

Исследование экситонной структуры в спектрах фотопроводимости кристаллов CdS

© А.С. Батырев, Р.А. Бисенгалиев*, О.Э. Ботов, Н.В. Карасенко, Б.В. Новиков*, Е.В. Сумьянова

Калмыцкий государственный университет,
358000 Элиста, Россия

* Научно-исследовательский институт физики при Санкт-Петербургском государственном университете,
198904 Петродворец, Россия

Исследованы изменения низкотемпературных спектров фотопроводимости (ФП) кристаллов CdS под влиянием внешних воздействий. Продемонстрирована высокая чувствительность тонкой (экситонной) структуры (ТС) спектров к изменениям условий рекомбинации неравновесных носителей вблизи поверхности и в объеме полупроводника.

При низких температурах в спектрах ФП полупроводников в области края собственного поглощения можно наблюдать тонкую структуру (ТС) в виде максимумов (тип 1) или минимумов (тип 2), обусловленную экситонами. Наличие ТС обусловлено различием времени жизни неравновесных основных носителей в приповерхностном слое (τ_s) и объеме полупроводника (τ_v) [1]. При этом тип ТС определяется соотношением этих времен: в случае ТС типа 1 $\tau_s > \tau_v$, в случае ТС типа 2 $\tau_s < \tau_v$, а при выполнении равенства $\tau_s = \tau_v$ спектры ФП должны иметь бесструктурный (гладкий) вид. Воздействуя на полупроводник различными способами, можно изменять соотношение между τ_s и τ_v , а следовательно, и тип ТС, используя последнюю как индикатор изменения фоточувствительности приповерхностной области и /или объема полупроводника.

В настоящей работе исследованы низкотемпературные ($T = 4 \div 77$ K) спектры ФП кристаллов CdS в зависимости от электрического поля, приложенного к полупроводнику по методу "эффекта поля", предварительного фотовозбуждения собственным светом, подсветки ИК — светом и тянущего поля. Обнаружены характерные изменения ТС спектров и фоточувствительности в собственной и примесной областях спектра.

Приложение к полупроводнику электрического поля, создающего слой обеднения вблизи поверхности, приводит, по мере его увеличения, к обратимой трансформации ТС от типа 1 к типу 2 (рис. 1, кривые 1–3). На промежуточной стадии такой трансформации спектральная кривая ФП приобретает гладкий вид (кривая 2). При значениях потенциала на полевом электроде, соответствующих слою обогащения у поверхности, тип ТС сохраняется (кривая 4).

К обратимой трансформации ТС от типа 1 к типу 2 приводит также предварительная засветка кристалла собственным светом.¹

В ряде кристаллов наблюдается обратимая трансформация ТС от типа 2 к типу 1 при интенсивной инфракрасной (ИК) подсветке. Имелись образцы, в которых

переход от типа 2 к типу 1 ТС происходил при увеличении тянущего поля (рис. 2). Отметим немаловажную для дальнейшего деталь, а именно: инверсия типа ТС с увеличением тянущего поля наблюдалась в образцах с линейными размерами ~ 1 mm.

Основные качественные черты изменения спектров ФП в собственной и примесной областях спектра заключаются в следующем.

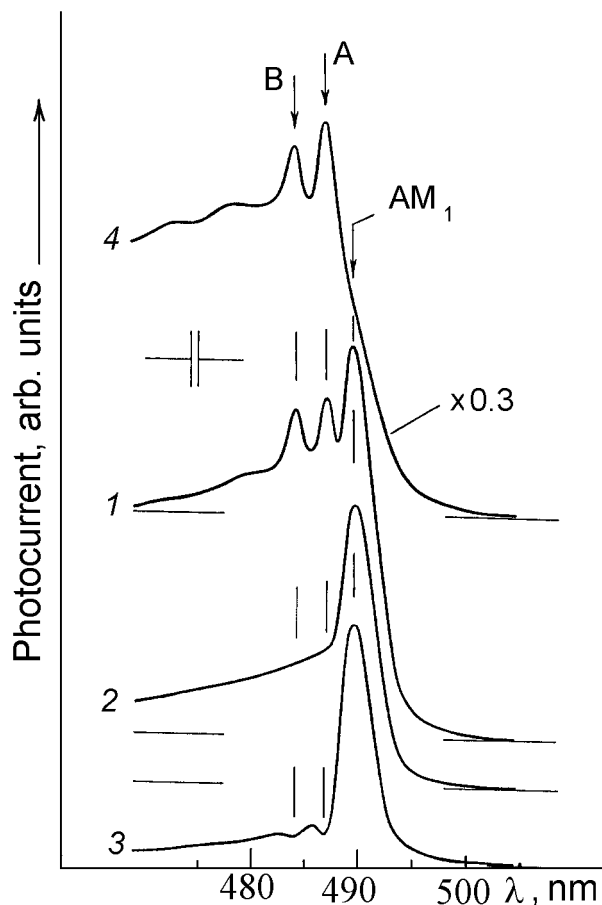


Рис. 1. Спектры ФП кристалла CdS при $T = 77$ K, $E \perp C$ и различных значениях потенциала φ на полевом электроде относительно образца. Для кривых 1–4 $\varphi = 0$; -50 ; -300 ; 50 V соответственно.

¹ Этот эффект наблюдался нами только в кристаллах, содержащих в спектрах ФП один или два длинноволновых дополнительных максимума AM_1 и AM_2 [2] (в обозначениях работы [3] $I_1(AM_1)$ и $I_2(AM_2)$). Такие кристаллы составляли большинство в партии исследованных нами образцов.

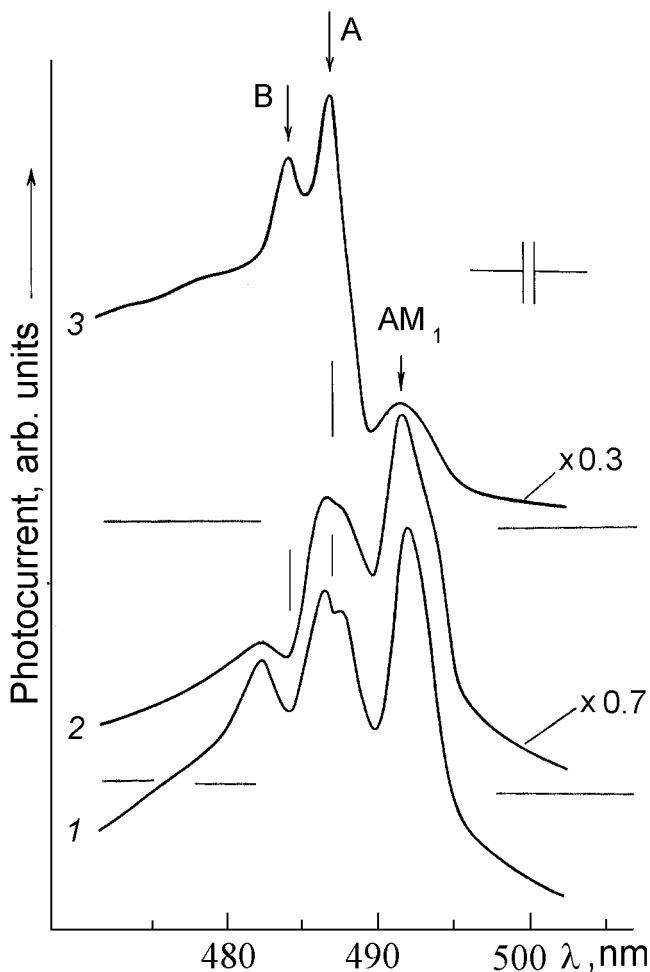


Рис. 2. Спектры ФП образца CdS при $T = 77\text{ K}$, $E \perp C$ и различных значениях тянущего напряжения U . Для кривых 1–3 $U = 20; 25; 35\text{ V}$ соответственно.

В случае перехода типа 1 ТС в тип 2 фоточувствительность в собственной области спектра сильно уменьшается при относительно слабом ее изменении в примесной области максимумов AM_1 и AM_2 . В результате спектры ФП приобретают характерный для кристаллов с типом 2 ТС вид кривой с доминирующим длинноволновым максимумом в примесной области спектра (рис. 1, кривые 1–3) (см. также [3]).

В случае инверсии типа ТС при ИК-подсветке происходит общее гашение фоточувствительности, существенно преобладающее в спектральной области дополнительных максимумов AM_1 и AM_2 . В случае инверсии типа ТС с ростом тянущего поля фоточувствительность в области AM_1 и AM_2 практически не меняется, а в собственной области спектра значительно возрастает (рис. 2). В обоих случаях фоточувствительность в области максимумов AM_1 и AM_2 относительно собственной области уменьшается, а общий вид спектральных кривых ФП приобретает черты, характерные для кристаллов с типом 1 ТС.

Трансформация спектров ФП по мере увеличения слоя обеднения у поверхности (рис. 1, кривые 1–3) объясняется уменьшением τ_s за счет увеличения скорости рекомбинации в области пространственного заряда по мере перехода от слабого обогащающего к истощающему приповерхностному изгибу зон [1]. Аналогично можно объяснить влияние предварительной засветки собственным светом на спектры ФП, поскольку в результате освещения возможна перезарядка поверхностных состояний за счет заполнения их электронами. Образование слоя обеднения у поверхности кристаллов CdS с типом 1 ТС, обусловленное "прилипанием" фотоэлектронов на поверхностные состояния, обнаружено в [4] методом спектроскопии фотоотражения в области экситонных резонансов.²

Характер действия ИК-подсветки на ТС спектров ФП указывает на изменение под ее влиянием соотношения $\tau_s < \tau_v$ на обратное. В то же время значительное уменьшение фототока в собственной области спектра при ИК-подсветке указывает на соответствующее уменьшение τ_s . Поэтому соотношение $\tau_s > \tau_v$ может реализоваться при ИК-подсветке лишь в случае преимущественного уменьшения при этом τ_v . Это фактически и наблюдается в эксперименте в виде преобладающего ИК-гашения фототока в примесной области максимумов AM_1 и AM_2 .

Селективный характер ИК-гашения ФП, с одной стороны, объясняет трансформацию ТС при ИК-подсветке, а с другой стороны указывает на объемное происхождение AM_1 и AM_2 (на это указывает также отмеченная выше их слабая чувствительность к изгибу зон у поверхности).

ИК-гашение AM_1 и AM_2 связано, на наш взгляд, с ионизацией ИК-излучением очувствляющих r -центров, с которыми непосредственно взаимодействуют соответствующие этим максимумам центры. Возможно, что r -центры входят в состав последних. Не исключено также, что центры, формирующие AM_1 и AM_2 , являются двукратно ионизованными собственными акцепторными дефектами, изолированными (AM_2) [2] или возмущенными другими заряженными центрами (AM_1).

Нетривиальным представляется нам эффект влияния тянущего поля на ТС. Трансформация ТС, как и в случае ИК-подсветки, указывает на обращение неравенства $\tau_s < \tau_v$ с ростом тянущего поля. Однако в данном случае такое обращение связано с ростом τ_s при одновременном уменьшении τ_v , что следует из сверхлинейного роста фототока с ростом тянущего поля в собственной области и сублинейного — в примесной области (рис. 2). Подобные изменения τ_s и τ_v с ростом тянущего поля могут быть связаны с инжекцией дырок из контакта (анода) в сильных полях, легко достижимых в образцах CdS с малыми размерами [5]. Инжекция дырок может привести к сокращению τ_v за счет захвата инжектированных дырок r -центрами и увеличения темпа

² В [4] установлена также корреляция между типом ТС спектров ФП и типом спектров фотоотражения, что указывает на важную роль поверхностных состояний и в формировании ТС спектров ФП.

рекомбинации в объеме свободных электронов с дырками, захваченными на мелкие акцепторные центры. Рост τ_s с увеличением тянущего поля может быть вызван уменьшением истоющего изгиба зон вблизи поверхности в результате захвата части инжектированных дырок приповерхностным дырочным "карманом".

Список литературы

- [1] В.А. Киселев, Б.В. Новиков, А.Е. Чередниченко. Экситонная спектроскопия приповерхностной области полупроводников. ЛГУ, Л. (1987). С. 162.
- [2] А.С. Батырев, Н.В. Карасенко, Б.В. Новиков. Вестн. СПбГУ **4**, 1(4) 28 (1994).
- [3] J.A. Bragagnolo, G.M. Storti, K.W. Boer. Phys. Stat. Sol. (a) **22**, 639 (1974).
- [4] R.A. Bisengaliev, E.D. Batyrev, B.V. Novikov, A.V. Sel'kin. Abstr. of Int. Conf. "Optics of Excitons in Condensed Matter". St. Petersburg (1997), P. 68.
- [5] R.W. Smith. Phys. Rev. **105**, 3, 900 (1957).