

Письма в ЖЭТФ. том 13; стр. 380 – 385

20 марта 1971 г.

**ОБРАТНАЯ ВОДОРОДОПОДОБНАЯ СЕРИЯ
ПРИ ОПТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ ЛЕГКИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В КРИСТАЛЛЕ ЙОДИСТОГО ВИСМУТА (BiJ_3)**

E. Ф. Гросс, В. И. Перель, Р. И. Шехмаметьев

При экспериментальных исследованиях экситонных состояний в кристалле BiJ_3 мы обнаружили водородоподобный спектр – водородоподобную серию резонансных линий поглощения и излучения, сходящихся не в коротковолновую, как обычно, а в длинноволновую область спектра, что трудно объяснить в рамках обычных представлений. Мы кратко описываем здесь это явление и делаем попытку объяснить его возбуждением под действием света легких заряженных частиц с отрицательными эффективными массами.

Экспериментальные результаты

Известны исследования оптических и фотоэлектрических свойств йодистого висмута при температурах выше гелиевых [1–8].

Ранее исследованные спектры были выполнены нами при $T = 77^\circ\text{K}$ на монокристаллах и пленках йодистого висмута [3–5].

Теперь мы вели опыты преимущественно при температуре жидкого гелия ($4,2^\circ\text{K}$) и, частично, при более высоких температурах вплоть до $T = 77^\circ\text{K}$ с монокристаллами BiJ_3 , выращенными из газовой фазы [3].

Исследования оптических спектров проводились с неполяризованным светом, идущим вдоль оптической оси С кристалла.

Спектральные исследования мы вели на призменном спектрографе ИСП-51 с камерой $F = 1300 \text{ мм}$ с дисперсией 20 \AA/mm в исследуемой (красной) области спектра и на дифракционном спектрографе ДФС-13 с дисперсией $1,9 \text{ \AA/mm}$. Источником света для получения спектров пог-

лощения служила лампа накаливания; возбуждение люминесценции и подсветки кристаллов производились светом ртутной лампы ДРШ-250 с использованием светофильтров.

В спектре поглощения монокристаллов BiJ_3 , при $T = 4,2^\circ\text{K}$ мы обнаружили группу из пяти линий поглощения¹⁾, расположенную с длинноволновой стороны края фундаментального поглощения в красной части спектра (см. рис. 1 и рис. 2), которая полностью исчезает при $T = 77^\circ\text{K}$ (в жидким азоте). За самой длинноволновой из них следует участок слабого сплошного поглощения. Оценка ширины линий поглощения дает в среднем величину около 10 cm^{-1} (для первых линий группы).

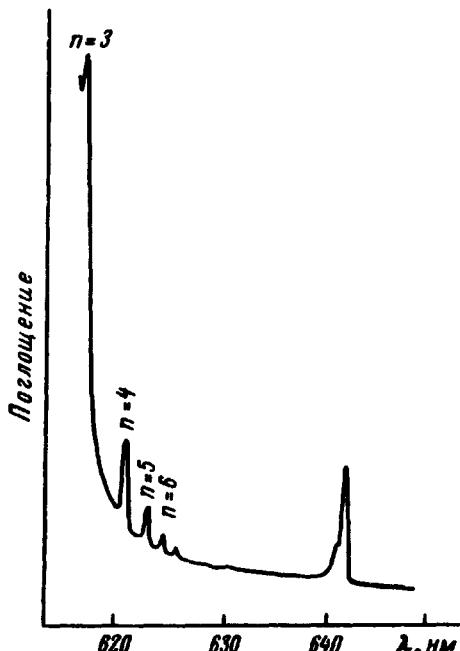


Рис. 1. Микрофотограмма спектра поглощения монокристалла BiJ_3 при $T = 4,2^\circ\text{K}$. Дисперсия 20 Å/mm

Исследования влияния повышения температуры и подсветки кристаллов излучением ртутной лампы ДРШ-250 показали одинаковое смещение всех линий группы в коротковолновую сторону спектра²⁾ и закономерное расширение, ослабление и постепенное исчезновение отдельных линий (начиная с "хвоста") группы от нагревания. Это показывает, что линии группы расположены в спектре не случайно, а принадлежат одной системе и объединены единым механизмом возникновения. Эта группа образует серию линий, сходящихся не в коротковолновую, как обычно, а наоборот, в длинноволновую сторону спектра. Частоты ν_n

¹⁾ В спектре наблюдаются и другие линии поглощения, которые здесь не обсуждаются.

²⁾ При этом граница фундаментального поглощения смещается навстречу, в длинноволновую сторону.

этих линий подчиняются обратной сериальной зависимости водородоподобного атома:

$$\frac{1}{n} = \nu_{\infty} + \frac{R_1}{n^2} = 15978 + \frac{1995}{n^2} (\text{см}^{-1}), \quad (1)$$

где $n = 3, 4, 5, 6, 7 \dots$

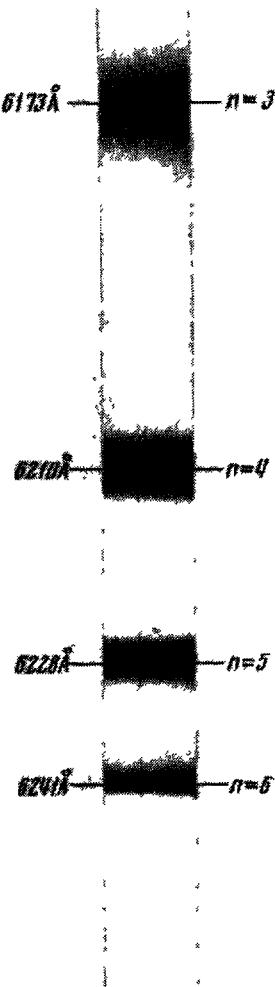


Рис. 2. Спектограмма обратной серии поглощения в кристалле BiJ_3 при $T = 4,2^\circ\text{K}$. Снято на дифракционном спектрографе с дисперсией $1,9 \text{ \AA/mm}$

Как видно из таблицы, действительно, частоты экспериментально измеренных нами линий в пределах ошибок измерений хорошо согласуются со значениями вычисленными по формуле (1). В спектре люминесценции монокристаллов BiJ_3 при $T = 4,2^\circ\text{K}$ нами обнаружены узкие линии излучения¹⁾, резонансно совпадающие с линиями поглощения обратной серии (см. таблицу).

¹⁾ Спектр люминесценции кристаллов BiJ_3 при $T = 4,2^\circ\text{K}$, в котором наблюдается более 30 узких линий и полос, будет приведен в отдельном сообщении.

**Положение линий обратной серии в спектрах поглощения
и излучения монокристаллов йодистого висмута при $T = 4,2^\circ\text{K}$**

Квантовые числа n	Эксперимент			Вычисления	
	Излучение		Поглощение	Длина волны	Частота $\nu_n, \text{см}^{-1}$
	Длина волны	Длина волны	Частоты		
n	$\lambda_n, \text{\AA}$	$\lambda_n, \text{\AA}$	$\nu_n, \text{см}^{-1}$	$\lambda_n, \text{\AA}$	$\nu_n, \text{см}^{-1}$
1	—	1)	—	5564	17973
2	—	1)	—	6069	16476
3	6174	6173 ²⁾	16200	6173	16200
4	6211	6210 ²⁾	16103	6210	16103
5	6229	6228	16056	6228	16057
6	6242	6241	16023	6237	16033
7	—	6246	16010	6243	16019
•	—	—	—	—	—
•	—	—	—	—	—
•	—	—	—	—	—
∞	—	6265	15961	6258	15978

¹⁾Линии серии с $n = 1$ и $n = 2$ не наблюдались из-за большого коэффициента поглощения и большой толщины кристаллов.

²⁾Экспериментальные значения частот ν_3 и ν_4 были использованы для вычисления постоянных сериальной формулы (1).

Значение постоянной Ридберга $R_1 = 1995 \text{ см}^{-1}$ в формуле (1) позволяет вычислить приведенную эффективную массу системы, вызывающей возникновение серии. Вычисления дают значение приведенной массы $\mu = 0,6 \text{ m}$. Это показывает, что в образовании серии принимают участие легкие частицы с массами близкими к массам свободных электронов.

Обсуждение результатов

Обратный порядок линий в обнаруженной серии трудно интерпретировать.

В принципе такой порядок может быть связан с энергетическим спектром двух одноименно заряженных частиц, имеющих отрицательную приведенную эффективную массу. В самом деле, система с гамильтонианом

$$H = \epsilon(p) + \frac{e^2}{r},$$

где p – квазимпульс, $\epsilon(p)$ – энергия в зоне, имеет водородоподобный спектр с обращенным расположением уровней, если $\epsilon(p) = E_0 - (p^2/2\mu)$. где μ – приведенная масса.

Такая система весьма необычна. Ее дискретный спектр лежит выше сплошного, причем радиус состояния тем меньше, чем выше Энергия. Система может состоять из двух электронов (тогда она может, как квазичастица, перемещаться по кристаллу и ее можно назвать биэлектроном), или из электрона и отрицательно заряженного центра. В настоящее время пока еще нет экспериментальных оснований считать, что в оптическом спектре проявляется свободный биэлектрон.

Появление обратной водородоподобной серии в спектре поглощения может быть обязано, например, переходам электрона с двухкратно-отрицательно заряженного примесного центра на дискретные уровни состояния с отрицательной массой в поле оставшегося однозарядного центра (рис. 3).

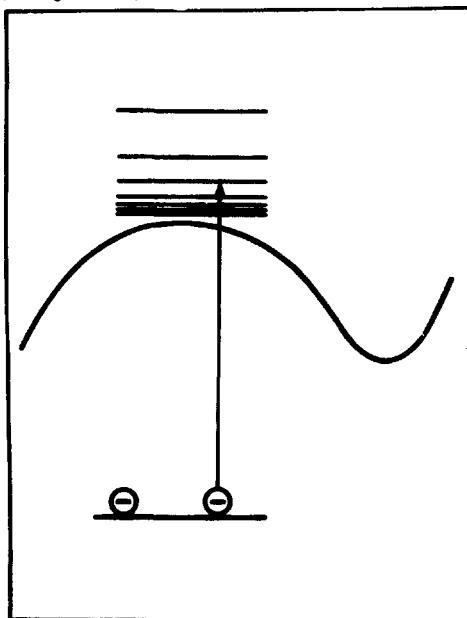


Рис. 3. Возможная схема, приводящая к появлению обратной водородоподобной серии в спектре поглощения

Авторы благодарят студента-дипломанта Е.И.Балашова и аспиранта И.И.Мельниченко за помощь в экспериментах.

Физико-технический институт

им. А.Ф.Иоффе

Академии наук СССР

Ленинградский

государственный университет

им. А.А.Жданова

Поступила в редакцию
18 февраля 1971 г.

Литература

- [1] Н.М.Дикарев. Ученые записки ЛГПИ им. Герцена. Кафедра общей физики, 148, 29, 1958.

- [2] Н.М.Дикарев. Ученые записки Вологодского гос. пед. института, 23, 79, 1958.
- [3] Р.И.Шехмаметьев. ФТТ 3; 581, 1961.
- [4] Е.Ф.Гросс, Р.И.Шехмаметьев. ФТТ, 3; 889, 1961.
- [5] Р.И.Шехмаметьев. Автореферат канд. диссертации. ЛГУ, Ленинград, 1964.
- [6] B.L.Evans. Proc. Roy. Soc., A289, 275, 1966.
- [7] В.Б.Тимофеев, В.И.Ващенко. Оптика и спектроскопия, 24, 740, 1968.
- [8] В.И.Ващенко, В.Б.Тимофеев. ФТТ, 9, 1577, 1967.
-