

УДК 535.372, 538.915

Поглощение и фотолюминесценция эпитаксиальных квантовых точек в ближнем поле серебряных наноструктур

© 2017 г. Н. А. Торопов*, канд. физ.-мат. наук; И. А. Гладских*, канд. физ.-мат. наук;
П. В. Гладских*, аспирант; А. Н. Косарев**, студент;
В. В. Преображенский***, канд. физ.-мат. наук;
М. А. Путято***, канд. физ.-мат. наук; Б. Р. Семягин***, канд. физ.-мат. наук;
В. В. Чалдышев**, доктор физ.-мат. наук;
Т. А. Вартанян*, доктор физ.-мат. наук

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

***Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск

****Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург

E-mail: nikita.a.toropov@gmail.com

Поступила в редакцию 30.01.2017

Исследованы оптические свойства гибридного материала, состоящего из полупроводниковых квантовых точек и металлических наночастиц. Полупроводниковая структура, содержащая стек из пяти слоев квантовых точек арсенида индия вблизи поверхности арсенида галлия, создана с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии. Поверхность структуры покрыта слоем наночастиц серебра, плазмонные резонансы которых близки к экситонным переходам в квантовых точках. Обнаружены длинноволновый сдвиг спектра экстинкции квантовых точек и усиление фотолюминесценции, свидетельствующие о взаимодействии между резонансами в компонентах образованной гибридной системы.

Ключевые слова: металлические наночастицы, эпитаксиальная квантовая точка, локализованный поверхностный плазмон, поглощение, люминесценция.

Коды OCIS: 310.6628, 260.2510, 300.6470

ВВЕДЕНИЕ

Гибридные экситон-плазмонные состояния в системах, состоящих из полупроводниковых квантовых точек (КТ) и металлических наночастиц (МНЧ), согласно имеющимся теоретическим результатам [1–3] обладают рядом необычных свойств, которые могут быть использованы для создания высокочувствительных сенсоров, быстродействующих переключателей, оптических линий задержки и других устройств. В связи с этим представляется своевременным проведение экспериментальных работ по проверке теоретических предсказаний и реализации указанных возможностей. Сильно связанные состояния локализованного плазмона — коллективного электронного возбуждения в МНЧ, и экситона — возбужденного состояния молекулы или полупроводниковой КТ, принято называть плекситонными [1–3]. Плекситонные состояния

возникают в специально созданных наноструктурах, в которых обе резонансные подсистемы располагаются на малых расстояниях друг от друга и сильно взаимодействуют через общее электромагнитное поле. В более широком смысле к плекситонным относятся не только те состояния, которые реализуются при сильной связи возбуждений в МНЧ и полупроводниковой КТ, но и в других системах пониженной размерности: металлических и полупроводниковых проволоках, квантовых ямах и тонких металлических пленках, в которых возбуждаются поверхностные плазмоны, в различных сочетаниях. В этих случаях эффекты сильной связи между резонансами проявляются на фоне эффектов распространения соответствующих возбуждений [4].

Если энергия экситона в полупроводниковой КТ близка к энергии плазмона в МНЧ, то сильное

взаимодействие между экситоном и плазмоном приводит к разнообразным эффектам, многие из которых имеют значительный потенциал для практического применения. К настоящему времени предсказаны не только изменения в спектрах поглощения гибридной системы [5], но и осцилляции Раби [6], плазмонно-индуцированная прозрачность [7], замедление света [8], бистабильность и гистерезис [9]. Расчеты указывают на исключительную чувствительность сенсоров, которые могут быть созданы на основе гибридного материала, как к биологическим молекулам [10], так и к гипотетическим майорановским фермионам [11]. Имеются теоретические указания на то, что гибридный материал может служить основой быстродействующих переключателей [12]. Большое число теоретических работ предсказывает различные неожиданные эффекты, которые могут наблюдаться в сильно связанных системах, аналогичных системам МНЧ — полупроводниковая КТ [13].

Для создания гибридного материала, обладающего плекситонными возбуждениями, используются разнообразные подходы. В данной работе полупроводниковые КТ арсенида индия были включены в матрицу арсенида галлия. По сравнению с гибридами на основе коллоидных КТ несомненным преимуществом полученного гибридного материала является непосредственный электрический контакт КТ арсенида индия с объемным кристаллическим полупроводниковым материалом — матрицей арсенида галлия.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ

Полупроводниковая структура, содержащая стек из 5 слоев КТ арсенида индия вблизи поверхности арсенида галлия, была создана с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии. Формирование КТ происходило по механизму Странского–Крастанова с образованием сплошного слоя, который при достижении критической толщины трансформировался в ансамбль когерентно напряженных островков InAs. Верхний слой полученных КТ был заращен чередующимися слоями арсенида галлия и арсенида алюминия общей толщиной 10 нм.

На часть полученных структур с КТ был нанесен тонкий слой серебра, который при нагревании распадался на отдельные МНЧ. Осаждение и отжиг серебряной пленки проводились в высоковакуумной камере *Kurt J. Lesker*.

Спектры оптической плотности полученных образцов измерялись на спектрофотометрах СФ-56 и *Shimadzu UV-3600* при комнатной температуре. Спектры фотолюминесценции записывались с помощью охлажденного до температуры $T \approx 100$ К германиевого диода, который находился у выходной щели двухрешеточного монохроматора СДЛ-1 фирмы ЛОМО. В монохроматоре использовались

дифракционные решетки, имеющие 300 штрихов на миллиметр. Рабочий диапазон составлял 800–2000 нм. Фотолюминесценция возбуждалась *p*-поляризованным излучением полупроводникового лазера с длиной волны 660 нм. Угол падения возбуждающего пучка света — около 45°. Лазер модулировался частотой 320 Гц. Фотоприемник подключался к синхронному детектору *Anfatec USB LockIn 250*. Средняя мощность лазера составляла порядка 80 мВт. Экспериментальная установка управлялась программным обеспечением, написанным на языке LabView.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При возбуждении излучением с длиной волны 660 нм наблюдалась люминесценция КТ арсенида индия в спектральной полосе 1,1–1,2 мкм. Для настройки частоты поверхностного плазмона, локализованного в серебряных наночастицах (СНЧ), в резонанс с экситонной полосой полупроводниковых КТ использовалась зависимость частоты локализованных плазмонов от формы и размеров частиц [14]. На рис. 1 приведено электронно-микроскопическое изображение СНЧ на поверхности арсенида галлия. Видно, что серебряная пленка состоит из частиц округлой формы с размерами от десятков до сотен нанометров. Если исходить из известных оптических постоянных серебра, то дипольный резонанс в сферической СНЧ с размерами порядка 10 нм в пустоте должен быть на длине волны 354 нм. Три фактора ведут к длинноволновому сдвигу плазмонного резонанса. Прежде всего, длинноволновый сдвиг обусловлен увеличением размеров частиц. Кроме того, из проведенных ранее экспериментов известно, что при вакуумном напылении серебра получают частицы сплюснутой формы, что так же приводит к длинноволновому сдвигу плазмонного резонанса. Наконец, дополнительный длинноволновый сдвиг обусловлен большой диэлектрической проницаемостью арсенида галлия, достигающей 12 в исследуемом диапазоне.

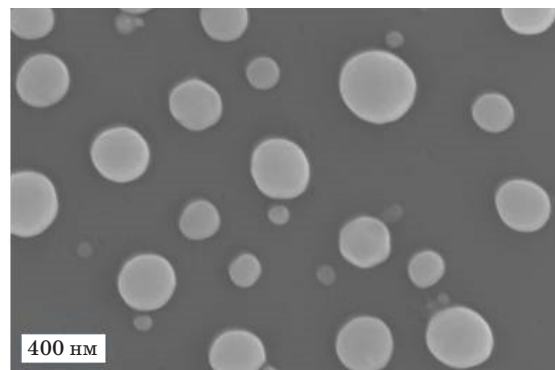


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение СНЧ на поверхности арсенида галлия.

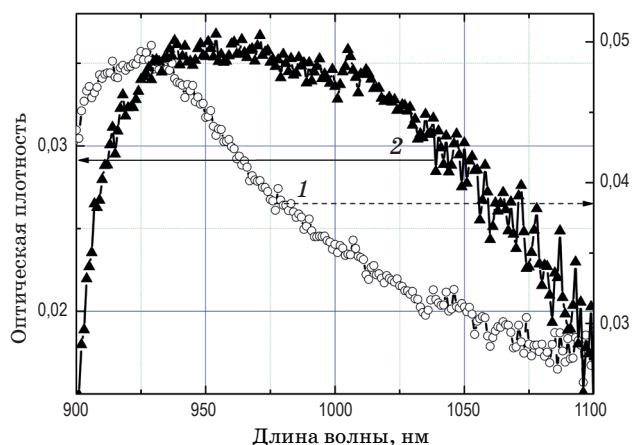


Рис. 2. Вклады в экстинкцию, обусловленные КТ арсенида индия, в отсутствие (1) и в присутствии СНЧ (2).

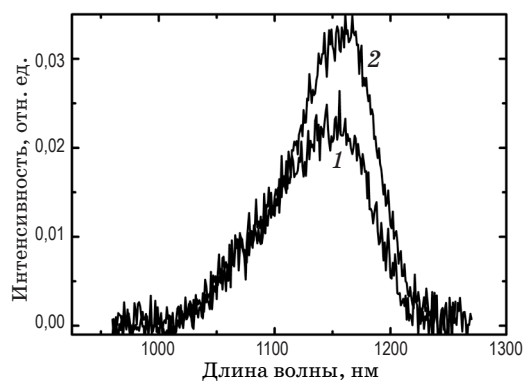


Рис. 3. Влияние СНЧ на фотолюминесценцию КТ арсенида индия в приповерхностной области арсенида галлия. 1 — без СНЧ, 2 — после нанесения СНЧ.

При нанесении серебряной пленки экстинкция полупроводниковых пластин в целом возрастает. Этот рост обусловлен, в основном, увеличением отражения серебряных частиц на арсениде галлия, которое исследовалось нами ранее [15]. На рис. 2

приведены разностные спектры экстинкции, на которых можно видеть длинноволновый сдвиг полосы экситонного поглощения КТ арсенида индия при нанесении на поверхность структуры гранулированной серебряной пленки.

Обнаружено усиление интенсивности фотолюминесценции КТ InAs в 1,5 раза в результате формирования слоя СНЧ (рис. 3). Обнаруженный эффект объясняется взаимодействием КТ и ближними полями МНЧ. Поскольку при нанесении частиц серебра отражение от образца существенно возрастает, то с учетом поправки на это полное увеличение интенсивности КТ InAs составляет 2,4 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование молекулярно-лучевой эпитаксии для создания полупроводниковых КТ в сочетании с вакуумным напылением СНЧ, поддерживающих плазмонные колебания, дало возможность получить гибридный материал, в котором спектрально совмещены резонансы плазмонного и экситонного типа. Пространственная близость МНЧ и полупроводниковых КТ позволила зарегистрировать длинноволновый сдвиг экситонного поглощения и усиление фотолюминесценции. Полученный гибридный материал выгодно отличается от известных ранее тем, что полупроводниковые КТ встроены и имеют непосредственный электрический контакт с высококачественной пластиной арсенида галлия, что открывает благоприятные перспективы для применений в оптоэлектронике.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-02-00932), Совета по грантам Президента Российской Федерации (МК 228.2017.2) и Правительства РФ (субсидия 074-U01). Авторы выражают особую благодарность Михаилу Баранову (Университет ИТМО) за помощь в получении микрофотографий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fofang N.T., Park T.H., Neumann O., Mirin N.A., Nordlander P., Halas N.J. Plexcitonic nanoparticles: Plasmon-exciton coupling in nanoshell-j-aggregate complexes // Nano Lett. 2008. V. 8. № 10. P. 3481–3487.
2. Goker A. Strongly correlated plexcitonics: Evolution of the Fano resonance in the presence of Kondo correlations // Phys. Chem. Chem. Phys. 2015. V. 17. P. 11569–11576.
3. Manjavacas A., Garcia de Abajo F.J., Nordlander P. Quantum plexcitonics: Strongly interacting plasmons and excitons // Nano Lett. 2011. V. 11. № 6. P. 2318–2323.
4. Dillu V., Rani P., Sinha R.K. Field enhanced plexcitonic coupling between InAs quantum dot and silver film: Highly sensitive plasmonic composite // Proc. SPIE. 2014. V. 9163. P. 91630W.
5. Zhang W., Govorov A.O., Bryant G.W. Semiconductor-metal nanoparticle molecules: Hybrid excitons and the nonlinear Fano effect // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. № 14. P. 146804/1–146804/4.
6. Cheng M.T., Liu S.D., Zhou H.J., Hao Z.H., Wang Q.Q. Coherent exciton-plasmon interaction in the hybrid semiconductor quantum dot and metal nanoparticle complex // Opt. Lett. 2007. V. 32. P. 2125–2127.

7. *Kosionis S.G., Terzis A.F., Sadeghi S.M., Paspalakis E.* Optical response of a quantum dot–metal nanoparticle hybrid interacting with a weak probe field // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2013. V. 25. P. 045304/1–045304/10.
8. *Lu Z., Zhu K.D.* Slow light in an artificial hybrid nanocrystal complex // *J. Phys. B.* 2009. V. 42. P. 015502/1–015502/6.
9. *Artuso R.D., Bryant G.W.* Optical response of strongly coupled quantum dot–metal nanoparticle systems: Double peaked Fano structure and bistability // *Nano Lett.* 2008. V. 8. P. 2106–2111.
10. *Hatef A., Sadeghi S.M., Boulais E., Meunier M.* Quantum dot–metallic nanorod sensors via exciton-plasmon interaction // *Nanotechnology.* 2013. V. 24. P. 1–8.
11. *Chen H.-J., Zhu K.-D.* Surface plasmon enhanced sensitive detection for possible signature of majorana fermions via a hybrid semiconductor quantum dot–metal nanoparticle system // *Sci. Rep.* 2015. V. 5. P. 13518/1–13518/11.
12. *Yang W.-X., Chen A.-X., Huang Z.W., Lee R.-K.* Ultrafast optical switching in quantum dot-metallic nanoparticle hybrid systems // *Opt. Exp.* 2015. V. 23. P. 13032–13040.
13. *Yang J.J., Perrin M., Lalanne P.* Analytical formalism for the interaction of two-level quantum systems with metal nanoresonators // *Phys. Rev. X.* 2015. V. 5. P. 021008/1–021008/9.
14. *Kelly K.L., Coronado E., Zhao L.L., Schatz G.C.* The optical properties of metal nanoparticles: The influence of size, shape, and dielectric environment // *J. Phys. Chem. B.* 2003. V. 107. P. 668–677.
15. *Gladskikh P.V., Gladskikh I.A., Toropov N.A., Baranov M.A., Vartanyan T.A.* Correlation between structural, optical, and electrical properties of self-assembled plasmonic nanostructures on the GaAs surface // *J. Nanopart. Research.* 2015. V. 17. P. 424/1–424/6.