

ПРОДОЛЬНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ГЕТЕРОСТРУКТУР Ge/Si С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ

А.И.Якимов¹⁾, В.А.Марков, А.В.Двуреченский, О.П.Пчеляков

*Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН
630090 Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 1 февраля 1996 г.

Исследована проводимость вдоль островкового слоя квантовых точек Ge, захороненного в кремнии. Размеры островков варьировались в диапазоне $D \approx 12 - 19$ нм. Обнаружено, что перенос заряда характеризуется двумя энергиями активации. Первая связана с термоэмиссией дырок из квантовых ям Ge в валентную зону Si. Вторая обусловлена туннелированием дырок между островками в условиях кулоновской блокады и определяется электростатической энергией зарядки квантовой точки.

PACS: 73.40.-c

Явление кулоновской блокады обычно изучают в вертикальных туннельных структурах, состоящих из проводящих частиц малых размеров, окруженных прослойкой диэлектрика ("кулоновские острова"). Известно, что в трехмерных гранулированных системах эффекты электростатической зарядки металлических гранул электронами играют определяющую роль и в продольной проводимости [1,2]. Система, представляющая собой островки германия, диспергированные в кремнии, является полупроводниковым аналогом гранулированных систем. Отличием служит лишь двумерный характер расположения островков и возможность размерного квантования электронного спектра в них. Поэтому выявлять корреляции в движении электронов, обусловленных их кулоновским взаимодействием, в таком объекте можно и в измерениях проводимости вдоль островкового слоя.

Для управляемого выращивания структур с островками германия в слое кремния использовалась установка молекулярно-лучевой эпитаксии типа "Катунь". Контроль процесса формирования островковых структур при росте по механизму Странского-Крастанова в режиме двумерно-слоевого роста проводился путем регистрации и анализа осцилляций интенсивности дифрагированного пучка быстрых электронов [3]. Изучение методом обратного резерфордовского рассеяния/каналирования атомного строения таких структур с островками, закрытыми слоем кремния, показали, что островковый слой расположен внутри пленки кремния и оттеснения (сегрегации Ge) к ее поверхности не происходит.

Исследования резонансного туннелирования в поперечной геометрии гетероструктур Si/Ge/Si с островковой пленкой германия и туннельно прозрачными слоями кремния [4] показали, что особенности вольт-амперных характеристик связаны с суперпозицией поперечного квантования дырочного спектра в островках Ge и эффектом кулоновской лестницы.

Как известно, формирование островковой пленки Ge на кремнии в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии после достижения слоя Ge критической

¹⁾e-mail: yakimov@isph.nsk.su

толщины ~ 1 нм является результатом самоорганизации гетеросистемы с целью снятия возникающих напряжений [3,5,6]. Островки имеют вид усеченных пирамид высотой d и шириной D , величины которых зависят от температуры роста T_s . Поскольку $d \ll D$ [4], то расстояние между уровнями продольного квантования ΔE_D должно быть существенно меньше такового в поперечном направлении ΔE_d . Действительно, взяв для $T_s = 300^\circ\text{C}$, $D = 12$ нм, $d = 3$ нм [4], получаем $\Delta E_D \approx \hbar^2/mD^2 = 1.3$ мэВ и $\Delta E_d \approx \hbar^2/md^2 = 20$ мэВ. Это обстоятельство позволяет минимизировать влияние размерного квантования на продольную проводимость островковой пленки (в отличие от поперечной геометрии) и, следовательно, увеличить вклад кулоновских корреляций в формирование процесса транспорта.

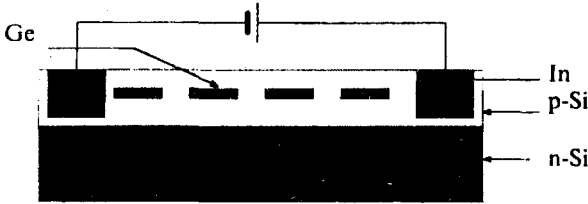


Рис.1. Схема исследуемой структуры

Поперечный разрез структуры, используемой для измерений продольной проводимости, приведен на рис.1. Эпитаксиальные слои Si и Ge p -типа выращивались на подложке КЭФ-7.5 с ориентацией (100). Концентрация дырок в кремнии составляла величину порядка 10^{15} см $^{-3}$, в германии – 10^{19} см $^{-3}$. Наличие p – n -перехода необходимо для отсечки влияния подложки на транспортные свойства. Суммарная толщина эпитаксиального Si имела величину 180 нм, расстояние от подложки до пленки германия – 150 нм. Область пространственного заряда, обусловленная наличием p – n -перехода, простиралась на всю толщину слоя p -Si, так что он был полностью обеднен носителями и не вносил вклада в проводимость. Пленка Ge толщиной 1.6 нм выращивалась при температурах $T_s = 300, 350$ и 400°C . При этом размеры островков варьировались в диапазоне 12–19 нм [4]. Формирование электрических контактов осуществлялось напылением In в протравленные на глубину 100 нм канавы. Измерения проводились четырехзондовым методом с выносными потенциальными контактами на постоянном токе.

Температурная зависимость слоевой проводимости G_{\square} структур с различными размерами островков германия (различная температура роста) приведена на рис.2. В области температур 300–27 К величина G_{\square} изменяется на 4–6 порядков, что демонстрирует активационный характер транспорта. Видно, что в окрестности температуры $T \approx 100$ К происходит смена энергии активации. Поэтому анализ экспериментальных данных проводился с учетом двух параллельных активационных процессов с энергиями E_1 и E_2 :

$$G_{\square} = G_1 \exp(-E_1/kT) + G_2 \exp(-E_2/kT). \quad (1)$$

Результаты подгонки экспериментальных зависимостей формулой (1) показаны на рис.2 сплошными линиями, подгоночные параметры представлены в таблице.

$T_s, ^\circ\text{C}$	$D, \text{нм}$	$G_1, \text{Ом}^{-1}$	$E_1, \text{мэВ}$	$G_2, \text{Ом}^{-1}$	$E_2, \text{мэВ}$	$E_2^{\text{cal}}, \text{мэВ}$
300	12	0.22 ± 0.04	172 ± 12	$(2.8 \pm 0.9) \cdot 10^{-5}$	15.7 ± 0.8	16.4
350	15	0.76 ± 0.15	228 ± 14	$(5.1 \pm 1.4) \cdot 10^{-6}$	13.1 ± 0.8	12.8
400	19	0.05 ± 0.01	250 ± 15	$(3.0 \pm 0.9) \cdot 10^{-11}$	10.0 ± 1.0	10.5

Из таблицы видно, что с увеличением размера островков энергия E_1 увеличивается, а E_2 уменьшается, причем $E_1 \gg E_2 \gg \Delta E_D$. Глубина квантовой ямы (разрыв валентной зоны на срелаксировавшей гетерогранице Ge/Si) имеет величину около 300 мэВ [7]. Поэтому энергию активации $E_1 = 172 - 250$ мэВ естественно связать с глубиной залегания уровня в яме, а процесс проводимости – с тепловой эмиссией дырок из ямы в валентную зону (рис.3). С уменьшением размера ямы уровень дырки "сдавливается" в валентную зону делокализованных состояний, и величина E_1 уменьшается.

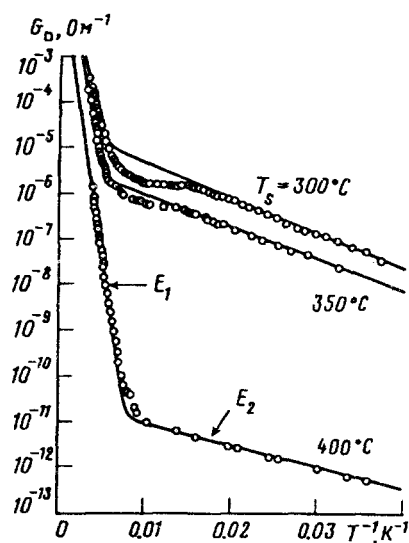


Рис.2. Температурная зависимость проводимости островковых пленок германия, выращенных при различных температурах T_s .

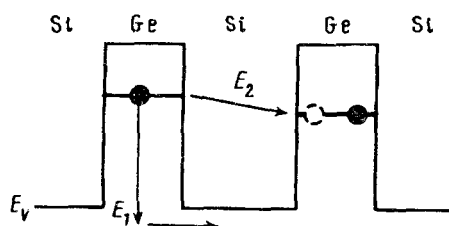


Рис.3. Структура валентной зоны и транспорт дырок с различными энергиями активации вдоль островковой пленки германия, захороненной в кремнии

Низкотемпературную энергию активации E_2 мы связываем с энергией, необходимой для того, чтобы поместить добавочную дырку на нейтральный островок в процессе туннелирования дырок между островками. Такой механизм проводимости является аналогом прыжкового механизма проводимости по нейтральным акцепторам в верхней зоне Хаббарда [8]. Энергия активации в этом случае определяется кулоновским отталкиванием добавочной дырки зарядами, находящимися на островке. Для случая многоэлектронной системы ее можно оценить как

$$E_2^{\text{cal}} = e^2/2C, \quad (2)$$

где C – электрическая емкость островка. Примем, что островок имеет форму диска диаметром D и высотой d . Тогда, если $D \gg d$, то

$$C \approx 8\epsilon\epsilon_0 D. \quad (3)$$

В таблице представлены результаты расчета величины E_2 (E_2^{cal}) с помощью соотношений (2) и (3). Как видно, они хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена в рамках проекта 129/57/2 ГНТП "Перспективные технологии и устройства микро- и нанoeлектроники".

-
1. B.Abeles, P.Sheng, M.D.Coutts, and Y.Arie, *Adv. Phys.* **24**, 407 (1975).
 2. C.J.Adkins, *J. Phys. C: Solid State Phys.* **15**, 7143 (1982).
 3. O.P.Pchelyakov, V.A.Markov, and L.V.Sokolov, *Brazilian Journal of Physics* **24**, 77 (1994).
 4. A.I.Yakimov, V.A.Markov, A.V.Dvurechenskii, and O.P.Pchelyakov, *J. Phys.: Condens. Matter* **6**, 2573 (1994).
 5. A.G.Cullis and G.R.Booker, *J.Cryst. Growth* **9**, 132 (1971).
 6. D.J.Eaglesham and M.Cerullo, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 1943 (1990).
 7. Lifeng Liu, G.S.Lee, and A.H.Marshak, *Solid State Electronics* **37**, 421 (1994).
 8. Б.И.Шкловский, А.Л.Эфрос, *Электронные свойства легированных полупроводников*, М.: Наука, 1979.