

# Пространственное разделение электронов в гетероструктурах Ge/Si(001) с квантовыми точками

А. И. Якимов<sup>1)</sup>, А. В. Двуреченский, А. И. Никифоров

Институт физики полупроводников Сибирского отд. РАН, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 10 апреля 2001 г.

Экспериментально показано, что возбуждение межзонных оптических переходов в массивах квантовых точек Ge/*n*-Si(001) приводит к уменьшению концентрации электронов в зоне проводимости. Обнаруженное явление обусловлено формированием отрицательно заряженных экситонных комплексов в островках Ge и является первым экспериментальным подтверждением пространственного разделения электронов в окружающей островки кремниевой матрице.

PACS: 73.20.Mf, 73.50.Pz

Один из перспективных методов создания ансамблей квантовых точек (КТ) основан на использовании кинетических эффектов в морфологических изменениях на поверхности полупроводников в процессе гетероэпитаксии. При больших рассогласованиях постоянной решетки рост полупроводниковых слоев происходит по механизму Странского–Крастанова. Для системы Ge/Si(001) рост германиевой пленки осуществляется вначале послойно до толщины 4–5 монослоев, а затем происходит переход к трехмерному росту пирамидальных нанокластеров Ge (квантовых точек), обеспечивающих частичную релаксацию упругих напряжений в гетероэпитаксиальной структуре [1].

Структуры Ge/Si с квантовыми точками Ge относятся к гетеропереходам 2-го типа, в которых электроны и дырки находятся в потенциальных ямах, расположенных по разные стороны от гетерограницы (рис.1), формируя пространственно не прямые экситоны. Такая необычная электронная конфигурация открывает новые возможности как в фундаментальных исследованиях, так и для приборных применений [2]. Зона проводимости одного из материалов (Si) здесь близка к валентной зоне другого (Ge), что вызывает пространственное разделение носителей. В данном случае дырки локализируются в нанокластерах Ge, тогда как для электронов в Ge имеется потенциальный барьер. Однако локализация дырок в Ge приводит к изменению хода потенциала в окружающей кремниевой матрице. Следствием такого изменения является возможность образования потенциальной ямы вокруг островков Ge для электронов и формирование в этой яме связанных электронных

состояний [3]. Проведенное в работах [3, 4] моделирование электронной структуры экситонных комплексов предсказывает, что при последовательном добавлении экситонов в пирамидальные нанокластеры Ge в Si(001) дырки сосредотачиваются в Ge вблизи основания пирамиды, а электроны поочередно локализируются в Si то в окрестности вершины пирамиды Ge, то вблизи границы между Si и сплошным слоем Ge (рис.1b). И хотя физическая причина пространственного разделения электронов в кремнии была понятна (это позволяет минимизировать кулоновское расталкивание электронов), экспериментального доказательства такой необычной электронной конфигурации получено не было.

В настоящей работе наличие пространственного разделения электронов, представленного на рис.1, получило свое подтверждение на опыте. Идея эксперимента заключалась в следующем. Известно, что положение химического потенциала в примесной зоне легированных полупроводников в случае слабой компенсации определяется концентрацией так называемых 0- и 2-комплексов [5]. Если около заданного акцептора нет ни одного ионизованного донора, то такой объект называется 0-комплексом. Если по *разные стороны* от акцептора расположены два ионизованных донора, то это 2-комплекс. Шкловским и Эфросом [5] было показано, что образование 2-комплексов энергетически выгодно, то есть отрицательно заряженный акцептор способен удержать по разные стороны от себя два положительно заряженных донора. Это утверждение можно перенести и на случай заряженного экситонного комплекса, состоящего из дырки в островке Ge и двух электронов, находящихся над и под пирамидой. Расчеты в приближении самосогласованного поля, приведенные в работе [6], по-

<sup>1)</sup>e-mail: yakimov@isp.nsc.ru

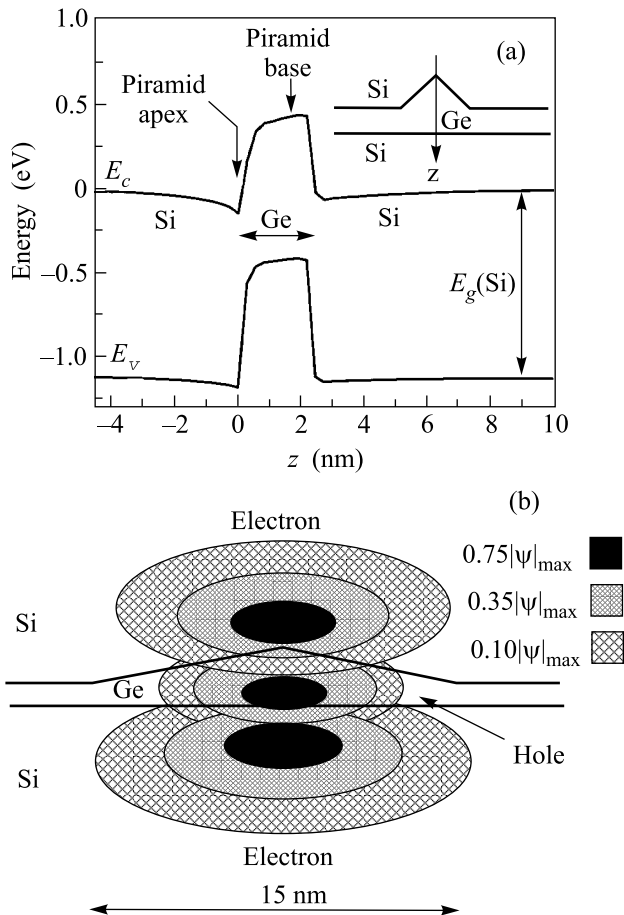


Рис.1. Расчетный профиль зон проводимости и валентной вдоль оси  $z$ , проходящей через вершину пирамиды Ge [4] (a). Расчетная структура волновых функций двух электронов и дырки, локализованных в окрестности пирамиды Ge [3] (b); градации серого соответствуют областям, на границе которых волновые функции спадают до уровня 75%, 35% и 10%. Пирамида находится на подстилающем сплошном слое Ge и окружена со всех сторон кремнием (см. вставку к рисунку (a)). Основание пирамиды имеет размеры  $15 \times 15$  нм. Расчет проводился с учетом неоднородного распределения упругих деформаций в гетеросистеме в приближении Хартри [3]

казали, что при наличии пространственного разделения электронов вблизи КТ Ge, содержащей  $N < 4$  дырок, могут удерживаться  $N + 1$  электронов, формируя искусственный “ион”<sup>2)</sup>. Рассмотрим кремний

<sup>2)</sup> На самом деле в [6] не был учтен фактор долинного вырождения в Si. Учет этого фактора приводит к тому, что “избыточный” электрон может удерживаться при  $N < 8$ .

$n$ -типа, содержащий нанокластеры Ge. При межзонной подсветке электроны и дырки возбуждаются парами, дырка захватывается в островок Ge, а электрон занимает низшее по энергии связанное состояние в зоне проводимости Si вблизи вершины германиевой пирамиды. Поскольку одна дырка способна удерживать возле КТ два электрона, то в условиях освещения произойдет захват равновесного электрона в потенциальную яму, находящуюся под островком, и концентрация электронов в Si понизится. Отметим, что обычно концентрация свободных носителей возрастает при освещении. Поэтому, измерив в эксперименте изменение концентрации свободных электронов в условиях межзонной подсветки, можно сделать вывод о существовании электронной конфигурации, показанной на рис.1. Ранее косвенные аргументы о фотоиндуцированной локализации равновесных электронов в потенциале неравновесных дырок высказывались в работе [6].

Для проверки выдвинутых представлений нами исследовались эпитаксиальные структуры Ge/Si, выращенные на подложке Si(001) с концентрацией фосфора  $N_s \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Образцы состояли из десяти слоев островков Ge, разделенных прослойками Si толщиной 30 нм. Концентрация доноров (Sb) в эпитаксиальном слое Si составляла  $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Нанокластеры Ge имели форму пирамид со средними размерами основания 15 нм и высотой 1.5 нм. Слоевая плотность нанокластеров в каждом из слоев  $\approx 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . В качестве источника света использовался GaAs-светодиод, максимум излучения которого находился на длине волны  $\sim 0.9 \text{ мкм}$ . Интенсивность излучения светодиода модулировалась с частотой 2 кГц. Фотопроводимость (ФП) и коэффициент Холла измерялись по методу Ван дер Пау на частоте модуляции с использованием фазочувствительного нановольтметра, что позволяло фиксировать малые изменения сопротивления и холловской эдс при освещении структур. Для исключения засветки контактов, которая может приводить к ложной ФП [7], сами контакты и приконтактная область защищались непрозрачным покрытием.

На рис.2 приведены экспериментальные зависимости относительной ФП  $\Delta G/G$ , относительного изменения концентрации электронов  $\Delta n/n$  и холловской подвижности  $\Delta \mu/\mu$  от мощности освещения  $P$  при  $T = 77 \text{ К}$ . В соответствии с высказанными выше представлениями, в области  $P = 0-100 \text{ мВт/см}^2$  действительно наблюдается уменьшение концентрации электронов при освещении, которое сопровождается появлением отрицательной фотопроводимости. Подвижность практически не меняется при  $P <$

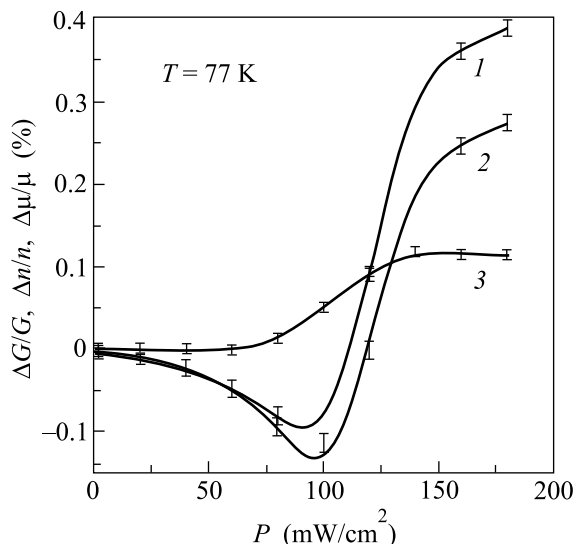


Рис.2. Зависимость относительной фотопроводимости (1), относительного изменения концентрации электронов в зоне проводимости кремния (2) и холловской подвижности (3) от интенсивности межзонной подсветки

70 мВт/см<sup>2</sup> и слабо увеличивается при более интенсивном освещении. Рост подвижности, по-видимому, связан с тем, что с увеличением числа дырок в КТ положительно заряженное ядро не может удерживать “лишний” электрон, вследствие чего рассеяние на “ионах” ( $N$  дырок +  $(N + 1)$  электронов) сме-

няется более слабым рассеянием на диполях ( $N$  дырок +  $N$  электронов). Ослаблением энергии связи “лишнего” электрона в поле  $N$  дырок при больших  $N$  можно объяснить и смену знака  $\Delta n$  и  $\Delta G$  при  $P > 100$  мВт/см<sup>2</sup>.

Таким образом, при освещении светом, вызывающим межзонные переходы, обнаружено уменьшение концентрации электронов в зоне проводимости гетероструктур Ge/Si(001) с квантовыми точками германия. Причиной такого поведения является формирование отрицательно заряженных “ионов”, возможность которого обусловлена пространственным разделением электронов на гетерограницах Si/Ge.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 00-02-17885).

1. О. П. Пчеляков, Ю. Б. Болховитянов, А. В. Двуреченский и др., ФТП **34**, 1281 (2000).
2. Ж. И. Алферов, ФТП **32**, 3 (1998).
3. А. И. Yakimov, N. P. Stepina, A. V. Dvurechenskii et al., Phys. Rev. **B63**, 45312 (2001).
4. А. И. Yakimov, N. P. Stepina, A. V. Dvurechenskii et al., Semicond. Sci. Technol. **15**, 1125 (2000).
5. Б. И. Шкловский, А. Л. Эфрос, *Электронные свойства легированных полупроводников*, М.: Наука, 1979.
6. А. И. Yakimov, A. V. Dvurechenskii, A. I. Nikiforov et al., Phys. Rev. **B62**, R16283 (2000).
7. В. Г. Кустов, ФТП **10**, 2215 (1976).