

Электрон-дырочные комплексы в низкоразмерных полупроводниковых структурах

М. А. Семина

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

Среди областей современной физики конденсированного состояния в качестве одной из наиболее актуальных и быстро развивающихся можно выделить физику полупроводниковых систем пониженной размерности (наноструктур) [1,2]. В таких структурах движение носителей заряда ограничено в одном или нескольких пространственных направлениях. Изучение оптических свойств наноструктур приобретает большую значимость, поскольку позволяет получить сведения об энергетическом спектре и элементарных возбуждениях изучаемого объекта. Уменьшение размерности системы приводит к значительным перестройкам энергетического спектра и качественным изменениям оптических свойств, что, в свою очередь, влечет появление новых физических эффектов.

Вблизи фундаментального края поглощения оптические свойства полупроводников и наноструктур на них основе определяются, главным образом, кулоновскими комплексами с небольшим числом частиц: экситонами (электрон-дырочными парами), заряженными экситонами или трионами (трехчастичными комплексами) и биэкситонами. Очевидно, что знание энергетического спектра и волновых функций таких комплексов необходимо для понимания широкого круга оптических явлений в наноструктурах.

В данной лекции приводится обзор достижений в теоретическом анализе строения и энергий связи электрон-дырочных комплексов в наноструктурах. Поскольку структура комплекса определяется конкуренцией различных энергетических параметров, например, энергии кулоновского взаимодействия и размерного квантования, то основное внимание уделено анализу предельных случаев, где строение комплекса может быть установлено из физических соображений, а также построению простых и физически обоснованных волновых функций экситонов и трионов.

План лекции:

1. Идеальные низкоразмерные системы

Вначале рассмотрим экситоны и трионы в идеальных системах различной размерности. Экситон представляет собой двухчастичный водородоподобный электрон-дырочный комплекс. Трионы — трехчастичные комплексы. Различают два типа трионов — X^- -трион (два электрона и дырка) и X^+ -трион (две

дырки и электрон). Стабильность обоих типов трионов в объемных полупроводниках была установлена теоретически еще в 1977 году [3], но малость их энергии связи не позволила обнаружить их экспериментально. Переход к двумерным системам (так можно описывать очень узкие и глубокие квантовые ямы) приводит к росту энергии связи экситона в 4 раза. Энергия связи трионов увеличивается при таком переходе почти на порядок [4]. Впервые трионы были обнаружены именно в квантовых ямах [5]. При переходе к одномерным структурам — квантовым проволокам — энергия связи кулоновских комплексов логарифмически расходится [6], однако в реальных полупроводниковых системах логарифмический предел не достигается.

2. Пространственно-разделенные комплексы

Развитие технологий роста наноструктур открывает возможности «инженерии» волновых функций. К примеру, в последнее время активно синтезируются и изучаются системы с пространственным разделением заряда, например, структуры, где электроны и дырки локализованы в разных квантовых ямах. Рассмотрим пространственно кулоновский комплекс: электрон находится в одной квантовой яме, а дырка — в другой, или электрон в квантовой яме, взаимодействующий с донором, находящимся в барьере. Можно выделить два предельных случая: малое расстояние между частицами (соответствует двумерному атому водорода) и большое расстояние между частицами (соответствует двумерному изотропному гармоническому осциллятору). В каждом из перечисленных случаев состояния комплекса сильно вырождены (так называемое случайное вырождение). Исследуется переход между предельными случаями атома водорода и гармонического осциллятора [6].

3. Локализация экситонов на флуктуациях интерфейсов квантовых ям и квантовых проволок

В реальных полупроводниковых структурах неизбежно присутствуют неоднородности, такие как, например, флуктуации ширины квантовой ямы или радиуса квантовой проволоки. Предложена модель для описания флуктуации, в которой ее действие на носители заряда описывается при помощи эффективного потенциала для электрона и дырки. Особенность такого потенциала — одинаковый знак для электрона и для дырки. В предельных случаях: «сильный» и «слабый» потенциала флуктуации вид волновой функции электрон-дырочного комплекса известен из физических соображений. Энергия связи основного состояния электрон-дырочного комплекса вычисляется при помощи вариационного метода, где в качестве пробной выбрана функция с малым числом подгоночных параметров, которая может принимать формы, соответствующие выделенным предельным случаям и плавно интерполирующая меж-

ду ними. Предложенный метод применим для неоднородности произвольной формы. В лекции представлены результаты для экситонов и трионов, локализованных на неоднородностях интерфейсов квантовых ям и квантовых проволок. Проводится анализ результатов и сравнение с экспериментом [7–10].

4. Влияние сложной структуры валентной зоны на свойства электрон-дырочных комплексов

Как правило, переход от объемных материалов к низкоразмерным структурам сопровождается усилением межчастичного взаимодействия и, как следствие, к увеличению энергии связи кулоновских комплексов. Однако в системах со сложной структурой валентной зоны это может быть не так. Рассмотрим нейтральный акцептор — комплекс, состоящий из дырки, локализованной на отрицательно заряженном центре. Локализация в гетероструктуре приводит не только к усилению кулоновского притяжения дырки к центру, но и к уменьшению эффективной массы дырки, ведущему к уменьшению энергии связи акцептора. В лекции продемонстрирована возможность появления немонотонной зависимости энергии связи акцептора от характерных размеров структуры. Проводится сравнение результатов для квантовых ям и квантовых проволок [11].

5. Заключение

Оригинальные результаты, изложенные в лекции, получены совместно с Р. А. Сергеевым и Р. А. Сурисом. Работа поддержана грантом фонда РФФИ и программой Президиума РАН.

Литература

- [1] J. Davies, *The physics of low-dimensional semiconductors*, Cambridge University Press, 1998.
- [2] E. L. Ivchenko, *Alpha Science*, Harrow UK, 2005.
- [3] B. Stebe, C. Comte, *Phys. Rev. B* **15**, 3967 (1977).
- [4] B. Stebe, A. Ainane, *Superlatt. Microstruct.* **5**, 545 (1989).
- [5] M. A. Lampert, *Phys. Rev. Lett.* **1**, 450 (1958).
- [6] М. А. Семина, Р. А. Сурис, *Письма в ЖЭТФ* **94**(7), 614-618 (2011).
- [7] М. А. Семина, Р. А. Сергеев, Р. А. Сурис, *ФТП* **40**, 1373-1380 (2006).
- [8] М. А. Семина, R. A. Sergeev and R. A. Suris, *Physica E* **40**, 5, 1357-1359 (2008).
- [9] М. А. Семина, Р. А. Сергеев, Р. А. Сурис, *ФТП*, **42** (12), 1459-1465 (2008).
- [10] М. А. Семина, Р. А. Сергеев, Р. А. Сурис, *ФТП*, **43**(9), 1222-1231 (2009).
- [11] М. А. Семина, Р. А. Сурис, *ФТП*, **45**(7), 947-955 (2011).