

06.3

## **Влияние послеростового отжига на структурные и оптические свойства многослойных гетероструктур Ge/Si**

© А.А. Тонких, В.Г. Талалаев, Н.Д. Захаров,  
Г.Э. Цырлин, В.М. Устинов, Р. Werner

Институт аналитического приборостроения РАН, С.-Петербург

E-mail: cirilin@ioffe.rssi.ru

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

С.-Петербургский государственный университет

Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Халле, Германия

Поступило в Редакцию 9 апреля 2003 г.

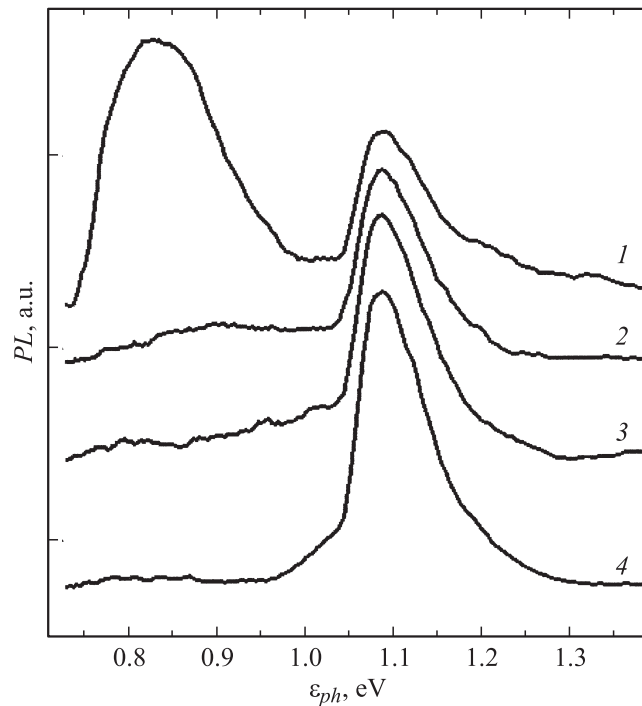
Методами фотолюминесценции и просвечивающей электронной микроскопии исследовано влияние послеростового термического и лазерного отжига на оптические и структурные свойства многослойных гетероструктур с квантовыми точками германия, помещенными в матрицу кремния. Были обнаружены спад фотолюминесценции из квантовых точек и возникновение новой полосы по отношению к образцам, не подвергнутым процедуре отжига. Измерения методами электронной микроскопии на просвет показали, что данный эффект обусловлен размытием интерфейса германий-кремний и появлением регулярной прямоугольной сетки дислокаций на поверхности отожженной структуры.

Кремний в настоящее время занимает лидирующие позиции на рынке микроэлектронных приборов, однако его применение в оптоэлектронике затруднено в силу низкой эффективности люминесценции. Тем не менее интеграция кремниевой микроэлектронной технологии с оптическими средствами передачи данных на одном чипе является актуальной задачей (в первую очередь в области разработки светоизлучающих приборов на основе кремния (СИПК)), для решения которой предпринимаются значительные усилия. Две группы авторов [1,2] ранее наблюдали интенсивную фотолюминесценцию вблизи  $1.5 \mu\text{m}$  от гетероструктур с квантовыми точками (КТ) Ge, помещенными в матрицу Si. В работе [3] нами была исследована природа эффективной фотолюминесценции от Ge/Si(100) многослойных гетероструктур с КТ Ge при комнатной температуре.

В данной работе исследуется влияние послеростового термического и лазерного отжига на оптические и структурные свойства Si/Ge гетероструктуры с двадцатью слоями КТ Ge, помещенных в матрицу Si.

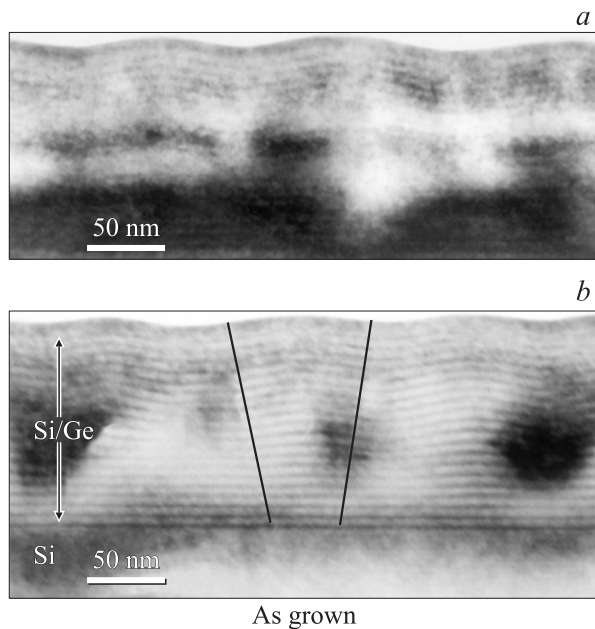
Ростовые эксперименты проводились на установке молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) Riber SIVA 45 (France) на подложках Si (100) *p*-типа диаметром 5 дюймов производства фирмы „ОКМЕТIC“ (Sweden). Предростовая процедура подготовки подложек детально описана в [4]. Формирование атомарных потоков Si и Ge осуществлялось с помощью электронно-лучевых испарителей, а постоянство скоростей напыления контролировалось двумя масс-спектрометрами с обратной связью, настроенными на 28 (Si) и 74 (Ge) массы. Образцы селективно легировались сурьмой, что достигалось за счет испарения Sb из эффузионного источника. Давление остаточных паров атмосферы во время роста было не хуже  $5 \cdot 10^{-10}$  Торр. Состояние поверхности контролировалось *in situ* с помощью дифракции быстрых электронов на отражение. Исследуемые структуры состояли из буферного слоя Si толщиной 100 nm, за которым следовало осаждение 20 слоев Ge (0.8 nm)/Si(5 nm), легированных сурьмой. Температура подложки при росте всей структуры не изменялась и составляла  $T_{sub} = 600^\circ\text{C}$ . Скорости роста составляли: для кремния 0.05 nm/s, для германия — 0.015 nm/s. После извлечения выращенного образца на воздух из него были выделены несколько сегментов, которые подвергались процедурам высокотемпературного и лазерного отжига. В итоге подготовленные образцы составили следующую серию: исследовалось 11 образцов (9 отожженных при различных температурных режимах, образец, подвергнутый лазерной обработке, и 1 не отожженный). Термический отжиг производился при температурах 700, 800, 900°C в течение 10, 20, 30 min в атмосфере Ar при атмосферном давлении. Лазерный отжиг производился с помощью сфокусированного лазерного пучка от Ar<sup>+</sup> лазера. Плотность мощности облучения достигала 150 kW/cm<sup>2</sup>. Фотолюминесценция (ФЛ) возбуждалась также Ar<sup>+</sup> лазером с длиной волны 488 nm. Детектирование сигнала ФЛ осуществлялось с помощью охлаждаемого Ge фотодетектора (Edinburgh Instruments) на выходе из 50-см монохроматора. Измерения методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) проводились на электронном микроскопе JEM 4010.

На рис. 1 представлены спектры ФЛ от исследуемых структур. В спектре образца № 1 (не подверженного термической или лазерной обработке) наблюдаются две полосы. Первая, в диапазоне 1.1 eV,



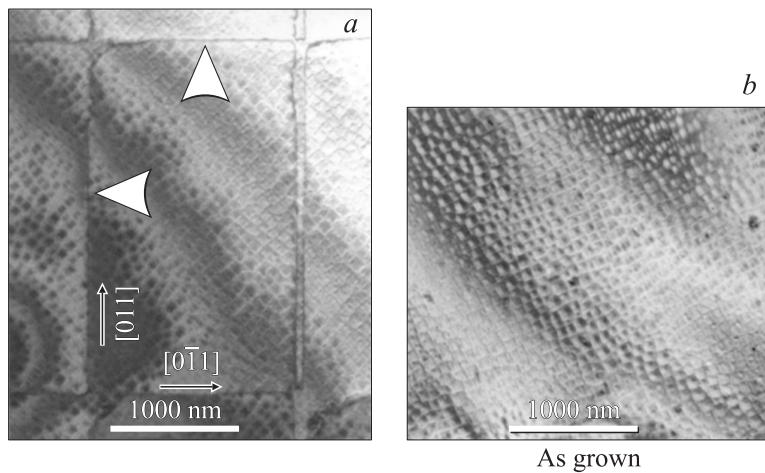
**Рис. 1.** Спектры фотолюминесценции структуры, отожженной в течение 10 min при температурах: 1 — не отожженный образец, 2 — 700°C, 3 — 800°C, 4 — 900°C.

соответствует излучению Si матрицы с участием поперечного оптического фонона. Механизм возникновения второй полосы в диапазоне 0.8–0.9 eV описан нами ранее в работе [3], где было показано, что в вертикально-коррелированных КТ Ge локализуются дырки, а слои Si образуют в этих колонках минизону для электронов. Квазипрямые оптические переходы между локализованными дырками и квазисвободными электронами в итоге дают ФЛ в полосе 0.8–0.9 eV. Из рисунка видно, что в спектрах отожженных образцов (№ 2–4) эта длинноволновая полоса практически исчезает, причем это происходит уже для образца № 2, отожженного лишь при 700°C в течение 10 min.



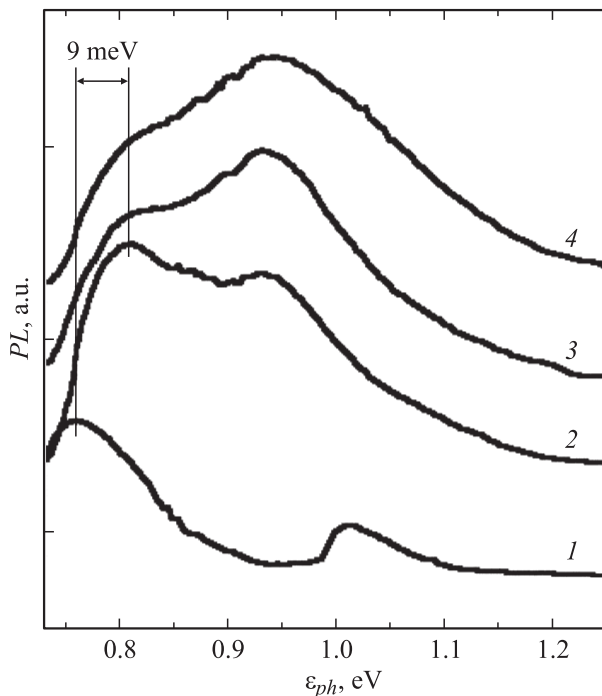
**Рис. 2.** ПЭМ изображение поперечного сечения отожженного в течение 30 min при 900°C (сверху) и не отожженного образцов (снизу, белые линии ограничивают одну из колонок Ge квантовых точек).

При более высокой температуре, а также при больших временах отжига характер спектров ФЛ не изменяется. Для выяснения причин такой деградации ФЛ были сняты ПЭМ изображения поперечного сечения и вид в плане от исследуемых образцов. На рис. 2 сравниваются образцы до и после процедуры отжига. Если неотожженный образец демонстрирует достаточно четкие гетерограницы между слоями Ge и Si, то в отожженном образце эти границы сильно размыты. Размытие гетерограниц объясняется термически стимулированной взаимной диффузией Ge и Si. Сверхрешетка из КТ Ge и слоев Si либо перестает существовать, либо ее профиль настолько сильно искажается, что это приводит к снижению барьеров, вырождению минизоны для электронов и делокализации дырок. Таким образом, в спектре ФЛ практически исчезает линия, соответствующая квазипрямому переходу [3].



**Рис. 3.** ПЭМ изображение в плане двух образцов: *a* — отожженного в течение 30 min при 900°C (треугольные стрелки указывают на стороны дислокационной сетки); *b* — не отожженного.

Другой интересный эффект наблюдается при рассмотрении ПЭМ изображения поверхности. Отожженный образец, как и не отожженный (рис. 3), демонстрирует ячеистую структуру поверхности, однако кроме этого в отожженном образце появляется регулярная прямоугольная сетка дислокаций с характерным размером  $1.5 \times 2.75 \mu\text{m}$ . Причина появления дислокаций заключается в том, что в отожженной структуре происходит изменение механизма релаксации упругих напряжений. Если в неотожженной структуре релаксация напряжений происходила за счет появления колонок КТ Ge и/или корригирования поверхности, то в отожженной структуре накопленные напряжения могут релаксировать по двум сценариям: 1) размытию гетерограниц за счет взаимной диффузии германия и кремния; и/или 2) образованию дислокаций несоответствия из-за разницы постоянных решетки кремния и германия. Фактором, определяющим тип релаксации напряжений, является, очевидно, скорость отжига. Практически безынерционный быстрый отжиг был осуществлен нами с помощью высококонцентрированного лазерного излучения с длиной волны 488 nm и плотностью мощности  $150 \text{ kW/cm}^2$ .



**Рис. 4.** Нормированные спектры ФЛ структуры, не подвергнутой лазерному отжигу: 1 —  $W = 5 \text{ W/cm}^2$ ; и подвергнутой лазерному отжигу: 2 —  $W = 3 \text{ W/cm}^2$ , 3 —  $W = 0.3 \text{ kW/cm}^2$ , 4 —  $W = 15 \text{ kW/cm}^2$ .

На рис. 4 приводится сравнение спектра неотожженного образца (№ 1) и спектров отожженных образцов (№ 2–4), снятых при разных плотностях возбуждения. Из рисунка видно, что в спектрах как отожженного, так и не отожженного образцов проявляются два пика. Однако положение этих пиков различно для не отожженного (№ 1) и отожженных (№ 2–4) образцов. В спектре не отожженного образца коротковолновому пику соответствует излучение в матрице Si с участием поперечного оптического фонона, в то время как причиной возникновения коротковолнового пика в отожженном образце, на наш взгляд, является дислокационная люминесценция [5]. Длинноволновый пик в отожженном образце имеет ту же природу, что и в не

отожженном, а его незначительное коротковолновое смещение ( $9\text{ meV}$ ) объясняется изменением размеров и формы Si/Ge сверхрешетки под воздействием лазерного отжига. Можно заметить, что при увеличении плотности возбуждения отожженного образца происходит увеличение интенсивности коротковолновой полосы спектра ФЛ, что, по-видимому, объясняется возрастающей ролью дислокационной люминесценции. Кроме того, из рисунка видно, что изменение плотности возбуждения не меняет энергетического положения этой компоненты спектра ФЛ.

Необходимо отметить, что дислокационный тип релаксации напряжений, на наш взгляд, достаточно интересен сам по себе, поскольку сетка дислокаций снижает напряжения в исследуемой гетероструктуре Ge/Si, а близость постоянной решетки поверхностного слоя к постоянной решетке Ge делает подобные структуры перспективными в качестве „виртуальных подложек“, используемых для выращивания на подложках Si светоизлучающих приборов на основе III–V соединений Ga(Al, In)As. Кроме того, узлы регулярной сетки дислокаций могут служить центрами зарождения наноразмерных кластеров и тем самым, возможно, позволят получать упорядоченное расположение таких кластеров.

Таким образом, нами показано, что отжиг многослойной Si/Ge гетероструктуры приводит к исчезновению линии ФЛ, соответствующей излучению сверхрешетки Si/Ge в случае термического отжига, и значительному изменению вида спектра ФЛ после лазерного отжига. Возможными механизмами этого эффекта может быть, во-первых, изменение профиля состава сверхрешетки под влиянием взаимной диффузии атомов Si и Ge; во-вторых, появление сети дислокаций несоответствия. Проведенная работа показывает, что высокотемпературный рост подобных структур затруднен вследствие значительного влияния кинетических процессов на поведение атомов Ge в матрице Si, приводящих к возникновению дислокаций несоответствия, перемешиванию материала и существенному размытию гетерограниц.

Г.Э. Цырлин выражает признательность фонду Гумбольдта (Alexander von Humboldt Stiftung).

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке научными программами Минпромнауки и технологии РФ.

## Список литературы

- [1] *Sunamura H., Usami N., Shiraki Y., Fukatsu S.* // APL. 1995. V. 66 (22). P. 3024–2026.
- [2] *Schmidt O.G., Denker U., Eberl K., Kienzle O., Ernst F.* // APL. 2000. V. 77 (16). P. 2509–2511.
- [3] *Cirlin G.E., Talalaev V.G., Zakharov N.D., Egorov V.A., Werner P.* // Phys. Stat. Sol. (b). 2002. V. 232. R1–R3.
- [4] *Цырлин Г.Э., Вернер П., Гёзеле У., Воловик Б.В., Устинов В.М., Леденцов Н.Н.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27 (1). С. 31–38.
- [5] *Шенгуров В.Г., Светлов П., Чалков В.Ю., Андреев Б.А., Красильник З.Ф., Бэр Б.Я., Дроздов Ю.Н., Яблонский А.Н.* // ФТП. 2002. Т. 36 (6). С. 662–665.