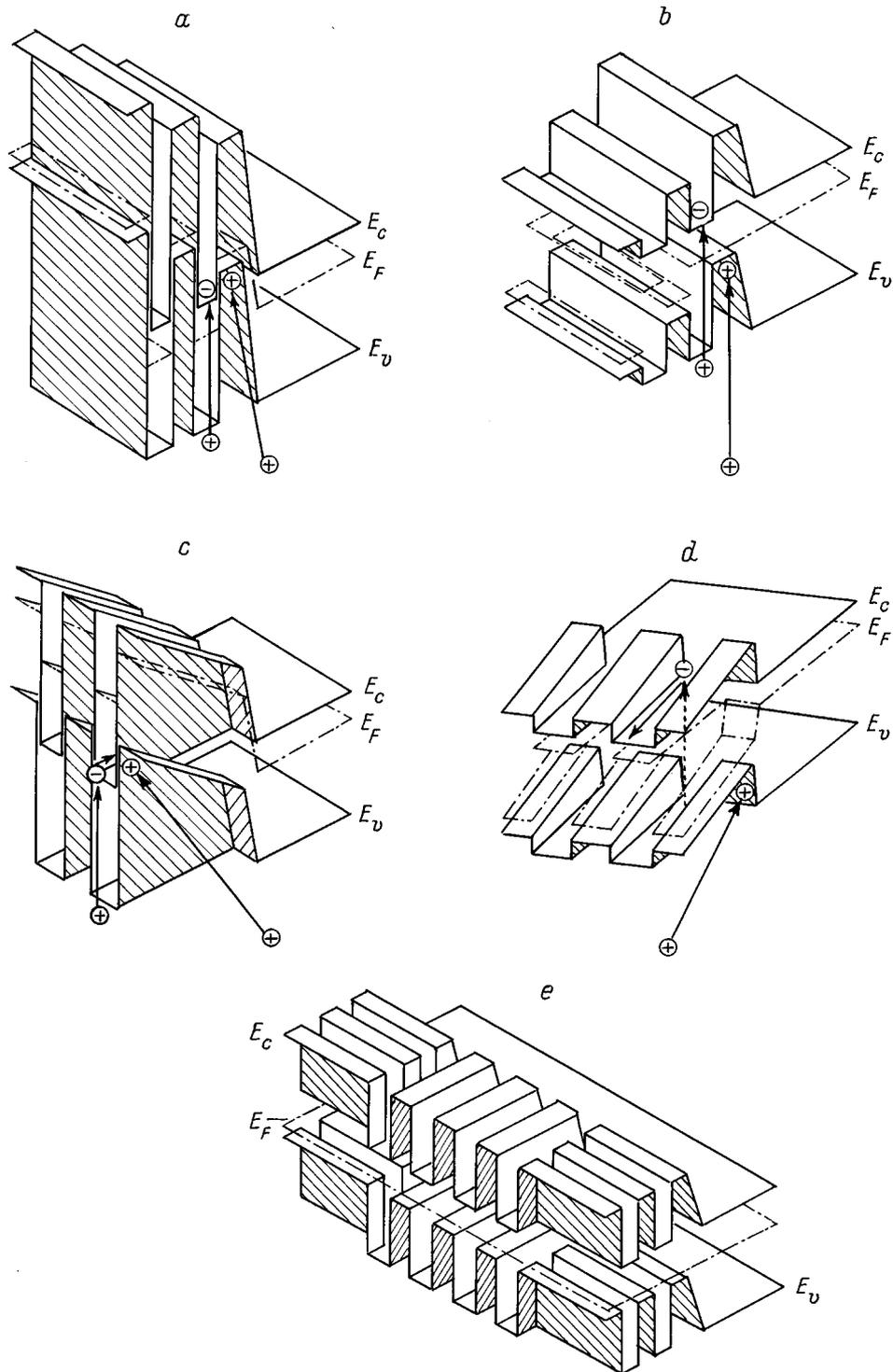


Рис. 3. Трехмерное изображение одноэлектронной зонной схемы $p^+ - n$ -переходов, состоящих из продольных (a, b) и поперечных (c, d) квантовых ям, а также их комбинаций (e). Напряжение смещения $p^+ - n$ -переходов: a, c — обратное; b, d — прямое; e — нулевое.

димости γ не зависит ни от первичного тока, ни от напряжения смещения. При прямом смещении ток радиационной проводимости резко падает до нуля вследствие интенсивной рекомбинации неравновесных носителей на границе $p^+ - n$ -перехода (рис. 2, кривая б). Неожиданный результат был получен при регистрации ВАХ радиационной проводимости $p^+ - n$ -перехода, сформированного при температуре диффузии $T_{\text{dif}} = 800^\circ\text{C}$. В этом случае радиационная проводимость регистрируется как при обратном, так и при прямом смещении $p^+ - n$ -перехода и не уменьшается даже при протекании через открытый диод тока проводимости порядка 10 мА, что свидетельствует о значительном возрастании времени жизни возбужденных носителей (рис. 2, кривые 1–5). Подобное снижение эффективности рекомбинации, по-видимому, обусловлено пространственным разделением потоков электронов и дырок из-за наличия самоупорядоченных квантовых ям внутри сверхмелких p^+ -диффузионных профилей.

Исследования угловых зависимостей циклотронного резонанса электронов и дырок, а также кристаллографически зависимой дырочной проводимости показали [1,7,8], что p^+ -диффузионные профили, реализованные в условиях паритета КО и вакансионных механизмов примесной диффузии, который достигается при $T_{\text{dif}} = 900^\circ\text{C}$, состоят из самоупорядоченных продольных квантовых ям (рис. 3, а, б), в то время как поперечные квантовые ямы были обнаружены внутри кремниевых $p^+ - n$ -переходов, полученных при доминировании вакансионных диффузионных механизмов ($T_{\text{dif}} = 800^\circ\text{C}$) (рис. 3, в, д). Анализ ВАХ квантованной проводимости [14,15] свидетельствует о том, что самоупорядоченные квантовые ямы n - и p -типа проводимости (рис. 3) формируются между двумерными сильно легированными слоями, которые, по данным ЭПР, преимущественно состоят из примесных диполей $B^+ - B^-$ с отрицательной корреляционной энергией и слабо влияют на подвижность и рекомбинацию неравновесных носителей тока.

Сверхмелкие кремниевые $p^+ - n$ -переходы, состоящие из продольных квантовых ям, характеризуются низким обратным темновым током (кривая 2 на вставке) вследствие наличия естественных потенциальных барьеров для неосновных носителей (рис. 3, а, б). Однако в этом случае не происходит пространственного разделения возбужденных электронов и дырок, что приводит, как отмечено выше, к резкому исчезновению радиационной проводимости при прямом смещении $p^+ - n$ -перехода (рис. 2, кривая б).

Наличие поперечных квантовых ям приводит к увеличению обратного темнового тока (см. кривую 1 на вставке к рис. 2) из-за возникновения естественных каналов для неосновных носителей (рис. 3, в, д), но в то же время способствует пространственному разделению возбужденных электронов и дырок. Поэтому радиационная проводимость $p^+ - n$ -переходов, содержащих самоупорядоченные поперечные квантовые ямы, может быть зарегистрирована как при прямом, так и при обратном напряжении (рис. 2, кривые 1–5). Потенциальный рельеф,

вносимый поперечными квантовыми ямами и ответственный за пространственное разделение электронов и дырок, может сглаживаться с ростом тока в результате омического падения напряжения на границе $p^+ - n$ -перехода, что наиболее ярко должно проявиться в структурах с высокоомной подложкой. Действительно, при прямом смещении $p^+ - n$ -перехода наблюдается уменьшение γ с ростом первичного тока I_1 , начиная с таких значений, при которых ток возбужденных носителей ΔI становится сравнимым с темновым током I_c , что отражает усиление процессов их рекомбинации. В то же время при обратном смещении $p^+ - n$ -перехода, в отсутствие тока основных носителей, коэффициент радиационной проводимости не зависит от первичного тока, который влияет лишь на значение напряжения, соответствующего выходу ВАХ радиационной проводимости на насыщение (рис. 2, кривые 1–5).

5. Энергетические зависимости радиационной проводимости в самоупорядоченных квантовых ямах на поверхности кремния (111)

Зависимости коэффициента радиационной проводимости γ от энергии первичных электронов представлены на рис. 4, а. Радиационная проводимость $p^+ - n$ -перехода, полученного при $T_{\text{dif}} = 900^\circ\text{C}$, возникает начиная с энергии первичных электронов $E_1 = 200$ эВ и быстро возрастает при дальнейшем ее увеличении (рис. 4, а, кривая 3). Функция собирания $f(x)$, рассчитанная по экспериментальной зависимости $\gamma(E_1)$, демонстрирует характерную ступенчатую форму, подтверждающую существование на границе $p^+ - n$ -перехода "мертвого слоя", в котором возбужденные электронно-дырочные пары не участвуют в формировании радиационной проводимости либо по причине малого времени жизни носителей, либо из-за потенциальных барьеров, возникающих при наличии продольных квантовых ям [9,10]. Толщина мертвого слоя на границе $p^+ - n$ -перехода, полученного при $T_{\text{dif}} = 900^\circ\text{C}$, не превышает 10 нм, а функция собирания $f(x)$ выходит на насыщение уже на глубине 50 нм (рис. 4, б, кривая 3). Следует отметить, что максимальное определенное значение $f(x)$ близко к 1, так как типичная для кремния средняя энергия $\Delta\varepsilon$, затрачиваемая на образование одной электронно-дырочной пары, составляет около 3 эВ. Принимая во внимание тот факт, что $p^+ - n$ -переходы, полученные при $T_{\text{dif}} = 900^\circ\text{C}$, характеризуются малыми обратными темновыми токами (см. кривую 2 на вставке к рис. 2) и высоким временем жизни неравновесных носителей, можно заключить, что основополагающую роль в образовании мертвого слоя глубиной 50 нм играют самоупорядоченные продольные квантовые ямы.

Напротив, время жизни неравновесных носителей, возбужденных в мертвом слое $p^+ - n$ -перехода, полученного при $T_{\text{dif}} = 800^\circ\text{C}$ и представляющего собой

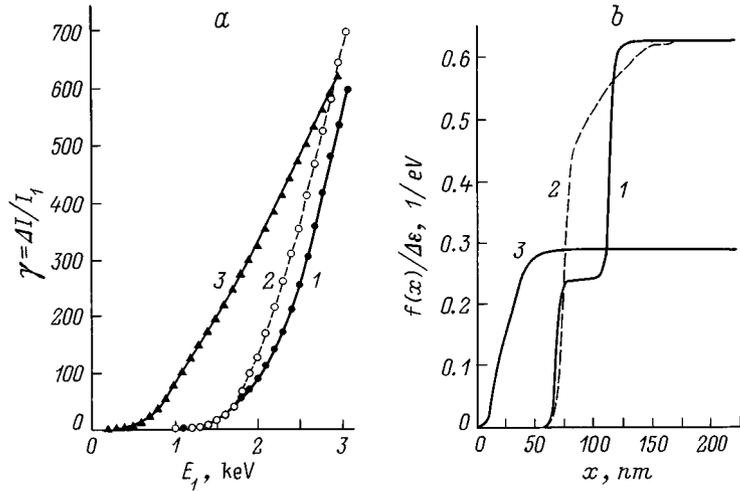


Рис. 4. Зависимости коэффициента радиационной проводимости γ от энергии первичных электронов E_1 ($I_1 = 2$ мкА) (а) и рассчитанные по ним распределения функции собирания $f(x)$ по глубине $p^+ - n$ -перехода (б) при обратном (кривые 1, 3 — $U = -5$ В) и прямом (кривые 2 — $U = 2$ В) смещениях $p^+ - n$ -переходов, полученных на поверхности кремния (111), легированного фосфором в концентрации $N(P) = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, при $T_{\text{dif}} = 800$ (1, 2) и 900°C (3).

комбинацию продольных и поперечных квантовых ям, недостаточно для того, чтобы они дали заметный вклад в радиационную проводимость. В этом случае толщина мертвого слоя (около 70 нм) одинакова как при прямом, так и при обратном смещении $p^+ - n$ -перехода (рис. 4, а, кривые 1, 2) и определяется прежде всего концентрацией рекомбинационно-активных центров вблизи его границы [9,10]. Кроме того, при обратном и прямом смещении $p^+ - n$ -перехода наблюдаются существенные различия в форме функции собирания (рис. 4, б, кривые 1, 2). При обратном смещении функция собирания $f(x)$ сначала резко возрастает почти до единицы на глубине 75 нм, а затем вновь увеличивается в 2.5 раза на глубине 120 нм. Наблюдаемый эффект порогового увеличения функции

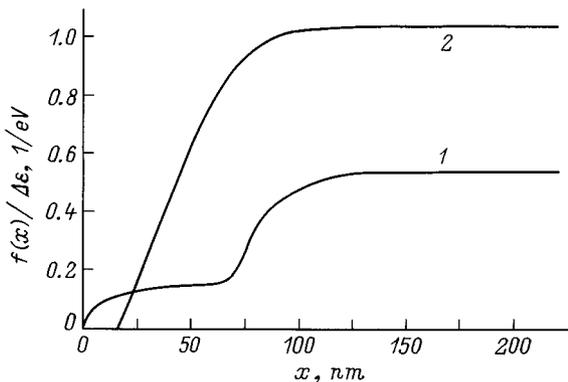


Рис. 5. Функции собирания $f(x)$ при обратном смещении $p^+ - n$ -переходов, полученных на поверхности кремния (100), легированного фосфором в концентрации $N(P) = 8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, при $T_{\text{dif}} = 800$ (1) и 900°C (2), в условиях сильного деформационного потенциала, стимулирующего образование комбинаций самоупорядоченных продольных и поперечных квантовых ям (рис. 3, е).

собирания, при котором $f(x)$ превышает свое предельное значение, определяемое концентрацией возбужденных электронно-дырочных пар, можно связать с ударным размножением дырок, зарождаемых на большей глубине и движущихся по направлению к поверхности при обратном смещении $p^+ - n$ -перехода (рис. 3, с). В то же время значение функции собирания, отражающей вклад в радиационную проводимость носителей, возбужденных на меньшей глубине, не превышает 1. Отсюда следует, что неравновесные электроны, движущиеся от рабочей поверхности к подложке, не испытывают ударного размножения вследствие пространственного разделения потоков возбужденных электронов и дырок. При прямом смещении $p^+ - n$ -перехода уже дырки движутся к подложке, и функция собирания превышает 1 на всей глубине возбуждения электронно-дырочных пар, что возможно лишь при ударном размножении носителей в ускоряющем поле (рис. 3, д). Данный эффект резкого увеличения коэффициента радиационной проводимости наиболее ярко проявляется в Si(100) в случае создания комбинации чередующихся продольных и поперечных квантовых ям n - и p -типа проводимости, кристаллографически ориентированных в эквивалентных направлениях $\langle 100 \rangle$ (рис. 5 и 3, е).

6. Заключение

Электронно-лучевая диагностика была использована для исследования вольт-амперных и энергетических характеристик радиационной проводимости самоупорядоченных квантовых ям, спонтанно формирующихся в процессе получения кремниевых $p^+ - n$ -переходов с помощью неравновесной примесной диффузии. Вольт-амперные характеристики радиационной проводимости

обнаружены как при обратном, так и при прямом смещении $p^+ - n$ -перехода, состоящего преимущественно из поперечных (перпендикулярных плоскости $p^+ - n$ -перехода) квантовых ям, тогда как наличие продольных (параллельных плоскости $p^+ - n$ -перехода) квантовых ям способствует генерации радиационной проводимости только при обратном смещении $p^+ - n$ -перехода. Зависимости коэффициента радиационной проводимости от энергии первичных электронов показали, что самоупорядоченные поперечные квантовые ямы внутри p^+ -диффузионного профиля стимулируют ударное размножение неравновесных носителей вследствие пространственного разделения электронов и дырок в поле сверхмелкого $p^+ - n$ -перехода.

Данная работа выполнена при поддержке Государственного комитета РФ по высшему образованию (грант по исследованиям в области электроники и радиотехники), ФТНС (проект 97-1040), ПТУМНЭ (проект 02.04.301.89.5.2) и Федеральной программы "Интеграция" (проект 75:2.1).

Список литературы

- [1] N.T. Bagraev, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A. Naeser. Def. Dif. Forum, **143–147**, 1003 (1997).
- [2] N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, V.L. Sukhanov. Def. Dif. Forum, **103–105**, 192 (1993).
- [3] W. Frank, U. Gosele, H. Mehrer, A. Seeger. *Diffusion in Crystalline Solids* (Academic Press, 1984) p. 63.
- [4] E. Antoncik. J. Electrochem. Soc., **141**, 3593 (1994).
- [5] R.B. Fair. Dif. and Def. Data, **37**, 1 (1984).
- [6] Н.Т. Баграев, Е.В. Владимирская, В.Э. Гасумянц, В.И. Кайданов, В.В. Кведер, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, Е.И. Чайкина. ФТП, **29**, 2133 (1995).
- [7] N.T. Bagraev, E.I. Chaikina, L.E. Klyachkin, I.I. Markov, W. Gehlhoff. Superlat. Microstruct., **23**, 338 (1998).
- [8] N.T. Bagraev, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, A. Naeser. Mater. Sci. Forum, **258–263**, 1607 (1997).
- [9] А.Н. Андронов, Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, С.В. Робозеров. ФТП, **32**, 137 (1998).
- [10] А.Н. Андронов, Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, С.В. Робозеров. ФТП, **33**, 46 (1999).
- [11] P.S. Zalm. Rep. Progr. Phys., **58**, 1321 (1995).
- [12] Е.Н. Пятышев, Д.В. Кузичев. Измер. техника, № 9, 3 (1991).
- [13] А.Н. Андронов, Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, С.В. Робозеров, Н.С. Фараджев. ФТП, **28**, 2049 (1994).
- [14] N.T. Bagraev, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, A. Naeser. Mater. Sci. Forum, **258–263**, 1683 (1997).
- [15] W. Gehlhoff, K. Irmischer, N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko. *Proc. of the IC-SLCS*, ed. by C.A.J. Ammerlaan and B. Pajot (World Scientific, Singapore, 1997) p. 227.

Редактор Т.А. Полянская

Radiation conductivity in self-assembly silicon quantum wells

A.N. Andronov*, N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, S.V. Robozеров*

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia
* St.Petersburg Technical University,
195251 St.Petersburg, Russia

Abstract Electron beam diagnostics is used to study self-assembly quantum wells that are spontaneously formed by non-equilibrium boron diffusion in the process of the preparation of the ultra-shallow silicon $p^+ - n$ junctions. Both the current-voltage characteristics and energy dependencies of the radiation conductivity coefficient are investigated with studying the longitudinal and lateral quantum wells that are oriented, respectively, along and perpendicular to the $p - n$ junction plane. CV characteristics of radiation conductivity are demonstrated, for the first time, under both the reverse and forward biases, which are created by the lateral quantum wells, whereas the longitudinal quantum wells are able to induce the radiation conductivity only under the reverse bias. Finally, the avalanche effects due to spatial separation of non-equilibrium carriers inside self-assembly lateral quantum wells are identified by analysing the energy dependencies of the radiation conductivity coefficient.