DOI: 10.17117/na.2015.11.04.285

Поступила (Received): 29.11.2015

<http://ucom.ru/doc/na.2015.11.04.285.pdf>**Мастропас З.П.****Капли бозе-конденсата фононов и экситонов
в антрацене при формировании его спектра
экситон-фотонной люминесценции****Mastropas Z.P.****Bose-condensate drops of phonons and excitons in the anthracene
under the formation of its spectrum of exciton-photon luminosity**

Показано, что при формировании низкотемпературного спектра экситон-фотонной люминесценции в кристаллах с сильным экситон-фононным взаимодействием возникают квантово-когерентные состояния фононной подсистемы – деформация решетки кристалла, связанная с экситоном. Появление в низкотемпературном спектре более широкого по частотам максимума, чем максимумы излучения экситонов в состоянии теплового равновесия, может считаться признаком возникновения в кристалле капель бозе-конденсата экситонов и капель фононов

Ключевые слова: экситон-фононное взаимодействие, когерентные состояния, бозе-конденсат

Мастропас Зинаида Петровна

Кандидат физико-математических наук, доцент
Южный федеральный университет
г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42

This work is devoted to study of the processes of formation of the low-temperature exciton-phonon luminosity spectrum in crystals with strong exciton-phonon interaction. It is shown that such processes are accompanied by appearance of the quantum-coherent states of phonon subsystem, which represent themselves a specific, exciton-related deformation of the crystalline lattice. The appearance of the broader (frequency-wise) maximum in the low-temperature spectrum, in comparison with those maxima of exciton radiation at the state of thermal equilibrium, might be considered as a sign of appearance bosc-condensate drops of excitons, (together with phonon drops) within this crystal

Key words: exciton-phonon interaction, coherent states, bosc-condensate

Mastropas Zinaida Petrovna

Candidate of Physico-mathematical Sciences,
Associate Professor
Southern federal university
Rostov-on-Don, B. Sadovaya st., 105/42

Экситонная люминесценция антрацена (ЭФЛ) возникает при возбуждении кристалла светом с частотами, превышающими деленную на $\hbar$ энергию дна экситонной зоны. Эта частота значительно больше фононных частот. Спектр ЭФЛ возникает в результате поглощения фотонов из падающего на кристалл потока электромагнитных волн с образованием экситонов и с последующим обратным процессом возникновения излучения кристалла при превращении экситонов в фотоны люминесценции. Существование экситонов в кристалле со-

проводится интенсивными процессами релаксации в результате передачи части энергии экситонов решетке кристалла с образованием фононов. Поэтому спектр ЭФЛ смещен в область более низких частот относительно спектра ее возбуждения.

Наибольший интерес представляют спектры люминесценции при ультра-низких температурах $T = 1K \div 4K$ [1-2]. Эти спектры имеют сложную структуру с большим количеством максимумов. Причем, большая часть этих максимумов остроконечны с шириной порядка kT . Их обычно интерпретируют как результат превращения экситонов из равновесного распределения вблизи дна экситонной зоны в фотоны с одновременным излучением одного или нескольких оптических фононов. Самый высокочастотный из таких максимумов соответствует безфононному излучению. Однако среди остроконечных максимумов в спектре ЭФЛ антрацена при низких температурах имеется обычно один значительно более широкий максимум на частоте, большей, чем частота безфононного максимума. Эксперименты по измерению времени формирования каждого максимума при импульсном возбуждении кристалла согласуются с представлением о том, что эти максимумы порождаются процессом излучения фононов экситонами из их равновесного распределения у дна экситонной зоны. Свойства этих максимумов хорошо соответствуют квантовополевой теории взаимодействия экситонов с фотонами при спонтанном нарушении симметрии экситонного и фононного полей. В результате возникают квантованные поля нижней и верхней поляритонных зон, и формирование спектра ЭФЛ оказывается простым процессом релаксации поляритонов с излучением или поглощением фононов с характерными параметрами, вполне соответствующими результатам расчета свойств релаксации по теории возмущений.

Наблюдаемый широкий максимум спектра экситонной люминесценции имеет характеристики, которые плохо согласуются с расчетами по теории возмущений. Сравнительно большое время его формирования и распада указывает на стационарность состояний, из которых излучаются кванты света, соответствующие широкому максимуму спектра. Взаимодействующие с фононами частицы (фермионы или экситоны), число которых при взаимодействии с фононами сохраняется, могут переходить в более устойчивые состояния, которые часто называют квантовокогерентными. Устойчивость этих состояний обеспечивается возникновением когерентных деформаций решетки кристалла, понижающих энергию основного возбуждения (экситонов или поляритонов) [3].

Легко доказать, что взаимодействие экситонов с фононами приводит к возникновению их связанного состояния, подобного связанному состоянию электрона и фононов в поляроне Ландау-Пекара [4]. Действительно, Гамильтониан взаимодействующих экситонов и фононов в представлении вторичного квантования должен иметь вид:

$$H = \sum_k F(\vec{k}) a_k^+ a_k + \sum_q \hbar \omega(\vec{q}) b_q^+ b_q + \sum_{k,q} F_{k,q} a_{k-q}^+ a_k (b_q^+ + b_q), \quad (1)$$

так как экситон-фононное взаимодействие должно сохранять число экситонов. Последнее слагаемое в (1) содержит оператор $(b_q^+ + b_q)$, который описывает деформацию решетки по нормальным координатам колебаний решетки,

соответствующим избранным в (1) фононам. Так как деформация решетки может быть как положительной, так и отрицательной, то существует состояние, в котором среднее значение последней суммы в (1) будет отрицательным, то есть экситон и фононы будут связаны друг с другом.

Таким образом, возникает капля бозе-конденсата фононов. Если в результате взаимодействия деформированной и возбужденной молекулы антрацена с высокочастотным внутримолекулярным фононом произойдет излучение фотона, то не поддерживаемая взаимодействием с элементарным возбуждением молекулы (т.е. с экситоном) деформация ее структуры самопроизвольно распадается с излучением многочисленных низкочастотных фононов. Теория квантово-когерентных состояний утверждает, что число таких излученных фотонов может быть различным. Для каждого числа своя вероятность в соответствии с функцией распределения Пуассона. Поскольку при распаде фонон-поляритонного квантово-когерентного состояния фононной подсистеме кристалла передается разное количество энергии в любом акте распада, то и излучаемая кристаллом электромагнитная энергия также будет различной. В связи с этим спектр люминесценции не будет иметь форму распределения по энергиям, характерную для теплового распределения поляритонов, а будет соответствовать распределению Пуассона. Таким образом, наличие в спектре низкотемпературной ЭФЛ широких полос без характерных для теплового равновесия острых максимумов свидетельствует об образовании при возбуждении ЭФЛ капель бозе-конденсатов и фононов, и поляритонов.

Если экситон превратится в фотон ЭФЛ, то освободятся связанные фононы, число которых не будет иметь определенного значения, так как они находились в квантово-когерентном состоянии. Волновая функция этого состояния удовлетворяет уравнению:

$$b_{\vec{q}}|\vec{n}\rangle = n|\vec{n}\rangle, \quad (2)$$

где $\bar{n}$ - среднее число фононов в связанном состоянии, а n - одно из возможных чисел фононов в состоянии $|\vec{n}\rangle$. Хорошо известно, что возможное число фононов n в состоянии $|\vec{n}\rangle$ может реализоваться с вероятностью

$$W_n = \bar{n}^n \exp(-\bar{n}) (n!)^{-1}, \quad (3)$$

соответствующей распределению Пуассона.

Таким образом, полная энергия поляритона с учетом энергии деформации решетки превращается в энергию излучаемого фотона и энергию, выделяющуюся при распаде на n фононов их бозе-конденсата (деформация решетки). Распределение Пуассона (3) не зависит от температуры и, следовательно, соответствующая (3) полоса излучения фотонов люминесценции не будет менять свою форму при понижении температуры люминесцирующей системы, не будет приобретать вид острого максимума при понижении температуры. Следовательно, появление в спектре ЭФЛ такой «широкой» полосы указывает на то, что в процессе ее формирования возникают связанные бозе-конденсат поляритонов и бозе-конденсат фононов. Это свидетельствует и о возникновении в этом процессе деформации решетки кристалла.

Список используемых источников:

1. Бродин М.С., Марисова С.В., Прихотько А.Ф. Экситонный спектр кристалла антрацена // Экситоны в кристаллах. Киев: Наукова Думка, 1973. С. 50-83.
2. Галанин М.Д., Мясников Э.Н., Хан-Магомедова Ш.Д. Поляритонная люминесценция кристалла антрацена // Изв. АН СССР. Сер. Физ., 1980. №4. С.730-737.
3. Myasnikov E.N., Mastropas Z.P. Microprocesses at second-order phase transitions in crystals with strong interband electron-phonon interaction // Ukr. J. Phys. 2011. Vol. 56(10). P. 1030-1036.
4. Мясников Э.Н., Мясникова А.Э., Мاستропас З.П. О множественном рождении фононов при фотодиссоциации медленных поляронов Ландау-Пекара // ЖЭТФ. 2006. Вып. 129(3). С. 546-565.

© 2015, Мастропас З.П.

Капли бозе-конденсата фононов и экситонов в антрацене при формировании его спектра экситон-фотонной люминесценции

© 2015, Mastropas Z.P.

Bose-condensate drops of phonons and excitons in the anthracene under the formation of its spectrum of exciton-photon luminosity