

ЗЕЕМАНОВСКОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ В СПЕКТРАХ ИЗЛУЧЕНИЯ
МНОГОЧАСТИЧНЫХ ЭКСИТОННО-ПРИМЕСНЫХ КОМПЛЕКСОВ В КРЕМНИИ

В.Д. Кулаковский, А.В. Малявкин, В.Б. Тимофеев

Наблюдаемая картина зеемановского расщепления линий излучения многочастичных экситонно-примесных комплексов (Ξ_m ПК) в недеформированном и одноосно деформированном кремнии с примесью фосфора подтверждает оболочечную модель Ξ_m ПК.

В спектрах рекомбинации непрямых полупроводников, содержащих мелкие примесные центры, при достаточно высоких плотностях возбуждения и низких температурах появляются серии узких линий. Впервые такая линейчатая структура была обнаружена в кристаллах кремния с примесью атомов бора и интерпретировалась как результат излучения экситонов в многочастичном экситонно-примесном комплексе Ξ_m^m ПК (где m — число экситонов, связанных с центром) [1]. Для объяснения природы Ξ_m ПК недавно была предложена оболочечная модель (ОМ) [2]. Согласно этой модели электроны и дырки в многочастичном комплексе последовательно заполняют оболочки в соответствии с принципом Паули. Благодаря вырождению зон, в комплексе количество одночастичных электронных состояний, характеризующихся главным квантовым числом, увеличивается в соответствии с кратностью вырождения. Оболочечная модель позволяет расклассифицировать электронные состояния комплекса по типам симметрии, предсказывает число линий в спектрах рекомбинации и их тонкую структуру. ОМ хорошо описывает особенности спектров излучения Ξ_m ПК в Si, не подвергнутом внешним воздействиям [3, 4], а также в одноосно-деформированных кристаллах [5]. В частности в [5] было показано, что вырождение зон является необходимым условием образования Ξ_m ПК в Si.

Одна из прямых проверок ОМ состоит в исследовании спектров Ξ_m ПК в магнитном поле. В рамках этой модели бесфононные линии излучения (α -линии) Ξ_m ПК на нейтральном доноре отвечают рекомбинации электронов из внутренней Γ^1 -оболочки, двукратно вырожденной по спину. В магнитном поле число зеемановских компонент для α -линий с учетом всех разрешенных переходов между расщепленными по спину состояниями должно оставаться постоянным. Это не противоречит экспериментальным наблюдениям в условиях, когда расщепление уровней $g\mu H \approx kT$ [6]. Более целесообразно сравнивать спектр зеемановского расщепления Ξ_m ПК с картиной расщепления, следующей из представленной ОМ, когда возбужденные по спину состояния не заселены.

В настоящей работе исследовались спектры излучения Ξ_m ПК в кремнии с донорной примесью при 1,8 К в достаточно сильных магнитных по-

лях, когда величина расщепления $g\mu H \gg 3kT$. Благодаря сильному различию интенсивностей зеемановских компонент, обусловленных переходами из основного и возбужденных состояний, интерпретация результатов становится в этих условиях однозначной. Кроме этого, исследовалось излучение \mathcal{E}_m ПК в одноосно деформированном кремнии в полях, отвечающих $g\mu H = (1 \pm 3)kT$. Из-за снятия вырождения в валентной зоне под действием деформации картина зеемановского расщепления существенно упрощается.

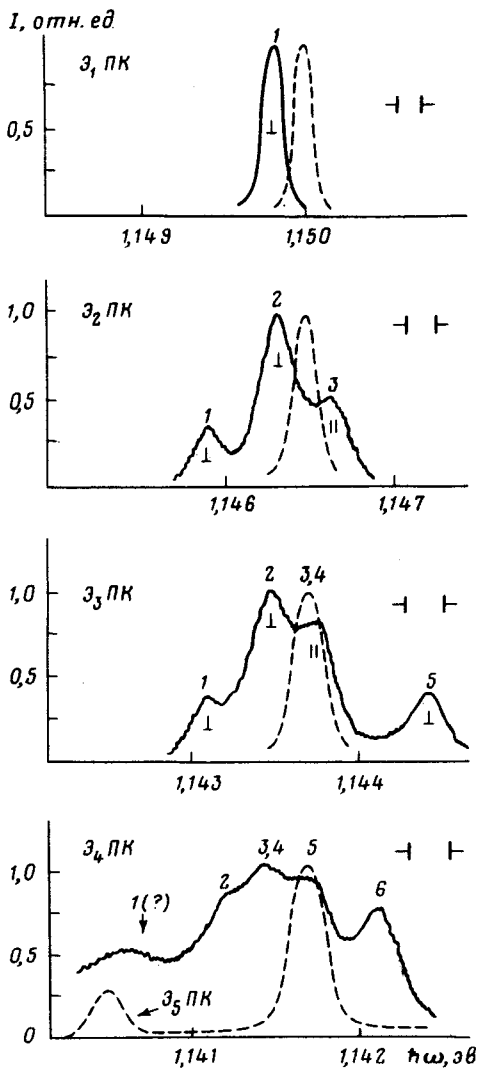


Рис. 1. Расщепление бесфононных линий излучения \mathcal{E}_m ПК в недеформированных кристаллах Si(P) при $T = 1,8$ К и $H = 62$ кэ. $\mathbf{H} \parallel [111]$ и $\mathbf{H} \perp \mathbf{k}$. Пунктиром показан спектр \mathcal{E}_m ПК, соответствующий $H = 0$. Излучение, поляризованное вдоль и перпендикулярно \mathbf{H} обозначено символами \parallel и \perp .

Использовались образцы Si, легированного фосфором ($N_p = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$). Возбуждение осуществлялось аргоновым лазером, излучение регистрировалось охлаждаемым ФЭУ с катодом S-1, для которого обеспечивался режим счета фотонов. Магнитное поле направлялось вдоль оси $[111]$, излучение регистрировалось в конфигурации Фойгта ($\mathbf{H} \perp \mathbf{k}$). Спектры для четырех α -линий в недеформированном Si при 1,8 К и $H = 62$ кэ представлены на рис. 1.

Согласно ОМ α -линии соответствуют рекомбинации электрона из внутренней оболочки Γ^1 с дыркой симметрии Γ^8 . Волновая функция системы электронов и дырок в ОМ аппроксимируется антисимметричным произведением одночастичных волновых функций [2]. Вероятности различных переходов выражаются при этом через известные скорости рекомбинации отдельных электронов и дырок [2,7]. Рекомбинация электронов и дырок с проекциями моментов s_z и j_z при изменении $\Delta(s_z + j_z) \geq 2$ запрещена. В конфигурации $\mathbf{H} \perp \mathbf{k}$ излучение, возникающее при рекомбинации электрона и дырки с изменением $\Delta(s_z + j_z) = \pm 1$, поляризовано в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, а при $\Delta(s_z + j_z) = 0$ — вдоль поля [7].

Возможные переходы из основного состояния для \mathcal{E}_m^m ПК ($m = 1 - 4$) в случае недеформированного Si приведены в таблице. Видно, что экспериментально наблюдаемое число зеемановских компонент в линиях \mathcal{E}_m^m ПК, их поляризация хорошо согласуются с ожидаемыми в рамках ОМ. Линии излучения, отвечающие рекомбинации электронов, у которых $s_z = \pm 1/2$, с дырками, у которых $j_z = \pm 1/2$, не удается разрешить из-за близких значений g -факторов g_e и $g_h 1/2$. В спектре \mathcal{E}_4^m ПК не разрешается компонента, отвечающая переходу 1. Заметим однако, что в соответствующей области спектра накладываются зеемановские компоненты линии \mathcal{E}_3^m ПК.

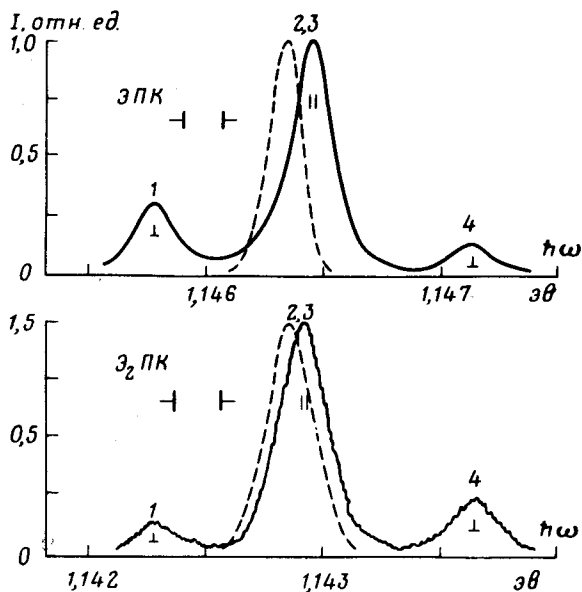


Рис.2 Расщепление бесфононных линий излучения \mathcal{E}_m^m ПК в деформированных кристаллах Si (P) при $T = 1,8\text{K}$, $H = 62\text{кэ}$, $\mathbf{H} \parallel [111]$, $\mathbf{P} \perp \mathbf{H}$ и $P = 10\text{кг/мм}^2$. Пунктиром показан спектр \mathcal{E}_m^m ПК при $H = 0$ и $P = 10\text{кг/мм}^2$

Картина расщепления уровней \mathcal{E}_m^m ПК в магнитном поле сильно упрощается в деформированном Si. В условиях сильной одноосной деформации в Si образуются комплексы лишь с одним и двумя связанными

экситонами [5]. При давлении $P \parallel [111]$ зона проводимости не изменяется, а валентная зона расщепляется на две двукратно вырожденные по спину. В сильно деформированном Si дырки в Ξ_m ПК заполняют двукратно вырожденную по спину ($J_z = \pm 1/2$) оболочку Γ^4 . Спектры зеемановского расщепления Ξ_1 ПК и Ξ_2 ПК представлены на рис. 2, а возможные переходы согласно ОМ — в таблице. Компоненты, отвечающие переходам 2 и 3, не удается разрешить из-за близких значений g -факторов электронов и дырок. Поляризация компонент соответствует ожидаемой в рамках ОМ. В согласии с ОМ интенсивность линии 4 в Ξ_1 ПК уменьшается с ростом расщепления основного состояния, тогда как в Ξ_2 ПК соотношение интенсивностей между компонентами 1 и 4 не изменяется. Неожиданным оказалось то, что отношение интенсивностей зеемановских компонент 4 и 1 для Ξ_1 ПК и Ξ_2 ПК заметно превышает ожидаемое (в Ξ_1 ПК это отношение определяется фактором $\exp(-g\mu H_z/kT)$, а в Ξ_2 ПК интенсивности компонент 1 и 4 должны совпадать). Возможная причина такой аномалии кроется в случае Ξ_1 ПК в том, что в деформированных кристаллах Si отсутствует равновесие между спиновыми подуровнями.

Таким образом, оболочечная модель в основном хорошо описывает наблюдаемое в эксперименте зеемановское расщепление в спектрах многочастичных экситонно-примесных комплексов в деформированном и недеформированном кремнии. В заключение отметим, что найденные по величине расщеплений линий излучения g -факторы для электронов и дырок оказались в пределах ошибки измерений одинаковыми для всех комплексов, а именно: $g_e = 1,9 \pm 0,1$; $g_{h\ 1/2} = 1,7 \pm 0,2$; $g_{h\ 3/2} = 1,1 \pm 0,2$. Эти значения согласуются с определенными в [8] для связанных экситонов в Si, легированном As, однако отличаются от g -факторов электронов, связанных с донором, и дырок, связанных с акцептором ($g_e = 2,0$; $g_{h\ 3/2} = g_{h\ 1/2} = 1,2$ [8]).

Авторы благодарят Г.Е.Пикуса за ценные обсуждения, предшествовавшие выполнению данной работы, и В.М.Хохлова за помощь при проведении эксперимента.

Институт физики твердого тела
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
12 апреля 1978 г.

Литература

- [1] А.С.Каминский, Я.Е.Покровский, Н.В.Алкеев. ЖЭТФ, **59**, 1937, 1970.
- [2] G.Kirczenow. Sol. State Comm., **21**, 713, 1977; Can. J. Phys., **55**, 1787, 1977.
- [3] M.L.W.Thewalt. Can. J. Phys., **55**, 1463, 1977.
- [4] R.R.Parsons. Sol.State Comm., **22**, 671, 1977.
- [5] В.Д.Кулаковский. Письма в ЖЭТФ, **27**, 217, 1978.
- [6] R.Sauer, J.Weber. Phys. Rev.Lett., **36**, 48, 1976.
- [7] Г.Е.Пикус. ФТТ, **19**, 1653, 1977.
- [8] J.M.Chervov, R.L.Aggarval, B.Lax. Phys. Rev., **B7**, 4547, 1973.