

Самоупорядоченные микрорезонаторы в сверхмелких кремниевых $p^+ - n$ -переходах

© Н.Т. Баграев, А.Д. Буравлев, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, С.А. Рыков*

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

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

(Получена 30 декабря 1999 г. Принята к печати 30 декабря 1999 г.)

Сканирующая туннельная микроскопия используется для регистрации топографических изображений поверхности (100) сверхмелких диффузионных профилей бора в кремнии. Данная методика позволяет исследовать влияние флуктуаций поверхностного деформационного потенциала, зависящих от толщины предварительно нанесенного слоя окисла, на кристаллографическую ориентацию потоков неравновесных вакансий и собственных межузельных атомов, которые стимулируют обменные механизмы примесной диффузии. Впервые показано существование самоупорядоченных систем квантовых антиточек, которые формируются вследствие флуктуаций поверхностного деформационного потенциала и представляют собой микродефекты, проникающие сквозь диффузионный профиль легирующей примеси. Установлено, что разброс в размерах квантовых антиточек нивелируется при увеличении температуры примесной диффузии. Кроме того, размеры квантовых антиточек взаимосвязаны с их пространственным распределением, что указывает на фрактальный механизм формирования самоупорядоченных нуль-мерных систем в условиях сильного взаимодействия неравновесных потоков примесных атомов и первичных дефектов. Получение самоупорядоченных квантовых антиточек, встроенных в систему кремниевых квантовых ям, делает возможным создание микрорезонаторов с распределенной обратной связью, наличие которых подтверждается с помощью спектральных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания соответственно в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн.

1. Введение

В основе формирования всех известных до настоящего времени наноструктур в полупроводниках лежат процессы локального самоупорядочения атомов матрицы [1]. Между тем самоупорядоченные наноструктуры могут также возникать вследствие анизотропии диффузии примесных атомов и ионов при их внедрении в полупроводниковую решетку методами ионной имплантации и диффузии [2,3]. Подобная самоорганизация примесных атомов резко усиливается при использовании метода неравновесной примесной диффузии в условиях контролируемой инъекции вакансий или собственных межузельных атомов [3,4]. В этом случае преимущество имеет применение планарной технологии, в рамках которой можно реализовать режим ускоренной диффузии легирующей примеси, стимулируя обменное взаимодействие примесного атома с собственным межузельным атомом (kick-out mechanism, КО-механизм примесной диффузии) или вакансией (вакансионный механизм примесной диффузии), а также осуществлять резкое торможение примесной диффузии в режиме полной аннигиляции собственных дефектов [3].

Исследование угловых зависимостей спектров циклотронного резонанса электронов и дырок, а также квантованной проводимости [3,5] показали, что сверхмелкие диффузионные профили бора (глубиной 5–20 нм по данным вторично-ионной масс-спектрометрии [4,6]), полученные таким образом, состоят из двумерных сильно легированных барьеров, между которыми сформированы самоупорядоченные квантовые ямы. В зависимости от

режимов неравновесной диффузии процессы самоупорядочения легирующих примесей могут стимулировать формирование как поперечных, так и продольных примесных сверхрешеток. Определенное преимущество примесных квантовых ям и сверхрешеток состоит в том, что они могут быть реализованы даже в элементарных полупроводниках, например, непосредственно в процессе получения кремниевых $p - n$ -переходов и транзисторных структур, в которых проявляются эффекты переноса одиночных электронов и дырок [7,8].

Однако технологическая реализация более сложных приборов кремниевой наноэлектроники, например различных комбинаций одноэлектронных ячеек памяти и транзисторных структур, требует воспроизводимого получения контролируемых последовательностей продольных и поперечных квантовых ям, которые в свою очередь определяются формой поверхностного деформационного потенциала, возникающего в процессе неравновесной примесной диффузии. Наиболее сильные флуктуации деформационного потенциала наблюдаются в условиях доминирования КО- или вакансионного механизма примесной диффузии вследствие пространственного разделения встречных потоков собственных межузельных атомов или вакансий [3]. В этом случае следует ожидать, что собственные дефекты, не участвующие в процессе неравновесной примесной диффузии, могут образовывать микродефекты, которые насквозь пронизывают сверхмелкие диффузионные профили. Таким образом, кроме упорядоченных квантовых ям в процессе неравновесной примесной диффузии может возникать самоорганизованная система микродефектов (антиточек), спо-

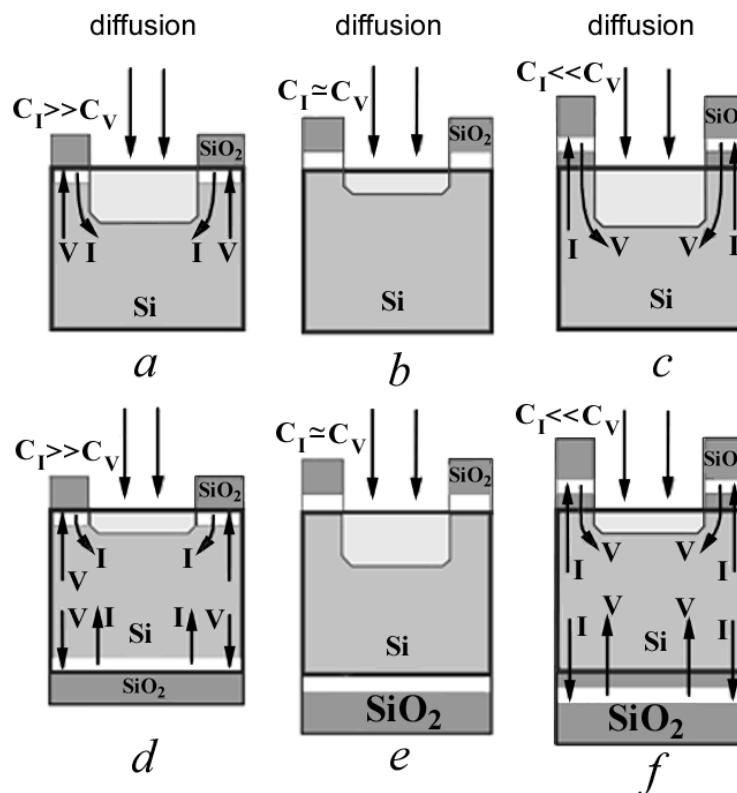


Рис. 1. Схема получения сверхмелких диффузионных профилей легирующей примеси в условиях инжекции собственных межузельных атомов I (a, d) и вакансий V (c, f) при наличии предварительно нанесенного слоя окисла только на рабочей поверхности ($a-c$) и на обеих сторонах подложки ($d-f$). C_I и C_V — неравновесные концентрации собственных межузельных атомов и вакансий соответственно.

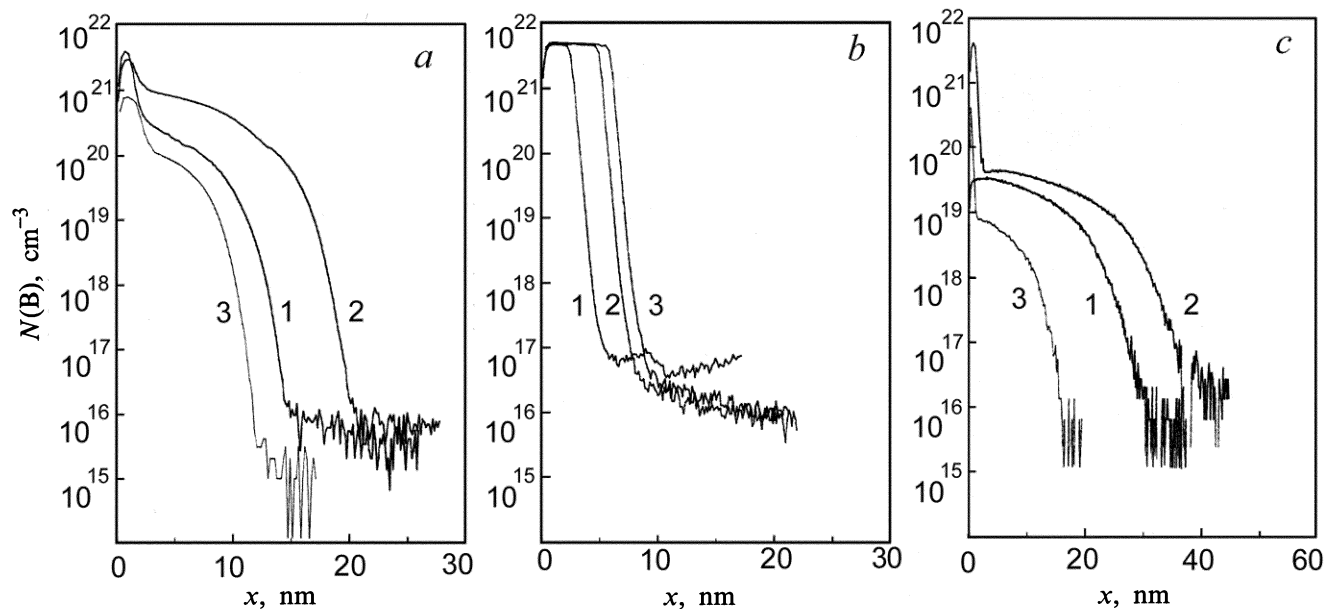


Рис. 2. Сверхмелкие профили концентрации бора $N(B)$ по глубине x в кремнии n -типа проводимости, полученные при разных температурах диффузии T_d после предварительного нанесения слоя окисла толщиной d_{SiO_2} на обе стороны пластины кремния ориентации (100). $d_{\text{SiO}_2}/d_0 = 1$ — 0.17, 2 — 1.0, 3 — 1.28. $T_d, ^\circ\text{C} = a$ — 800, b — 900, c — 1100. Толщина слоя окисла d_{SiO_2} определялась временем окисления кремниевой пластины; d_0 соответствует средней толщине слоя окисла, при которой достигается паритет между КО- и вакансионным механизмами примесной диффузии.

собная оказывать влияние на динамику баллистического транспорта неравновесных носителей внутри сверхмелких диффузионных профилей.

В настоящей работе представлены результаты исследования поверхности диффузионных профилей бора в Si (100), полученные с помощью сканирующей туннельной микроскопии. Сначала рассматривается влияние температуры примесной диффузии и толщины предварительно осажденного слоя окисла, задающей величину и форму поверхностного деформационного потенциала, на характеристики микродефектов, формирующихся внутри сверхмелкого диффузионного профиля. Далее анализируется взаимосвязь размеров микродефектов и их пространственного распределения, которая лежит в основе фрактального механизма самоорганизации нульмерных систем в процессе неравновесной примесной диффузии. Поскольку самоупорядоченные системы микродефектов — антиотчек, встроенные в примесные сверхрешетки, могут быть основой для образования микрорезонаторов, с целью идентификации их характеристик изучаются спектральные зависимости коэффициентов отражения и пропускания в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн. В заключение впервые демонстрируется усиление люминесценции из квантовой ямы и внутрицентральной люминесценции точечного дефекта, находящихся внутри подобного микрорезонатора.

2. Сверхмелкие диффузионные профили бора в кремнии

В качестве основы при получении сверхмелких диффузионных профилей бора использовались пластины монокристаллического кремния ориентации (100) n -типа проводимости толщиной 350 мкм с удельным сопротивлением 1.0 Ом·см. Предварительно обе стороны пластины окислялись в атмосфере сухого кислорода при температуре 1150°C. Толщина слоя окисла определялась временем окисления. Следует отметить, что предварительное окисление обеих сторон пластины применялось в первую очередь для накопления в подложке как собственных межузельных атомов (рис. 1, d), так и вакансий (рис. 1, f), что достигается при наличии на кремниевой поверхности соответственно тонкого и толстого слоев окисла. Подобного эффекта не удастся достигнуть при окислении только рабочей поверхности, что соответствует режиму геттерирования остаточных примесей, в рамках которого собственные межузельные атомы и вакансии формируют микродефекты вблизи обратной поверхности подложки (рис. 1, a, c). После окончания окисления на рабочей стороне пластины с помощью фотолитографии вскрывались окна для проведения кратковременной диффузии бора из газовой фазы.

Варьируя температуру диффузии ($T_d = 800, 900$ и 1100°C) и толщину предварительно осажденного слоя окисла d_{SiO_2} , удалось определить оптимальные условия для доминирования КО- и вакансионного механизмов

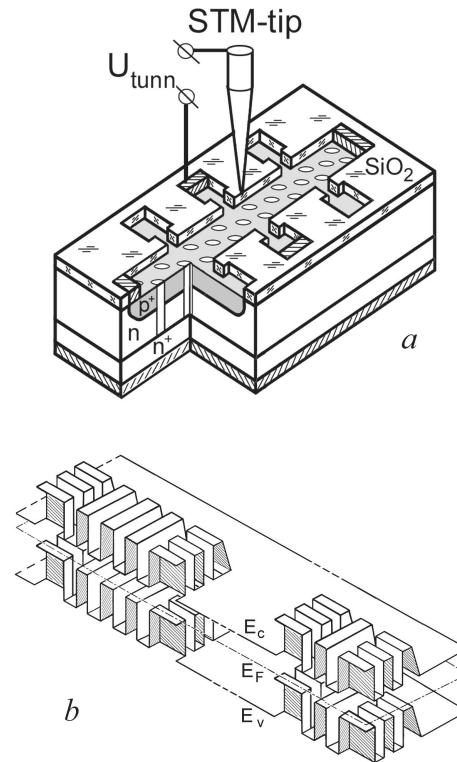


Рис. 3. a — планарная структура, используемая для изучения самоупорядоченных систем антиотчек внутри сверхмелкого диффузионного p^+ -профиля с помощью STM-спектроскопии; U_{tunn} — прикладываемое напряжение. b — трехмерное изображение одноэлектронной зонной схемы продольных и поперечных квантовых ям, сформированных между диффузионными p^+ -барьерами внутри самоупорядоченного микрорезонатора; показаны границы зоны проводимости (E_c), валентной зоны (E_v) и уровень Ферми (E_F).

диффузии бора, а также установить критерии их паритета. Высокий уровень генерации первичных дефектов, обеспечивающих увлечение или торможение примесных атомов, достигался не только благодаря их предварительному накоплению в подложке, но и с помощью добавочной подпитки борсодержащей газовой фазы сухим кислородом и хлористыми соединениями.

Анализ полученных профилей концентрации бора в кремнии ориентации (100), проведенный методом масс-спектрометрии вторичных ионов (рис. 2), показывает, что паритет между КО- и вакансионным механизмами, приводящий к резкому замедлению примесной диффузии, устанавливается при $T_d = 900^\circ\text{C}$. Кроме того, вследствие интенсивной аннигиляции собственных межузельных атомов и вакансий следует ожидать, что при данной температуре и наличии слоя окисла средней толщины могут быть минимизированы флуктуации поверхностного деформационного потенциала. В случае доминирования как КО- ($T_d = 1100^\circ\text{C}$), так и вакансионного ($T_d = 800^\circ\text{C}$) механизмов диффузии бора в кремнии, максимальные флуктуации поверхностного

деформационного потенциала, по-видимому, возникают при наличии соответственно тонкого и толстого слоев окисла.

Данное положение получило подтверждение при анализе угловых зависимостей циклотронного резонанса [3,5], которые позволили идентифицировать продольные квантовые ямы внутри сверхмелкого диффузионного профиля бора, полученного в условиях паритета КО-и вакансионного диффузионных механизмов, тогда как поперечные квантовые ямы, перпендикулярные плоскости сверхмелкого профиля, доминируют при использовании $T_d = 800$ и 1100°C . Далее влияние флуктуаций поверхностного деформационного потенциала на характеристики сверхмелких профилей бора в кремнии (100) анализируется на основании данных, которые были получены с помощью сканирующего туннельного микроскопа (STM) с электромагнитной системой грубого подвода образца к острию (рис. 3, *a*), работающего как при комнатной температуре, так и при температуре жидкого гелия. Настоящее исследование выполнено при комнатной температуре.

3. Сканирующая туннельная микроскопия самоупорядоченных микродефектов на поверхности сверхмелких диффузионных профилей бора в кремнии (100)

На рис. 4–6 представлены при разном пространственном разрешении трехмерные STM-изображения топографии фрагментов поверхности диффузионных профилей бора в кремнии (100), полученных при различных температурах диффузии (T_d) и толщинах слоя окисла (d_{SiO_2}).

Как было сказано выше, применение высоких температур диффузии ($T_d = 1100^\circ\text{C}$) резко ускоряет диффузию бора, проникающего в кремниевый монокристалл в условиях доминирования КО-механизма. В свою очередь, если диффузия проводится при низких температурах ($T_d = 800^\circ\text{C}$), то основную роль играет вакансионный механизм, заключающийся в увлечении атомов бора неравновесными вакансиями. Кроме того, при средних температурах ($T_d = 900^\circ\text{C}$) можно достигнуть паритета двух механизмов примесной диффузии, вызывая полную аннигиляцию собственных межузельных атомов и вакансий и обеспечивая резкое торможение диффузии легирующей примеси. Скорость диффузии также сильно зависит от толщины слоя окисла (d_{SiO_2}), поскольку она определяет доминирующий тип избыточных дефектов. Вакансии стимулируют примесную диффузию преимущественно при больших значениях d_{SiO_2} , тогда как при малых толщинах окисла примеси увлекаются в основном собственными межузельными атомами.

Таким образом, при температуре $T_d = 800^\circ\text{C}$ и наличии толстого слоя предварительно нанесенного окисла легирование бором проводилось в условиях доминирования вакансионного механизма примесной диффузии [4].

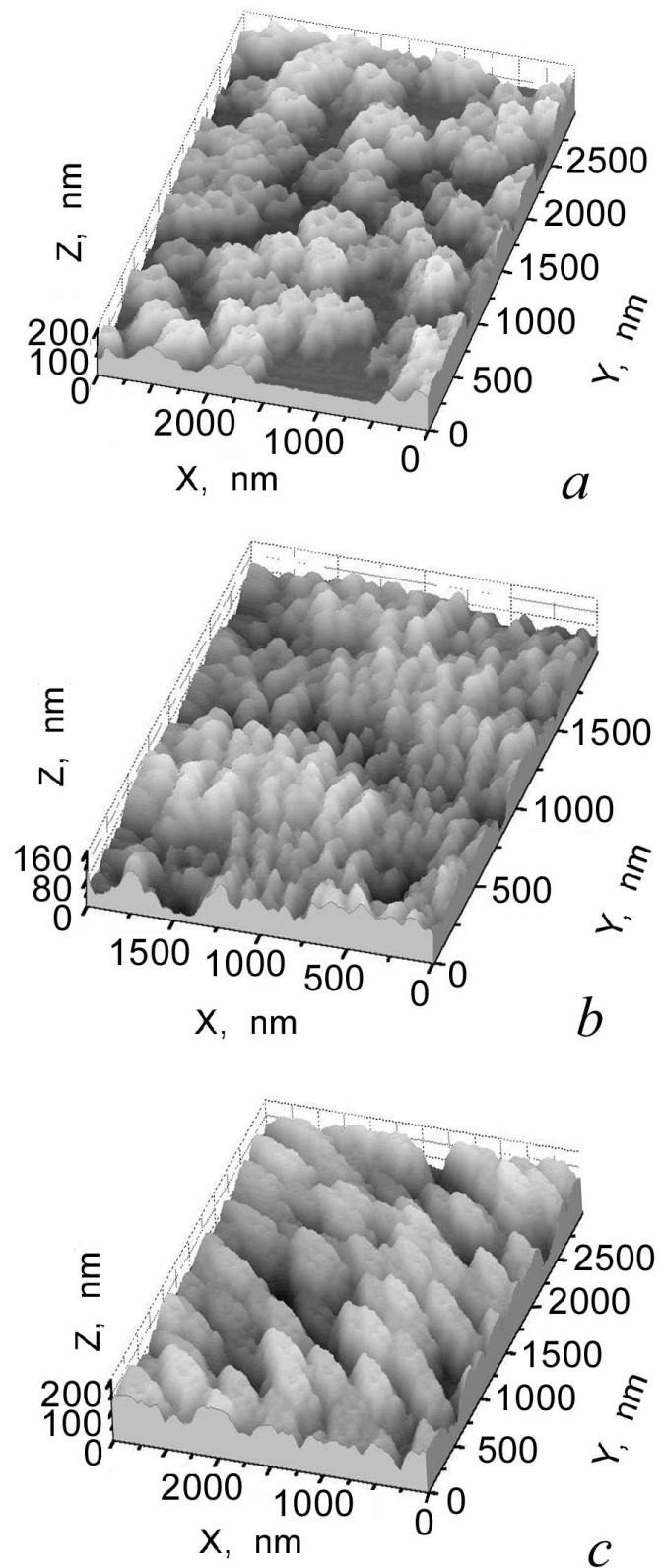


Рис. 4. Трехмерные STM-изображения поверхности сверхмелких диффузионных профилей бора в кремнии (100), полученных при температуре диффузии $T_d = 800^\circ\text{C}$ и при наличии предварительно нанесенного слоя окисла: *a* — толстый слой, $d_{\text{SiO}_2}/d_0 = 1.28$; *b* — слой средней толщины, $d_{\text{SiO}_2}/d_0 = 1.0$; *c* — тонкий слой, $d_{\text{SiO}_2}/d_0 = 0.17$. $X \parallel [001]$, $Y \parallel [010]$.

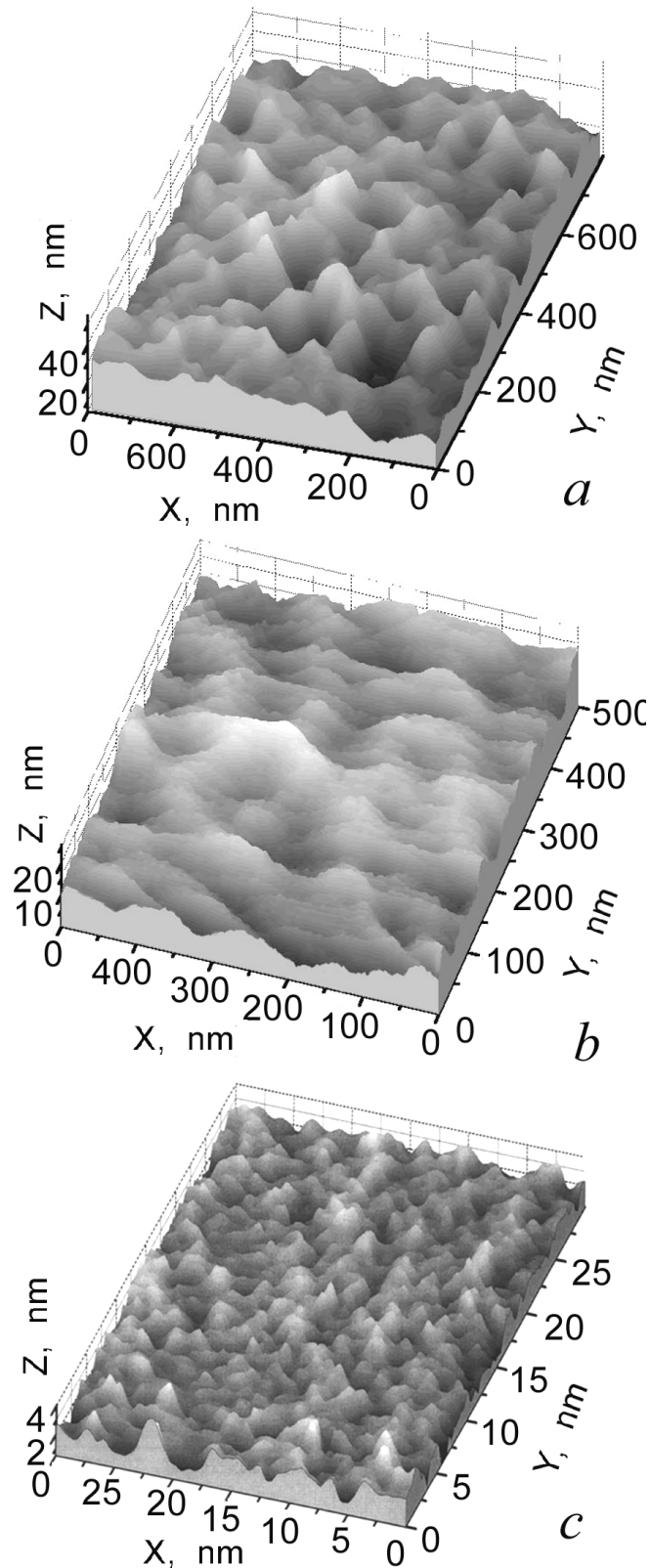


Рис. 5. Трехмерные STM-изображения с различным разрешением поверхности сверхмелких диффузионных профилей бора в кремнии (100), полученных при температуре диффузии $T_d = 900^\circ\text{C}$ и при наличии предварительно нанесенного слоя окисла средней толщины, $d_{\text{SiO}_2}/d_0 = 1.0$. $X \parallel [001]$, $Y \parallel [010]$.

Это означает, что в кристалле в начальный момент проведения диффузии было большое число вакансий. Однако они были распределены неравномерно по кристаллу. В местах выпуклых образований, высотой примерно 200 нм (рис. 4, *a*), вакансий, очевидно, было значительно меньше, чем в областях между ними. Эти выпуклые образования представляют собой микродефекты, по-видимому, состоящие из межузельных атомов. Подобное распределение микродефектов, возникающее вследствие флуктуаций деформационного потенциала, выявляется уже в процессе вскрытия окна в слое окисла для реализации примесной диффузии. В процессе фотолитографии травитель на основе плавиковой кислоты убирает не только слой окисла, он подтравливает и поверхностный слой кремния. При этом подтравливание происходит по-разному: где мало вакансий, большая плотность материала, оно идет медленнее, чем в областях, где вакансий много. В результате на первоначально ровной поверхности диффузионного "окна", подготовленного для проведения примесной диффузии, существует рельеф деформационного потенциала, высотой, однако, заметно меньшей, чем 200 нм. Через эту, уже изначально не очень ровную поверхность, была проведена диффузия бора из газовой фазы при температуре 800°C . При такой температуре диффузия идет только по вакансиям и доминирует в областях, где их много. На рис. 4, *a* эти области представляют собой темные участки. При этом в процессе диффузии слой окисла, оставшиеся вне вскрытого фотолитографией "окна", продолжают поставлять вакансии, которые устремляются преимущественно в отмеченные выше области с их изначально высокой концентрацией, где и стимулируют примесную диффузию. В результате потенциальный рельеф в этих областях понижается относительно микродефектов, в которые примесные атомы практически не проникают. Таким образом, происходит своего рода избирательное травление поверхности. При большом скоплении вакансий процесс примесной диффузии вдоль кристаллографической оси $[100]$ идет настолько интенсивно, что можно идентифицировать кристаллографические направления $[110]$ и $[1\bar{1}0]$, соответствующие максимальному ускорению примесной диффузии в рамках вакансионного механизма (рис. 6, *c*). Другого рода процессы идут в областях кристалла, где примесная диффузия заторможена. На рис. 4, *a* эти области представляют собой микродефекты. В процессе примесной диффузии данные микродефекты являются стоком для мигрирующих межузельных атомов кремния, что отражается в увеличении их размера. Углубление в центре микродефектов связано с тем, что скорость миграции межузельных атомов кремния максимальна вдоль кристаллографической оси $\{111\}$, вследствие чего захват межузельных атомов кремния на микродефект происходит главным образом вдоль их поверхности, т. е. по внешнему контуру микродефекта — вдоль эквивалентных направлений $\{111\}$ его рост идет быстрее, чем в центре. Таким образом, размеры микродефектов, выявленных еще при вскрытии окна в окисле,

увеличиваются в процессе примесной диффузии. Следует отметить, что микродефекты пронизывают насквозь не только диффузионный профиль, но и остальной объем образца [9], тем самым формируя самоупорядоченные системы больших квантовых антиточек (рис. 3, *a*).

При анализе результатов исследований диффузионного профиля бора, полученного при $T_d = 800^\circ\text{C}$ и наличии слоя окисла средней толщины (рис. 4, *b*), следует учесть, что в этом случае число вакансий вблизи травленной кремниевой поверхности (100) внутри диффузионного окна близко к числу межузельных атомов. Однако, несмотря на то, что вакансии и межузельные атомы в значительной мере аннигилируют друг с другом, атомы бора по-прежнему увлекаются вакансиями вследствие низкой температуры примесной диффузии. Тем не менее диффузионный профиль бора формируется сравнительно медленно из-за малого количества вакансий, накопленных в объеме на стадии предварительного окисления. Кроме того, полученный диффузионный профиль является более однородным из-за ослабления флуктуаций поверхностного деформационного потенциала, что нашло отражение в наличии на его поверхности значительно меньших по размеру микродефектов (рис. 4, *b*), чем в присутствии толстого слоя окисла (рис. 4, *a*).

На рис. 4, *c* представлено STM-изображение поверхности диффузионного профиля, полученного при той же температуре диффузии, но с тонким слоем предварительно нанесенного окисла. Наличие тонкого слоя окисла означает, что вакансии вблизи травленной поверхности (100) внутри диффузионного окна сравнительно мало, и, наоборот, доминируют кластеры межузельных атомов кремния, которые являются в процессе примесной диффузии зародышами для образования крупных кристаллографически ориентированных микродефектов. Эти микродефекты имеют тонкую структуру, которая проявляется вплоть до малых фрагментов поверхности. Как видно из рис. 4, *c*, на поверхности (100) монокристалла кремния имеется выделенное направление, соответствующее кристаллографической оси [111], вдоль которого ориентированы микродефекты. Подобная кристаллографическая ориентация микродефектов вдоль одного из двух эквивалентных направлений [111], лежащих в плоскости (110), обусловлена остаточными механическими напряжениями, часто возникающими при резке слитка кремния на пластины. В этом случае диффузия собственных атомов кремния способна эффективно декорировать направление наибольшего (наименьшего) напряжения. Следует отметить, что коэффициент диффузии собственных межузельных атомов кремния максимален в кристаллографическом направлении [111] и их диффузия в значительной степени подавлена в направлении [100], тогда как вакансии наиболее эффективно диффундируют в направлении [100] и тормозится в направлении [111]. Данная зависимость скоростей диффузии собственных дефектов от кристаллографического направления соответствующим образом отражается в тензорах коэффициента неравновесной диффузии для вакансионного и

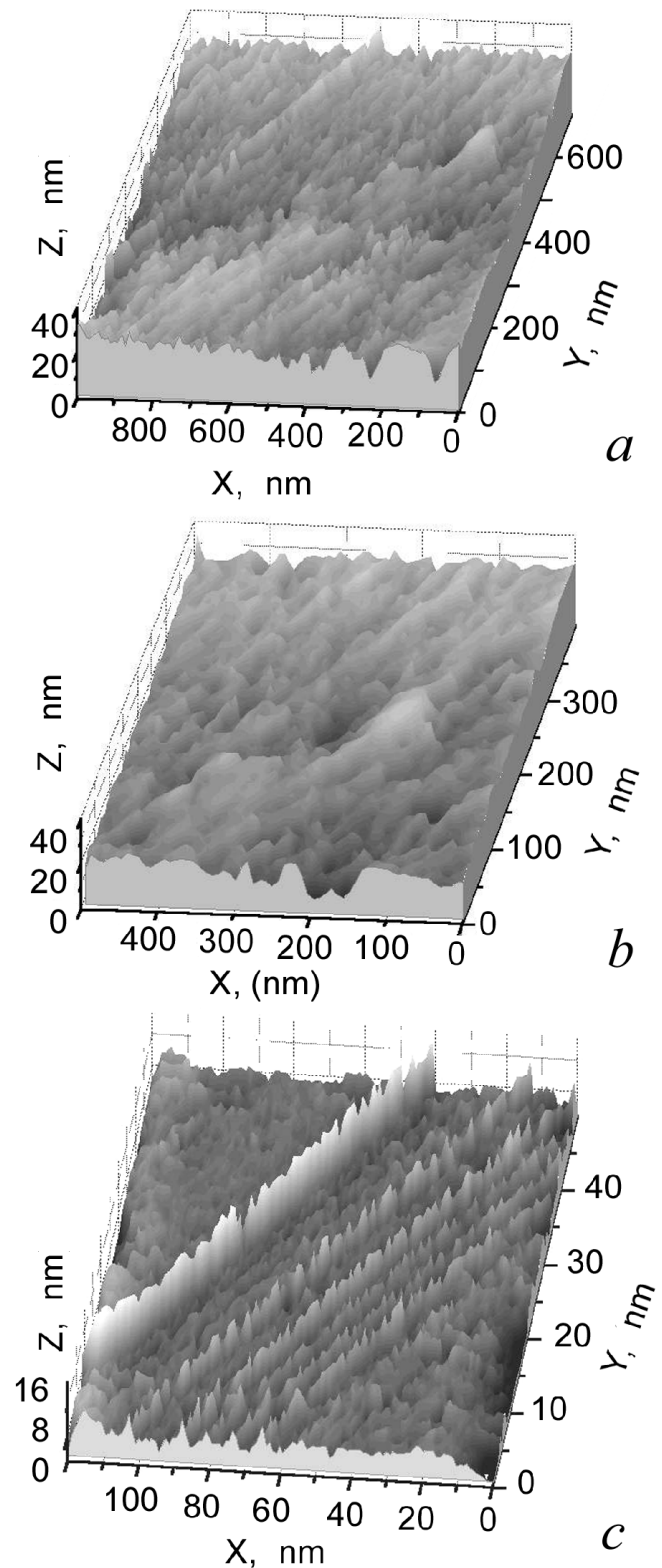


Рис. 6. Трехмерные STM-изображения поверхности сверхмелких диффузионных профилей бора в кремнии (100), полученных при температурах диффузии $T_d = 1100$ (*a, b*), 800°C (*c*) и при наличии предварительно нанесенного слоя окисла. *a, b* — тонкий слой, $d_{\text{SiO}_2}/d_0 = 0.17$; *c* — толстый слой, $d_{\text{SiO}_2}/d_0 = 1.28$. $X \parallel [001]$, $Y \parallel [010]$.

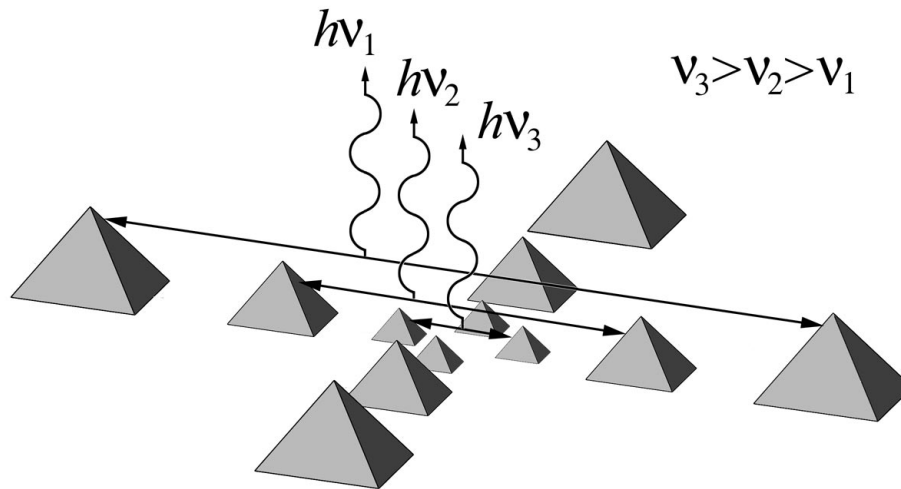


Рис. 7. Модель систем микрорезонаторов на основе квантовых антиточек, полученных вследствие фрактального механизма диффузионного легирования в условиях инжекции первичных дефектов.

КО-механизмов [10,11]. По этой причине диффузия бора заторможена при $T_d = 800^\circ\text{C}$ и наличии тонкого слоя окисла, и на поверхности диффузионного профиля доминируют микродефекты, ориентированные вдоль оси [111], соответствующей наиболее эффективному направлению для диффузии межузельных атомов кремния. При наличии толстого слоя окисла вблизи травленной поверхности доминируют вакансии и остаточные межузельные атомы кремния вынуждены диффундировать в процессе примесной диффузии вдоль оси [100], которая определяет направление роста микродефектов в данных условиях.

Таким образом, начальное распределение деформационного потенциала, которое зависит от толщины предварительно нанесенного окисла, определяет кристаллографическую ориентацию не только диффузионных потоков примесных атомов, но и оптимальное направление роста микродефектов, проникающих сквозь диффузионный профиль.

STM-изображения фрагментов поверхности диффузионного профиля бора, полученного при температуре диффузии 900°C и средней толщине слоя окисла, представлены на рис. 5, *a, b, c*. В этом случае реализуется условие паритета между двумя механизмами диффузии, что позволяет получить самые мелкие диффузионные профили. Размер микродефектов, образовавшихся в ходе диффузии при данных технологических условиях, значительно меньше (рис. 5), чем на поверхности образцов, полученных при температуре диффузии, равной 800°C . Кроме того, высота поверхностного рельефа диффузионных профилей также невелика. Сверхмелкий диффузионный профиль формируется в данных условиях значительно медленнее, чем при $T_d = 800^\circ\text{C}$, из-за интенсивной аннигиляции первичных дефектов. Поэтому в

процессе примесной диффузии не возникает избыточных потоков неравновесных межузельных атомов и вакансий, вследствие чего величина флуктуаций деформационного потенциала, задаваемая условиями предварительного окисления, остается неизменной. Таким образом, получение сверхмелких примесных профилей в условиях паритета диффузионных механизмов сопровождается сглаживанием их поверхностного рельефа в отсутствие значительных флуктуаций поверхностного деформационного потенциала.

Следует отметить, что форма микродефектов и особенности их пространственного распределения на поверхности диффузионного профиля хорошо воспроизводятся при увеличении разрешения регистрируемых STM-изображений (рис. 5, *a-c*; рис. 4, *a*; рис. 6, *c*). Иными словами, наблюдается полная взаимосвязь между размерами микродефектов и их пространственным распределением в независимости от величины флуктуаций поверхностного деформационного потенциала, которая больше в диффузионных профилях, полученных при $T_d = 800^\circ\text{C}$, чем в условиях паритета диффузионных механизмов ($T_d = 900^\circ\text{C}$). Подобная иерархия микродефектов, не зависящая от начального разброса в их размерах, указывает на фрактальный механизм их формирования в условиях сильного разделения неравновесных потоков собственных межузельных атомов и вакансий вследствие генерации флуктуаций деформационного потенциала на границе кремний–окисел.

Предлагаемый механизм формирования поверхностного рельефа сверхмелких диффузионных профилей находит подтверждение при рассмотрении STM-изображения фрагмента поверхности диффузионного профиля, полученного при температуре диффузии, равной 1100°C (рис. 6, *a, b*). При данной температуре примесная

диффузия стимулируется в условиях доминирования КО-механизма, роль которого усиливается из-за наличия на поверхности тонкого слоя предварительно осажденного окисла. По этой причине примесная диффузия и формирование микродефектов ускоряются вдоль одной из эквивалентных осей [111], лежащих в плоскости (110), перпендикулярной к рабочей поверхности кремния (100) (рис. 6, *a*), которой соответствует максимальная скорость миграции межузельных атомов кремния. Важным обстоятельством является отсутствие крупных микродефектов на поверхности диффузионного профиля бора, полученного при $T_d = 1100^\circ\text{C}$, что обусловлено интенсивным взаимодействием собственных межузельных атомов с легирующей примесью в условиях доминирования КО-механизма диффузии. В этом случае большинство межузельных атомов кремния стимулирует примесную диффузию, не участвуя в формировании микродефектов в местах флуктуаций диформационного потенциала.

Таким образом, сравнительный анализ STM-изображений, представленных на рис. 4, *a* и 6, *a* показывает, что микродефекты, возникающие в процессе неравновесной примесной диффузии, преимущественно состоят из собственных межузельных атомов кремния, тогда как миграция неравновесных вакансий не приводит к аналогичным образованиям. По-видимому, это является следствием их недостаточной подвижности по сравнению с подвижностью собственных межузельных атомов.

Обнаруженные микродефекты представляют собой системы антиоточек, встроенные в примесные сверхрешетки, из которых состоят сверхмелкие диффузионные профили [3,12], что делает возможным рассматривать их как основу для формирования самоупорядоченных микрорезонаторов (рис. 7). С целью идентификации этих необычных микрорезонаторов, характеристики которых определяются размерами и распределением микродефектов, исследовались спектральные зависимости коэффициентов отражения и пропускания в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн.

4. Оптические свойства самоупорядоченных антиоточек на поверхности кремния (100)

Самоупорядоченные микрорезонаторы, встроенные в примесные сверхрешетки на поверхности кремния (100) (рис. 3, *b*), могут существенно снизить коэффициент отражения света в коротковолновой области спектра, которое возникает вследствие прямых межзонных переходов в узких квантовых ямах (шириной $d \approx 2$ нм), сформированных в плоскости сверхмелкого диффузионного p^+ -профиля [3,6,8]. Выше мы обозначили эти квантовые ямы, являющиеся составляющими примесной сверхрешетки, как продольные.

Спектры отражения $R(\lambda)$ изучались с помощью спектрофотометра UV-VIS Specord M40 (Carl Zeiss Jena),

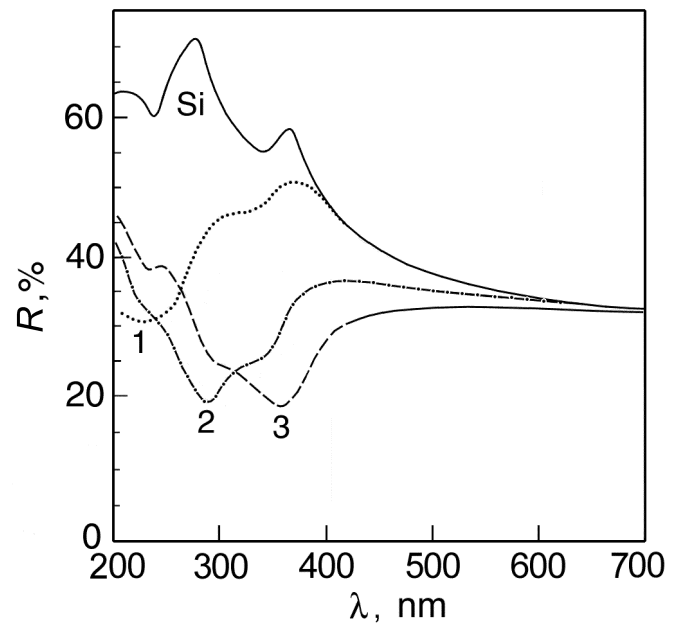


Рис. 8. Спектральная зависимость коэффициента отражения света $R(\lambda)$ от поверхности монокристаллического кремния (100) и сверхмелких кремниевых $p^+ - n$ -переходов в плоскости (100), полученных при различных температурах диффузии бора и толщинах предварительно нанесенного слоя окисла: 1 — соответствует рис. 6, *c*; 2 — соответствует рис. 5, *b*; 3 — соответствует рис. 6, *b*.

снабженного для измерения отражения интегрирующей сферой. На рис. 8 представлены спектры отражения света от сверхмелких диффузионных p^+ -профилей, полученных при различной температуре диффузии бора.

Для всех исследуемых образцов характерно снижение значения $R(\lambda)$ по сравнению с умеренно легированным монокристаллическим кремнием, а также размытие пиков в точках при длинах волн $\lambda = 354$ и 275 нм, обусловленных переходами между долинами $\Gamma - L$ вблизи точки X в зоне Бриллюэна, первый из которых связан с прямыми переходами $\Gamma'_{25} - \Gamma'_{15}$, $L'_3 - L_1$, $\Gamma'_{25} - \Gamma_2$, а второй — $X_4 - X_1$ и $\Sigma_4 - \Sigma_1$.

Анализ спектральной зависимости коэффициента отражения показывает, что наличие микрорезонаторов, самоорганизующихся между самоупорядоченными микродефектами средних размеров, наиболее сильно снижает $R(\lambda)$ в коротковолновой области спектра (200–330 нм), в то время как присутствие более крупных микродефектов способствует эффективному отражению света в более длинноволновой области ($\lambda > 330$ нм). При этом из сопоставления $R(\lambda)$ с данными STM следует, что положение минимума коэффициента отражения в спектральной зависимости $R(\lambda)$ и размеры микрорезонатора взаимосвязаны, подчиняясь соотношению Вульфа–Брэгга: $x = \lambda/2n$, где x — размер резонатора, λ — длина волны, n — коэффициент преломления света в кремнии (см. рис. 8; рис. 6, *c*; 5, *b*; 6, *b*).

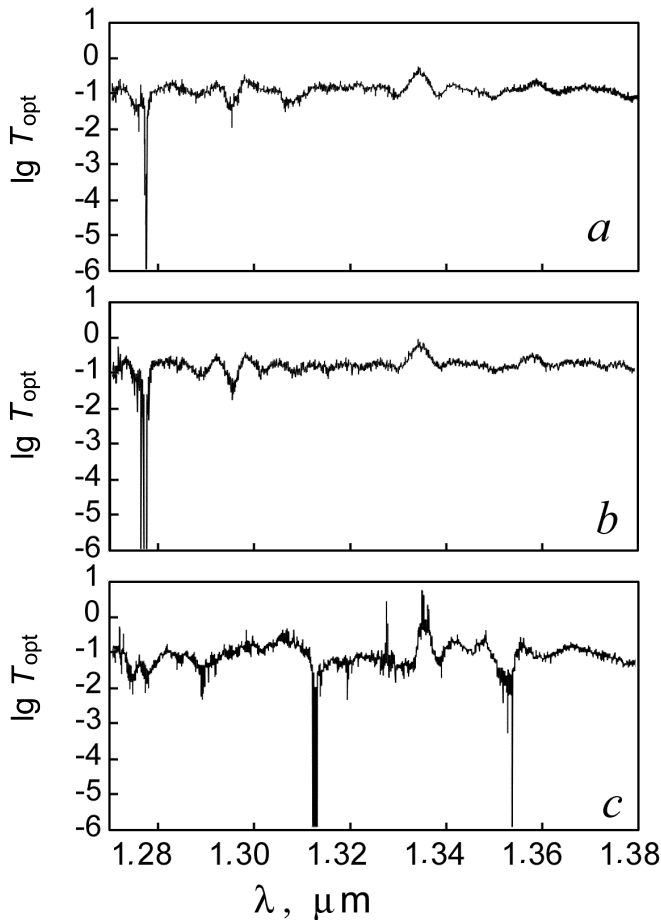


Рис. 9. Спектральная зависимость коэффициента прохождения света T_{opt} при 300 К через самоупорядоченную систему квантовых антиточек внутри сверхмелкого диффузионного p^+ -профиля, которая позволяет идентифицировать встроенные микрорезонаторы: *a* — соответствует рис. 4, *a*; *b* — соответствует рис. 5; *c* — соответствует рис. 6, *a*, *b*.

Получение больших квантовых антиточек (см., например, рис. 4, *a*), встроенных в систему узких кремниевых квантовых ям, делает возможным создание микрорезонаторов с распределенной обратной связью, соответствующих λ [мкм] $< 1.24/E_g$ [эВ], где E_g — ширина запрещенной зоны кремния, характеристики которых идентифицируются с помощью спектральных зависимостей коэффициентов пропускания в инфракрасном диапазоне длин волн. На рис. 9 приведены спектральные зависимости коэффициента пропускания для исследованных сверхмелких диффузионных профилей, зарегистрированные при комнатной температуре с помощью инфракрасного фурье-спектрометра IFS-28 (Bruker).

Представленные спектральные зависимости наглядно свидетельствуют о наличии самоупорядоченных микрорезонаторов, размеры которых, определяемые из STM-изображений, согласуются с зарегистрированными длинами волн поглощения в соответствии с соотношением Вульфа–Брэгга. Наличие продольных узких

квантовых ям ($d \approx 2$ нм) внутри микрорезонаторов позволило обнаружить расщепление Раби (рис. 9, *c*), которое является важной характеристикой микрорезонаторов, встроенных в системы полупроводниковых сверхрешеток [13,14]. Дополнительным свидетельством принадлежности линий поглощения света, которые определяются внутризонными переходами дырок в квантовой яме p -типа, $d \approx 2$ нм (см. рис. 3, *b*), расщеплению Раби является обнаруженное усиление люминесценции в соответствующем диапазоне длин волн (рис. 10).

Спектральная линия на длине волны 1.3278 мкм (см. рис. 10), по-видимому, обусловлена внутризонной люминесценцией дырок в процессе их туннелирования между продольными квантовыми ямами внутри микрорезонатора (рис. 3, *b*). Туннелирование возникает вследствие наличия встроенного электрического поля внутри сверхмелкого диффузионного p^+ -профиля на поверхности кремния (100) n -типа, которое представляет собой не что иное, как поле $p^+ - n$ -перехода.

Разрешенный спектр, обнаруженный в интервале длин волн $\lambda = 1.3335 - 1.3375$ мкм (рис. 10), может принадлежать точечному дефекту, находящемуся внутри резонатора. Предварительный анализ энергетического спектра указывает на участие в его формировании остаточных центров меди, которые возникают в процессе легирования из газовой фазы. Число линий в спектре свидетельствует о расщеплении основного состояния центра в условиях электрического поля $p^+ - n$ -перехода.

Следует отметить, что усиление внутрицентральной и межзонной люминесценции, индуцированной точечными примесными центрами, находящимися внутри кремниевых микрорезонаторов, является достаточно важной задачей, решение которой позволяет, в частности, резко повысить эффективность внутрицентральной люминесценции ионов Er^{3+} в кремниевых светодиодах для волоконно-оптических линий связи [15].

Заключение

Использование сканирующей туннельной микроскопии позволило определить влияние температуры примесной диффузии и параметров предварительного окисления на характеристики поверхностного рельефа сверхмелких диффузионных профилей бора в Si (100).

Установлено, что начальное распределение деформационного потенциала, задаваемое толщиной предварительно нанесенного окисла, определяет кристаллографическую зависимость коэффициента примесной диффузии в условиях увлечения избыточными потоками как вакансий, так и межузельных атомов, а также — пространственное распределение и оптимальное направление роста индуцированных ими самоупорядоченных микродефектов, пронизывающих диффузионный профиль легирующей примеси.

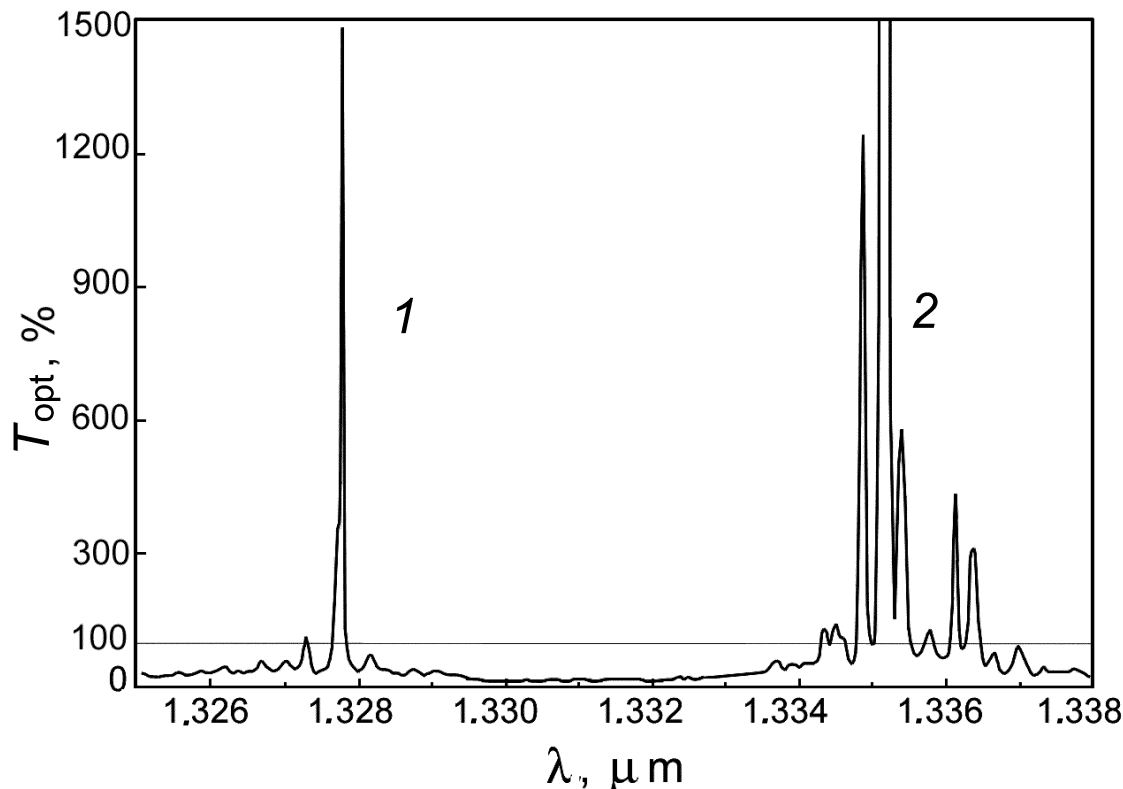


Рис. 10. Спектральная зависимость коэффициента прохождения света T_{opt} при 300 К через сверхмелкий диффузионный p^+ -профиль в кремнии (100), полученный при $T_d = 1100^\circ\text{C}$ (рис. 6, *a, b*), свидетельствующая об усилении люминесценции из квантовой ямы (1) и внутрицентровой люминесценции точечного дефекта (2), находящихся внутри микрорезонатора в системе самоупорядоченных квантовых антиточек (рис. 9, *c*).

Показано, что разброс в размерах обнаруженных микродефектов, представляющих собой самоорганизованные системы квантовых антиточек, который отражает величину флуктуаций деформационного потенциала, нивелируется при увеличении температуры примесной диффузии. Кроме того, обнаружена взаимосвязь размеров квантовых антиточек с их пространственным распределением, которая указывает на фрактальный механизм формирования самоупорядоченных нульмерных систем в условиях сильного взаимодействия неравновесных потоков примесных атомов и первичных дефектов.

Получение самоорганизованных систем квантовых антиточек, встроенных в систему кремниевых квантовых ям, сделало возможным создание микрорезонаторов с распределенной обратной связью, характеристики которых были определены с помощью спектральных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания соответственно в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн.

Впервые продемонстрировано усиление люминесценции из квантовой ямы и внутрицентровой люминесценции точечного дефекта, находящихся внутри подобного микрорезонатора.

Данная работа выполнена при поддержке ФТНС (проект 97-1040), ПТУМНЕ (проект 02.04.301.89.5.2) и Федеральной программы "Интеграция" (проект 75:2.1).

Список литературы

- [1] R. Nötzel. *Semicond. Sci. Technol.*, **11**, 1365 (1996).
- [2] H.-J. Gossman, J.M. Poate. *Proc. ICPS-23* (Berlin, 1996) **4**, 2569.
- [3] N.T. Bagraev, E.I. Chaikina, L.E. Klyachkin et al. *Superlat. Microstr.*, **23**(2), 337 (1998).
- [4] N.T. Bagraev, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A. Näser. *Def. Dif. Forum*, **143–147**, 1003 (1997).
- [5] W. Gehlhoff, N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin. *Sol. St. Phenomena*, **47–48**, 589 (1995).
- [6] N.T. Bagraev, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin et al. *Mater. Sci. Forum*, **258–263**, 1683 (1997).
- [7] N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, W. Gehlhoff. *Proc. ICPS-23* (Berlin, 1996) **2**, 1241.
- [8] N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, W. Gehlhoff. *Superlat. Microstr.*, **23**(6), 1333 (1998).
- [9] Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, И.С. Половцев, В.Л. Суханов. *ФТП*, **24** (9), 1557 (1990).
- [10] А.Н. Андронов, Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, С.В. Робозеров. *ФТП*, **32**, 137 (1998).

- [11] А.Н. Андронов, Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, С.В. Робозеров. ФТП, **33** (1), 58 (1999).
- [12] А.Н. Андронов, Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, С.В. Робозеров. ФТТ, **41** (10), 1871 (1999).
- [13] R. Houdre, R.P. Stanley, C. Weisbuch et al. *Proc. ICPS-23* (Berlin, 1996) **4**, 3071.
- [14] R. Houdre. *Phys. Rev. B*, **49**, 16 761 (1994).
- [15] N.T. Bagraev, A.D. Bouravleuv, W. Gehlhoff et al. *Phys. B*, **273–274** (1–4), 967 (1999).

Редактор Л.В. Шаронова

Self-assembled microcavities embedded into ultra-shallow silicon $p^+ - n$ junctions

N.T. Bagraev, A.D. Bouravleuv, L.E. Klyachkin,
A.M. Malyarenko, S.A. Rykov*

Ioffe Physicotechnical Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

* St. Petersburg State Technical University,
195251 St. Petersburg, Russia

Abstract Scanning tunneling microscopy is used to register the surface topographic image of the ultra-shallow boron diffusion profiles in the Si (100) wafers. The technique applied allows to study the effect of the surface deformation potential fluctuations that are dependent on the thickness of the earlier evaporated silicon oxide overlayer on the crystallographic orientation of the excess fluxes of both vacancies and self-interstitials, which induce the exchange mechanisms of the impurity doping. Self-assembled systems of quantum anti-dots are demonstrated for the first time. They are created by the fluctuations of the deformation potential and appeared as microdefects penetrating through the ultra-shallow boron diffusion profile. The analysis of the topographic images obtained shows that the value of the quantum anti-dot dimension is equalized thereby revealing a smooth of the surface deformation potential as the diffusion temperature increases. Besides, the interplay between the dimension of the quantum anti-dots and their distribution on the ultra-shallow diffusion profile surface are considered to be an evidence of the fractal mechanism that causes the formation of self-assembled zero-dimensional systems because of a strong coupling between the excess fluxes of impurity atoms and primary defects. Self-assembled quantum anti-dots embedded into the quantum well system allow to prepare microcavities that exhibit a positive feedback identified by the spectral dependencies of both the reflection and transmission, respectively, at visible and infrared wavelengths.