Теория ридберговских экситонов в закиси меди

Семина М.А.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

DOI 10.34077/Semicond2019-39

Экситон – связанная кулоновским притяжением пара, состоящая из электрона и дырки, играет ключевую роль в оптических свойствах полупроводниковых кристаллов и наноструктур. Закись меди (Cu_2O) является уникальным полупроводником, где сочетаются большая энергия связи экситона $E_b \approx 87$ мэВ и высокое качество природных кристаллов. Именно в кристаллах Cu_2O Е.Ф. Гросс и Н.А. Каррыев в ФТИ им. А.Ф. Иоффе сделали открытие — обнаружили проявления экситонов Ванье–Мотта в спектрах поглощения [1]. В недавних экспериментах, выполненных в Техническом университете Дортмунда (Германия), в этом материале наблюдались высоковозбужденные состояния экситона с главным квантовым числом n вплоть до 25 [2]. Такие экситоны демонстрируют свойства, аналогичные ридберговским – высоковозбужденным – атомам, а наблюдение аналогов ридберговских атомов в полупроводниках значительно облегчило исследования в этой области квантовой физики.

В отличие от атомов, экситон находится в кристаллической решетке, что приводит как к количественным (например, уменьшение энергии связи за счет эффектов экранирования и перенормировки эффективных масс), так и к качественным изменениям их свойств благодаря понижению симметрии, смешиванию состояний различных зон, параметрически сильному спин-орбитальному взаимодействию. Особенность закиси меди – сопоставимые величины энергии связи экситона и значения спин-орбитального расщепления верхних подзон валентной зоны, что требует учета сложной структуры валентной зоны при исследовании экситонных эффектов в Cu_2O .

В докладе дается обзор основных достижений в исследовании ридберговских экситонов в закиси меди. Обсуждается тонкая структура энергетического спектра экситонов и продемонстрировано, что смешивание состояний экситонов с разным угловым моментом приводит к особенностям в ридберговской серии в спектре поглощения. Сопоставление теории и эксперимента позволяет уточнить параметры Латтинжера закиси меди [3]. Предложены различные модели для описания экситонных состояний в Cu_2O , отличающиеся по вычислительной сложности [4]. Далее анализируются скейлинговые закономерности экситонных параметров в зависимости от главного квантового числа. Выявлены отличия от водородоподобной модели, например, поведение поляризуемости экситонов в электрическом поле описывается законом n^7 (в отличие от водородоподобной модели со скейлингом n^6). Полученные скейлинговые закономерности находятся в хорошем согласии с данными экспериментов [5].

Значительный размер ридберговских экситонов делает их исключительно подверженным воздействию внешних полей: электрического и магнитного. Приводятся результаты комплексного исследования электрооптических свойств Cu_2O в экситонной области спектра, включая эффект Штарка и диссоциацию экситонов во электрическом поле. Анализируется конкуренция электро-дипольных и квадрупольных механизмов оптических переходов, которая приводит к оптической анизотропии кубического кристалла. Показано, что при диссоциации экситонов под действием статического электрического поля внутри мультиплета с заданным квантовым числом, уровни с большей энергией ионизируются в больших электрических полях. Такое неожиданное, на первый взгляд, поведение связано профилем волновых функций экситонов в электрическом поле [6,7].

В заключение доклада будут кратко описаны особенности нелинейно оптических явлений (двухфотонного поглощения и генерации второй гармоники) на ридберговских экситонах в Cu_2O .

[1] Е.Ф. Гросс, Н.А. Каррыев, ДАН СССР 84, 471 (1952).

[2] T. Kazimierczuk et al., *Nature* 514, 343 (2014).

[3] J. Thewes, J. Heckötter, T. Kazimierczuk, M. Assmann, D. Fröhlich, M. Bayer, M.A. Semina, and M.M. Glazov, *Phys. Rev. Lett.* 115, 027402 (2015).

[4] М.А. Семина, ФТТ 60, 1515 (2018).

[5] J. Heckötter, M. Freitag, D. Fröhlich, M. Aßmann, M. Bayer, M. A. Semina, and M. M. Glazov, *Phys. Rev. B* 96, 125142 (2017).

[6] J. Heckötter, M. Freitag, D. Fröhlich, M. Aßmann, M. Bayer, M. A. Semina, and M. M. Glazov, *Phys. Rev. B* 95, 035210 (2017).

[7] J. Heckötter, M. Freitag, D. Fröhlich, M. Aßmann, M. Bayer, M.A. Семина, М.М. Глазов, ФТТ 60, 1495 (2018).