

УДК 621.315.592

©1995

СИЛЬНЫЕ ЗАРЯДОВЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ В p^+ -КВАНТОВЫХ ЯМАХ НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ n -ТИПА

*Н.Т.Баграев, Е.В.Владимирская, В.Э.Гасумянц, В.И.Кайданов,
В.В.Кведер, Л.Е.Клячкин, А.М.Маляренко, А.И.Шальнин*

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

(Поступила в Редакцию 16 декабря 1994 г.)

В окончательной редакции 1 марта 1995 г.)

В кремнии с сильнолегированными квантово-размерными p^+ - n -переходами обнаружена энергетическая щель в плотности состояний вырожденного двумерного дырочного газа, который может проявлять как диэлектрические, так и металлические свойства в зависимости от концентрации легирующей примеси и размеров p^+ -квантовой ямы.

Увеличение энергии связи локализованного экситона и подавление эффектов экранирования в сильнолегированных двумерных полупроводниковых системах могут привести к переходу металл-диэлектрик в вырожденном двумерном электронном (дырочном) газе [1,2] с реализацией двумерного экситонного диэлектрика или различных вариантов андерсоновской локализации. Широкие возможности в изучении вышеперечисленных явлений открываются в связи с созданием сильнолегированных квантово-размерных кремниевых p^+ - n -переходов, в которых обнаружена мощная инфракрасная электролюминесценция, обусловленная, возможно, наличием щели в плотности состояний вырожденной дырочной зоны [3,4]. В настоящей работе получены прямые доказательства существования подобной энергетической щели в плотности состояний вырожденного двумерного дырочного газа, который в условиях сильных зарядовых корреляций может проявлять как диэлектрические, так и металлические свойства в зависимости от концентрации легирующей примеси и размеров p^+ -квантовой ямы на поверхности кремния n -типа.

Квантово-размерные p^+ - n -переходы были получены при малых временах диффузии бора из газовой фазы в пластины монокристаллического кремния толщиной 350 μm , ориентации (100), n -типа проводимости с удельным сопротивлением 500 $\Omega\cdot\text{cm}$. На начальной стадии процесса кремниевые пластины подвергались термическому окислению, после чего с помощью фотолитографии в окисле были вскрыты окна, в которых формировались p^+ - n -переходы. Профили концентрации примеси определялись методом SIMS (вторичная ионная

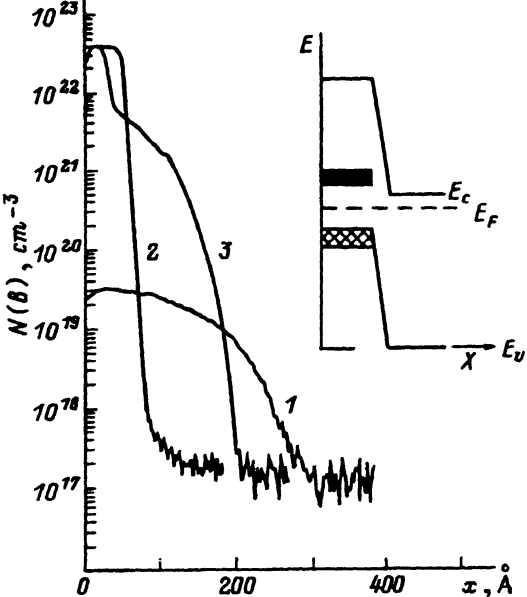


Рис. 1. Профили концентрации бора в кремнии, полученные при температурах диффузии 1100 (1), 900 (2) и 800°С (3).

На вставке — одноэлектронная зонная схема p^+ -квантовой ямы на поверхности кремния n -типа при низкой температуре.

масс-спектрометрия—ВИМС) (рис. 1). Электрофизические параметры вырожденного дырочного газа исследовались путем регистрации температурных зависимостей удельного сопротивления (рис. 2, $a-c$) и термоэдс (коэффициент Зеебека) (рис. 2, $a'-c'$), а также вольт-амперных характеристик (ВАХ) при $T = 300$ и 77 К (рис. 3).

На рис. 1 представлены SIMS-профили концентрации бора (p^+ -область) в p^+ - n -переходах, сформированных в предварительно окисленных образцах при температурах диффузии 1100, 900 и 800°С, варьирование которыми позволяет менять вклад в примесную диффузию механизма kick-out и диссоциативного вакансионного механизма (обмен позициями примеси в узле решетки с собственным междуузельным атомом или вакансией соответственно) [3]. Использование тонких слоев окисла в сочетании с высокими температурами (1100°С) приводит к генерации поверхностью раздела Si-SiO₂ избыточной концентрации собственных междуузельных атомов и резкому ускорению примесной диффузии в условиях kick-out-механизма (кривая 1 на рис. 1) [3]. Напротив, применение толстых слоев окисла и низких температур диффузии (800°С) стимулирует диссоциативный вакансионный механизм диффузии при избытке генерируемых вакансий, ответственных за увеличение растворимости легирующей примеси (кривая 3 на рис. 1) [3]. В случае паритета диффузионных механизмов (промежуточные толщины окисла и температуры диффузии) появляется возможность резко затормозить примесную диффузию и реализовать квантово-размерный p - n -переход (кривая 2 на рис. 1). Данные SIMS-измерений показывают, что минимальная глубина p^+ - n -перехода достигается при температуре диффузии 900°С, при которой происходит смена механизма диффузии. Следует отметить, что скорость примесной диффузии мало отличается при явном доминировании механизма kick-out или диссоциативного вакансионного диффузионного механизма.

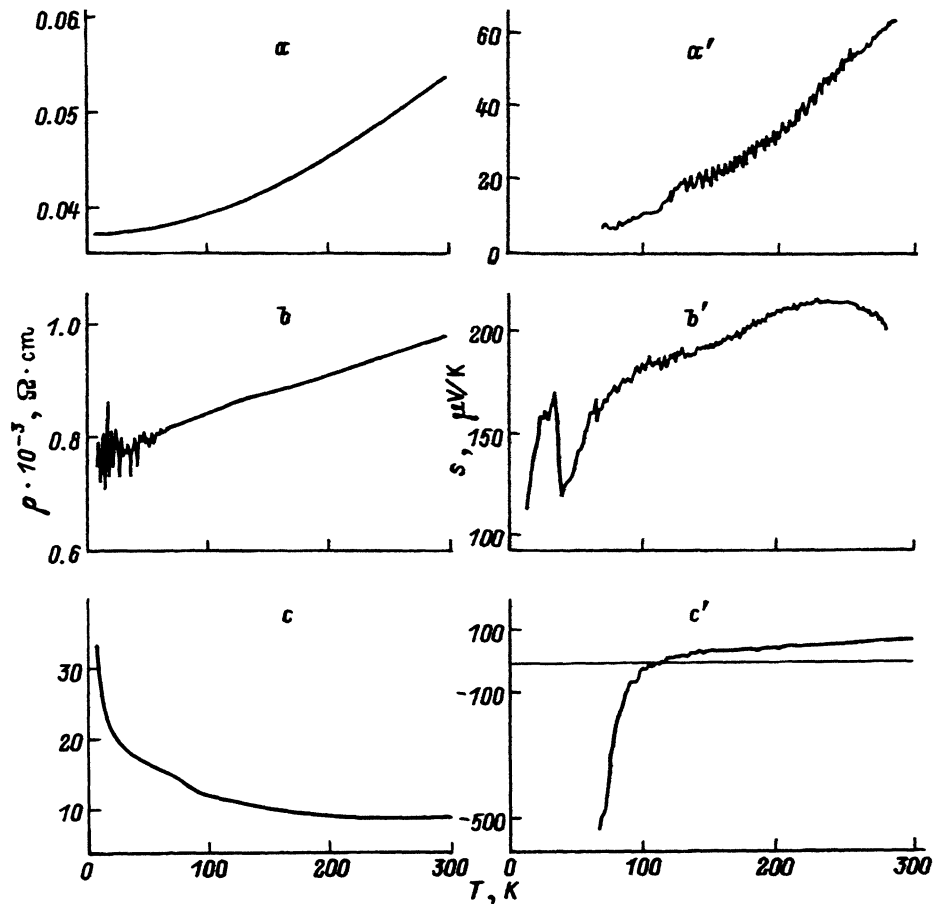


Рис. 2. Температурные зависимости удельного сопротивления (a-c) и термоэдс (коэффициент Зеебека) (a'-c') p^+ -квантовых ям на поверхности кремния n -типа, полученных при температурах диффузии 1100 (a, a'), 900 (b, b') и 800°C (c, c').

На рис. 2, a-c представлены температурные зависимости удельного сопротивления сильнолегированных p^+ -квантовых ям, полученных на поверхности кремния n -типа при различных температурах диффузии (рис. 1). Видно, что исследованные p^+ - n -переходы значительно отличаются друг от друга по электрофизическим свойствам.

В образце, полученном при температуре диффузии 1100°C, наблюдается металлическая проводимость (рис. 2, a). При этом увеличение удельного сопротивления с температурой описывается зависимостью $\rho = \rho_0 + \alpha T^\beta$, которая при $\beta = 1.62$ хорошо коррелирует с результатами холловских измерений, демонстрирующих падение подвижности за счет рассеяния на фононах ($\mu^{-1} = \mu^{-1}(0) + \alpha T^\beta$) и совпадение холловской концентрации дырок с данными SIMS (рис. 1). Значение показателя степени $\beta = 1.62$ соответствует поведению металлической проводимости квазидвумерного вырожденного дырочного газа, наличие которого в p^+ -области подтверждается соответствующей температур-

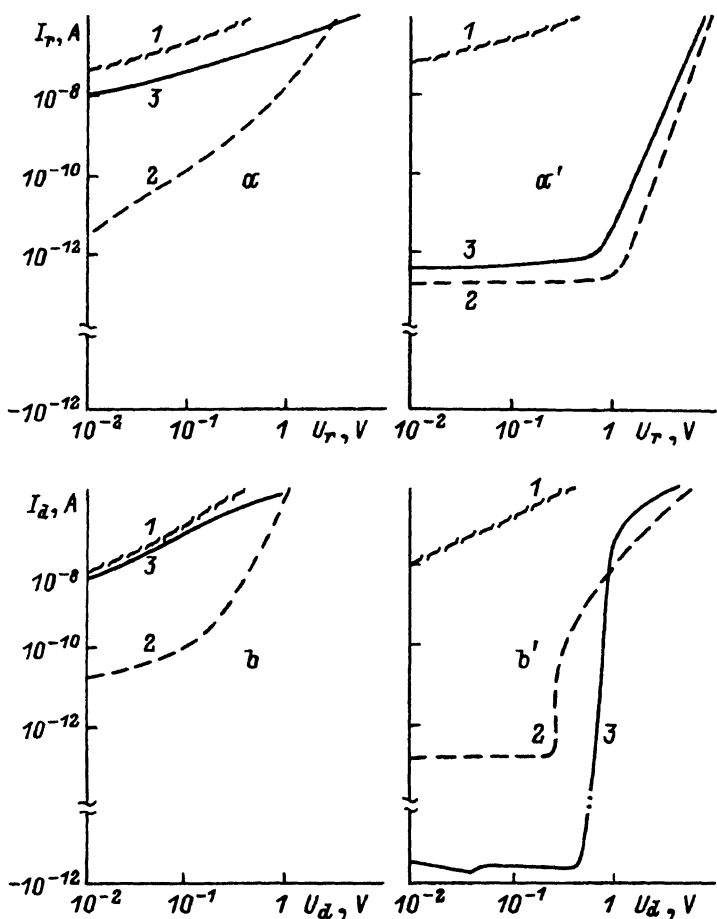


Рис. 3. Обратные (a, a') и прямые (b, b') ветви вольт-амперных характеристик p^+ - n -переходов, содержащих сильнолегированную p^+ -квантовую яму, при $T = 300$ (a, b) и $T = 77$ К (a', b').

Температура диффузии бора ($^{\circ}\text{C}$): 1 — 1100, 2 — 900, 3 — 800.

ной зависимостью термоэдс (рис. 2, a'), а также симметрией прямой и обратной ветвей ВАХ при $T = 300$ (кривые 1 на рис. 3, a, b) и 77 К (кривые 1 на рис. 3, a', b').

В противоположность образцу с относительно глубоким p^+ - n -переходом (рис. 2, a, a') удельное сопротивление p^+ -квантовой ямы, полученной при температуре диффузии 800°C , возрастает при уменьшении температуры (рис. 2, c). Формальная обработка полученных зависимостей $\log(\rho)$ от $1/T$ в пренебрежении квазидвумерностью p^+ -области дает очень маленькие энергии активации: 3 meV при $T > 50\text{ K}$ и 0.3 meV при $T < 50\text{ K}$. Для того чтобы определить, связана ли малая величина энергии активации проводимости с термически активированными перескоками или с возникновением энергетической щели (вставка на рис. 1), целесообразно использовать температурную зависимость термоэдс [2]. В первом случае коэффициент Зеебека $|\alpha|$ всегда будет

возрастает с температурой [2], как и в $p^+ - n$ -переходе с вырожденным газом квазидвумерных дырок (рис. 2, a'). Если же имеется энергетическая щель (рис. 1, b), то $|\alpha|$ уменьшается с ростом температуры [2]

$$|\alpha| = \frac{k}{e} \left(\frac{\Delta E}{kT} + \text{const} \right), \quad (1)$$

где ΔE — величина энергетической щели. Именно подобная зависимость была обнаружена при исследовании термоэдс p^+ -квантовой ямы, полученной в кремнии n -типа при температуре диффузии 800°C (рис. 2, c'). Причем величина аномально широкой энергетической щели ($\Delta E = 0.26 \text{ eV}$), определенная в интервале температур $70 \div 90 \text{ K}$, на два порядка превышает значения энергии активации, полученные из зависимости $\log(\rho)$ от $1/T$ в трехмерном приближении. Поэтому при расчете энергий активации проводимости p^+ -квантовых ям необходимо пользоваться формулами, учитывающими двумерные поправки [1].¹ Знак обнаруженной гигантской термоэдс соответствует при низких температурах электронной составляющей проводимости, тогда как при $T > 112 \text{ K}$ основной вклад в термоэдс вносят термически возбужденные дырки. Такая смена знака термоэдс p^+ -квантовой ямы указывает на диэлектрические свойства вырожденного квазидвумерного дырочного газа. Величина энергетической щели в плотности состояний вырожденной дырочной зоны может быть обусловлена сильными зарядовыми корреляциями, возникающими в p^+ -квантовой яме при сверхвысокой концентрации бора. При этом повышается вероятность формирования глубокого состояния малого радиуса для локализованной дырки, что сопровождается реконструкцией мелкого акцептора вдоль кристаллографической оси $\langle 111 \rangle$ с образованием глубокого донора C_{3v} -симметрии, состоящего из нейтрального бора и кремниевой оборванной связи. Предлагаемый механизм трансформации мелкого акцептора в глубокий донор в p^+ -квантовой яме является ответственным за возникновение диэлектрической щели в плотности состояний квазидвумерных дырок и позволяет объяснить доминирование электронной составляющей проводимости в термоэдс при низких температурах (рис. 2, c'). Величина щели в этом случае фиксируется позицией глубокого уровня кремниевой оборванной связи (вставка на рис. 1) [6] и может быть определена из порогового значения напряжения в ВАХ ступенчатой формы (кривые 3 на рис. 3). Наиболее ярко энергетическая щель проявляется в ВАХ при $T = 77 \text{ K}$ (рис. 3, a', b'), что находит отражение в пороговом характере как прямой, так и обратной ветви. Впервые зарегистрированный эффект изменения знака прямой ветви темновой ВАХ, по-видимому, обусловлен туннелированием остаточных делокализованных электронов из p^+ -квантовой ямы вследствие дисперсии величины энергетической щели, что подтверждается совпадением значений прямого и обратного токов при напряжениях ниже порогового (см. кривые 3 на рис. 3, a', b'). Дополнительным аргументом

¹ Квазидвумерность энергетического спектра дырок и электронов в $p^+ - n$ - и $n^+ - p$ -переходах, полученных при 800 и 900°C , демонстрируется в исследованиях угловых зависимостей циклотронного резонанса [5], которые показывают, что p^+ - и n^+ -области состоят из сильнолегированных квантовых ям, ориентированных как параллельно (kick-out-механизм диффузии), так и перпендикулярно (диссоциативный вакансионный механизм диффузии) плоскости $p - n$ -перехода.

пользу предложенной модели является хорошее согласие значений ΔE , определенных на основании порогового значения ВАХ (кривая 3 на рис. 3, b'), и приведенной выше температурной зависимости коэффициента Зеебека (рис. 2, c').

В случае подавления андерсоновской локализации, что соответствует слабой флуктуации величины энергетической щели в плотности состояний дырок в узкой p^+ -квантовой яме (кривая 2 на рис. 1), реконструкция мелкого акцептора вдоль кристаллографической оси [111] является в достаточной степени эластичной и не сопровождается образованием кремниевой оборванной связи. Возникновение энергетической щели в таких условиях не приводит к исчезновению металлических свойств вырожденного квазидвумерного дырочного газа. В этой концепции можно объяснить поведение электрофизических характеристик p^+ -квантовой ямы, полученной при температуре диффузии 900°C (рис. 2, b). Видно, что удельное сопротивление уменьшается с понижением температуры, но показатель степени $\beta = 1.1$ заметно ниже, чем для металлической проводимости вырожденного дырочного газа. При $T < 40\text{ K}$ наблюдаются воспроизводимые мезоскопические флуктуации сопротивления образца, амплитуда которых становится меньше при увеличении тока. Данный факт в совокупности с соответствующими ВАХ (кривые 2 на рис. 3) и температурной зависимостью термоэдс (рис. 2, b'), характерной для высокотемпературных сверхпроводников [7], свидетельствует о том, что отдельные участки p^+ -квантовой ямы обладают высокой проводимостью, несмотря на наличие щели в плотности состояний квазидвумерных дырок. Следует отметить, что обсуждаемая модель образования сильных зарядовых корреляций в p^+ -квантовой яме представляет собой одну из версий двумерного экситонного диэлектрика [1], который в случае подавления андерсоновской локализации квазидвумерных носителей, приводящей к флуктуации величины энергетической щели, может перейти в режим сверхпроводника второго рода [1].

Таким образом, в сильнолегированных кремниевых квантовых ямах впервые обнаружена энергетическая щель в плотности состояний вырожденного дырочного газа, который в зависимости от типа зарядовых корреляций может проявлять как диэлектрические, так и металлические свойства.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Международного научного фонда (ISF) (грант № NIX000).

Список литературы

- [1] Tosatti E., Anderson P.W. Solid State Commun. 14, 773 (1974).
- [2] Мотт Н.Ф. Переходы металл-изолятор. М. (1979). С. 61. (N.F.Mott, Metal-Insulator Transitions. London 1974).
- [3] Bagraev N.T., Klyachkin L.E., Sukhanov V.L. Defect and Diffusion Forum 103-105, 201 (1993).
- [4] Баграев Н.Т., Клячкин Л.Е., Чайкина Е.И. Письма в ЖЭТФ. 58, 620 (1993).
- [5] Gehlnoff W., Bagraev N., Klyachkin L. Deutsche Physikalische Gesellschaft E.V. Vortragsanmeldung fur die Tagung. Abstracts. Berlin (1995). P. 178.
- [6] Kveder V.V. Defect and Diffusion Forum 103-105, 461 (1993).
- [7] Kaidanov V.L. Defect and Diffusion Forum 103-105, 387 (1993).