Физика низких температур, 1996, т. 22, № 1, с. 104–106

Краткие сообщения

УДК 535.312;535.346

О наблюдении высокотемпературного «спайка» в экситонных спектрах отражения CdSe

П. С. Кособуцкий, А. Л. Прокопчук

Университет «Львовская политехника», Украина, 290646, г. Львов-13, ул. С. Бандеры, 12
E-mail:ryk@lpi.lviv.ua

Статья поступила в редакцию 27 июня 1995 г., после переработки 8 августа 1995 г.

Впервые сообщается о наблюдении высокотемпературного (T = 77 K) «спайка» в экситонном спектре отражения CdSe. Высказано предположение о том, что возможными причинами наблюдаемой аномалии могут быть влияние экситон-фононного взаимодействия на трансляционную массу экситона, а также координатная зависимость фактора затухания в системе экситонов.

Вперше повідомляється про експериментальне спостереження високотемпературного (T = 77 K) «спайку» в екситонном спектрі відбивання CdSe. Висловлено припущення, що можливими причинами спостережуваної аномалії можуть бути вплив екситон-фононної взаємодії на трансляційну масу екситона, а також координатна залежність фактора згасання в системі екситонів.

Известно, что состояние поверхности кристаллов играет важную роль в формировании экситонных спектров отражения [1]. Так, например, в них нередко обнаруживается «неклассическая» особенность — узкий дополнительный максимум («спайк») отражения, который, как правило, исчезает при повышении температуры от 4,2 K. Этот факт в общем укладывается в распространенную интерпретацию [2], трактующую такой механизм как следствие интерференции световых волн, отраженных от противоположных границ безэкситонного («мертвого») слоя на поверхности с учетом пространственной дисперсии, которая ослабевает с увеличением затухания в системе экситонов.

В данной работе впервые сообщается об экспериментальном наблюдении высокотемпературного (T = 77 K) «спайка» отражения. Мы провели компьютерное моделирование экситонных спектров и убедились в том, что такой нетривиальный температурный эффект можно объяснить в рамках известной модели [2] в предположении о большой величине эффективной массы экситона M^*. Некоторую роль может играть возрастание затухания вследствие повышения концентрации дефектов при приближении к поверхности. В данном случае «спайк» возникает за счет фазовых соотношений между интерферирующими волнами и может наблюдаться в предельном случае классической дисперсии $M^* \to \infty$.

Экспериментальные спектры отражения регистрировались от естественных поверхностей CdSe в поляризованном свете фотоэлектрическим методом в геометрии нормального отражения на спектральном приборе с линейной дисперсией около 7 Å/мм. Исследуемые кристаллы выращивались из газовой фазы.

Экспериментальные результаты представлены на рис. 1 (кривые *1* и *2*). В спектрах резонансной люминесценции при невысоких уровнях возбуждения наблюдается сравнительно широкая бесструктурная полоса *1*, которая обусловлена излучательным распадом свободных экситонов. В спектре отражений *2*, помимо четко выраженных главных экстремумов, при температуре T = 77 K наблюдается дополнительный узкий максимум — «спайк», который с повышением температуры быстро затухает с одновременным уширением спектра отражения в целом и исчезает при T >100 K.

Проводя компьютерное моделирование спектров в рамках традиционного подхода [2], мы использовали модель оптически однородного безэкситонного слоя толщиной d с показателем преломления $n_0 = \sqrt{\varepsilon_0}$, где ε_0 — фоновая диэлектрическая проницаемость в объеме кристалла. Расчетная толщина «мертвого» слоя оценивалась следующим образом. Известно [2], что «спайк» возникает на частоте продольного экситона ω_L, а минимум — на частоте фазовой компенсации ω_m [3]:

$$\omega_m^2 \simeq \omega_0^2 \left(1 + \frac{4\pi\alpha}{\varepsilon_0} \cos^2 \delta/2\right),$$

© П. С. Кособуцкий, А. Л. Прокопчук, 1996

где $4\pi\alpha$ — сила осциллятора перехода в соответствующее экситонное состояние; $\delta = 4\pi n_0 d/\lambda$ — фазовая задержка волны в «мертвом» слое. По экспериментальным данным о положении минимума и «спайка» мы получили, что толщина слоя составляет 100–160 Å, т.е. в пределах размеров одной-двух экситонных орбит. Другие расчетные параметры взяты из [4]. Оказалось, что существенным является выбор закона дисперсии функции диэлектрической проницаемости в области экситонного резонанса и затухания. Для трансляционной массы экситона $M^* = 0{,}87m_0$ [4] и толщины слоя $d = 120$ Å «спайк» исчезает при затухании $\gamma > 0{,}1$ МэВ (сравни кривые *3* и *4*). Если учесть также, что ширина экспериментального спектра существенно превышает величину продольно-поперечного расщепления E_{LT} [4], то можно предположить, что наблюдаемый «спайк» в экспериментальном спектре не связан с проявлением пространственной дисперсии.

В полупроводниках группы A_2B_6 эффективная масса дырки превышает эффективную массу электрона. В таких кристаллах функция связи экситона с фононом не равна нулю и экситон-фононное взаимодействие может привести к увеличению трансляционной массы M^* экситона вследствие поляризации среды [5]. Так, в [2] было продемонстрировано, что переход к дисперсионным кривым классической кристаллооптики происходит тем раньше, чем больше M^*.

Наши расчеты показывают, что увеличение трансляционной массы экситона увеличивает амплитуду отражения не только основного максимума, но и «спайка». Поскольку эффективная масса экситона увеличивается вследствие экситон-фононного взаимодействия, то, как видно из рис. 1, дополнительный максимум отражения действительно усиливается с ростом температуры (кривые *5*, *6*). При температурах $T > 60$ K, при которых затухание экспоненциально возрастает, амплитуда максимумов отражения убывает.

В предельном случае классической дисперсии ($M^* \to \infty$), который также широко использовался в литературе [6] для объяснения аномалий в экситонном отражении, также можно получить «спайк» в расчетных спектрах (кривые *8*, *9*), если предположить координатную зависимость затухания, обусловленную рассеянием экситонов на дефектах. При приближении к поверхности концентрация дефектов возрастает, поэтому в данном варианте расчета затухание задавалось выражением вида $\gamma = \gamma_{ep} + \delta(x)\gamma_0$, где $\delta(x)$ — некоторая функция, равная единице в объеме и увеличивающаяся при приближении к поверхности кристалла, а γ_{ep} — затухание, обусловленное процессами рассеяния экситонов на фононах решетки.

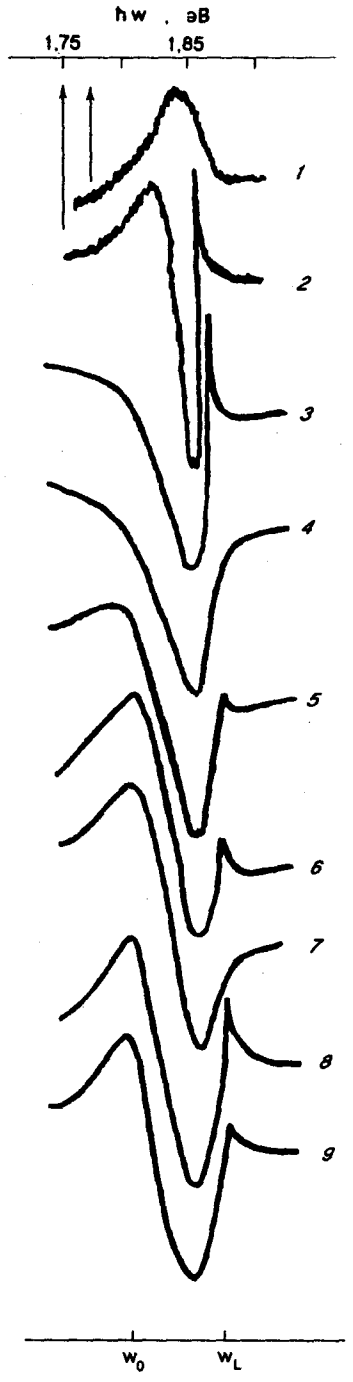

Рис. 1. Экспериментальные (1, 2) и расчетные (*3–9*) спектры резонансной люминесценции (*1*) и отражения (*2–9*), которые для наглядности смещены по оси ординат. Расчетные параметры: Кривые *3*, *4*: $d = 120$ Å, $M^* = 0{,}87m_0$, $T = 5$ K; $\gamma_0 = 0$ (*3*); 0,1 (*4*) мэВ. Кривые *5–7*: $\gamma_0 = 0{,}1$ мэВ, $d = 120$ Å; *5* — $T = 20$ K, $M^* = 2{,}4m_0$; *6* — $T = 40$ K, $M^* = 7m_0$; *7* — $T = 60$ K; $M^* = 10m_0$. Кривые *8*, *9*: $d = 160$ Å, $M^* = \infty$; $1 \le \delta \le 4$, $T = 80$ (*8*); 100 (*9*) K. Координатная зависимость $\gamma_0(x)$ моделировалась ступенчатой функцией $\delta(x)$. Количество ступенек 10, каждая толщиной 25 Å. Отсчет ведется от «мертвого» слоя. В первой ступеньке $\delta = 4$, а в 10-й $\delta = 1$.

Таким образом, можно сделать вывод, что проблема интерпретации неклассических особенностей экситонных спектров отражения не является тривиальной и до конца решенной. По-видимому, нужно выйти за пределы традиционных представлений о постоянстве эффективной массы экситона и фактора затухания, в рамках которых не удается удовлетворительно описать температурные особенности спектров отражения, особенно когда ощутимым становится экситон-фононное взаимодействие.

1. В. А. Киселев, Б. В. Новиков, А. С. Чередниченко, *Экситонная спектроскопия приповерхностной области полупроводников*, Изд-во ЛГУ, Ленинград (1987).
2. J. J. Hopfield and D. C. Thomas, *Phys. Rev.* **132**, 563 (1963).
3. П. С. Кособуцкий, *УФЖ* **28**, 1090 (1983).
4. *Физика и химия соединений* A_2B_6, С. А. Медведев (ред.), Мир, Москва (1970).
5. А. С. Давыдов, *Теория твердого тела*, Наука, Москва (1976).
6. F. Evangelisti, A. Frova, and F. Patella, *Phys. Rev.* **10**, 4253 (1974).

On observation of a high-temperature «spike» in exciton reflection spectra of CdSe

P. S. Kosoboutski and A. L. Prokopchuk

A high-temperature ($T = 77$ K) «spike» was first observed in the exciton reflection spectrum of CdSe. The spike phenomenon is assumed to be due to the influence of the exciton-phonon interaction on the translation exciton mass as well as to the coordinate dependence of the damping factor in the exciton system.