

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

А. В. Клековкин^{1,2}, И. П. Казаков¹, В. А. Цветков¹,
М. А. Акмаев¹, С. А. Зиновьев¹

Исследованы одиночные квантовые ямы в системе $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ с $x < 0.1$, выращенные в режиме модуляции молекулярного потока Ge при формировании слоя твёрдого раствора. Полученные гетероструктуры исследовались методом низкотемпературной фотолюминесценции, а их свойства сопоставлялись со свойствами аналогичных гетероструктур, выращенных без модуляции молекулярного потока Ge. Показано, что модуляция потока Ge практически не влияет на спектральные свойства квантовых ям.

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

Введение. В настоящей работе представлены результаты исследования методом низкотемпературной фотолюминесценции (НФЛ) квантовых ям (КЯ) в системе $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$, выращенных в режиме модуляции (периодического перекрытия) молекулярного потока (МП) Ge при постоянном МП Si. Используя такой технологический приём, за счёт увеличения тока электронной пушки молекулярного источника (МИ) можно повысить стабильность МП Ge, что представляет значительную проблему при получении слоёв разбавленного ($x < 0.1$) твёрдого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Вместе с тем, стабильность работы механизма привода заслонок и газовыделение, сопровождающее его работу, вносят дополнительные факторы в процесс формирования КЯ в режиме модуляции. Как они повлияют на спектральные свойства КЯ? Исследованию этого вопроса и посвящена настоящая статья.

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

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

Технология выращивания КЯ и результаты их исследования методом просвечивающей растровой электронной микроскопии описаны в нашей предыдущей работе [1]. Гетероструктуры состояли из буферного слоя Si, КЯ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и защитного слоя Si. 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 предполагаемой последовательности тонких слоёв $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y/\text{Si}/\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y/\dots$ толщиной $d_{\text{SiGe}}, d_{\text{Si}}$ внутри КЯ. Как видно из табл. 1, в различных образцах значение толщины слоёв d_{SiGe} варьировалось в диапазоне 0.14 нм – 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.

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 в КЯ, N	Усреднённый состав слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, x
	d_{SiGe} ($\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$)	d_{Si} (Si)		
A	14	1.4	3	0.08
B	3.14	1.4	10	0.06
C	2.1	2.1	11	0.09
D	1.4	1.4	17	0.01
E	2.8	1.4	11	0.08

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.

Методика эксперимента. Гетероструктуры исследовались методами НФЛ. Измерения проводились в ближней инфракрасной области спектра при температурах 6–15 К и мощности возбуждения до 125 Вт/см². В качестве источника возбуждающего излучения использовался непрерывный твердотельный лазер с диодной накачкой с длиной волны $\lambda = 532$ нм. Излучение лазера фокусировали на образец нормально его плоскости в пятно диаметром ~ 2 мм. Прошедшее через подложку рекомбинационное излучение собирали кварцевой линзой на входную щель спектрометра. Сигнал ФЛ анализировали с

помощью дифракционного спектрометра. Выходящее из спектрометра излучение регистрировали германиевым *p-i-n*-фотодетектором. Для выделения электрического сигнала была использована техника синхронного детектирования. Возбуждающее излучение при помощи механического прерывателя модулировали на частоте ~ 70 Гц.

Результаты исследования. На спектрах НФЛ образцов, выращенных с модуляцией МП Ge (рис. 1), наблюдались фоновые компоненты от КЯ (линия SiGe:TO) и подложки Si (Si:TO). Также присутствовали бесфоновые компоненты от КЯ (линия SiGe:NP). Для сравнения приведен спектр ФЛ от КЯ постоянного состава. Видно, что положение линий на спектрах образцов практически совпадает, независимо от способа получения. Интенсивность линии SiGe для образцов КЯ постоянного состава несколько выше ($\sim 15\%$), чем для образцов, выращенных в режиме периодического перекрытия МП Ge. Это, по-видимому, связано с газовой выделением при переключении заслонок, которые являются источниками примесей. Отметим, что перед проведением экспериментов по выращиванию образцов с модуляцией МП никаких специальных мер по обезгаживанию механизма привода заслонки МИ Ge не предпринималось.

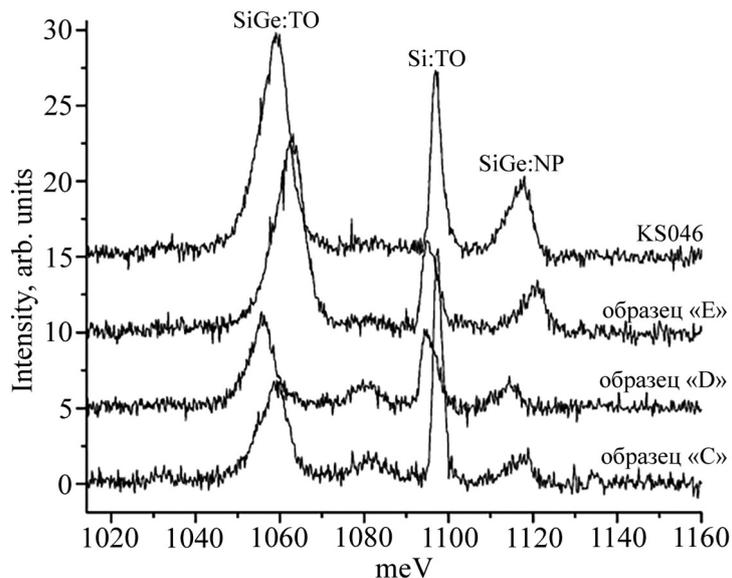


Рис. 1: Спектры НФЛ образцов, выращенных с модуляцией МП Ge (C, D, E) и без модуляции (KS046) при $T = 6$ К.

Исследование рекомбинационного излучения образцов в широком интервале уровней возбуждения не выявило каких-либо отличий по сравнению с КЯ постоянного состава [2–4]. В спектрах образцов, выращенных в режиме модуляции МП Ge, наблюдались все

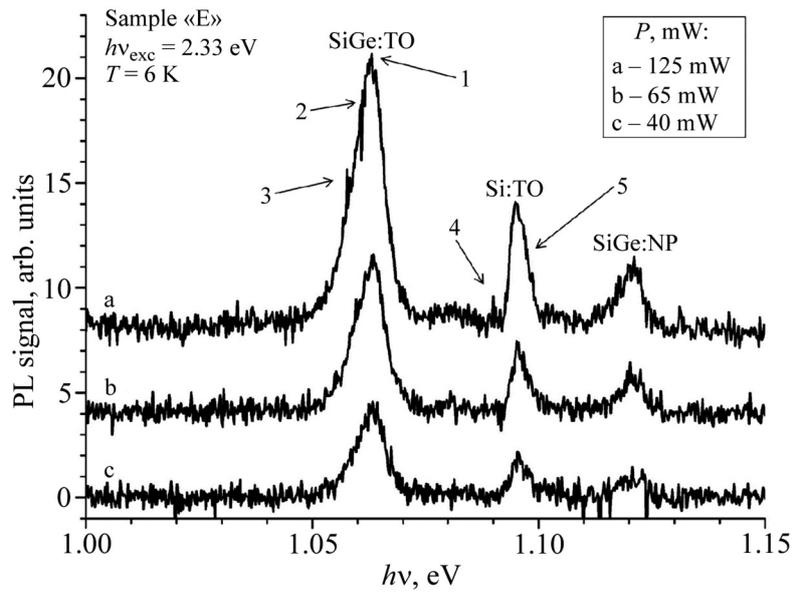


Рис. 2: Спектры ФЛ структуры E, снятые при различных уровнях накачки $T = 6$ К. Пояснения в тексте.

линии, характерные для наших лучших образцов с КЯ постоянного состава. В образцах обоих типов наблюдались интенсивные ТО-фононные компоненты спектра от КЯ

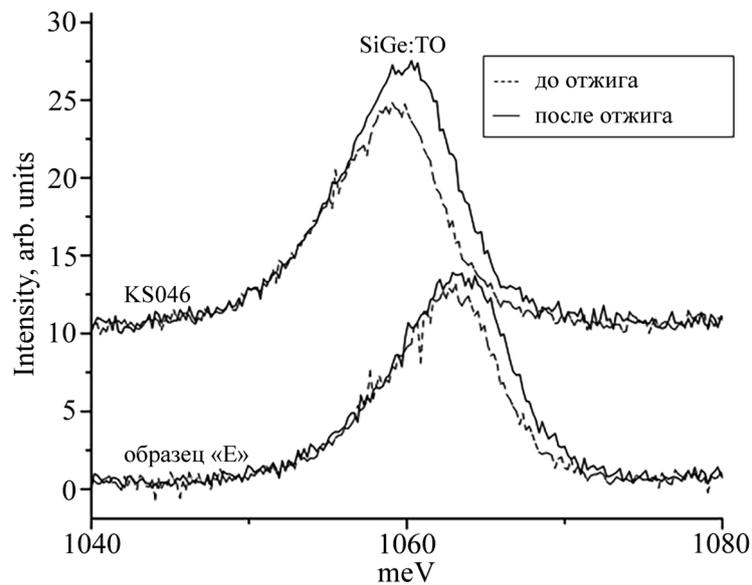


Рис. 3: Спектры ФЛ структуры E и KS046 до и после отжига при $T = 800$ °C в течение 5 мин.

(линия SiGe-TO) и подложки Si (линия Si:TO) (рис. 2). Фононная компонента от КЯ представлена линиями свободного пространственно прямого экситона (1), свободного биэкситона (2), ЭДЖ (3). В излучении подложки Si доминирует линия свободного экситона (5), а также линия связанного экситона (4). Бесфононные компоненты спектра от КЯ (линия SiGe:NP) выражены значительно слабее фононных.

Для проверки устойчивости гетероструктур к температурным воздействиям были проведены эксперименты по быстрому термическому отжигу образцов при температуре 800 °C в течение 5 минут с последующим контролем методом низкотемпературной ФЛ. Для образцов обоих типов отжиг приводит к сдвигу линий ФЛ от слоя SiGe (SiGe:TO) в синюю область спектра (рис. 3), по-видимому, обусловленному уменьшением концентрации Ge в слое SiGe и уменьшением толщины КЯ [5–7]. Полуширина линий после отжига также немного увеличивалась, что можно объяснить увеличением размытия гетерограниц КЯ в результате продолжения процесса релаксации напряжений несоответствия.

Заключение. Методом МПЭ с использованием периодического перекрытия молекулярного потока Ge были выращены КЯ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ с $x < 0.1$. На спектрах ФЛ образцов, выращенных таким способом, наблюдались все линии, характерные для наших лучших образцов с КЯ постоянного состава, хотя интенсивность линий от КЯ несколько меньше (~15%). Отжиг образцов приводил к некоторому уширению и “синему” смещению линий ФЛ образцов обоих типов.

Таким образом, в настоящей работе продемонстрирована возможность 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] И. П. Казаков, А. В. Клековкин, В. А. Цветков и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **45**(12), 40 (2018).
- [2] Д. С. Козырев, Т. М. Бурбаев, Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки **3**(177), 60 (2013).
- [3] М. Бурбаев, М. Н. Гордеев, Д. Н. Лобанов и др., Письма в ЖЭТФ **92**(5), 341 (2010).

- [4] Н. Н. Сибельдин, *ЖЭТФ* **149**(3), 678 (2016).
- [5] H. Lafontaine, D. C. Houghton, N. L. Rowell, et al., *Journal of Crystal Growth* **157**, 57 (1995).
- [6] H. Lafontaine, D. C. Houghton, N. L. Rowell, et al., *Appl. Phys. Lett.* **69**, 1444 (1996).
- [7] Koichi Terashima et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **30**(12), 3601 (1991).

Поступила в редакцию 28 августа 2018 г.

После доработки 14 марта 2019 г.

Принята к публикации 14 марта 2019 г.