

Экситон-Поляритоны в Плоских Волноводах Полного Внутреннего Отражения

Козлов Г.Г., Полтавцев С.В., Капитонов Ю.В., Манухова А.Д.,
Шапочкин П.Ю., Ложкин М.С., Ложкина О.А., Долгих Ю.К.
Санкт-Петербургский Государственный Университет, Россия

Введение

С момента открытия сильной связи между электромагнитным полем и материальными резонансами наблюдался постоянный рост интереса к исследованиям экситон-поляритонов в полупроводниковых гетероструктурах. Эти квазичастицы, возникающие в ходе экситон-фотонного взаимодействия, наследуют характерные свойства от своих родителей: сильную нелинейность вследствие экситон-экситонного взаимодействия и малую эффективную массу из-за своей фотонной природы. Учёные по всему миру добились огромных успехов в наблюдении ряда важных квантовых эффектов на экситон-поляритонах в высокочастотных брэгговских микрорезонаторах с квантовой ямой: стимулированного поляритонного рассеяния, поляритонной Бозе-Эйнштейновской конденсации и сверхтекучести поляритонного конденсата.

В последние годы были сделаны значительные шаги к использованию планарных волноводов в качестве среды для наблюдения бегущих поляритонов с большой дальностью распространения. Плоские волноводы полного внутреннего отражения (ПОВ ПВО) обладают рядом преимуществ по сравнению с брэгговскими: относительно небольшая толщина гетероструктуры, простота роста и практически полное отсутствие утечек света из волновода. Эти факторы и стремительный прогресс технологии молекулярно-пучковой эпитаксии для производства квантовых ям дают основания надеяться на успех в обнаружении эффекта сильной связи в таких системах.

Эксперимент

Здесь показан экспериментальный подход и представлены результаты для образца T699p2 - асимметричного ПОВ ПВО со слоем 930 нм $\text{Al}_{30\%}\text{GaAs}$ в качестве волноводного промежутка, в середине которого располагается 13.7 нм GaAs квантовая яма. Обкладкой волновода служат вакуум и слой $\text{Al}_{30\%}\text{GaAs}$ толщиной 960 нм.

Прежде всего необходимо решить проблему ввода света в образец. Невозможно напрямую возбудить одну из мод плоского волновода ПВО из верхнего или нижнего полупространства, потому что нельзя получить угол распространения света внутри волноводного промежутка, превышающий характеристический угол для границы обкладка-сердцевина. Очевидным решением является засветка образца с торца. Этот вариант требует решения ряда сложных инженерных задач из-за малого размера волноводного промежутка (930 нм): размещения микрообъектива внутри холодного пальца криостата, идеальной юстировки оптики и полного отсутствия вибраций в схеме.

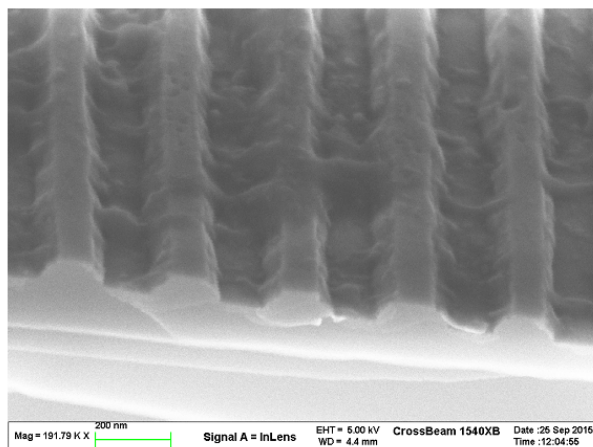


Рис.1. Дифракционная решетка, нанесённая на поверхность образца методом травления Ag^+ плазмой через PMMA-маску.

Кроме этого ввод света в ПОВ ПВО может быть осуществлён через дифракционную решетку, размещённую на поверхности образца. Этот способ позволяет обойти закон преломления Снелла и аккуратным подбором параметров достичь любого желаемого значения угла распространения света в сердцевине волновода. С помощью травления направленным потоком ионной Ar^+ плазмы через РММА-маску, нанесённую методом электронной литографии, на поверхности образца был создан набор дифракционных решеток с шириной 300 мкм, периодом 250 нм и глубиной 100 нм. Период был выбран так, чтобы внутри волноводного промежутка существовал лишь первый дифракционный порядок с углом дифракции около 70° , что практически совпадает с углом распространения низшей моды для волновода с заданными геометрическими параметрами и химическим составом. Результаты, представленные здесь, были получены для решетки #3 с расстоянием от края решетки до торца в 100 мкм (Рис.1).

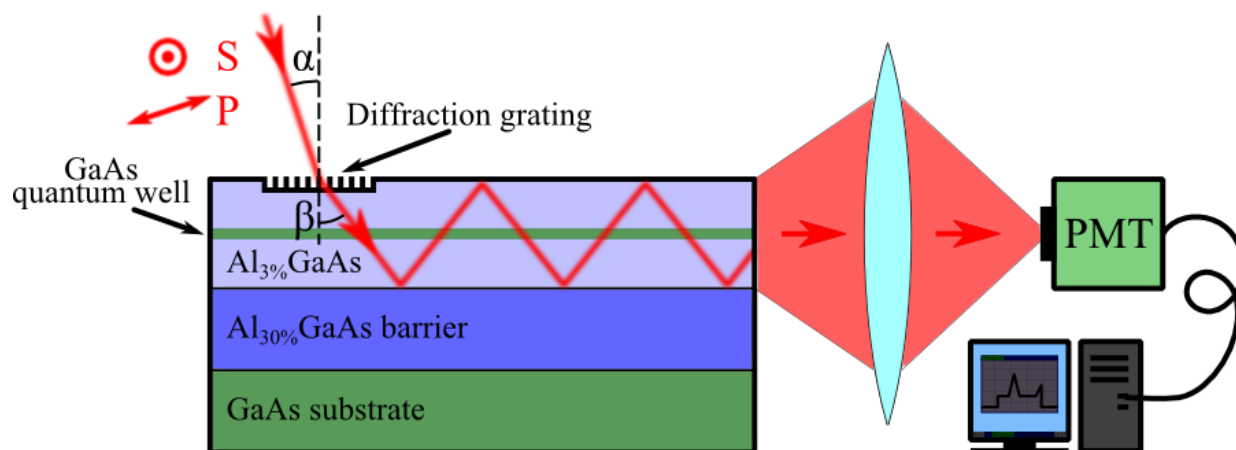


Рис.2. Схема эксперимента.

В ходе эксперимента образец находится в гелиевом криостате замкнутого цикла Cryomech ST15 при температуре 10К. Свет перестраиваемого CW-лазера Sacher Lasertechnik Lynx TEC-120 вводится в низшую волноводную моду первым дифракционным рефлексом решетки. Свет, выходящий с торца образца, собирается короткофокусным объективом в большом телесном угле и детектируется с помощью ФЭУ (Рис.2). Экспериментальная установка позволяет осуществлять быстрое сканирование угла падения света на образец α и медленное сканирование энергии фотонов E пробного лазерного света.

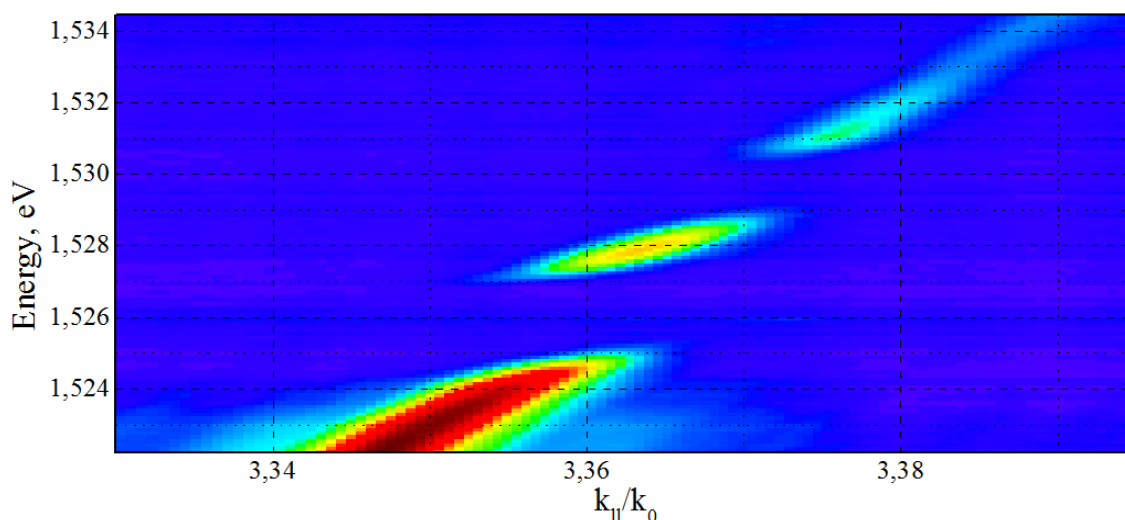


Рис.3. Трёхмерные данные, полученные в эксперименте: спектрально-угловая зависимость интенсивности сигнала.

Результаты

Вдали от экситонных резонансов зависимость интенсивности сигнала от угла падения света при заданной длине волны имеет максимум, соответствующий фотонной моде волновода ПВО с поляризационным расщеплением 4 мЭВ. При энергиях, близких к резонансам экситона с тяжелой дыркой (НН) и лёгкой дыркой (ЛН) мы наблюдаем эффект антипересечения вследствие наличия сильной связи между фотонной и экситонной модами (Рис.3&4). Максимальное расщепление для НН-экситона было достигнуто в S-поляризации (с расщеплением Раби $\Omega_{\text{НН, S}} = 2.6$ мЭВ). Для ЛН-экситона - в Р-поляризации с $\Omega_{\text{ЛН, P}} = 2.8$ мЭВ.

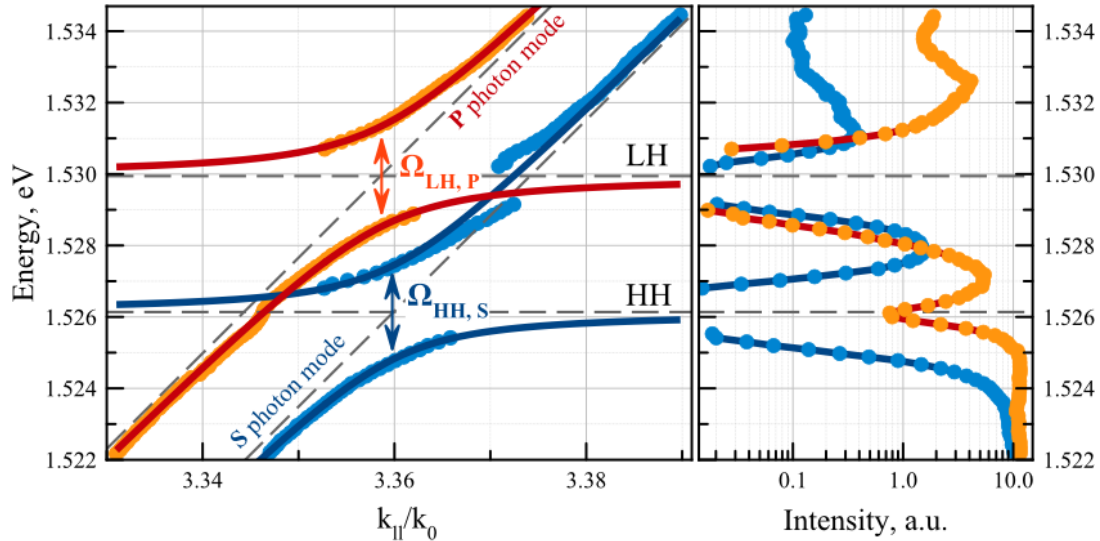


Рис.4. Угловая зависимость энергетического положения максимума сигнала и спектральная зависимость интенсивности сигнала.

Данные исследования частично поддержаны РФФИ, грант No. 15-02-07668 а.

Работа выполнена на оборудовании ресурсного центра "Нанофотоника" (<http://www.photon.spbu.ru>).

Более подробную информацию о экситон-поляритонах в брэгговских волноводах и волноводах ПВО можно найти в следующих публикациях:

- [1] C. Weisbuch, M. Nishioka, A. Ishikawa, and Y. Arakawa, Phys. Rev. Lett. 69 N23, 3314 (1992).
- [2] J. Kasprzak et al., Nature 443, 409-414 (2006).
- [3] A. Amo et al., Nature Physics 5, 805-810 (2009).
- [4] P. M. Walker et al., Appl. Phys. Lett. 102, 012109 (2013).

Информацию об успехах технологии молекулярно-пучковой эпитаксии в производстве квантовых ям можно найти в недавних публикациях нашего научного коллектива:

- [1] S.V. Poltavtsev et al., Solid State Comm. 199, 47-51 (2014).
- [2] I.A. Solovev et al., Journal of Physics: Conference Series 643, 012085 1-4 (2015).