

ОБРАТНАЯ ВОДОРОДОПОДОБНАЯ СЕРИЯ В ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРАХ КРИСТАЛЛОВ ZnP_2

А.В.Селькин, И.Г.Стамов, Н.Н.Сырбу, А.Г.Уманец

В области края фундаментального поглощения моноклинного кристалла ZnP_2 обнаружена сходящаяся в длинноволновую сторону серия из 8 линий поглощения, описываемая формулой водородоподобного образования с отрицательной приведенной массой. Результаты интерпретируются в рамках модели биелектронно-примесного комплекса.

В 1971 г. Гросс, Перель и Шехмаматьев [1], исследуя оптические спектры кристаллов ViJ_3 вблизи края фундаментального поглощения, обратили внимание на водородоподобную серию из 4 резонансных линий поглощения и излучения, сходящуюся не в коротковолновую (КВ), как обычно, а в длинноволновую (ДВ) область спектра. Для объяснения столь необычного явления авторами [1] было высказано предположение о том, что обратная водородоподобная серия (ОВС) линий отражает энергетический спектр двух одноименно заряженных частиц, имеющих отрицательную приведенную эффективную массу. Возможность существования такой системы обсуждалась ранее в работе [2] в связи с анализом магнитокулоновских уровней вблизи седловых точек.

В серии дальнейших работ [3] экспериментальные результаты [1] были интерпретированы в рамках модели биелектрона (бихола) – связанного состояния двух электронов (дырок), принадлежащих разным зонам проводимости (валентным зонам). Однако, впоследствии [4, 5] были высказаны сомнения относительно единой природы наблюдаемых в ViJ_3 линий. Кроме того, до сих пор ViJ_3 представлял собой единственный кристалл, для которого вообще ставился вопрос об ОВС.

В настоящей работе мы впервые приводим результаты исследования ОВС в моноклинных кристаллах ZnP_2 (черная модификация, симметрия C_{2h}^5), которые по своему химическому составу и структуре существенно отличаются от ViJ_3 . Исследованные нами кристаллы ZnP_2 были выращены из газовой фазы и представляли собой образцы *n*-типа с концентрацией носителей $10^{19} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Спектры изучались при температурах 2 и 77К на установке, собранной на базе спектрометра ДФС-24 при спектральной ширине щели 0,2 Å.

На рис.1 изображены спектры пропускания моноклинного кристалла ZnP_2 (поляризация $E \perp C_2$, направление распространения света $K \perp C_2$) при температурах 2К (кривые *a*, *a'*) и 77К (кривая *b*). Обращают на себя внимание похожие по структуре группы линий. Наиболее интенсивные и самые коротковолновые в этих группах "головные" линии (обозначенные вертикальными стрелками в нижней части рис.1) образуют сходящуюся в ДВ сторону серию. С увеличением температуры от 2 до 77К количество линий в группах существенно уменьшается. При этом все головные линии, как и экситонные линии отражения в области $\lambda < 8000 \text{ Å}$ [6, 7], параллельно смещаются в ДВ сторону спектра примерно на 4 мэВ. Положение голов-

ных линий достаточно хорошо описывается формулой ОВС $\mathcal{E} = \mathcal{E}_g^{(ee)} + G^{(ee)}/n^2$, если номера принимают значения от $n = 4$ (для самой КВ линии) до $n = 11$ (в случае самой ДВ линии); тогда при $T = 2\text{ К}$ получаем $\mathcal{E}_g^{(ee)} = 1,504 \text{ эВ}$, а $G^{(ee)} = 0,733 \text{ эВ}$.

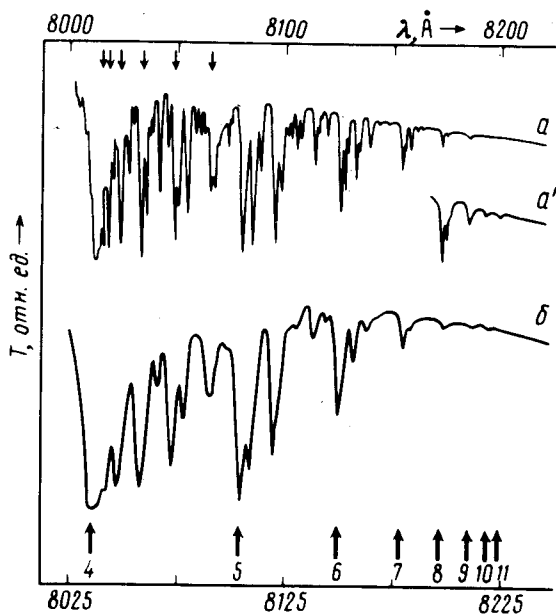


Рис.1 Спектры пропускания моноклинного кристалла ZnP_2 с длинноволновой стороны от края фундаментального поглощения в поляризации $E \perp C_2$ при $T = 2 \text{ К}$ (a, a' — верхняя шкала λ) и 77 К (b — нижняя шкала λ); толщина кристалла $d = 0,3 \text{ мм}$ (a, b), $d = 0,9 \text{ мм}$ (a')

Что касается расположения линий-компонент, то в КВ группах можно выделить серии линий, сходящиеся в КВ сторону. Особенно четко это видно в спектре при $T = 77\text{ К}$ в группе $n = 4$ (соответствующие линии помечены вертикальными стрелками в верхней части рис.1). С понижением температуры до 2 К появляются дополнительные линии, но наиболее интенсивными являются те, которые наблюдались при 77 К . Анализ спектрального положения линий-компонент с помощью формулы прямой водородоподобной серии (ПВС) $\mathcal{E} = \sum_g^{(n)} G^{(n)}/K^2$ указывает на заметное отклонение от водородоподобности, если в качестве $\mathcal{E}_g^{(n)}$ брать спектральное положение головной линии n .

Наличие ярко выраженной ОВС позволяет заключить, что формирование спектра связано с механизмом типа биелектронного. Возможность такого механизма согласуется с n -типом проводимости исследованных образцов. Тогда зонную схему кристалла ZnP_2 , определяющую его оптические свойства вблизи края собственного поглощения [6], можно изобразить (рис.2) в виде двух зон проводимости C_1 и C_2 и одной или двух близко расположенных валентных зон V . Для того, чтобы реализовывалось связанное состояние электронов C_1 и C_2 необходимо, чтобы соответствующие эффективные массы удовлетворяли неравенствам $m_1 > |m_2|$ и $m_2 < 0$.

Зная измеренное значение $G^{(ee)}$ и принимая статическую диэлектрическую проницаемость равной 10, можем оценить приведенную массу биелектрона $\mu_{ee} \approx 5,4 m_0$ (m_0 — масса свободного электрона) и его борковский радиус $a_{ee}^{(1)} \approx 1 \text{ Å}$. Тогда радиус наблюдаемого состояния $n = 4$ составляет $a_{ee}^{(4)} \approx 16 \text{ Å}$, т.е. наиболее интенсивные наблюдаемые биелектронные состояния должны иметь относительно малые радиусы.

Попадая в поле положительного заряженного центра (например, ионизованного донора), биелектрон на больших расстояниях от центра ведет себя как точечный заряд $-2e$ с эффективной трансляционной массой $M_{ee} = m_1 - |m_2| > 0$. В результате реализуется обычная водо-

родоподобная система с притягивающим потенциалом. Если $\mu_{ee} \gg M_{ee}$, биэлектрон в значительной степени должен сохранять свои индивидуальные свойства, что проявляется в ОВС; в то же время за счет взаимодействия биэлектрона как целого с положительно заряженным центром возможны ПВС, которые должны располагаться у каждой биэлектронной (головной) линии поглощения с ДВ стороны.

Более точный учет многочастичного взаимодействия в таком биэлектронно-примесном комплексе (БПК) должен приводить к отклонениям от водородоподобности, что, по-видимому, и проявляется в расположении линий-компонент. По мере понижения температуры кристалла могут выявляться более тонкие детали спектра, обусловленные, например, снятием орбитального вырождения рассматриваемого БПК.

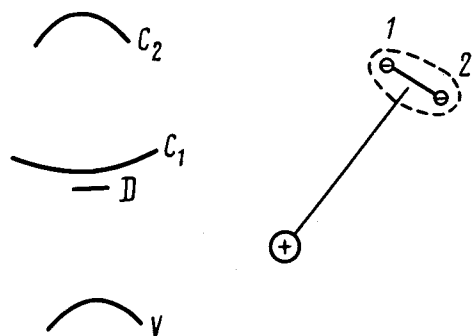


Рис.2. Зонная схема моноклинного кристалла ZnP_2 , при которой возможно образование биэлектронно-примесного комплекса, изображенного в правой части рисунка; C_1 C_2 – зоны проводимости, V – валентная зона, D – уровень энергии нейтрального донора

Условия оптического возбуждения БПК определяются начальным состоянием системы. Такое состояние может, например, образовывать комплекс D^- , состоящий из электрона C_1 , связанного с нейтральным донором D , уровень которого расположен под зоной C_1 (рис.2). При этом величина $\mathcal{E}_g^{(ee)}$, определяемая по формуле ОВС, должна превосходить энергетический зазор между экстремумами зон C_1 и C_2 на величину энергии диссоциации комплекса D^- .

К сожалению, пока отсутствуют надежные данные о зонной структуре моноклинных кристаллов ZnP_2 и весьма ограничен имеющийся экспериментальный материал. Поэтому высказанные нами предположения о природе ДВ спектров поглощения в этих кристаллах нуждаются в более подробном экспериментальном изучении.

В заключение авторы выражают благодарность А.Г. Жиличу, Е.Л.Ивченко и С.А.Пермогорову за полезные дискуссии.

Литература

1. Гросс Е.Ф., Перель В.И., Шехмаметьев Р.И. Письма в ЖЭТФ, 1971, 13, 320.
2. Рацба Э.И., Эдельштейн В.М., Письма в ЖЭТФ, 1969, 9, 475.
3. Гросс Е.Ф., Старостин Н.В., Шенцов М.П., Шехмаметьев Р.И. Изв. АН СССР, сер. физ., 1973, 37, 835.
4. Petroff Y., Yu P.Y., Shen Y.R. Phys. stat. sol. (b), 1974, 61, 419.
5. Лисица М.П., Моцный Ф.В. УФЖ, 1976, 21, 1025.
6. Певцов А.Б., Пермогоров С.А., Селькин А.В., Сырбу Н.Н., Уманец А.Г. ФТП, 1982, 16, №5.
7. Соболев В.В., Козлов А.И., Тычина И.И., Романик П.А., Смоляренко Э.М. Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, 115.