Письма в ЖЭТФ, том , вып. , стр. -

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

А.И.Якимов[1)], *А.В.Двуреченский*, *А.И.Никифоров*

Поступила в редакцию April 8, 2001

Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН
630090 Новосибирск, Россия

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 непрямые 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 локализуются 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 изменение является возможность образования потенциальной ямы вокруг островков Ge для электронов и формирование в этой яме связанных электроннных состояний [3]. Проведенное в работах [3, 4] моделирование электронной структуры экситонных комплексов обнаружило, что в напряженных гетероструктурах Ge/Si(001), содержащих пирамидальные нанокластеры Ge, основное состояние дырок сосредоточено в Ge вблизи основания пирамиды, а электроны локализованы в Si в окрестности вершины пирамиды Ge и вблизи границы между Si и сплошным слоем Ge (рис.1б). И хотя физическая причина пространственного разделения электронов в

[1)] e-mail: yakimov@isp.nsc.ru

В содержании:
А.И.Якимов, А.В.Двуреченский, А.И.Никифоров
Пространственное разделение электронов в гетероструктурах Ge/Si(001) с квантовыми точками 1

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, впервые получило свое подтверждение на опыте. Идея эксперимента заключалась в следующем. Известно, что положение химпотенциала 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, т.е. отрицательно заряженный акцептор способен удержать возле себя (например, сверху и внизу) по одному положительно заряженному донору. Это утверждение можно перенести и на случай заряженного экситонного комплекса, состоящего из дырки в островке Ge и двух электронов, находящихся над и под островком. Расчеты в приближении самосогласованного поля, приведенные в работе [6], показали, что при наличии пространственного разделения электронов вблизи КТ Ge, содержащей $N < 4$ дырок, могут удерживаться $N + 1$ электронов, формируя искусственный "ион".[2)] Рассмотрим кремний n-типа, содержащий нанокластеры Ge. При межзонной подсветке электроны и дырки возбуждаются парами, дырка захватывется 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 величину $3 \times 10^{16}\,\text{см}^{-3}$. Нанокластеры Ge имели форму пирамид со средними размерами основания 15 нм и высотой 1.5 нм. Слоевая плотность нанокластеров в каждом из слоев $\approx 3 \times 10^{11}\,\text{см}^{-2}$. В качестве источника света использовался GaAs-светодиод, максимум излучения которого находился на длине волны ~ 0.9 мкм. Интенсивность излучения светодиода модулировалась с частотой 2 кГц. Фотопроводимость (ФП) и коэффициент Холла измерялась 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

[2)] 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 $N < 8$.

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 температуре $T = 77\,\mathrm{K}$. В соответствии с высказанными выше представлениями в области $P = 0$–$100\,\mathrm{мВт/см^2}$ действительно наблюдается уменьшение концентрации электронов при освещении, которое сопровождается появлением отрицательной фотопроводимости. Подвижность практически не меняется при $P < 70\,\mathrm{мВт/см^2}$ 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" $\langle N$ дырок $+ (N+1)$ электронов$\rangle$ сменяется более слабым рассеянием на диполях $\langle N$ дырок $+ N$ электронов$\rangle$. Ослаблением энергии связи "лишнего" электрона в поле N дырок при больших N можно объяснить и смену знака Δn и ΔG при $P > 100\,\mathrm{мВт/см^2}$.

Таким образом, при освещении светом, вызывающем 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 Ж. И., ФТП, **32**, 3 (1998).
3. A.I.Yakimov, N.P.Stepina, A.V.Dvurechenskii et al., Phys. Rev. **B63**, 45312 (2001).
4. A.I.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. A.I.Yakimov, A.V.Dvurechenskii, A.I.Nikiforov et al., Phys. Rev. **B62**, R16283 (2000).
7. В.Г.Кустов, ФТП **10**, 2215 (1976).

Рис. 1. Расчетный профиль зон проводимости и валентной вдоль оси z, проходящей через вершину пирамиды Ge [4] (а). Расчетная структура волновых функций двух электронов и дырки, локализованных в окрестности пирамиды Ge [3] (б); 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. вставке к рисунку (а)). Основание пирамиды имеет размеры $15 \times 15\,\text{нм}^2$. Расчет проводился с учетом неоднородного распределения упругих деформаций в гетеросистеме в приближении Хартри [3].

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