

## КИНЕТИКА ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ МЕТАСТАБИЛЬНОГО СЛОЯ SiGe/Si С КОЛЬЦЕВЫМИ МИКРОСТРУКТУРАМИ НА ПОВЕРХНОСТИ

А. Н. Миннуллин<sup>1</sup>, С. В. Шевцов<sup>1,2</sup>

*Показано влияние латеральной неоднородности, возникающей за счет развития диффузионной неустойчивости в процессе эпитаксиального роста, на кинетику низкотемпературной фотолюминесценции гетероструктур  $Si_{0.9}Ge_{0.1}$ -Si.*

**Ключевые слова:** фотолюминесценция, SiGe/Si, микроструктура, экситоны.

Возможным методом управления формой и положением нанообъектов при гетероэпитаксиальном росте является использование метастабильных систем, в которых малое возмущение ростовой поверхности приводит к развитию различного типа неустойчивостей. Вследствие потери плоскостности фронта кристаллизации, вызванной неустойчивостью, формируются нано- или микрообъекты, положение которых определено исходным возмущением [1, 2].

В данной работе исследуются структуры, сформировавшиеся вследствие развития диффузионной нестабильности при эпитаксиальном росте напряженных слоев  $Si_{0.9}Ge_{0.1}$ /Si. Структурные свойства этих слоев подробно описаны в работе [3]. В данной работе внимание, главным образом, уделяется спектрально-временной динамике низкотемпературной фотолюминесценции (НФЛ) в таких системах. Слои были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии при температуре 700 °С. Вначале на кремниевой подложке Si(001) выращивался кремниевый буфер толщиной 100 нм, на который затем наращивался слой SiGe толщиной 50 нм. Для того чтобы лучше контролировать возможные изменения морфологии поверхности, слой SiGe кремнием не покрывался. Толщины и состав слоя SiGe подбирались так, чтобы последний находился в метастабильном состоянии. Дислокации несоответствия в структурах отсутствовали. Морфология поверхности выращенных слоев анализировалась атомно-силовым

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

<sup>2</sup> МФТИ(ГУ), 141700 Россия, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: kolob7040@gmail.com.

микроскопом “NTEGRA Prima” (NT-MDT) с использованием бесконтактной моды. Измерения НФЛ проводились в парах гелия (температура 5 К) при возбуждении третьей гармоникой Nd:YAG лазера (355 нм, 5 нс) [4]. Для детальных исследований была отобрана структура, на поверхности которой кольцевые образования малого размера формировали однородный массив (рис. 1, слева). Для того чтобы проиллюстрировать возможные изменения состава при росте отобранной структуры на рис. 1 (справа) приведен усредненный сигнал с квадрупольного масс-спектрометра, встроенного в установку молекулярно-пучковой эпитаксии.

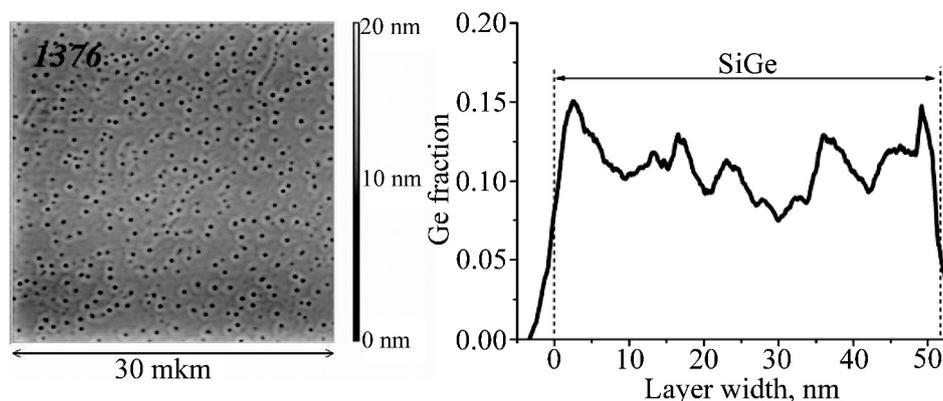


Рис. 1: Морфология поверхности отобранной структуры (слева) и изменение доли германия в процессе ее роста (справа).

Последовательный анализ [3] позволяет приписать кольцевые структуры на рис. 1 развитию диффузионной неустойчивости, описанной в [1, 2]. Диффузионный механизм формирования кольцевых образований подразумевает изменение локальной концентрации германия и деформационного поля вблизи нарушений плоского фронта кристаллизации. Глубина проникновения напряжений в подложку сопоставима с размером кольцевых образований ( $\sim$  мкм) и при значительном удалении от слоя SiGe в глубь подложки убывает обратно пропорционально глубине [3].

Характерный вид разрешенных по времени спектров НФЛ исследованной структуры показан на рис. 2. Фотолюминесценция объемного кремния определяется рекомбинацией электронно-дырочной жидкости (EHL), излучением связанных на боре экситонов (BE) [5, 6] и многоэкситонных комплексов (ВМЕС). Глубина поглощения используемого ультрафиолетового излучения составляет несколько десятков нанометров, поэтому НФЛ кремния на рис. 2 соответствует буферному слою кремния и верхней части подложки. Именно эти области наиболее подвержены влиянию упругих напряжений, возни-

кающих за счет неоднородности слоя SiGe. Данные напряжения, в частности, приводят к изменению времени затухания линий BE и EHL. Согласно литературным данным [7] время жизни EHL – 140–150 нс, а время жизни BE – 1000 нс. В то время как для исследованной структуры время затухания линии EHL составляет  $126.7 \pm 1.1$  нс, а время затухания BE –  $1057 \pm 11$  нс. Уменьшение времени жизни EHL определяется, по-видимому, тем, что градиент упругих напряжений приводит к “стоку” конденсированной фазы в слой SiGe. Данный вывод подтверждается частичной стабилизацией интенсивности излучения из слоя SiGe на временах отстройки 20–300 нс от возбуждающего импульса. Увеличение времени спада линии BE вызвано, предположительно, незначительным уменьшением перекрытия электронных и дырочных волновых функций за счет возмущения экситонно-примесных комплексов полем деформации и/или приповерхностным электрическим полем.

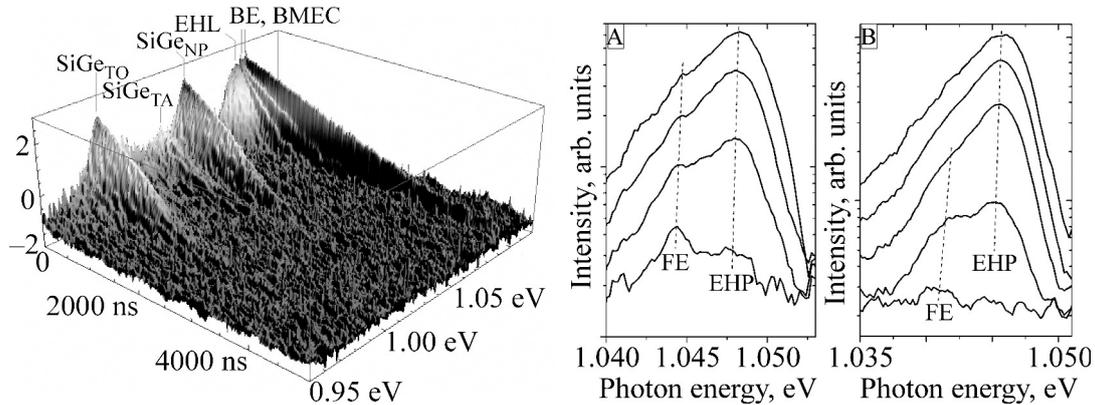


Рис. 2: Спектрально-разрешенная динамика сигнала НФЛ (слева). Фрагменты спектров НФЛ (справа), полученные при возбуждении структуры УФ импульсами с энергией 1 мкДж (А) и 4 мкДж (В). Времена отстройки от возбуждающего импульса (сверху – вниз) соответственно, 80, 350, 750 и 1500 нс. Нижняя кривая на рис. В соответствует времени отстройки 3000 нс. Температура 5 К.

Излучение слоя SiGe представлено тремя линиями – бесфононный переход ( $\text{SiGe}_{\text{NP}}$ ) и его фононные повторения  $\text{SiGe}_{\text{TO}}$ ,  $\text{SiGe}_{\text{TA}}$  с участием, соответственно, поперечных оптических и акустических фононов. Большое время затухания данных линий  $\sim 500$  нс вызвано, предположительно, связыванием экситонов на интерфейсе SiGe/Si, и последующей локализацией в латеральном направлении за счет деформационных (возможно также электрических) полей от кольцевых структур. Тот факт, что излучение формируется областями слоя SiGe, расположенными вблизи подложки, подтверждается росто-

вым протоколом на рис. 1. Как видно из рис. 1, в начальной части слоя SiGe, находящейся вблизи кремниевой подложки, наблюдается увеличение концентрации германия и, соответственно, глубины потенциальной ямы для дырок. В то же время, наличие барьера для электронов в слое SiGe способствует выталкиванию электронной волновой функции в чистый кремний [8]. Поэтому область, в которой экситон имеет наименьшую энергию, расположена непосредственно вблизи интерфейса SiGe–Si. Отметим, что полученные времена затухания НФЛ из слоя SiGe ( $\sim 500$  нс) близки к времени жизни экситонов в высококачественных SiGe/Si квантовых ямах с содержанием германия  $\sim 10\%$  [9]. Это указывает на очень низкую концентрацию центров безызлучательной рекомбинации в областях, из которых происходит излучение. Таким образом, метастабильный слой SiGe, выращенный при температуре  $700^\circ\text{C}$ , содержит локальные области, свободные от дефектов.

Отдельный интерес представляет временная эволюция тонкой структуры излучения из слоя SiGe, измеренная при различных плотностях импульсного возбуждения, см. рис. 2. При малых временах отстройки линия излучения слоя SiGe определяется рекомбинацией носителей в вырожденной электронно-дырочной плазме (ЕНР). Это подтверждается значительной ( $\sim 7$  мэВ) шириной линии излучения, наличием низкочастотного размытия, характерного для излучения вырожденной плазмы [10, 11], а также оценкой поверхностной плотности электронно-дырочных пар, захваченных в слое SiGe после прихода возбуждающего импульса ( $\sim 5 \cdot 10^{12}$  см $^{-2}$ ). Экситонные состояния в такой плазме должны эффективно экранироваться [4].

По мере рекомбинации носителей усредненная по поверхности плотность электронно-дырочных пар уменьшается. Но форма и спектральное положение линии излучения ЕНР остаются практически неизменными. Это возможно только в случае, если при рекомбинации носителей уменьшается объем, занимаемый ЕНР, а ее плотность при этом меняется слабо. То есть излучение ЕНР напоминает НФЛ электронно-дырочных капель в SiGe слоях [10], что возможно только в случае неоднородности ЕНР.

При временах отстройки от возбуждающего импульса  $\sim 750$  нс и более в спектрах ФЛ слоя SiGe проявляется более узкая линия (FE), сдвинутая в длинноволновую область относительно линии излучения ЕНР. Данную линию следует приписать экситонным состояниям. Существование экситонных состояний с достаточно плотной ЕНР независимо подтверждает пространственную неоднородность электронно-дырочной системы. Экситонное излучение из слоя SiGe имеет малую спектральную ширину ( $\sim 3$  мэВ), что указывает на незначительную величину неоднородного уширения в структуре. Дан-

ное наблюдение подтверждает тот факт, что латеральная неоднородность напрямую не связана с изменением концентрации германия в излучающих областях, а определяется малым возмущением, вызванным неоднородным электрическим и/или деформационным полем вблизи поверхности.

Таким образом, исследована НФЛ метастабильного слоя SiGe, на поверхности которого сформирован плотный массив кольцевых образований, вызванных развитием диффузионной неустойчивости. Продемонстрировано изменение времен затухания линий излучения объемного кремния, которые указывают на присутствие локальных электрических и/или деформационных полей в приповерхностных областях.

Обнаружена медленно затухающая люминесценция, связанная с локализацией электронов и дырок вблизи интерфейса SiGe–Si. Значительные (~500 нс) времена затухания люминесценции свидетельствуют о том, что концентрация центров безызлучательной рекомбинации вблизи интерфейса мала. Наблюдаемое на достаточно длительных временных интервалах сосуществование экситонных состояний с плотной электронно-дырочной плазмой указывает на пространственную неоднородность электронно-дырочной системы. При этом малая ширина линии экситонного излучения исключает связь латеральной неоднородности с заметными изменениями концентрации германия в излучающих областях. Данная неоднородность определяется, по-видимому, малыми возмущениями, возникающими вследствие наличия деформационных и, возможно, электрических полей вблизи поверхности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-22-00273).

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Yaoyu Pang and Rui Huang, Phys. Rev. B **74**, 075413 (2006).
- [2] W. Tekalign, B. Spencer, J. Appl. Phys. **96**, 5505 (2004).
- [3] В. С. Багаев, В. С. Кривобок, Д. Н. Лобанов и др., ФТТ **56**, 1896 (2014).
- [4] В. С. Багаев, В. С. Кривобок, С. Н. Николаев и др., ЖЭТФ **144**(5), 1045 (2013).
- [5] В. С. Багаев, В. В. Зайцев, В. С. Кривобок и др., ЖЭТФ **134**, 988 (2008).
- [6] V. V. Zaitsev, V. S. Bagaev, T. M. Burbaev, et al., Physica E **40**(5), 1172 (2008).
- [7] C. B. Guillaume, J. M. Debever, and F. Salvan, Phys. Rev. **177**, 567 (1969).
- [8] В. С. Багаев, В. С. Кривобок, С. Н. Николаев и др., Письма в ЖЭТФ **94**(1), 63 (2011).

- [9] В. С. Кривобок, С. Н. Николаев, В. С. Багаев и др., Письма в ЖЭТФ **100**(5), 343 (2014).
- [10] V. S. Bagaev, V. S. Krivobok, S. N. Nikolaev, et al., Phys. Rev. B **82**, 1153131 (2010).
- [11] V. S. Bagaev, V. S. Krivobok, S. N. Nikolaev, et al., J. Appl. Phys. **117**, 185705 (2015).

Поступила в редакцию 2 июля 2015 г.