

## МЕТОДЫ УСИЛЕНИЯ ВИДИМОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ SiGe/Si ГЕТЕРОСТРУКТУР

С. Н. Николаев, В. С. Кривобок, В. С. Багаев, Е. Е. Онищенко

*Исследована возможность увеличения сигнала фотолюминесценции квантовых ям  $Si_{1-x}Ge_x/Si$  в видимой области спектра за счет изменения структуры зоны проводимости и взаимодействия многочастичных состояний с плазменными колебаниями металлических наночастиц. Для управления зонной структурой была использована одноосная деформация образца на величину  $\sim 10^{-4}$ . Обнаружено, что такой подход позволяет увеличить интенсивность излучения биэкситонов в квантовой яме ( $x = 9\%$ ) в 2.4 раза при температуре 5 К. Металлические наночастицы, нанесенные на поверхность образца с толщиной защитного слоя 20 нм, позволили увеличить интенсивность люминесценции квантовых ям примерно в 2.7 раза.*

**Ключевые слова:** Si, Ge, квантовые ямы,  $2E_g$ -люминесценция, деформация, металлические наночастицы.

В гетероструктурах на основе непрямозонных полупроводников (таких, как Si и Ge) наблюдается излучение, связанное с совместной рекомбинацией двух электронов из противоположных долин и двух дырок. Такое излучение называется  $2E_g$ -люминесценцией [1, 2]. В квантовых ямах  $Si_{1-x}Ge_x/Si$  такое излучение наблюдается в видимой области спектра и позволяет исследовать многочастичные состояния в плотной квазиравновесной электронно-дырочной системе пониженной размерности [2–5]. Однако низкая интенсивность  $2E_g$ -люминесценции ограничивает ее применение как в фундаментальных исследованиях, так и в практических применениях. В то же время существенное повышение эффективности  $2E_g$ -люминесценции могло бы представлять значительный интерес с точки зрения развития альтернативных методов кремниевой фотоники. В

данной работе опробовано два подхода к увеличению сигнала видимой люминесценции квантовых ям SiGe/Si: плазмонный и деформационный.

Исследования проводились на образцах с квантовыми ямами  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  толщиной 5 нм с содержанием Ge в квантовой яме  $x = 5\%$  и  $x = 9 - 15\%$ . Структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на высокоомных подложках Si(001). Для измерения спектров фотолюминесценции излучение структур анализировалось решеточным монохроматором Acton SP2500 и регистрировалось ПЗС-приемником PyLoN 100F. Возбуждение электронно-дырочной системы проводилось с помощью полупроводникового перестраиваемого лазера Topica с длиной волны 800 нм. Для повышения пространственной однородности и снижения роли диффузии носителей заряда излучение лазера не фокусировалось, размер пятна составлял  $\sim 3$  мм. Образец помещался в гелиевый криостат Утрехт, позволяющий работать как в парах при температуре 5–300 К, так и в жидком гелии при температуре 2 К. Был разработан и изготовлен специальный пресс, который размещался в криостате и позволял проводить изгиб плоских образцов при гелиевых температурах.

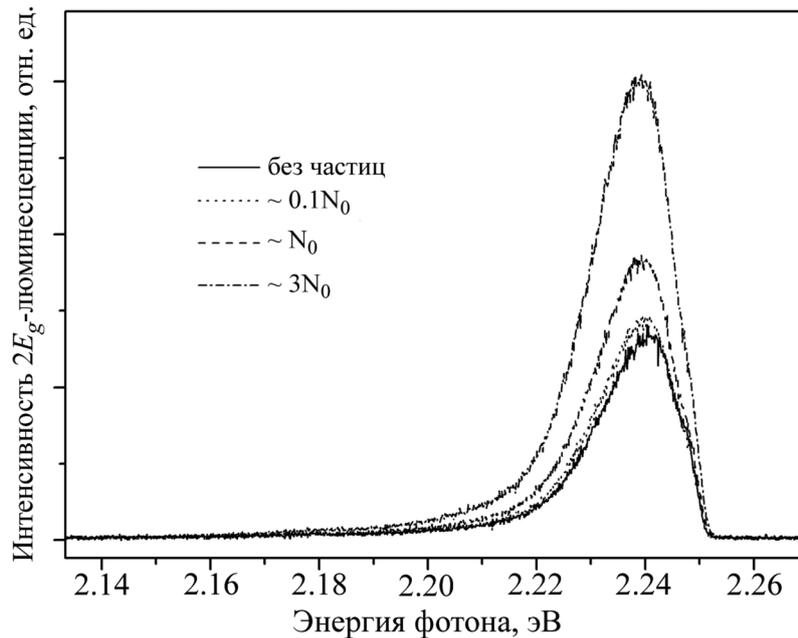


Рис. 1: Спектры  $2E_g$ -люминесценции квантовых ям  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  с различной плотностью золотых наночастиц (интенсивность люминесценции последовательно возрастает с увеличением плотности наночастиц). Плотность мощности возбуждения  $\sim 0.25$  Вт/см<sup>2</sup>, температура 5 К.  $N_0 \sim 3 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>.

Усиление локального поля поверхностными и локальными плазменными колебаниями металлических структур и частиц нашло широкое применение как при фундаментальных исследованиях, так и при создании различных приборов (детекторы, безапертурные микроскопы и т. д.). В данной работе было исследовано влияние золотых наночастиц на спектры низкотемпературной фотолюминесценции квантовых ям  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  с тонким покровным слоем кремния. Металлические наночастицы подбирались таким образом, чтобы их плазменный резонанс приходился на область  $2E_g$ -люминесценции исследуемых структур и существенно превосходил энергию фотонов лазерного возбуждения и ИК-люминесценции квантовых ям. На поверхность образца с квантовой ямой  $\text{Si}_{0.95}\text{Ge}_{0.05}/\text{Si}$  были нанесены золотые наночастицы с диаметром 11 нм.

Сопоставление ИК-спектров люминесценции квантовой ямы с нанесенными наночастицами и без нанесенных наночастиц показало нечувствительность спектров к наличию металлических частиц на поверхности образца. В спектре  $2E_g$ -люминесценции проявляется исключительно излучение многочастичных состояний, в квантовых ямах  $\text{SiGe}/\text{Si}$  с малым содержанием Ge доминирует излучение электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ), а на коротковолновом краю полосы излучения ЭДЖ наблюдается слабое излучение многоэкситонных комплексов, предположительно, биэкситонов.

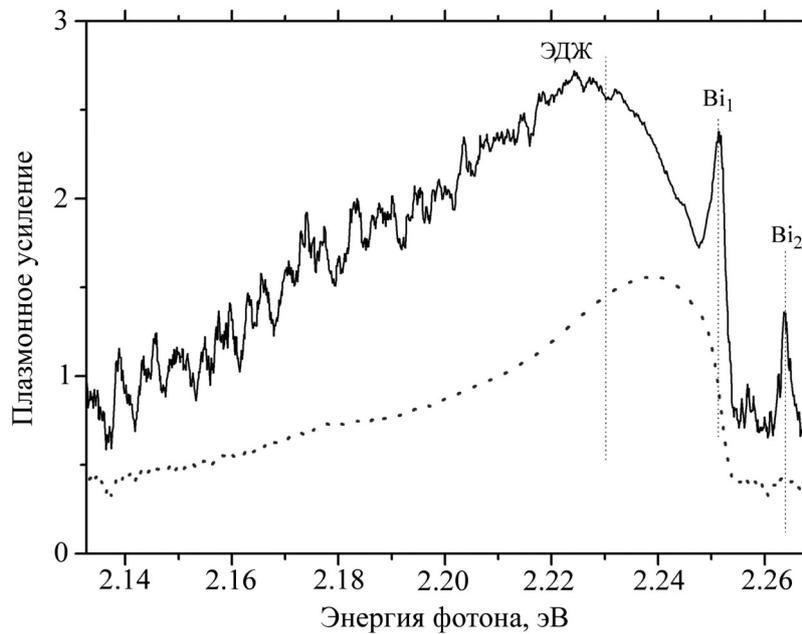


Рис. 2: Спектральная зависимость плазмонного усиления (сплошная линия) и логарифм интенсивности  $2E_g$ -люминесценции (точки).

Как видно их рис. 1, интенсивность  $2E_g$ -люминесценции возрастает во всем спектральном диапазоне. При этом коэффициент увеличения  $2E_g$ -люминесценции растет по мере увеличения поверхностной плотности золотых наночастиц, достигая величины  $\sim 2.7$  (см. рис. 2). Таким образом, полученные данные определенно указывают на плазмонное усиление наночастицами золота интенсивности  $2E_g$ -люминесценции при отсутствии заметных изменений в ИК-спектрах.

Как видно из рис. 2, коэффициент плазмонного усиления существенно зависит не только от типа многочастичного состояния, но и заметно меняется для различных областей линии ЭДЖ. Помимо основной биэкситонной линии  $Bi_1$  в спектре  $2E_g$ -люминесценции SiGe/Si квантовых ям наблюдается также дополнительная линия люминесценции  $Bi_2$ , сдвинутая на 12 мэВ в сторону высоких энергий по отношению к линии  $Bi_1$ . Данный пик может быть связан с биэкситонными состояниями с участием легкой дырки.

При увеличении содержания Ge в слое твердого раствора до 9% происходит подавление образования ЭДЖ, а основным состоянием электронно-дырочной системы оказывается биэкситон с энергией связи 2–2.5 мэВ [3, 4]. Его степень вырождения определяется структурой зоны проводимости и валентной зоны. Наличие встроенной деформации в квантовых ямах приводит к расщеплению состояний легкой и тяжелой дырок в центре зоны Бриллюэна, поэтому биэкситоны в квантовых ямах содержат две тяжелые дырки с противоположными спинами. Зона проводимости при этом остается четырехкратно вырожденной ( $\pm x$  и  $\pm y$  долины являются основным состоянием,  $\pm z$  – возбужденным). При такой конфигурации долин степень вырождения биэкситона составляет  $8 \cdot 7/2 = 28$ , однако излучающими в  $2E_g$ -спектре являются только биэкситоны с участием двух электронов из противоположных долин, число таких состояний равно  $8 \cdot 2/2 = 8$ , то есть “светлыми” являются  $2/7$  от общего числа биэкситонных состояний.

Повысить долю “светлых” в  $2E_g$ -спектре биэкситонов можно, если снять вырождение долин, лежащих в плоскости квантовой ямы. В данной работе для понижения степени вырождения основного состояния в квантовых ямах SiGe/Si использовалась анизотропная деформация образцов. Для этого образцы подвергались изгибу относительно различных кристаллографических направлений ([110] и [100]). При деформации структур относительно направления [110] обнаружено монотонное тушение биэкситонной ИК- и  $2E_g$ -люминесценции по мере увеличения деформации, а также синий сдвиг биэкситонной полосы (в ИК-спектре на  $\sim 4$  мэВ, в  $2E_g$  – на  $\sim 8$  мэВ при деформации  $1 \cdot 10^{-4}$ ). Обнаруженный эффект объясняется увеличением энергии  $\pm x$ ,  $\pm y$  долин и уменьшением

энергии  $\pm z$  долин. В экспериментах было также обнаружено, что  $2E_g$ -люминесценция затухает заметно быстрее ИК-излучения, что указывает на уменьшение стабильности биэкситонов, предположительно, за счет увеличения дипольного момента экситонов.

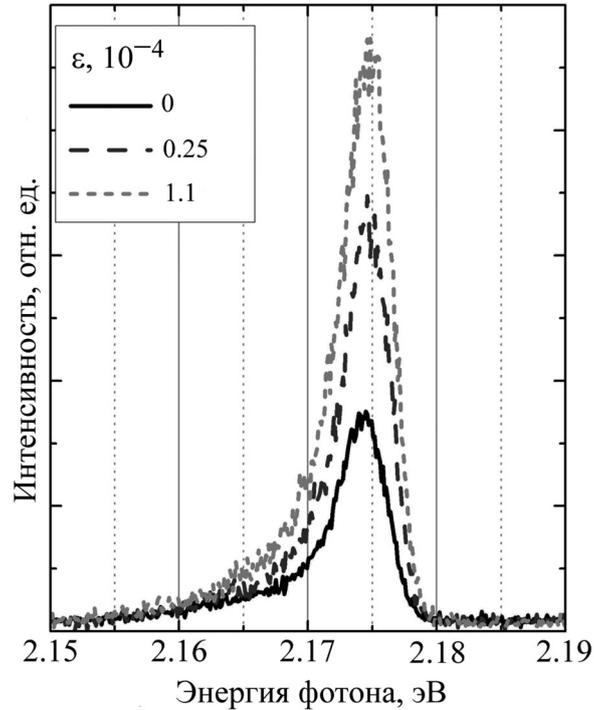


Рис. 3: Зависимость спектров  $2E_g$ -люминесценции от величины приложенной деформации  $\epsilon$  при плотности мощности возбуждения  $\sim 50$  мВт/см<sup>2</sup> и температуре 5 К.

Существенно отличное поведение спектров люминесценции наблюдается при изгибе структур  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  с  $x = 12 - 15\%$  относительно направления  $[100]$  (рис. 3). Полоса  $2E_g$ -люминесценции биэкситонов почти не меняет спектрального положения с ростом деформации, при этом увеличивается интенсивность излучения вплоть до насыщения (интенсивность увеличивается примерно в 2.4 раза). Насыщение регистрируется при деформациях  $\sim 0.6 \cdot 10^{-4}$ . Измеренное увеличение интенсивности приблизительно соответствует отношению долей “светлых” состояний в общем количестве биэкситонных состояний после и до деформации структуры (4/6 против 8/28). Соответственно, обнаруженный эффект указывает на снятие вырождения биэкситонных состояний (с 28 до 6), при котором основное состояние системы формируют “светлые” биэкситоны.

Таким образом, в данной работе успешно продемонстрированы два подхода к повышению интенсивности видимой люминесценции SiGe/Si квантовых ям: плазмонное усиление люминесценции металлическими наночастицами и увеличение доли “светлых”

состояний биэкситонов за счет изменения зонной структуры при анизотропной деформации.

Работа выполнена при поддержке гранта № 14-22-00273 Российского научного фонда.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] T. Steiner, L. Lenchyshyn, M. Thewalt, et al., *Solid State Commun.* **89**, 429 (1994).
- [2] V. S. Bagaev, V. S. Krivobok, S. N. Nikolaev, et al., *Phys. Rev. B* **82**, 1153131 (2010).
- [3] В. С. Багаев, В. С. Кривобок, С. Н. Николаев и др., *Письма в ЖЭТФ* **94**(1), 63 (2011).
- [4] В. С. Багаев, Э. Т. Давлетов, В. С. Кривобок и др., *ЖЭТФ* **148**(6), 1198 (2015).
- [5] С. Н. Николаев, В. С. Кривобок, В. С. Багаев и др., *Письма в ЖЭТФ* **104**(3), 161 (2016).

Поступила в редакцию 5 декабря 2017 г.