РАЗДЕЛ XI. ФИЗИКА

Полвонов Б.З., Насиров М., Мирзаев В., Расулов В.Р.
 Исследование низкотемпературной фотолюминесценции кристаллов
 в области экситонного резонанса

Ферганский политехнический институт
 (Узбекистан, Фергана)

doi: 10.18411/sr-10-02-2019-45

idsp: sciencerussia-10-02-2019-45

Аннотация

На основе микроскопической теории поляритонной люминесценции (ПЛ) выполнен анализ известных экспериментальных спектров низкотемпературной фотолюминесценции (НТФЛ) кристаллов $CdTe$ для экситонного резонанса $A_{n=1}$. С помощью численных расчетов получены теоретические ПЛ и обсуждается механизм формирования экситонной люминесценции.

Ключевые слова: люминесценция, поляритон, спектр, экситон, полупроводник.

Abstract

On the base of the microscopic theory polariton luminescence (PL) is executed analysis are known experimental spectrum in a low temperature photoluminescence (LTFL) of $CdTe$ crystals for $A_{n=1}$ exciton resonance. By means of the numerical calculation are received theoretical spectrums PL and is discussed mechanism of the formation of exciton luminescence.

Keywords: luminescence, polariton, spectrum, exciton, semiconductor.

В последнее время в области оптической спектроскопии полупроводников большое внимание уделяется исследованию НТФЛ кристаллов $CdTe$ с целью усовершенствования методов неразрушающего контроля и диагностики кристаллических и поликристаллических полупроводниковых структур на их основе [1-5]. При этом особую важность приобретает анализ спектров экситонной люминесценции как наиболее чувствительного и прямого метода, позволяющего получить самую достоверную информацию о дефектах полупроводникового материала. Однако до сих пор, насколько нам известно, адекватный количественный анализ НТФЛ кристаллов $CdTe$ в окрестности экситонных резонансов с учетом поляритонного эффекта и процессов затухания экситонов отсутствует. Настоящая работа посвящена восполнению этого пробела. В работе [6] была развита теория ПЛ для кристаллов типа $CdTe$ с небольшими значениями продольно-поперечного расщепления ($\omega_{LT} \leq 1.0$ мэВ). В отличие от ранних работ [7, 8] с участием авторов предложена модель формирования ПЛ полупроводниковых кристаллов типа $CdTe$, согласно которой излучающие квантовые состояния поляритонов в окрестности «бутылочного горла» заселяются за счет рассеяния поляритонов нижней ветви 1 из области $\omega \geq \omega_L$ с достаточно большими $\vec{k}$ на акустических и оптических фононах, причем в ПЛ дают вклады упруго рассеянные на примесях в сторону поверхности кристалла поляритонные волны с верхними 2 и нижними 1 дисперсионными ветвями и их интерференция в вакууме (рис.1). Теория позволяет рассчитать спектры парциальных вкладов поляритонного излучения при конечных значениях затухания $\hbar\Gamma$ механических экситонов и в случаях, когда критерии применимости кинетического уравнения Больцмана для функции распределения поляритонов нарушаются [5]. Здесь приводятся

результаты численных расчетов на компьютере спектров ПЛ и сопоставление их с известными экспериментальными спектрами НТФЛ кристаллов $CdTe$. Обсуждается механизм формирования экситонной люминесценции в зависимости от значений оптических параметров кристалла для экситонного резонанса $A_{n=1}$.

Исследуем спектральную интенсивность излучения $I_{\lambda}^{(0)}(\omega, \vec{\Omega})$ с поляризацией λ , распространяющегося в вакууме в направлении единичного вектора $\vec{\Omega}(\theta, \varphi)$ (который лежит в плоскости yz , а внутренняя нормаль к границе кристалла направлена вдоль оси z ; $\lambda = s, p$, где $s \parallel x$, $p \perp x$):

$$I_{\lambda}^{(0)}(\omega, \vec{\Omega}) = \sum_{\beta} I_{\beta\lambda}^{(0)}(\omega, \vec{\Omega}). \quad (1)$$

Рис.1. Схематические процессы термализации поляритонов нижней ветви 1 в области частот выше ω_L путем неупругого рассеяния на продольных акустических (LA), оптических (LO) фононах и упругого рассеяния на примесях (R) и формирование ПЛ в окрестности частот ω_0 и ω_L при конечном затухании экситона $\hbar\Gamma$.

Мы ограничиваемся рассмотрением ПЛ в s-поляризации. Тогда $\beta = 1, 2, 12$ при $\lambda = s$. Предполагается, что кристалл непрерывно облучается светом с частотой выше края фундаментального поглощения. Возбуждаемые светом свободные носители тока термализуются и связываются в экситоны, в результате чего формируется неравновесная функция распределения $f_{1k\lambda}^{-}(z)$ поляритонов ветви 1 выше ω_L (рис.1). Последовательное определение функции $f_{1k\lambda}^{-}(z)$ выходит за рамки данной работы и здесь эта функция считается заданной. При расчете мы для определенности будем полагать

$$f_{1k\lambda}^{-}(z) = f_1\left(\omega_{k_1}^{(r)}\right) \cdot \exp(-z/L), \quad (2)$$

где L – эффективная глубина распределения поляритонов ветви 1. Поэтому вклады $I_{\beta s}^{(0)}(\omega, \vec{\Omega})$ поляритонов ветви $\beta=1, 2$ в $I_{\lambda}^{(0)}$ можно рассматривать как результат однократного упругого и неупругого рассеяния в кристалле поляритонов ветви 1 выше

частоты ω_L с заданной функцией распределения $f_{1k\lambda}(z)$ в состоянии $\beta=1, 2$ (рис. 1) и превращения поляритонов β на границе кристалла в фотоны вторичного излучения в вакууме. Будем учитывать когерентные рассеяния $1 \rightarrow 1'$, $1 \rightarrow 2'$ и интерференционный вклад $I_{12\lambda}^{(0)}$ в $ПЛ$ (1). Для расчета $I_{\beta s}^{(o)}(\omega, \vec{\Omega})$ при конечных значениях экситонного затухания $\hbar\Gamma$ мы воспользовались диаграммной техникой Келдыша [5] и получили

$$I_{\beta s}^{(o)}(\omega, \vec{\Omega}) = \frac{F(\omega, \vec{\Omega})}{2k_o \operatorname{Im} n_{\beta z} + L^{-1}} \left| \frac{t_{0\beta}^{(s)}}{n_{\beta z}} \right|^2, \quad \beta = 1, 2, \quad (3)$$

$$I_{12s}^{(o)}(\omega, \vec{\Omega}) = F(\omega, \vec{\Omega}) \cdot 2 \operatorname{Re} \left(\frac{1}{-ik_o(n_{1z} - n_{2z}^*) + L^{-1}} \frac{t_{01}^{(s)} \cdot (t_{02}^{(s)})^*}{n_{1z} \cdot n_{2z}^*} \right), \quad (4)$$

$$F(\omega, \vec{\Omega}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{2M^2 c \varepsilon_b \omega_{LT} \cos \theta}{\hbar \tau_{\beta 1} |(n_1^2 - n_2^2)|^2} f_1(\omega), \quad (5)$$

где $n_{\beta z} = (n_\beta^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}$ и величины $t_{0\beta}^{(s)}$ и n_{β} рассчитываются с учетом затухания Γ :

$$t_{0\beta}^{(s)}(\theta) = \frac{E_{\beta s}^{(t)}}{E_{\beta s}^{(i)}} = \frac{2n_{\beta z}}{(n_{0z} + \bar{n}_s) \cdot \cos \delta - i \sin \delta \cdot \left(\tilde{n}_z + \frac{n_{0z}}{\tilde{n}_z} \bar{n}_s \right)}, \quad (6)$$

где $n_{0z} = \cos \theta$, $\tilde{n}_z = \sqrt{\varepsilon_b - \sin^2 \theta}$, $\delta = \sqrt{\varepsilon_b} k_0 \ell / \tilde{n}_z$ (ℓ - толщина «мертвого слоя») и

$$\bar{n}_s = \frac{n_{1z}(\varepsilon_b - n_2^2) + n_{2z}(n_1^2 - \varepsilon_b)}{n_1^2 - n_2^2}. \quad (7)$$

Здесь комплексные показатели преломления n_β определяются формулами

$$n_\beta^2 = \frac{1}{2} \left\{ \varepsilon_b + \frac{\omega + i \frac{\Gamma}{2} - \omega_0}{\omega_M} - (-1)^\beta \left[\left(\varepsilon_b - \frac{\omega + i \frac{\Gamma}{2} - \omega_0}{\omega_M} \right)^2 + \frac{\Gamma_c^2}{4\omega_M} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}, \quad (8)$$

где $\Gamma_c = 4\sqrt{\varepsilon_b \omega_{LT} \omega_M}$ - критическое значение затухания, при котором $n_1 = n_2$ на критической частоте $\omega_c = \omega_0 + \varepsilon_b \omega_M$; $\omega_M = \hbar k_0^2 / 2M$.

Таким образом, экситонную люминесценцию в окрестности резонансной частоты ω_0 при конечных значениях затухания экситонов $\hbar\Gamma$ можно теоретически описать с помощью поляритонной модели, согласно которой экспериментально регистрируемая $ПЛ$ в вакууме рассматривается как сумма парциальных излучений отдельных поляритонных мод с учетом их интерференции.

На основе микроскопической теории $ПЛ$ и анализа теоретических спектров $НТФЛ$ кристаллов $CdTe$ предложена модель формирования $ПЛ$ полупроводниковых кристаллов типа $CdTe$ с небольшим значением продольно-поперечного расщепления ω_{LT} при конечных затуханиях $\hbar\Gamma$ механических экситонов, согласно которой излучающие квантовые состояния поляритонов в окрестности «бутылочного горла» заселяются за счет рассеяния поляритонов нижней ветви 1 из области $\omega \geq \omega_L$ с достаточно большими $\vec{k}$ на акустических и оптических фононах, причем в $ПЛ$ дают вклады упруго рассеянные на примесях в сторону поверхности кристалла поляритонные волны с верхними 2 и нижними 1 дисперсионными ветвями и их интерференция в вакууме.

Также разработан метод расчета парциальных спектров $ПЛ$ кристаллов типа $CdTe$ в окрестности экситонного резонанса $A_{n=1}$ при конечных значениях $\hbar\Gamma$ с использованием диаграммной техники Келдыша для функции Грина экситонов, справедливый и в случаях, когда нарушается критерии применимости кинетического уравнения Больцмана для функции распределения поляритонов.

Показано, что теоретический спектр $ПЛ$ кристаллов $CdTe$ в соответствие экспериментальным спектром при значениях $\hbar\Gamma < 0.6$ мэВ обнаруживает асимметричную дублетную тонкую структуру с максимумами в окрестностях частот ω_0 (A_0 -линия) и ω_L (A_L -линия), а при $\Gamma \geq \Gamma_c$ - синглетную линию с максимумом вблизи частоты ω_0 , причем для случаев $\Gamma \gg \Gamma_c$ контур этой линии приобретает лоренцевский вид, что отражает полное подавление поляритонного эффекта сильным экситонным затуханием.

1. Багаев В.С., Клевков Ю.В., Колосов С.А., Кривобок В.С., Онищенко Е.Е., Шепель А.А. Фотолюминесценция, выращенного при значительном отклонении от термодинамического равновесия // ФТП. - 2011. - Т. 45, вып. 7. - С. 908-915.
2. Багаев В.С., Клевков Ю.В., Колосов С.А., Кривобок В.С., Шепель А.А. Оптические и электрофизические свойства дефектов в высокочистом // ФТТ. - 2010. - Т. 52, вып. 1. - С. 37-42.
3. Парфенюк О.А., Илашук М.И., Уляницкий К.С., Фочук П.М., Стрильчук О.М., Крилюк С.П., Корбутяк Д.В. Электрофизические свойства и низкотемпературная фотолюминесценция монокристаллов, легированных Si // ФТП. - 2006. Т. 40, вып. 2. - С.148-152.
4. Разиков Т.М., Кучкаров К.М., Эргашев Б.А. Фотолюминесценция пленок теллурида кадмия различного состава, полученных химического молекулярно-пучкового осаждения // Научно-технический журнал ФерПИ - Фергана, Узбекистан. - 2011, №3. - С. 97-99.
5. Ахмадалиев Б.Ж., Полвонов Б.З., Юлдашев Н.Х. Поверхностно-радиационные моды и продольные экситоны в спектрах низкотемпературной фотолюминесценции // ФИП. -2010. Т. 8, №3. – С. 250-258.
6. Ахмадалиев Б.Ж., Полвонов Б.З., Юлдашев Н.Х. Поляритонная люминесценция в кристаллах типа с учетом затухания экситонов. I. Теория // Научно-технический журнал ФерПИ- Фергана, Узбекистан. - 2012, №1. -С. 3-10.
7. Абдукадыров А.Г., Ивченко Е.Л., Селькин А.В., Юлдашев Н.Х. Поляритонная люминесценция в окрестности частоты продольного экситона с учетом затухания // Опт.и спектр. - 1989. Т. 67, вып 10. – С. 845-850.
8. Юлдашев Н.Х. Экситон-поляритонная люминесценция и перенос резонансного излучения в кристаллах. Фергана: «Фаргона», 2001. - 214 с.