

ЭКРАНИРОВАНИЕ ОБРАТНОЙ ВОДОРОДОПОДОБНОЙ СЕРИИ В BiI_3 ПРИ ДВУХФОТОННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ

*В.Ф.Агекян, Н.Н.Васильев, В.П.Гладких,
Р.И.Шехмаметьев*

Исследованы неравновесные спектры поглощения кристаллов иодистого висмута в области обратной водородоподобной серии (ОВС) при сильном оптическом возбуждении. Наблюдается последовательная диссоциация линий ОВС, начиная с высших длинноволновых членов. Результат интерпретируется как экранирование ОВС, подтверждающее единую природу линий.

Существование связанных кулоновских состояний вблизи особенностей энергетических зон кристалла определяется типом и параметрами актуальных критических точек, а также величиной внешнего магнитного поля ¹. В благоприятном случае может реализоваться связанное состояние двух частиц с одноименным зарядом ².

В поглощении BiI_3 при низких температурах наблюдается серия линий с эффективной постоянной Ридберга 0,2473 эВ, сходящихся в длинноволновую сторону к пределу 1,9809 эВ. Эта обратная водородоподобная серия (ОВС) интерпретируется как спектр биелектрона (бихола) — системы, состоящей из двух электронов (дырок), которые имеют отрицательную приведенную и положительную суммарную эффективные массы, и связанной кулоновскими силами ^{2,3}. Одна из частиц может быть локализована на примеси. Влияние на спектр ОВС внешних воздействий согласуется с ее предполагаемым происхождением ^{3,4}. Существуют и иные модели ^{5,6}, которые впрочем не могут объяснить все полученные к настоящему моменту результаты, к тому же в работах ^{5,6} не делается различия между линиями ОВС и близкими по энергии линиями иного происхождения. Редкость наблюдения ОВС в полупроводниках по сравнению с экситонным эффектом объясняется жесткими требованиями к энергетическому спектру кристалла, знакам и величинам эффективных масс, параметрам примесных состояний. Недавнее обнаружение ОВС в кристалле ZnP_2 ⁷ указало, что спектр BiI_3 является в этом смысле единственным, и повысило интерес к проблеме.

Образец BiI_3 погружался в жидкий гелий и возбуждался импульсами лазера с энергией квантов $h\nu_{\text{л}} = 1,17$ эВ. Край сильного поглощения в BiI_3 начинается с 2,0116 эВ, так что кристалл возбуждается двухфотонным способом. В этом случае малый коэффициент двухфотонного поглощения k_2 обеспечивает однородное по глубине возбуждение образца и делает несущественными поверхностные эффекты. Источником света для исследования поглощения в момент возбуждения являлась широкая полоса излучения красителя родамина-6Г, который накачивался второй гармоникой того же лазерного импульса. Спектр регистрировался по схеме импульсного синхродетектирования.

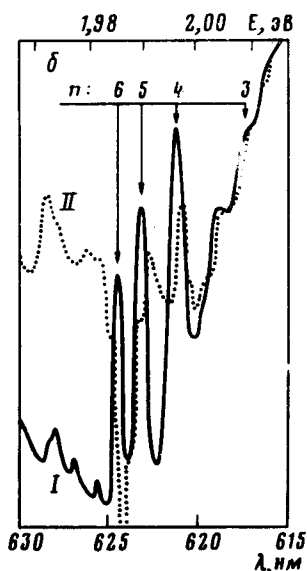
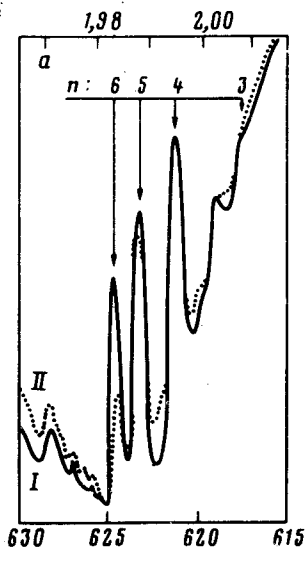


Рис. 1

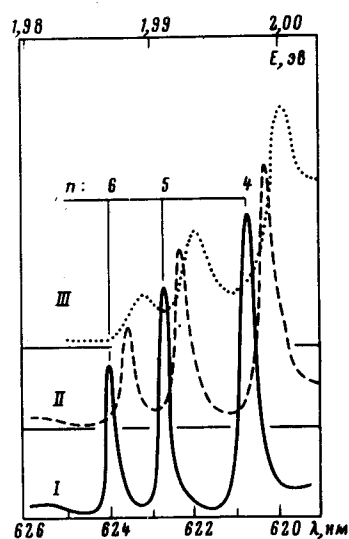


Рис. 2.

Рис. 1. Равновесный (I) и неравновесные (II) спектры поглощения BiI_3 при различных мощностях фотовозбуждения J_0 с энергией квантов 1,17 эВ; I — $J_0 = 0$; IIa — $J_0 = 7,5 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2}$; II б — $J_0 = 15 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2}$, $T = 4 \text{ К}$, $n = 3 \div 6$ — линии ОВС

Рис. 2. Температурная зависимость спектра поглощения BiI_3 . $T = 9 \text{ К}$ (I), 15 К (II), 28 К (III). Приведена область ОВС с линиями $n = 4, 5, 6$

В эксперименте исследовалась зависимость неравновесного спектра поглощения ОВС от мощности J_0 возбуждающего света. При $J_0 = 7,5 \text{ МВт} \cdot \text{см}^2$ интенсивность линии $n = 6$ уменьшается в 2–3 раза, и можно заметить ослабление линии $n = 5$ (рис.1, а). С увеличением J_0 до $15 \text{ МВт} \cdot \text{см}^2$ линия $n = 6$ практически исчезает, линии $n = 5$ и $n = 4$ ослабляются в 4 и 2 раза соответственно и усиливается сплошное поглощение, в особенности с длинноволновой стороны от предела ОВС. При этом кристалл остается прозрачным в области линий ОВС с большими n .

Последовательное ослабление и исчезновение линий и появление сплошного поглощения не связаны с термодиссоциацией. Действительно, температурный коэффициент смещения линий ОВС равен $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ эВ} \cdot \text{град}^{-1}$, так что смещение линий при максимальном возбуждении (рис.1, б) соответствует нагреванию кристалла от 4 К не более, чем на 5 К, при котором контуры линий ОВС меняются мало (рис.2). Край поглощения 2,0116 эВ также мало изменяется при нагревании образца до 10 К, а сплошное поглощение ниже предела ОВС не появляется по крайней мере до 30 К.

Мы полагаем, что последовательное ослабление и исчезновение линий ОВС в нашем эксперименте является результатом экранирования биелектронных состояний при высокой концентрации фотоносителей. В опытах по экранированию экситонов, например, в CdS и Cu_2O ^{8,9} диссоциация линий сопровождается сужением запрещенной зоны и усилением хвоста сплошного поглощения вследствие увеличения энергии взаимодействия носителей. Возможно, что поглощение, появляющееся при сильном возбуждении Vl_3 за пределом ОВС, имеет аналогичное происхождение для биелектронов.

Таким образом, поведение ОВС в Vl_3 в условиях фотовозбуждения свидетельствует о едином серийном происхождении линий.

Реализация условий экранирования позволяет оценить время жизни неравновесных носителей τ_0 в предположении, что τ_0 много меньше длительности импульса фотовозбуждения $\tau_{\text{л}} = 7 \cdot 10^{-9} \text{ с}$. Можно показать, что

$$\tau_0 = \frac{2h\nu_n}{k_2 J_0^2} (1 + k_2 J_0 l) n_0, \quad (1)$$

где n_0 — концентрация носителей при накачке J_0 , экранирующей состояние с квантовым числом n и энергией связи E_n , l — толщина образца 0,015 см. Связь E_n и n_0 дается соотношением Мотта

$$E_n = \frac{1}{2} \frac{e^2}{\epsilon_0} \kappa(n_0), \quad (2)$$

где ϵ_0 — статическая диэлектрическая проницаемость, $\kappa(n_0)$ — обратный радиус экранирования. Согласно¹⁰ экранирование дискретного состояния при низкой температуре характеризуется резким ослаблением соответствующей линии в узком интервале концентраций свободных носителей, так что уменьшение интенсивности вдвое можно считать соответствующим условию (2). На рис.1, а видно, что экранирование линии $n = 6$ происходит при $J_0 \approx 7,5 \text{ МВт} \cdot \text{см}^2$. Используя критерий (2), известное значение E_6 и зависимость κ от n_0 в приближении Дебая, мы получили из (1) величину $\tau_0 = 5 \cdot 10^{-12} \text{ с}$ с точностью до множителя несколько единиц, измерив предварительно $k_2 = 2 \text{ см} \cdot \text{МВт}^{-1}$. Расчеты для условий, соответствующих экранированию линий $n = 5$ и $n = 4$, дают близкие значения τ_0 . Если учесть, что при сильном возбуждении электронная температура может быть выше температуры решетки, τ_0 несколько возрастает.

Авторы выражают благодарность А.В.Малову за помощь в эксперименте.

Литература

1. Рашба Э.И., Эдельштейн В.М. Письма в ЖЭТФ, 1969, 9, 475.
2. Гросс Е.Ф., Перель В.И., Шехмаметьев Р.И. Письма в ЖЭТФ, 1971, 13, 320.
3. Гросс Е.Ф., Старостин Н.В., Шепилов М.П., Шехмаметьев Р.И. Изв. АН СССР, сер. физич., 1973, 37, 885.
4. Крылова Н.О., Шехмаметьев Р.И., Гургенбеков М.Ю. Оптика и спектроскопия, 1975, 38, 947.
5. Лисица М.П., Моцный Ф.В. Сб. Квантовая электроника, 1979, Киев, 17, 26.
6. Karasawa T., Komatsu T., Kaifu J. Solid State Comm., 1982, 44, 323.
7. Селькин А.В., Стамов И.Г., Сырбу Н.Н., Уманец А.Г. Письма в ЖЭТФ, 1982, 35, 51.
8. Лысенко В.Г., Ревенко В.И. ФТТ, 1978, 20, 2144.
9. Агекян В.Ф., Васильев Н.Н., Степанов Ю.А. Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 16.
10. Zimmerman R., Kilimann K., Kraft W.D., Kremp D., Röpke G. Phys. Stat. Sol., 1978, (b)90, 175.

НИИ физики

Ленинградского

государственного университета

им. А.А.Жданова

Поступила в редакцию

23 января 1984 г.