

УДК 538.9

ВЫРАЩИВАНИЕ КВАНТОВЫХ ЯМ $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ ($x < 0.1$) С МОДУЛЯЦИЕЙ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПОТОКА Ge.

I. МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВАЯ ЭПИТАКСИЯ

И. П. Казаков¹, А. В. Клековкин^{1,2}, В. А. Цветков¹,
М. А. Акмаев¹, О. В. Уваров³

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии выращены одиночные квантовые ямы в системе $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ с $x < 0.1$ в режиме периодического перекрытия молекулярного потока Ge при формировании слоя твёрдого раствора. Это позволило увеличить рабочий ток электронной пушки источника, что обеспечило более стабильный молекулярный поток Ge. Полученные гетероструктуры исследованы методами просвечивающей растровой электронной микроскопии.

Ключевые слова: гетероструктуры $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$, молекулярно-пучковая эпитаксия, квантовые ямы, просвечивающая растровая электронная микроскопия.

Введение. Классическими материалами для исследования конденсации экситонов и свойств электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ) являются Ge и Si. Благодаря многодолинности зон проводимости, и, как следствие, уменьшению энергии Ферми электронов при заданной их плотности из-за высокой степени вырождения электронных состояний, ЭДЖ в этих полупроводниках обладает большой энергией связи ($0.5Ry \sim 6.8$ эВ).

Вместе с тем, положение потолка валентной зоны в k -пространстве отвечает центру зоны Бриллюэна. Поэтому межзонные переходы не прямые, и время рекомбинации неравновесных электронов и дырок на несколько порядков величины превышает время их энергетической релаксации в соответствующих зонах. В результате в Si и Ge может устанавливаться тепловое равновесие между неравновесной электронно-дырочной системой и кристаллической решеткой, и конденсация экситонов будет протекать в условиях, близких к равновесным.

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: aklekovkinbox@gmail.com.

² ИСВЧПЭ РАН, 117105 Россия, Москва, Нагорный проезд, 7, стр. 5.

³ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38.

При относительно малом содержании Ge ($x < 0.1$) гетероструктуры Si/Si_{1-x}Ge_x/Si относятся ко II роду, т.к. квантовая яма (КЯ) представляет собой достаточно глубокую потенциальную яму для дырок и невысокий потенциальный барьер для электронов, находящихся в Si барьерах. Например, при значениях $x = 0.05$ разрыв зоны проводимости ΔE_c составляет 5 мэВ, а валентной зоны $\Delta E_v = 40$ мэВ [10, 11]. В зависимости от толщины SiGe-слоя и высоты барьера (высота определяется содержанием Ge в слое твердого раствора) в таких структурах могут наблюдаться как пространственно-прямая, где электроны и дырки расположены в КЯ, так и диполярная ЭДЖ с пространственно разделенными электронами и дырками, более характерная для случая мощного фотозвозбуждения.

При малых значениях x зонная структура твердого раствора Si_{1-x}Ge_x такая же, как у Si: зона проводимости имеет шесть эквивалентных минимумов энергии, а максимум валентной зоны двукратно вырожден (конфигурация зон Si (6.2) [9]). Из-за внутренних напряжений в псевдоморфном слое Si_{1-x}Ge_x, выращенном на ненапряженной подложке Si (100), шестикратное (без учета спина) вырождение дна зоны проводимости снято: два минимума расположены выше, а четыре, являющиеся дном зоны в напряженном SiGe-слое, ниже по энергии [10, 12]. Оценка величины междолинного расщепления с использованием данных этих работ показывает, что она существенно превышает энергию Ферми электронов в ЭДЖ, полученную из обработки формы линии ее излучения. Таким образом, в напряженном SiGe-слое электроны заселяют только четыре нижних минимума зоны проводимости. Пространственные ограничения усиливают эффекты межчастичных взаимодействий, а также дают возможность управлять электронным спектром посредством изменения дизайна наноструктур [1, 2].

Получение КЯ Si/Si_{1-x}Ge_x/Si с $x < 0.1$ в установках молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) затруднено из-за нестабильной работы электронной пушки молекулярного источника Ge при низких значениях тока электронного пучка. Для решения этой проблемы часто используют дополнительный эффузионный источник Ge [13], что не всегда возможно.

В настоящей работе слой твердого раствора Si_{1-x}Ge_x КЯ выращивался в режиме модуляции (периодического перекрытия) молекулярного потока (МП) Ge при постоянном МП Si, что давало возможность увеличить ток электронной пушки молекулярного источника (МИ) и добиться более стабильного во времени МП Ge. Данный метод применялся, например, в работах [3–5], для выращивания Si/Ge квазипрямозонных материалов с высоким содержанием Ge ($x > 0.4$).

Структура полученных образцов исследована методом просвечивающей растровой электронной микроскопии (ПРЭМ).

Методика эксперимента. Исследуемые образцы были изготовлены на установке МПЭ Siva 21 (Riber). Для контроля МП был использован масс-спектрометр Hiden RC RGA Analyser, установленный в ростовой камере в положении “прямой видимости” поверхностей мишеней Si и Ge. Отметим, что данный масс-спектрометр позволял получать мгновенные значения эффективного давления МП. По данным масс-спектрометрии была проведена оценка стабильности работы электронных пушек МИ Ge и Si. Было установлено, что при значении тока электронного пучка источника Ge 110 мА, необходимом для получения твердых растворов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с величиной $x = 0.05$, колебания МП составили $\sim 15\%$ (рис. 1 (кривая I)), а при значении 132 мА – только $\sim 10\%$ (рис. 1 (кривая II)). При этом колебания МП для источника Si составили $\sim 6\%$ (рис. 1 (кривая III)). Таким образом, увеличив ток электронной пушки, можно снизить колебания МП Ge, а более низкие усреднённые по времени значения МП получить за счёт периодического перекрывания его заслонкой.

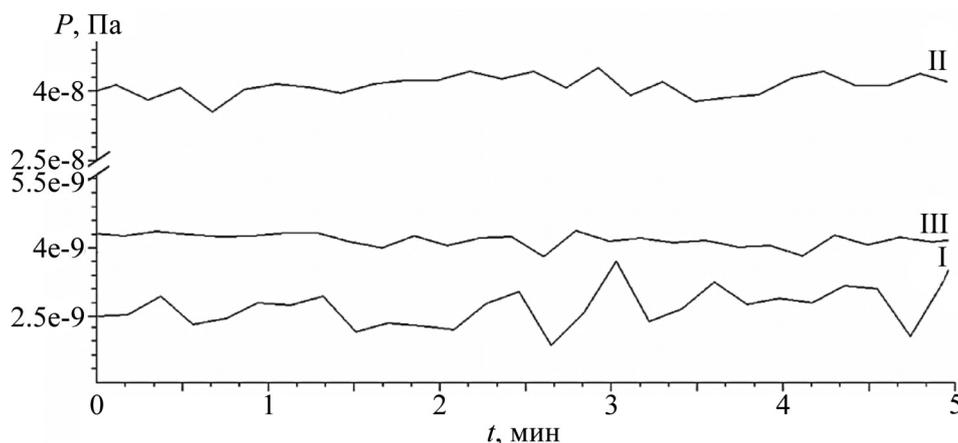


Рис. 1: Эффективные давления МП Ge (I, II) и Si (III) по данным масс-спектрометрии при различных значениях тока электронного пучка: I – 110 мА, II – 132 мА, III – 153 мА.

Гетероструктуры состояли из буферного слоя Si, КЯ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и защитного слоя Si. Подготовка использованных в работе подложек Si (100) описана в работе [6]. Толщины буферного и защитного слоев были равны 100 нм. Приведённые значения концентрации x в слоях твёрдого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ в образцах, выращенных с модуляцией МП Ge (табл. 1), соответствовали усреднённому содержанию Ge в КЯ и предполагае-

мой, согласно программе работы заслонки МИ Ge (рис. 2), последовательности слоёв $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y/\text{Si}/\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y/\dots$ в этой КЯ, эффективные толщины d_{SiGe} и d_{Si} которых были рассчитаны на основе предварительных калибровок скорости роста на образцах Si и Ge с толщиной слоёв 0.3 мкм. Как видно из табл. 1, в различных образцах значение d_{SiGe} варьировалось в диапазоне 0.14–1.4 нм ($\sim 1 - 10$ монослоёв (МС)), а значение d_{Si} – в диапазоне 0.14–0.28 нм ($\sim 1 - 2$ МС). Количество периодов в предполагаемой последовательности $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y/\text{Si}/\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y/\dots$ было от 3 до 17.

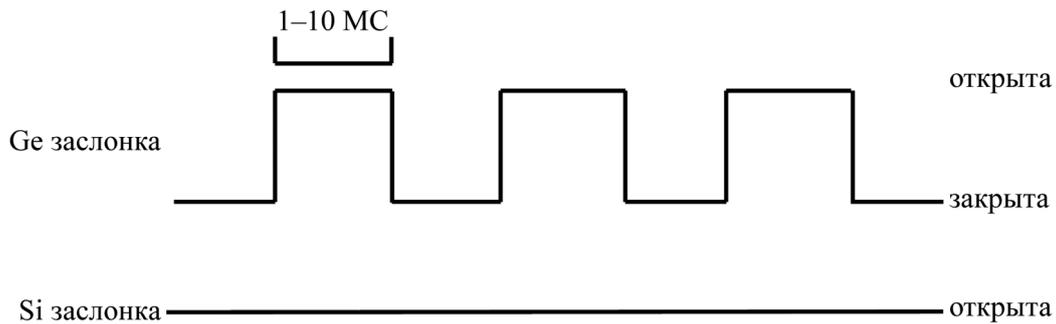


Рис. 2: Схематическая последовательность положений заслонок МИ Ge и Si в процессе выращивания слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$.

Таким образом, были получены образцы, имеющие в слое КЯ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ усреднённые концентрации x , равные 0.08 (А), 0.06 (В), 0.09 (С), 0.01 (D), 0.08 (Е). Для сравнения технологий на этой же установке были выращены образцы со слоем КЯ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ постоянного состава x , равного усредненному составу описанных выше образцов.

Т а б л и ц а 1

Предполагаемые параметры слоёв твёрдого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ в КЯ, закладываемые в программу управления заслонками МИ Si и Ge

№ структуры	Эффективная толщина слоя, нм		Количество периодов, N	Усреднённый состав слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, x
	d_{SiGe} ($\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$)	d_{Si} (Si)		
А	14	1.4	3	0.08
В	3.14	1.4	10	0.06
С	2.1	2.1	11	0.09
Д	1.4	1.4	17	0.01
Е	2.8	1.4	11	0.08

Буферные слои Si выращивались при температуре подложки ~ 600 °С, слои КЯ – при ~ 500 °С. Контроль температуры подложки осуществлялся по термопаре, расположенной вблизи нагревательного элемента манипулятора. Скорости осаждения Ge и Si равнялись 0.02 нм/с и 0.1 нм/с, соответственно. Полное давление паров в камере МПЭ во время роста было не больше 6.66×10^{-8} Па.

Процесс роста структур контролировался методом дифракции быстрых электронов. После схода окислов в процессе подготовки подложки на её поверхности наблюдалась реконструкция Si (2×2), которая сохранялась в течение выращивания всей гетероструктуры. При формировании КЯ происходило лишь незначительное утолщение основных рефлексов.

Результаты исследования методом ПРЭМ. Исследования методом ПРЭМ проводились на высоковольтном просвечивающем электронном микроскопе Carl Zeiss Libra 200FE. Стандартными методами были приготовлены поперечные срезы исследуемых гетероструктур. На полученных изображениях (рис. 3) слои Si и SiGe соответствуют областям темного и яркого контраста, соответственно.

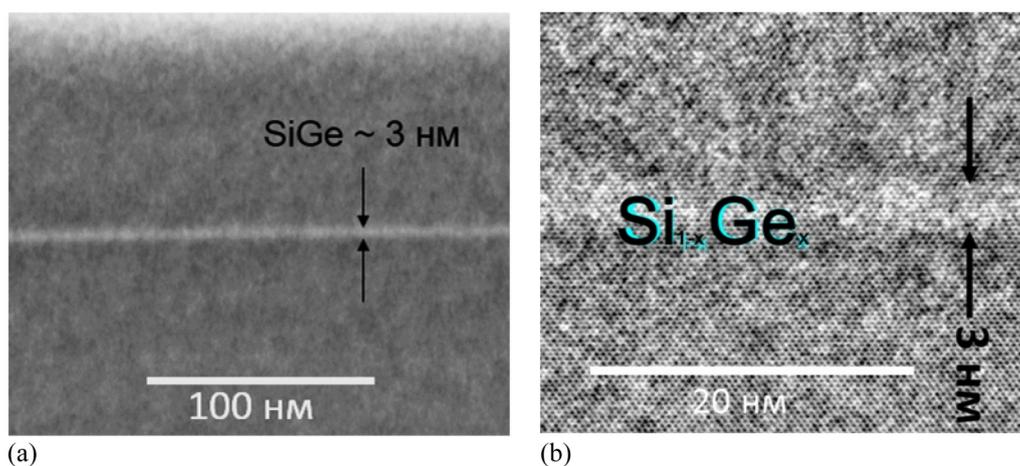


Рис. 3: ПРЭМ изображение поперечного среза структуры С при различном увеличении.

На ПРЭМ изображении видно (рис. 3(a)), что слой КЯ достаточно равномерный по толщине и не имеет разрывов. Модуляция по составу, которая задавалась программой управления заслонкой МИ Ge (табл. 1), отсутствует (рис. 3(b)). Это может быть связано с перемешиванием в твёрдом растворе $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, возникающем в процессе релаксации напряжений несоответствия кристаллических решёток [7]. В пользу такого предположения говорит и размытие первой гетерограницы КЯ (рис. 3(b)), где значение RMS,

определённое нами по ПРЭМ изображениям, достигает 1.3 нм. Отметим, что обычно при таких режимах роста мы получаем слои Si с атомарно гладкой поверхностью (RMS ~ 0.7 нм) (рис. 4), и если бы указанного перемешивания не было, размытие первой гетерограницы определялось бы шероховатостью ростовой поверхности Si. Аналогичные эффекты огрубления гетерограниц в гетероструктурах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ наблюдались, например, в работе [8].

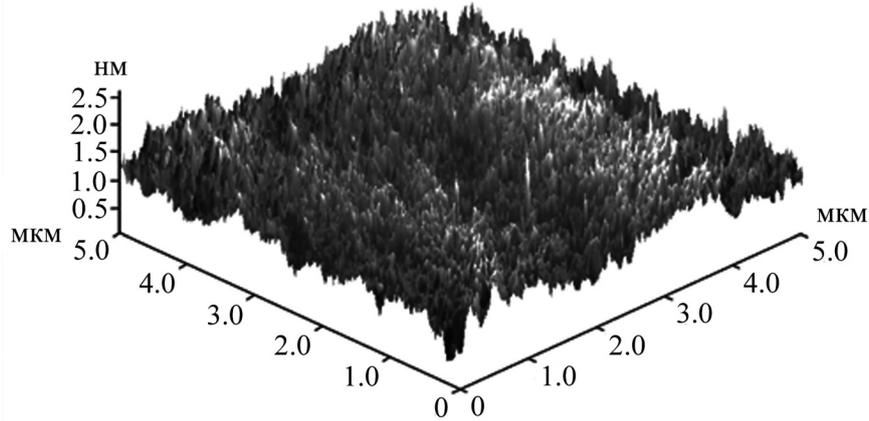


Рис. 4: AFM-изображение рельефа поверхности эпитаксиального слоя Si.

Методом МПЭ с использованием периодического перекрытия молекулярного потока Ge были выращены КЯ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ с $x < 0.1$. По данным ПРЭМ, в слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, отсутствует какая-либо модуляция по составу в направлении роста, что свидетельствует о возможности получения КЯ в системе $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ с $x < 0.1$ путем модуляции потока Ge.

Авторы выражают благодарность фонду РФФИ за финансовую поддержку по грантам № 16-02-00986 а, № 16-29-03352 офи_м и Программе Президиума РАН.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] K. Kheng, R. T. Cox, Y. Merle d'Aubigne, et al., Phys. Rev. Lett. **71**, 1752 (1993).
- [2] А. В. Горбунов, В. Б. Тимофеев, Письма в ЖЭТФ **83**(4), 178 (2006).
- [3] T. P. Pearsall, J. Bevk, L. C. Feldman et al., Phys. Rev. **58**, 729 (1987).
- [4] E. Kasper, H. Kibbel, and H. Jorke, Phys. Rev. B **38**, 3599 (1988).
- [5] T. P. Persall, J. Bevk, L. C. Feldman, et al., Phys. Rev. Lett. **58**, 729 (1987).

- [6] Ю. Г. Садофьев, В. П. Мартовицкий, М. А. Базалевский, Изв. РАН. Сер. физ. **78**, 47 (2014).
- [7] V. V. Roddatis, A. L. Vasiliev, and M. V. Kovalchuk, Journal of Physics: Conference Series **471**, 012044 (2013).
- [8] B. Gallas, I. Berbezier, A. Ronda, and J. Derrien, Thin Solid Films **294**, 22 (1997).
- [9] C. D. Jeffries and L. V. Keldysh, *Electron-Hole Droplets in Semiconductors*, (Amsterdam North-Holland, 1983).
- [10] C. G. Van de Walle and R. M. Martin, Phys. Rev. B **34**, 5621 (1986).
- [11] L. Keldysh, Phys. Stat. Sol. (a) **164**(1), 3 (1997).
- [12] Z. L. Yang, J. R. Watling, R. C. W. Wilkins, et al., Semicond. Sci. Technol. **19**, 1174 (2004).
- [13] Jong-Hyeok Park, Masashi Kurosawa, Naoyuki Kawabata, et al., Thin Solid Films **520**(8) 3293 (2012).

Поступила в редакцию 28 августа 2018 г.

После доработки 18 октября 2018 г.

Принята к публикации 27 ноября 2018 г.