

## ЭКСИТОН-ЭКСИТОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АБСОРБЦИОННАЯ БИСТАБИЛЬНОСТЬ В CdS ПРИ НИЗКИХ УРОВНЯХ ОПТИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В. С. Днепровский, В. И. Климов, Е. В. Названова, А. И. Фуртичев

Зарегистрировано резкое уменьшение пропускания в области края фундаментального поглощения кристаллов CdS (80 К) и абсорбционная бистабильность при малых (менее  $10 \text{ кВт/см}^2$ ) уровнях возбуждения излучением аргонового лазера. Анализ спектров люминесценции показал, что при таком способе возбуждения быстрое изменение нелинейного поглощения в кристаллах связано с процессом экситон-экситонного взаимодействия.

Оптические свойства полупроводников существенно изменяются при резонансном возбуждении экситонов<sup>1-6</sup>. Уширение линии экситонного поглощения при коллективном взаимодействии экситонов может привести к увеличению поглощения в области края фундаментального поглощения полупроводника. Возникающий процесс нелинейного роста поглощения возбуждающего излучения представляет особый интерес для создания оптических бистабильных устройств с собственной обратной связью, в которых  $S$ -образная зависимость коэффициента поглощения от концентрации частиц вызвана динамическим соотношением между ростом числа возбужденных частиц и их рекомбинацией<sup>7</sup>. Безрезонансная абсорбционная бистабильность обнаружена в охлажденных до азотных и гелиевых температур кристаллах CdS при относительно высоких (около  $1 \text{ МВт/см}^2$ ) уровнях возбуждения<sup>2,3,8,9</sup>. При этом нелинейный рост поглощения в области края фундаментального поглощения полупроводника CdS был, по-видимому, в основном обусловлен перенормировкой ширины запрещенной зоны (ее сжатием) при возбуждении плазмы высокой плотности.

В настоящей работе измерено пропускание и получены спектры люминесценции кристаллов CdS (80 К) при резонансном возбуждении в область края поглощения импульсами аргонового лазера. Обнаруженный нелинейный рост поглощения полупроводника, быстрое включение и выключение бистабильного элемента, особенности спектров люминесценции объяснены процессом экситон-экситонного коллективного взаимодействия.

В экспериментах использованы пластинчатые образцы CdS, охлажденные до температуры жидкого азота, толщиной 3 — 5 мкм. Возбуждение осуществлялось аргоновым лазером ПА-120 ( $\lambda = 488 \text{ нм}$ ), непрерывное излучение которого с помощью модулятора преобразовывалось в импульсы с перестраиваемой длительностью. Поляризация излучения параллельна оптической оси кристалла. При этом излучением с длиной волны  $\lambda = 488 \text{ нм}$  осуществляется возбуждение образцов в область края фундаментального поглощения. Диаметр пятна сфокусированного излучения на поверхности кристалла — 30 мкм. Одновременно измерялись форма падающего и прошедшего через образец импульсов при разных уровнях возбуждения и спектры люминесценции кристаллов с помощью дифракционного спектрометра ДФС-24. На рис. 1, а приведены осциллограммы падающего (интенсивностью  $I$ ) и прошедшего ( $I_T$ ) через образец CdS импульсов лазера длительностью 7 мкс и гистерезисная зависимость  $I_T(I)$ . Быстрое переключение бистабильного элемента (время включения и выключения не превышало 1 мкс — временного разрешения использованных фотоприемников) обусловлено нелинейным изменением поглощения в области края фундаментального поглощения полупроводника. Быстрое нелинейное изменение поглощения может быть связано со следующими процессами: 1) уширение линии экситонного поглощения при увеличении концентрации экситонов, 2) образование экситонных молекул (биэкситонов) при двухфотонном поглощении света, 3) уменьшение ширины запрещенной зоны (перенормировка) на величину, определяемую суммой обменной и коореляционной поправок к энергии взаимодействующих электронов и дырок высокой плотности. Особенности спектров люминесценции

(рис. 2) позволяют предположить, что доминирует процесс экситон-экситонного взаимодействия. При используемых уровнях возбуждения возникает  $P$ -полоса люминесценции, энергетическое положение которой (она сдвинута на энергию связи экситона в сторону меньших энергий относительно энергии свободного экситона), сверхлинейная зависимость интенсивности полосы от интенсивности накачки, отличие формы линии от формы линии первого фоновонного повторения  $A$ -экситонов (полоса  $A$ - $LO$  возникает при малых уровнях возбуждения и асимметрична — имеет "хвост" в области больших энергий), возникновение стимулированного излучения (рис. 2) в области длинноволнового крыла полосы позволяют объяснить ее процессом неупругого экситон-экситонного взаимодействия:  $ex + ex \rightarrow h\nu + (e+h)$  ( $e+h$  — электронно-дырочная пара). Оценки показывают, что быстрое переключение элемента происходит при концентрации экситонов  $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Таким образом можно считать, что по крайней мере на начальном этапе переключения увеличение поглощения не связано с перенормировкой ширины запрещенной зоны. Для переключения использованного элемента край поглощения нужно "сдвинуть" на 10 — 13 мэВ. Такой сдвиг, вызванный перенормировкой зоны, может быть достигнут в  $\text{CdS}$  при концентрации носителей  $n \geq 10^{17} \text{ см}^{-3}$  [10, 11, 8]. Вклад в поглощение за счет образования биэкситонов в  $\text{CdS}$  при азотной температуре маловероятен — мала энергия связи биэкситона.

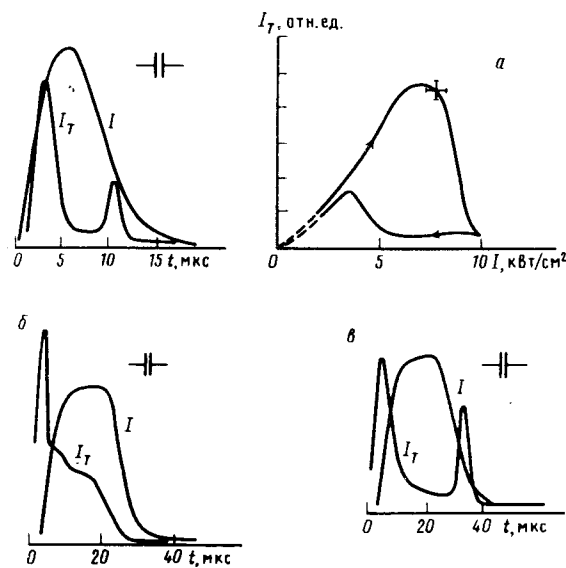


Рис. 1

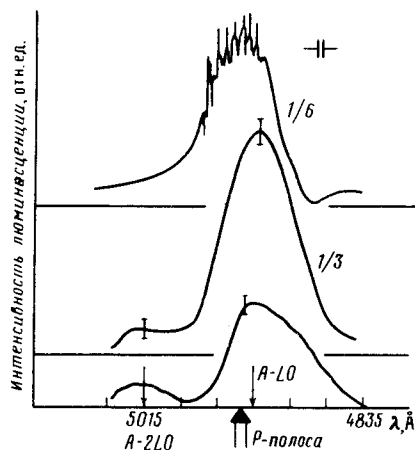


Рис. 2

Рис. 1. Осциллограммы падающего и прошедшего через кристалл  $\text{CdS}$  импульсов аргонового лазера ( $\lambda = 488 \text{ нм}$ ) для импульсов разной длительности и интенсивности и зависимость  $I_T(I)$  для импульса длительностью 7 мкс ( $I$  — интенсивность падающего,  $I_T$  — прошедшего света)

Рис. 2. Спектры люминесценции кристаллов  $\text{CdS}$  (80 К) при разных уровнях возбуждения излучением аргонового лазера: 4, 9, 15  $\text{кВт/см}^2$

Влияние теплового сдвига края поглощения на режим переключения можно обнаружить при увеличении длительности возбуждающего импульса в несколько раз (рис. 1, б, в)<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Следует отметить, что для использованных кристаллов  $\text{CdS}$  (80 К) был зарегистрирован стационарный бистабильный режим, связанный с термооптической нелинейностью (с тепловым сдвигом края поглощения при возбуждении образцов миллисекундными импульсами или непрерывным излучением аргонового лазера).

Прослеживается конкуренция двух видов нелинейного изменения поглощения: "быстрого", связанного с коллективным взаимодействием экситонов, и "медленного" определяемого нагревом полупроводника лазерным излучением. Быстрое падение пропускания (рис. 1, б), по-видимому, связано с экситонным механизмом переключения в образце, нагретом до более высокой температуры, чем для режима, представленного на рис. 1, в (при меньшей интенсивности накачки к моменту достижения требуемой для экситонного механизма переключения интенсивности излучения проходит большее время, и кристалл нагревается сильнее). По-видимому, при нагревании кристалла изменяется поглощение, и спектр нелинейно поглощающего образца перестраивается в область, где возникает обратная связь<sup>2)</sup>. Выключение элемента при повышении уровня возбуждения (рис. 1, в) происходит быстрее (!), чем включение, и связано с экситонным механизмом нелинейности. Это обстоятельство также можно объяснить перестройкой спектра поглощения при нагревании образца до области существования обратной связи ( $S$ -обратной зависимости коэффициента поглощения от концентрации экситонов).

Быстрый нелинейный процесс экситонной природы, по-видимому, может возникнуть при малых уровнях возбуждения и в полупроводниковых микрокристаллах CdS, в которых существует квантовый размерный эффект<sup>12, 13</sup>.

Авторы благодарны Л. В. Келдышу за поддержку и обсуждение работы.

#### Литература

1. Kalt H., Lyssenko V.G., Renner R., Klingshirn C. Solid State Comm., 1984, 51, 675.
2. Klingshirn C., Vohnert K., Kalt H., Lyssenko V.G., Kempf K. J. of Luminescence, 1985, 30, 188.
3. Henneberger F., Puls J., Rossmann H. J. of Luminescence, 1985, 30, 204.
4. Коршунов В.В., Лебедев М.В., Лысенко В.Г. ФТТ, 1985, 27, 1518.
5. Nguyen H.X., Zimmermann R. Phys. Stat. Sol. (b), 1984, 124, 191.
6. Rossmann H., Henneberger F. Phys. Stat. Sol. (b), 1985, 131, 185.
7. Henneberger F., Rossmann H. Phys. Stat. Sol. (b), 1984, 121, 685.
8. Bohnert K., Fidorra F., Klingshirn C. Z. Phys. B, 1984, 57, 263.
9. Rossmann H., Henneberger F., Voigt J. Phys. Stat. Sol. (b), 1983, 115, K 63.
10. Rösler M., Zimmermann R. Phys. Stat. Sol. (b), 1977, 83, 85.
11. Fidorra F., Wegener M., Bigot J.Y., Hönerlage B., Klingshirn C. J. of Luminescence, 1986, 35, 43.
12. Ekimov A.I., Efrös A.L., Onushchenko A.A. Solid State Comm., 1985, 56, 921.
13. Banyai L., Koch S.W. Phys. Rev. Lett., 1986, 57, 2722.

Московский государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию  
25 апреля 1987 г.

<sup>2)</sup> Изменить спектр пропускания (выбрать рабочую точку нелинейной системы со обратной связью) можно также поворотом вектора поляризации излучения лазера относительно оптической оси кристалла.