

Плазмонное усиление интенсивности четырехчастичной излучательной рекомбинации в SiGe/Si квантовых ямах.

А.С. Гуляшко^{1,2}, Э.Т. Давлетов^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)

²Физический институт им. Лебедева РАН

К настоящему моменту для целого ряда систем уверенно продемонстрирована возможность управления скоростью спонтанного излучения за счет взаимодействия излучающих состояний с плазменными колебаниями металлических наночастиц. Тем не менее, насколько известно авторам, ранее не сообщалось о экспериментальном наблюдении эффектов плазмонного усиления для коллективных процессов рекомбинации, при которых испущенному кванту передается энергия, высвободившаяся после аннигиляции нескольких электронно-дырочных пар. Простейшим примером таких процессов является слабая люминесценция кремния (Si) и гетероструктур на его основе, наблюдаемая в желто-зеленом спектральном диапазоне. Это излучение, называемое обычно 2Eg-люминесценцией, возникает, если в результате одновременной рекомбинации двух дырок и двух электронов из противоположенных долин энергия полностью передается одному кванту света.

В настоящей работе продемонстрировано увеличение квантового выхода 2Eg люминесценции биэкситонов и электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ) вызванное взаимодействием данных многочастичных состояний с плазмонной подсистемой золотых наночастиц [1]. Принципиальная возможность плазмонного усиления скорости четырехчастичной излучательной рекомбинации (прямой в пространстве волновых векторов) может представлять интерес для разработки устройств кремниевой фотоники, работающих на новых принципах.

Для формирования системы, в которой реализовано взаимодействие многочастичных электронно-дырочных состояний с плазменными колебаниями мы использовали мелкую Si_{0.95}Ge_{0.05}/Si квантовую яму (КЯ) с тонким покровным слоем, выращенную методом молекулярно пучковой эпитаксии. Номинальная ростовая толщина покровного слоя кремния составляла 30 нм, а толщина слоя Si_{0.95}Ge_{0.05} - 5 нм. Часть поверхности КЯ покрывалась коллоидным раствором сферических наночастиц в циклодекстрине. После высыхания раствора на поверхности формировался массив наночастиц, поверхностной плотностью которого можно было управлять за счет изменения концентрации золотых наночастиц в исходном растворе. Средний диаметр наночастиц составлял 11 нм при дисперсии порядка 1 нм. При таких параметрах золотые наночастицы формируют хорошо выраженный плазмонный резонанс, расположенный в районе 2.0-2.5 эВ. Данный резонанс иллюстрирует верхняя кривая на рис. 1, которая представляет собой отношение спектров пропускания раствора циклодекстрина с наночастицами золота и без них. Сравнение спектров низкотемпературной фотолюминесценции (НФЛ) для областей поверхности без наночастиц и покрытых наночастицами с заданной поверхностной плотностью, позволило определить влияние наночастиц на рекомбинационное излучение многочастичных состояний в КЯ.

Как отмечалось выше, для отобранной структуры при гелиевых (5К) температурах возможно два механизма излучательной рекомбинации: обычная ИК люминесценция, спектр которой представлен в левой нижней части рис. 1, и 2Eg люминесценция, спектр которой приведен в нижней центральной части рис. 1[2.3]. Как видно из рисунка, спектральное положение 2Eg люминесценции близко к максимуму плазмонного резонанса, в то время как ИК люминесценция и энергия возбуждающих квантов (помечена стрелкой) располагаются вдали от него. Также, кванты возбуждения попадают в существенно антистоксовую область по отношению к спектру 2Eg излучения. При такой постановке эксперимента следует ожидать, что (1) лазерное излучение напрямую не возбуждает плазмонную подсистему наночастиц, (2) возможное влияние плазменных колебаний наиболее сильно именно на 2Eg, а не на ИК люминесценцию и (3) процессы горячей люминесценции и возможное многофонное комбинационное рассеяние света не дают вклад в области, в которой регистрируется 2Eg излучение. Таким образом, при наличии связи с плазмонами, основное влияние наночастиц должно сводиться к изменениям спектров и/или интенсивности 2Eg люминесценции при слабых модификациях рекомбинационных спектров в ИК диапазоне.

Сравнение спектров ИК и 2Eg излучения для областей без золотых наночастиц (черная кривая) и с наночастицами, поверхностная плотность которых $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (зеленая кривая), иллюстрирует рис. 2. Как видно из рис. 2 (справа), единственное значимое изменение ИК спектра КЯ сводится к появлению узкой линии в районе 1.1185 eV (Surf), которая связана с люминесценцией фоновой органики в растворе циклодекстрина. В частности, нижняя серая кривая иллюстрирует спектр

излучения наночастиц с поверхностной плотностью $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ осажденных на кварцевую подложку, в котором также присутствует линия Surf с близкой интенсивностью. То есть, как и ожидалось, осаждение наночастиц не оказывает заметного влияния на спектр ИК люминесценции. Качественно иная ситуация реализуется для спектров 2Eg люминесценции, см. Рис. 2 (слева). Интенсивность 2Eg люминесценции монотонно возрастает во всем диапазоне, где присутствует отличный от нуля сигнал. Пространственный анализ интенсивности 2Eg НФЛ показал, что обнаруженное увеличение интенсивности резко пропадает при смещении из области, содержащей золотые наночастицы. Таким образом, полученные данные указывают на плазмонное усиление интенсивности 2Eg излучения при отсутствии заметных изменений в спектрах ИК люминесценции.

Таким образом, продемонстрирована возможность плазмонного усиления скорости четырехчастичной излучательной рекомбинации в SiGe/Si квантовых ямах с малой толщиной покровного слоя кремния. Показано, что усиление имеет место только для видимого излучения, энергия квантов которого находится в пределах плазмонного резонанса.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант # 14-22-00273).

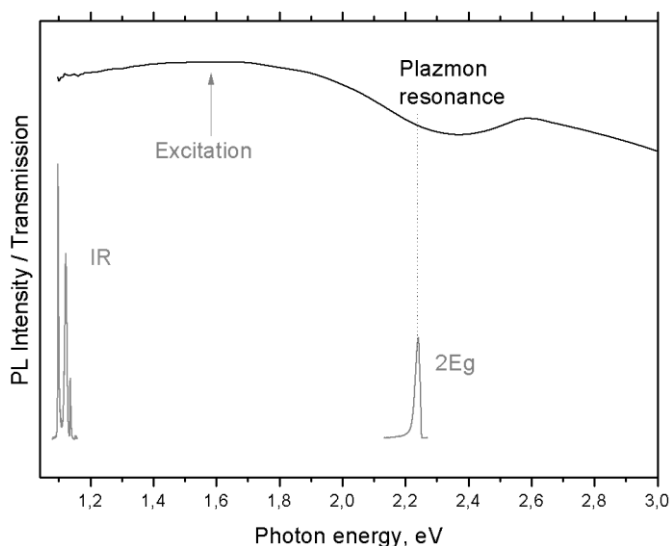


Рис. 1. Энергетическая схема основных процессов. Верхняя кривая – пропускание коллоидного раствора золотых наночастиц иллюстрирующая спектральное положение и ширину плазмонного резонанса. Внизу приведены спектры излучения квантовой ямы в ИК (слева) и видимом (справа) диапазонах. Энергия квантов возбуждающих НФЛ помечена стрелкой.

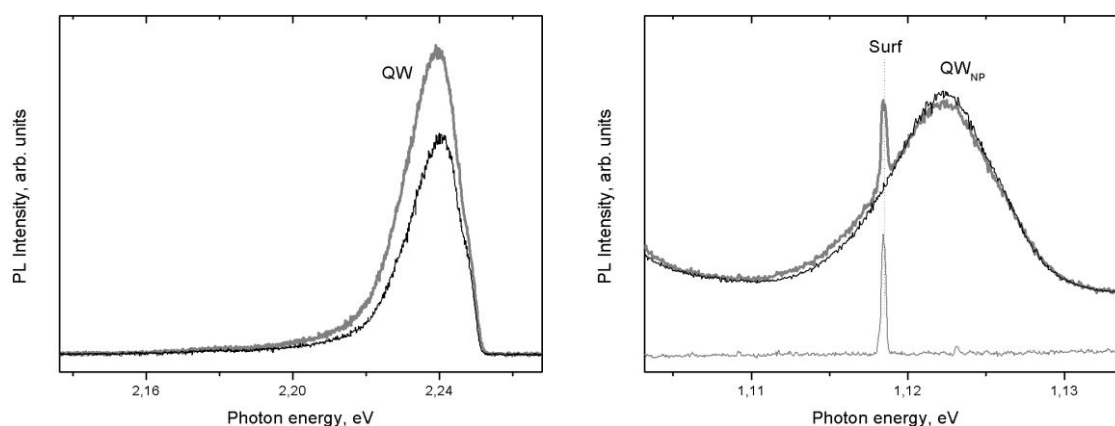


Рис. 2. Изменение спектров 2Eg (слева) и ИК (справа) люминесценции квантовой ямы при нанесении раствора с золотыми наночастицами. Черные кривые соответствуют области без наночастиц, серые – области с наночастицами поверхностная плотность которых $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Серая кривая на правом рисунке внизу иллюстрирует артефакт, связанный с люминесценцией фоновой органики присутствующей в растворе наночастиц.

Литература

- [1] Н. Н. Сибельдин, ЖЭТФ 2016 Т. 149, С. 678.
- [2] В. С. Багаев, В. С. Кривобок, С. Н. Николаев, и др. Письма в ЖЭТФ 2011 Т. 94, С. 63.
- [3] Т. М. Бурбаев, М. Н. Гордеев, Д. Н. Лобанов, и др. Письма в ЖЭТФ 2010 Т. 92, С. 341.