

Экситоны в предионизационном электрическом поле барьера Шоттки

© А.Б. Новиков, Б.В. Новиков, Г. Роппишер, А.В. Селькин, Н. Штайн, Р.Б. Юферев, Ю.А. Бумай

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

Исследованы низкотемпературные ($T = 80$ К) спектры экситонного отражения света кристаллов CdS в электрическом поле барьера Шоттки. Зарегистрировано аномальное штарковское смещение водородоподобного экситонного состояния в предионизационном пределе. Из анализа спектров, выполненного в рамках теории нелокального диэлектрического отклика в пространственно неоднородной среде, установлен характер распределения подбарьерного электрического поля.

Хорошо известно, что под действием электрического поля основное экситонное состояние кристалла испытывает штарковский сдвиг и уширение [1]. В случае слабых полей происходит квадратичное по полю смещение линии свободного экситона в длинноволновую сторону спектра. Однако, когда значение напряженности E электрического поля не является малым по сравнению с критическим значением E_1 , соответствующим условию полной ионизации экситона, следует ожидать (по аналогии с поведением водородоподобного атома в сильном электрическом поле [2]) существенного отклонения от квадратичного закона смещения, включая изменение знака смещения и сильное уширение экситонного состояния.

В настоящей работе экспериментально изучались оптические спектры отражения (рис. 1) в области A - и B -экситонных резонансов кристаллов CdS с тонким полупрозрачным покрытием из золота, под которым формировался барьер Шоттки. В условиях обратного смещения на барьере удалось зарегистрировать все стадии изменения спектров R с ростом подбарьерного поля вплоть до полного сглаживания резонансных спектральных особенностей.

Для количественного описания полученных экспериментальных данных мы выполнили (на основе подхода [3]) расчеты спектров, учитывающие эффекты пространственной дисперсии и неоднородный характер распределения электрического поля барьера Шоттки, в котором штарковский сдвиг $\Delta\omega_0$ и штарковское уширение $\Delta\Gamma$ экситонного состояния зависят от расстояния Z до поверхности. Локальные значения $\Delta\omega_0$ и $\Delta\Gamma$ как функции приведенного электрического поля E/E_1 рассчитывались на основании табличных данных [2,4].

Соответствие экспериментальных и расчетных значений "ионизирующих" напряжений достигается, если допустить, что концентрация избыточных ионизованных доноров $\Delta N = N_D - N_A$ вблизи поверхности существенно меньше, чем в остальном объеме кристалла. Резкое уменьшение величины ΔN около поверхности, по видимому, обусловлено внедрением компенсирующих акцепторов в приповерхностный слой кристалла в процессе напыления золота.

Простейшая модель, отражающая принципиальную сторону описываемой ситуации, соответствует ступенчатому представлению координатной зависимости ΔN

с малым значением в приповерхностном слое некоторой толщины W_1 по сравнению с остальным объемом кристалла. В рамках такой модели мы провели теоретические расчеты спектров R , варьируя параметры W_1 и ΔN . Наилучшее соответствие теоретических спектров экспериментальным данным достигается при $\Delta N = 4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ в области $Z < W_1$ и $\Delta N = 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ в области $Z > W_1$ ($W_1 = 110 \text{ nm}$, ось Z направлена вглубь образца, плоскость $Z = 0$ соответствует границе раздела "пленка Au-кристалл").

Таким образом, толщина W_1 приповерхностной области (где из-за малых значений ΔN существует практически однородное электрическое поле), оказалась порядка длины свободного пробега экситона, т.е. экспериментальная ситуация близка к случаю поведения экситонов в однородном электрическом поле, включая предел предионизационного распада. Это позволяет воспользоваться стандартной процедурой Аспнеса [5], обычно применяемый при обработке спектров отражения с целью определения параметров резонанса.

На рис. 2 кривая 6, изображает штарковское смещение резонансной частоты ω_0 экситона $A_{n=1}$ в CdS, полученное из анализа экспериментальных спектров R с использованием процедуры Аспнеса. Соответствующее этому смещению полное уширение Γ (определенное также в рамках этой процедуры) изображено кривой 3. Сплошные кривые 2 и 5 являются результатом обработки по Аспнесу теоретических спектров отражения, рассчитанных для разных значений напряжения U на барьере. Изображенные на рис. 2 кривые сопоставляются с расчетами штарковского смещения (кривая 4) и полного уширения (кривая 1) в области почти однородного поля E в точке $Z = W_1$ (на границе слабой и сильной компенсации донорной примеси).

Штарковские смещения экситонного резонанса, определенные тремя способами (кривые 4, 5 и 6), хорошо согласуются друг с другом, подтверждая справедливость предложенной теоретической модели. Полученные нами экспериментальные данные явно указывают на аномальный характер эффекта Штарка на экситонном состоянии, т.е. на существенное отклонение смещения экситонного резонанса в сильном электрическом поле от квадратичного по полю закона, что находится в хорошем согласии с теоретическими выводами [2] о поведении водородоподобных состояний в электрических полях.

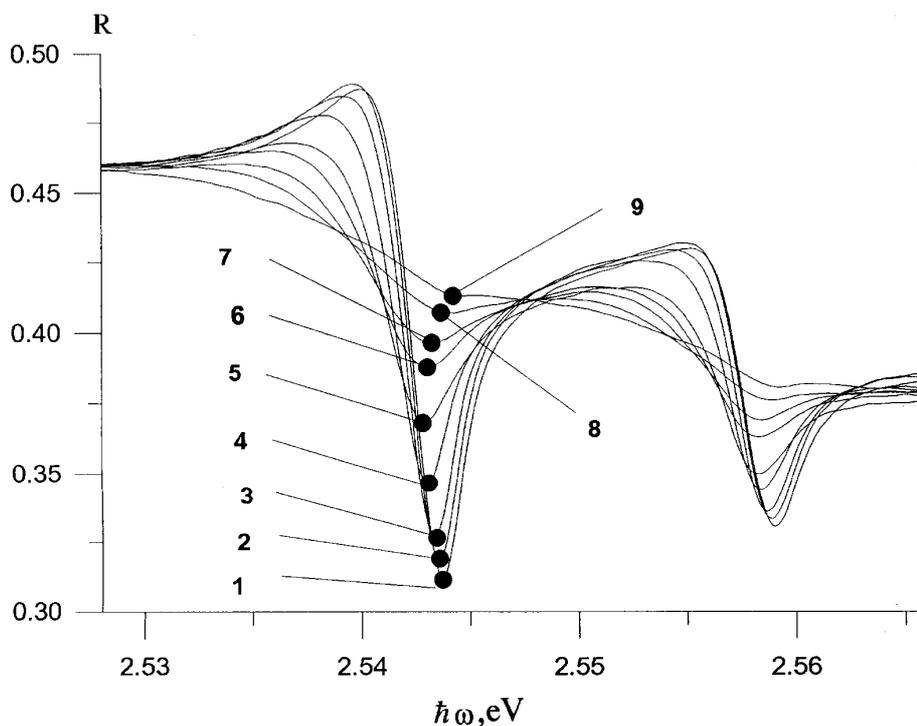


Рис. 1. Спектры отражения кристалла CdS ($T = 80$ K) в области экситонных резонансов A и B при постоянных составляющих напряжения на барьере Шоттки $U = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ V (кривые 1–9, соответственно) и модулирующей составляющей 0.05 V.

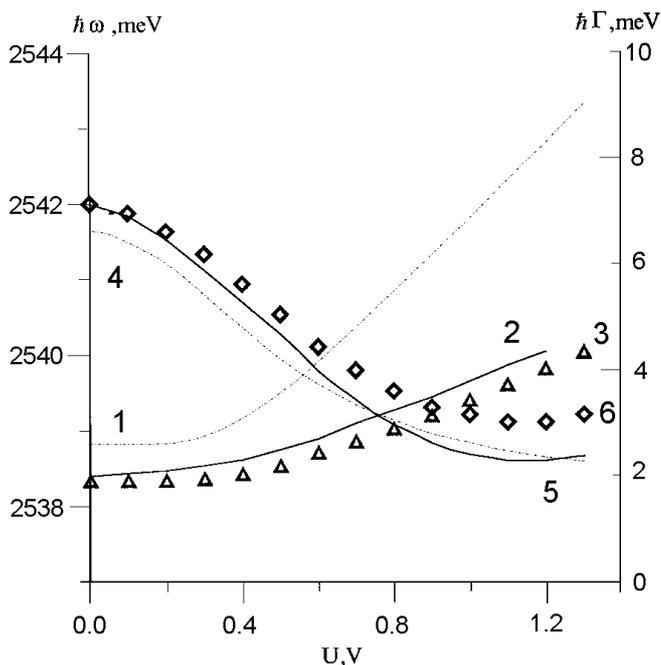


Рис. 2. Резонансная частота экситона (кривые 4, 5 и ромбики (6)) и полное уширение (кривые 1, 2 и треугольники (3)) в зависимости от приложенного барьерного напряжения U для состояния $A_{n=1}$ в CdS.

Что касается зависимости уширения Γ от приложенного напряжения U , то существует заметное различие между значениями Γ в области однородного поля (кривая 1) и значениями, полученными в результате обработки спектров согласно Аспнесу (кривые 2 и 3). Дело в том, что измеряемая по методу [5] величина Γ в случае, когда она сильно зависит от Z , является лишь некоторым эффективным параметром и, в основном, определяется участками спектра на крыльях контуров отражения, где поглощение света мало и в формирование отраженной волны дает существенный вклад область кристалла $Z > W_1$ с относительно малыми значениями $\Gamma(Z)$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 97-02-18322).

Список литературы

- [1] А.Г. Аронов, А.С. Иоселевич. В сб.: *Экситоны* / Под ред. Э.И. Рашба и М.Д. Стерджа. Наука М. (1985). С. 193.
- [2] R.J. Damburg, V.V. Kolosov. *J. Phys.* **B9**, 3358 (1976).
- [3] А.В. Селькин. *Вестн. СПбГУ. Сер. 4, 2(11)*, 87 (1996).
- [4] В.А. Киселев, Б.В. Новиков, А.Е. Чердиченко. *Экситонная спектроскопия приповерхностной области полупроводников*. Изд-во ЛГУ, Л. (1987).
- [5] D.E. Aspnes. In: *Handbook on Semiconductors* / Ed. T.S. Moss. North-Holland, N. Y. (1980). V. 2. P. 109.