

## ШТАРКОВСКАЯ СТРУКТУРА ЛИНИЙ ОБРАТНОЙ ВОДОРОДОПОДОБНОЙ СЕРИИ В СПЕКТРЕ КРИСТАЛЛОВ $\text{Vl}_3$

*Р.И.Шехмаматьев*

В спектре поглощения  $\text{Vl}_3$  при  $T = 1,6$  К впервые обнаружена штарковская структура линий обратной водородоподобной серии (ОВС), связанная с оптическими переходами на расщепленные кристаллическим полем уровни энергии биелектрона. Определены значения параметров анизотропии  $A$  и приведенных масс  $\mu_{\perp}$  и  $\mu_{\parallel}$ .

Обратная водородоподобная серия в спектрах поглощения полупроводников характеризует системы с отрицательной приведенной массой; биелектрон или бихол<sup>1, 2</sup>. Такие системы могут включать также локальные центры, которые являются источниками электронов (дырок) при образовании биелектрона (бихола)<sup>1, 3</sup>. В этом случае интенсивность линий ОВС зависит также от концентрации центров<sup>4</sup>.

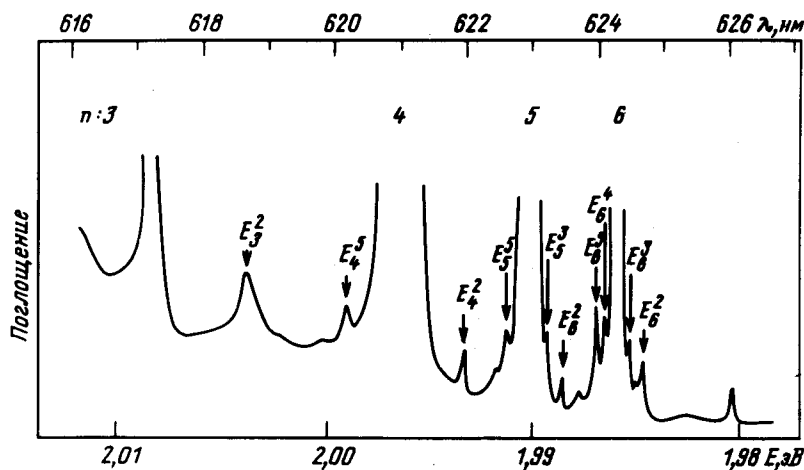
В изотропной среде водородоподобные уровни энергии биелектрона (бихола)

$$E_n = E_0 + G/n^2; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

( $G = \mu'_0 e^4 / 2 \hbar^2 \epsilon^2$  – постоянная Ридберга системы,  $\mu'_0$  – приведенная масса,  $\epsilon$  – диэлектрическая постоянная) имеют вырождение порядка  $n^2$ . В анизотропном кристалле энергетический спектр биелектрона (бихола) усложняется вследствие снятия вырождения по  $l$  и  $m$ , где  $l$  – орбитальное,  $m$  – магнитное квантовые числа.

Одноосный кристалл  $\text{ViI}_3$  является весьма низкосимметричным (пространственная группа  $C_{3i}^2$ ), так что уровни энергии расщеплены внутрикристаллическим полем. Оптические переходы на эти уровни энергии могут привести к сложной картине спектра ОВС. Однако, согласно теоретическим расчетам <sup>5</sup>, разрешенные оптические переходы на уровни энергии с  $l > 0$  имеют значительно меньшую вероятность, чем переходы на уровни  $S$ -типа ( $l = 0$ ). Поэтому до настоящего времени штарковская структура ОВС в спектрах  $\text{ViI}_3$  не была обнаружена. (Дублетная структура главных линий ОВС  $n = 3 \div 6$  имеет другое происхождение <sup>6</sup>).

Для изучения этих возможных оптических переходов были синтезированы кристаллы  $\text{ViI}_3$ , в которых концентрация локальных центров была существенно выше, чем в исследовавшихся раньше образцах. Спектры изучались при температурах 1,6 и 4 К на приборе с дисперсией 0,18 нм/мм. Применялась фотографическая регистрация спектров.



Штарковская структура линий ОВС в спектре поглощения кристаллов  $\text{ViI}_3$  при температуре 1,6 К. Микрофотограмма.  $E_n^k$  – спутники мультиплета, где  $n$  – главное квантовое число,  $k$  – условный номер

С ростом концентрации центров в кристалле в оптических спектрах  $\text{ViI}_3$  около главных линий ОВС "возгорает" структура, состоящая из слабых узких линий поглощения (рисунок). Эта структура возникает, в основном, последовательно: сначала для состояния с главным квантовым числом  $n = 6$ , а затем – для состояний с  $n = 5, 4$  и 3. Появление структуры и усиление главных линий сопровождается одновременно ростом интенсивности в узкой полосе поглощения 1,9808 эВ, положение которой в спектре соответствует пределу ОВС <sup>1</sup>, вычисленному по (1).

Линии структуры группируются около главных (интенсивных) линий ОВС; при этом серия представляет собой систему штарковских мультиплетов. Мультиплет (штарковский мультиплет) устроен следующим образом: в центре сильная линия  $S$ -типа (что отвечает разрешенному зона – зонному переходу) и спутники ( $E_n^k$ ), расположенные по обе стороны от этой главной линии ( $E_n$ ). Эти спутники обусловлены проявлением состояний с более высокими значениями орбитального квантового числа ( $P_0, P_{\pm 1}, D_{\pm 1}, D_{\pm 2}, |n \pm 0\rangle$  и т. д.) <sup>1)</sup>.

Величина мультиплетного расщепления  $\Delta E_n^k = |E_n - E_n^k|$  зависит от главного квантового числа  $n$  и уменьшается с ростом  $n$ . Измерив положение линий в спектре  $\text{ViI}_3$  при температуре 1,6 К, мы получили, что величины мультиплетного штарковского расщепления состояний с главными квантовыми числами  $n = 3, 4$  и 5 больше величины расщепления состояний с  $n = 6$  примерно в 4, 2,25 и 1,44 раза соответственно (таблица). Это указывает на достаточно хорошее выполнение теоретического соотношения

1) Аналогичные явления наблюдались и в спектрах резонансной люминесценции.

$$\Delta E_n^k / \Delta E_{(n+1)}^k = (n+1)^2 / n^2, \quad (2)$$

которое связывает зависящие от  $n$  величины мультиплетного расщепления уровней энергии водородоподобной системы в анизотропном одноосном кристалле <sup>7, 8</sup>.

В одноосных кристаллах положение штарковских уровней энергии водородоподобной системы (например, экситона Ванье) в первом приближении теории возмущений можно описывать <sup>8</sup> при помощи параметра анизотропии  $A = \epsilon_{\perp} \mu_{\perp} / \epsilon_{\parallel} \mu_{\parallel}$  формулами вида

$$F_1^{nl|m|} = E_0^{n00} [K_{l|m|} f^{l|m|}(A) - 1], \quad (3)$$

где  $\mu_{\parallel}, \mu_{\perp}$  и  $\epsilon_{\parallel}, \epsilon_{\perp}$  — значения приведенных масс и диэлектрических постоянных вдоль оптической оси кристалла и перпендикулярно ей;  $E_0^{n00}$  — энергия невозмущенного уровня с главным квантовым числом  $n$ ;  $f^{l|m|}(A)$  — функция, зависящая от параметра анизотропии  $A$  и квантовых чисел  $l$  и  $m$ ;  $K_{l|m|}$  — численный коэффициент.

**Энергия (в эВ) главных линий  $E_n$  и спутников  $E_n^k$   
штарковской структуры ОВС в спектрах поглощения  
кристаллов  $\text{BiI}_3$  ·  $T = 1,6$  К**

Квантовые числа	$E_n$	$E_n^2$	$E_n^3$	$E_n^4$	$E_n^5$
3	2,0084	2,0037	2,0060	2,0103	1)
4	1,9964	1,99352	1,99511	1,99792	1,99898
5	1,9900	1,98891	1,98968	1,99086	1,99163
6	1,9862	1,98503	1,98569	1,98694	1,98741

1) Расчетное положение линии  $E_3^5 = 2,0126$  эВ приходится на область сильного поглощения.

Анализ формул из (8) показывает, что расщепление уровней энергии биэлектрона и экситона по  $l$  и  $m$  в анизотропном кристалле, во основном, аналогичны. Тогда для определения параметра  $A$  можно использовать (3) с учетом направления сходимости серии.

Предположительная интерпретация линий структуры ОВС позволяет оценить величину параметра  $A$  в пределах от 2,0 до 2,6 и вычислить значения приведенных масс  $\mu_{\perp}$  и  $\mu_{\parallel}$  из соотношения в <sup>7</sup>

$$1/\mu_0 = 2/3\mu_{\perp} + \epsilon_{\perp}/3\mu_{\parallel}\epsilon_{\parallel}. \quad (4)$$

Для случая, когда  $A = 2,6$  и  $\mu'_0 \approx 0,6 m_0$  <sup>1</sup>, получены величины  $\mu'_{\perp} = 0,91 m_0$  и  $\mu'_{\parallel} = 0,42 m_0$ . (При определении параметра  $A$  использованы постоянная  $G = 0,3306$  эВ, определенная по экспериментальному положению главных линий поглощения ОВС  $n = 5$  и  $n = 6$ , и значения диэлектрических постоянных  $\epsilon_{\perp} = 6,15$  и  $\epsilon_{\parallel} = 5,19$  из <sup>9</sup>).

Из теории <sup>8</sup> следует также, что при  $A > 1$  энергия связи, вычисленная по формуле (3), должна быть меньше величины получаемой в изотропном случае. Такое смещение линий ОВС относительно расчетного положения по формуле (1) действительно наблюдается в спектрах  $\text{BiI}_3$  <sup>1</sup>. В заключение отметим, что некоторые из линий наблюдались и раньше в спектрах кристаллов  $\text{BiI}_3$  (например,  $\lambda = 618,8$  нм или  $Q$ -линия), но их природа оставалась неясной. Теперь они естественным образом входят в штарковскую структуру линий ОВС.

Автор благодарит В.И.Переля и Н.В.Старостина за полезное обсуждение результатов.

## Литература

1. Гросс Е.Ф., Перель В.И., Шехмаматьев Р.И. Письма в ЖЭТФ, 1971, 13, 320.
2. Гросс Е.Ф., Старостин Н.В., Шехмаматьев Р.И. ФТТ, 1971, 13, 393.
3. Селькин А.В., Стамов И.Г., Сырбу Н.Н., Уманец А.Г. Письма в ЖЭТФ, 1982, 35, 51.
4. Сырбу Н.Н., Хачатурова С.Б., Стамов И.Г. ФТП, 1984, 18, 1498.
5. Старостин Н.В., Шепилов М.П. УФЖ, 1980, 25, 1707.
6. Абдель Азиз Ю.М., Шехмаматьев Р.И. ФТТ, 1984, 26, 2072.
7. Hopfield J.J., Thomas D.G. Phys. Rev., 1961, 122, 35.
8. Deverin J.A. Helv. Phys. Acta, 1969, 42, 397.
9. Evans B.L. Proc. Roy. Soc., 1966, A289, 275.

НИИ физики

Ленинградского государственного  
университета им. А.А.Жданова

Поступила в редакцию  
26 февраля 1987 г.