

537.311.33(048)

А. С. Каминский, В. А. Карасюк, Я. Е. Покровский. Многочастичные экситон-примесные комплексы в полупроводниках. В идеальной кристаллической решетке электроны и дырки можно рассматривать как почти свободные частицы, аналогичные электронам и позитронам в свободном пространстве. Отличие заключается в том, что электроны и дырки характеризуются эффективной массой, которая может сильно отличаться от массы свободного электрона и обладать сильной анизотропией. Кроме того, электростатическое взаимодействие между заряженными частицами сильно ослаблено благодаря большой диэлектрической проницаемости кристаллов. Это приводит к изменению характерных масштабов расстояний и энергий связанных состояний электронов и дырок. Исходя из аналогии между электронами и дырками и элементарными частицами и учитывая различные возможности в соотношениях их эффективных масс, М. Ламперт¹ в 1958 г. предсказал возможность существования в полупроводниках ряда подвижных и неподвижных электронно-дырочных комплексов, некоторые из которых были затем обнаружены экспериментально. В частности, им было предсказано существование связанного экситона, возникающего при захвате свободного экситона нейтральным донором или акцептором. В 1960 г. Дж. Хейнс² экспериментально обнаружил связанные экситоны в кремнии, легированном элементами III или V групп по появлению узких пиков люминесценции, возникающих при аннигиляции электрона и дырки в связанном экситоне. В 1970 г. А. С. Каминский и Я. Е. Покровский³, исследуя при 4,2 К фотолюминесценцию кремния, содержавшего примесь бора, обнаружили серии узких пиков излучения, возгарающихся последовательно по мере увеличения уровня возбуждения. Происхождение этих пиков было объяснено захватом нескольких (m) экситонов на атомы бора, в результате которого возникает коллективное состояние, содержащее однократно заряженный примесный ион, m носителей (электронов или дырок) того же знака заряда, что и у примесного иона и $m + 1$ носитель с противоположным знаком заряда. Эти состояния получили название многочастичных экситон-примесных комплексов.

Согласно оболочечной модели, предложенной Г. Кирженовым⁴ в 1977 г. электроны и дырки в комплексах занимают оболочки, волновые функции на которых имеют кратность вырождения и симметрию волновых функций простого донора и акцептора. Так, два электрона в комплексах, связанных на донорах V группы в кремнии, заполняют оболочку, ближайшую к примесному иону. Далее следует четырехкратно вырожденная дырочная оболочка, за которой расположены электронные оболочки, вмещающие до 10 электронов. Таким образом, благодаря высокой кратности вырождения, в полупроводниках возможно существование комплексов, содержащих большое число электронов и дырок. В случае электронов и позитронов, наинизшее состояние которых вырождено лишь по спину, существование аналогичных комплексов невозможно. При рекомбинации дырки с электроном из внутренней оболочки испускаются линии α -серии, при рекомбинации с внешним электроном — более коротковолновой β -серии. Эти серии наблюдаются экспериментально (см., например,^{5,6}). При одноосных деформациях кремния четырехкратно вырожденная дырочная оболочка расщепляется на две двукратно вырожденные. Это приводит к раздвоению линий люминесценции, а при больших деформациях — к исчезновению комплексов, содержащих более двух дырок⁷. Одноосная деформация приводит также к поляризации излучения комплексов. Поляризация была рассчитана на основе симметрии волновых функций, предсказанной оболочечной моделью и оказалась в хорошем согласии с экспериментом⁸.

В совершенных кристаллах кремния методом интерференционной спектроскопии удалось разрешить тонкую структуру линий излучения комплексов, в том числе при различных одноосных деформациях. Основные особенности тонкой структуры были интерпретированы в предположении, что она определяется спариванием моментов дырок и обменным взаимодействием дырок с электронами внешних оболочек^{9,10}. Кроме того, показано, что один из электронов в комплексах, связанных на донорах, локализован вблизи примесного иона столь же сильно, как и в нейтральном доноре.

Спектральный анализ люминесценции многочастичных экситон-примесных комплексов позволяет легко определять содержание элементов III и V групп даже в наиболее чистых монокристаллах кремния¹¹.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lampert M. — Phys. Rev. Lett., 1958, v. 1, p. 450.
2. Haynes J. — Phys. Rev. Lett., 1960, v. 4, p. 361.
3. Каминский А. С., Покровский Я. Е. — Письма ЖЭТФ, 1970, т. 11, с. 381.
4. Kirsznow — Can. J. Phys., 1977, v. 55, p. 1787.
5. Каминский А. С., Покровский Я. Е. — В кн. Проблемы современной радиотехники и электроники. — М.: Наука, 1980. — С. 455.
6. Кулаковский В. Д., Пикус Г. Е., Тимофеев В. Е. — УФН, 1981, т. 135, с. 237.

7. Каминский А. С., Карасюк В. А., Покровский Я. Е. — ЖЭТФ, 1978, т. 74, с. 2234.
8. Каминский А. С., Покровский Я. Е. — ЖЭТФ, 1979, т. 76, с. 1727.
9. Каминский А. С., Карасюк В. А., Покровский Я. Е. — ЖЭТФ, 1982, т. 83, с. 2237.
10. Карасюк В. А., Покровский Я. Е. — Письма ЖЭТФ, 1983, т. 37, с. 537.
11. Каминский А. С., Колесник Л. И., Лейферов Б. М., Покровский Я. Е. — ЖПС, 1982, т. 36, с. 745.