

Особенности контуров экситонного отражения света кристаллов GaAs

© А.С. Батырев*, В.В. Джамбинов, А.Е. Чередниченко

* Калмыцкий государственный университет,
358000 Элиста, Россия

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

(Поступила в Редакцию 11 декабря 1996 г.)

Исследованы контуры экситонного отражения света кристаллов GaAs, подвергнутых поверхностно-чувствительной электронной бомбардировке. Обнаружены особенности, которые на качественном уровне можно объяснить с использованием простейшей аппроксимации приповерхностного экситонного потенциала потенциальной ямой прямоугольной формы.

Исследование оптических экситонных спектров в прямозонных полупроводниках дает важную информацию о взаимодействии экситона с поверхностью и приповерхностной областью кристалла [1–17]. Особенно информативными являются контуры экситонного отражения света (КЭОС), которые зависят от обработки поверхности [2,3,8,11,15,16], интенсивности [6,7] и геометрии [13–15] возбужденных, состава приповерхностного слоя [17], величины прикладываемого внешнего электрического поля различной конфигурации (см., например, [6,9]). В ряде работ делались попытки оценить параметры приповерхностной области из КЭОС.

Зависимость КЭОС от внешних поверхностно-чувствительных воздействий и соответственно от состояния приповерхностной области образца обусловлена существованием вблизи поверхности специфического переходного экситонного слоя, характеристики которого могут изменяться под воздействием внешних факторов. Такой слой эффективно описывается приповерхностным экситонным потенциалом (см., например, [11]), тип и параметры которого определяются конкретными механизмами возмущения экситонного состояния в приповерхностной области, вызванными, в частности, изменениями концентрации дефектов, величины и распределения поля.

В настоящей работе исследована трансформация КЭОС кристаллов GaAs под воздействием электронной бомбардировки низкоэнергетическими электронами (3.5 keV). Эксперименты проводились с использованием специального криостата [18], позволявшего облучать образцы электронами в высоком вакууме при температуре $T = 4.2$ К и *in situ* регистрировать их оптические спектры в зависимости от дозы облучения. Исследовались монокристаллические пленки *n*-GaAs с различными значениями концентрации центров $N_D - N_A$ ($\sim 10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$), выращенные методом жидкофазной эпитаксии.

На рис. 1 приведены КЭОС одного из исследованных образцов: исходного (кривая 1) и после разных доз облучения (кривые 2,3). Как видно из этого рисунка, КЭОС в исходном состоянии имеет сложный вид и характеризуется наличием структуры в области максимума отражения, а также узкого пика (так называемого

спайка) на частоте объемного продольного экситона $\omega_{LV} \approx 12224 \text{ cm}^{-1}$ [9].

Электронная бомбардировка приводит к характерной перестройке КЭОС. По мере увеличения дозы облучения наблюдается его "вращение": отражение в области основного максимума падает, а в области спайка и коротковолнового плеча возрастает, минимум КЭОС сдвигается в область меньших энергий. После дозы $\sim 6 \cdot 10^{17} \text{ e/cm}^2$ форма КЭОС приобретает антидисперсионный вид (кривая 3). Обращает на себя внимание исключительно высокая чувствительность к поверхностно-чувствительной бомбардировке спайка, а именно с ростом дозы спайк необычно возрастает по интенсивности, одновременно смещаясь в длинноволновую область (кривые 2,3). Максимальная величина сдвига спайка составляла $\sim 1.2 \text{ cm}^{-1}$. Аномальное поведение спайка будет объяснено далее с помощью вставки к рис. 1 [11,19].

Важно отметить, что изменения КЭОС, вызванные облучением, полностью сохранялись и после нагрева образца до комнатной температуры (в отличие, например, от кристаллов группы A_2B_6 [11,19]). Это указывает на необратимый характер изменений свойств структур арсенида галлия при воздействии низкоэнергетическими электронами.

Перейдем к обсуждению полученных результатов. Для реальных поверхностей кристаллов A_3B_5 характерно закрепление (пиннинг) уровня Ферми поверхностными состояниями, что приводит к фиксированному приповерхностному изгибу зон. В случае кристаллов *n*-GaAs типичный изгиб электронных зон соответствует слою обеднения и оценивается при разумных параметрах в $\sim 0.8 \text{ eV}$ (см., например, [9]).¹

В электрическом поле слоя пространственного заряда на счет штарковского сдвига резонансной частоты экситона возможно образование потенциальной ямы для экситонов [11,19]. В ряде работ (см., например, [11,19]) указывается на возможность образования вблизи поверхности потенциальной ямы с жесткой стенкой, т.е.

¹ В оптических исследованиях проявляются значительно меньшие по величине изгибы зон, что связано с их частичным световым спрямлением даже при относительно малых интенсивностях зондирующего света (см., например, [2,9]).

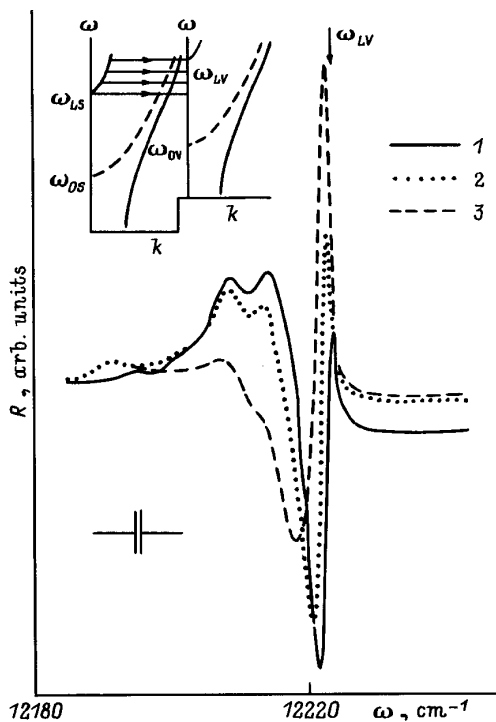


Рис. 1. КЭОС кристалла GaAs при 4.2 К. 1 — экспериментальный спектр GaAs с "естественной" поверхностью, 2, 3 — после облучения электронами 3.5 keV по мере увеличения дозы облучения ($e\ell \cdot \text{cm}^{-2}$): 2 — $5 \cdot 10^{16}$, 3 — $6 \cdot 10^{17}$. На вставке — схема, поясняющая anomalously большую интенсивность спайка при наличии потенциальной ямы с "жесткими" стенками [11,19].

прямоугольной ямы. В недавней работе Новикова и др. [20] изучены спектры отражения и электроотражения в барьерах Шоттки на CdS. Соответствующие расчеты эффекта Штарка находят согласие с экспериментом в простейшей модели ступенчатой зависимости величины $\Delta N = N_D - N_A$ с существенно меньшим значением этой величины в приповерхностном слое по сравнению с остальным объемом кристалла (в этом слое происходит основное падение прикладываемого напряжения).

Исходя из вышеизложенного, мы выполнили расчеты КЭОС для комплексного приповерхностного экситонного потенциала, представленного прямоугольными ямами для резонансной частоты ω_0 ($\Delta\omega_0$ — глубина ямы) и ступеньками для затухания экситона Γ . С целью достижения лучшего согласия с экспериментом варьировались глубина и ширина ямы, а также значения Γ . Расчет основывался на методе, предложенном Киселевым [21], с использованием многослойной аппроксимации неоднородности [11,19] (см. также работу Селькина [22], результаты которой были использованы для расчета КЭОС сульфида кадмия в поле барьера Шоттки [20]).

В расчетах арсенида галлия использовались параметры экситона, приведенные в [9]. На рис. 2 показаны экспериментальный (кривая 1) и расчетный (кривая 2) КЭОС образца GaAs; на вставке к этому рисунку показан соответствующий расчетному КЭОС потенциал.

Как видно из рисунка, простейшая модель потенциальной ямы в виде прямоугольника качественно передает ход коэффициента отражения и воспроизводит характерную особенность экспериментальных КЭОС — спайк, однако в расчетных спектрах его величина больше.

Согласно [11,19], яркая спайковая структура характерна для потенциальной ямы с резкими краями, что хорошо объясняется в рамках представлений поляритонной теории (см. вставку к рис. 1).

Понижение резонансной частоты экситона у поверхности ($\omega_{0S} < \omega_{0V}$) приводит к тому, что частоты поляритонов верхней ветви поверхностного слоя ($\omega > \omega_{LS}$) попадают в "запрещенную" область частот продольно-поперечного расщепления объемного поляритона (ω_{0V}, ω_{LV}), и вследствие этого такие поляритоны испытывают сильное отражение от объема кристалла (эффект "металлического" отражения от объема поляритонов поверхностного слоя).

Мы полагаем, что именно этот эффект, теоретически предсказанный в [11,19], является причиной наблюдаемого в эксперименте резкого возгорания и смещения спайка в сторону меньших энергий под воздействием электронной бомбардировки (рис. 1). Действительно, облучение кристаллов электронами с энергией в несколько килоэлектрон-вольт приводит помимо прочего к образованию допороговых дефектов на глубине проникновения электронов (несколько сотен ангстрем) (см., например, [11,19,23]). Это подтверждается также необратимостью КЭОС GaAs после нагрева до комнатной температуры, так как известно [23] (см. также [24]), что в этих кристаллах структурные нарушения типа точечных дефектов стабильны и для своего отжига требуют значительно более высоких температур, чем комнатная.

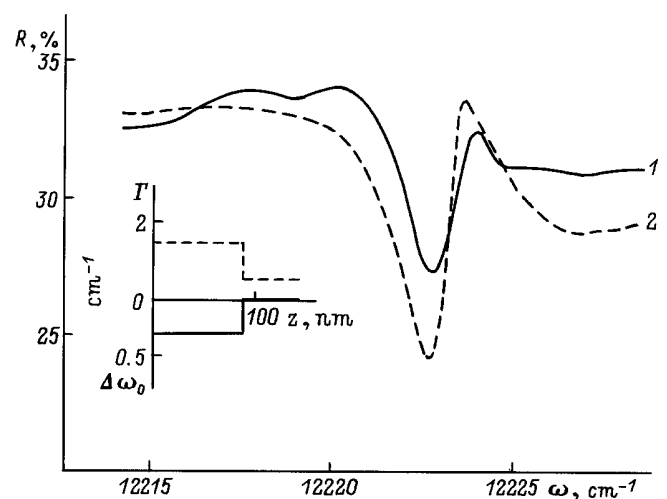


Рис. 2. КЭОС кристалла GaAs. 1 — экспериментальный спектр при $T = 4.2$ К, 2 — расчетный для потенциальной ямы, изображенной на вставке. На вставке — модель потенциальной ямы, соответствующая расчетному КЭОС (кривая 2); $\Delta\omega_0$ — сдвиг резонансной частоты экситона, Γ — затухание экситона.

Структурные дефекты в GaAs являются электрически активными, с уровнями энергии как в верхней, так и в нижней половине запрещенной зоны [24,25]. В зависимости от положения этих уровней относительно уровня Ферми дефекты могут находиться в различных зарядовых состояниях. Отсюда следует, что в кристаллах GaAs под действием электронного облучения наряду с дефектным изменяется также зарядовое состояние приповерхностной области.

Таким образом, в настоящей работе впервые обнаружен проявляющийся в КЭОС эффект зеркального отражения от объема поляритонов приповерхностного слоя, который, согласно предсказаниям [11,19], должен проявляться в случае приповерхностных потенциальных ям для экситонов с резкими границами (так называемые "твердые" или "жесткие" стенки — hard walls).

Что касается более общего случая потенциальных ям, то здесь для лучшего согласия между экспериментом и подгоночными расчетными КЭОС следует учитывать так называемый мертвый, т. е. безэкситонный, слой [1,10], а также реальное распределение электрического поля и примесно-дефектных центров вблизи поверхности.

Такой учет произведен, например, в вышеупомянутой работе Новикова и др. [20] для расчета КЭОС CdS в поле барьера Шоттки; для расчета КЭОС GaAs Лягуа [10] использовал ступенчатый приповерхностный потенциал, что при учете мертвого слоя позволило ему получить удовлетворительное согласие между экспериментальными и расчетными спектрами для ряда соединений.

Авторы считают своим долгом почтить память безвременно ушедшего из жизни старшего научного сотрудника ФТИ им. А.Ф. Иоффе Вадима Алексеевича Киселева — коллеги, соавтора, чьи идеи легли в основу целого ряда работ, в том числе и настоящей.

Список литературы

- [1] J.J. Hopfield, D.G. Thomas. Phys. Rev. **132**, 2, 563 (1963).
- [2] D.D. Sell, S.E. Stokowski, R. Dingle, J.V. DiLorenzo. Phys. Rev. **7**, 10, 4568 (1973).
- [3] F. Evangelisti, A. Frova, F. Patella. Phys. Rev. **B10**, 10, 4253 (1974).
- [4] S. Sakoda. J. Phys. Soc. Jap. **40**, 1, 152 (1976).
- [5] I. Balslev. Phys. Stat. Sol. (b) **88**, 1, 155 (1978).
- [6] J. Lagois, E. Wagner, W. Bludau, K. Losch. Phys. Rev. **B18**, 8, 4325 (1978).
- [7] J.U. Fischbach, W. Ruhle, D. Bimberg, E. Bauser. Solid State Commun. **18**, 9/10, 1755 (1976).
- [8] L. Schultheis, I. Balslev. Phys. Rev. **B28**, 4, 2292 (1983).
- [9] L. Schultheis, J. Lagois. Phys. Rev. **B29**, 12, 6784 (1984).
- [10] J. Lagois. Phys. Rev. **B23**, 10, 5511 (1981).
- [11] В.А. Киселев, Б.В. Новиков, А.Е. Чередниченко. Экситонная спектроскопия приповерхностной области полупроводников. Изд-во ЛГУ, Л. (1987). 162 с.
- [12] А.С. Батырев, В.В. Джамбинов, Т.Т. Лаврищев, И.Т. Лаврищева, Б.С. Лиджиев. Тез. докл. 12-го Всесоюз. конф. по физике полупроводников. Киев (Октябрь 1990). Ч. 2. С. 288–289.
- [13] F. Perez-Rodriguez, P. Halevi. Phys. Rev. **B45**, 20, 1184 (1993).
- [14] F. Perez-Rodriguez, P. Halevi. Phys. Rev. **B53**, 15, 10086 (1996).
- [15] А.С. Батырев, Н.В. Карасенко, А.В. Селькин. ФТТ **35**, 11, 3099 (1993).
- [16] А.С. Батырев, Б.В. Новиков, А.В. Селькин. Письма в ЖЭТФ **61**, 10 (1995).
- [17] А.С. Батырев, Н.В. Карасенко, А.В. Селькин, Л.Н. Тенищев. Письма в ЖЭТФ **62**, 5, 397 (1995).
- [18] Б.В. Новиков, Г.В. Бенеманская, А.Е. Чередниченко. ПТЭ **2**, 216 (1976); В.В. Novikov, G.V. Benemanskaya, A.E. Cherednichenko. Cryogenics. November (1976).
- [19] А.Е. Cherednichenko, V.A. Kiselev. Prog. Surf. Sci. **36**, 3, 179 (1991).
- [20] А.Б. Новиков, Б.В. Новиков, Г. Роппишер, А.В. Селькин, Н. Штейн, Р.Б. Юферов. Письма в ЖЭТФ **64**, 1, 38 (1996).
- [21] В.А. Киселев. ФТТ **20**, 7, 2173 (1978).
- [22] А.В. Селькин. Вестн. СПбГУ **4**, 2 (11), 77 (1996).
- [23] В.С. Вавилов, Н.П. Кекелидзе, Л.С. Смирнов. Действие излучений на полупроводники. Наука, М. (1988). 191 с.
- [24] С. Маделунг. Физика полупроводниковых соединений 3 и 5 групп. Мир, М. (1967). 477 с.
- [25] В.С. Вавилов, А.Е. Кив, О.З. Ниязова. Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках. Наука, М. (1981). 368 с.