

УДК 537.86
ББК 22.379.24
Э 41

Головнев Юрий Филиппович

Доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей и теоретической физики Тульского государственного педагогического университета им. Л.Н. Толстого, Тула, тел. (4872) 657829, e-mail: physics@tspu.tula.ru

Нургулеев Дамир Абдулганович

Кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей и теоретической физики Тульского государственного педагогического университета им. Л.Н. Толстого, Тула, тел. (4872) 657829, e-mail: physics@tspu.tula.ru

Власова Яна Валерьевна

Аспирант кафедры общей и теоретической физики Тульского государственного педагогического университета им. Л.Н. Толстого, Тула, тел. (4872) 657829, e-mail: antares1992@inbox.ru

Денисов Игорь Васильевич

Доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры алгебры, математического анализа и геометрии Тульского государственного педагогического университета им. Л.Н. Толстого, Тула, тел. (4872) 657829, e-mail: den_tspu@mail.ru

Экситонные поляритоны в EuO

(Рецензирована)

Аннотация. Исследуется экситон-фотонное взаимодействие в ферромагнитном полупроводнике EuO. Проведен подробный анализ процесса образования экситонных поляритонов в ферромагнитном кристалле EuO. Путем решения связанных уравнений Шредингера для фотонных и экситонных полей получены соответствующие дисперсионные кривые.

Ключевые слова: экситон, ферромагнитный полупроводник, поляритон.

Golovnev Yuriy Filippovich

Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of General and Theoretical Physics Department, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, ph. (4872) 657829, e-mail: physics@tspu.tula.ru

Nurguleev Damir Abdulganovich

Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of General and Theoretical Physics Department, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, ph. (4872) 657829, e-mail: physics@tspu.tula.ru

Vlasova Yana Valeryevna

Post-graduate student of General and Theoretical Physics Department, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, ph. (4872) 657829, e-mail: antares1992@inbox.ru

Denisov Igor Vasilyevich

Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of Department of Algebra, Mathematical Analysis and Geometry, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, ph. (4872) 657829, e-mail: den_tspu@mail.ru

Exciton polaritons in EuO semiconductor

Abstract. The paper examines an exciton-photon interaction in a ferromagnetic EuO semiconductor. The authors have analyzed in detail the process of formation of exciton polaritons in the ferromagnetic EuO crystal, and by solution of the Schrodinger coupled equations for photon and exciton fields have obtained the necessary dispersion curves.

Keywords: exciton, ferromagnetic semiconductor, polariton.

При температуре $T < T_C$, где T_C – точка Кюри, полупроводник EuO переходит в ферромагнитное состояние [1], когда волны де-Бройля превышают межчастичное расстояние и нижнее состояние приобретает нулевой импульс, а свободная энергия системы минимизируется. Из-за обменного межчастичного взаимодействия состояние будет устойчивым, так как вклады обменных взаимодействий складываются когерентно. Индивидуальные свойства бозе-частиц в конденсате теряются, и он проявляет коллективные когерентные свойства в макромасштабах. Обнаружена и бозе-эйнштейновская (БЭК) конденсация экситонных поляритонов. Поляритон – это суперпозиция поляризованного возбуждения и света (см. рис. 1),

являющаяся проявлением эффекта «запаздывания света». Волновая функция такой суперпозиции будет иметь вид [2]:

$$|\psi_{\pm}\rangle = \eta_c |\psi_c\rangle \pm \eta_x |\psi_x\rangle, \quad (1)$$

где $\eta_{c,x}$ – коэффициенты, которые определяют доли фотонов и экситонов в поляритонной субстанции; ψ_c , ψ_x – волновые функции фотона и экситона.

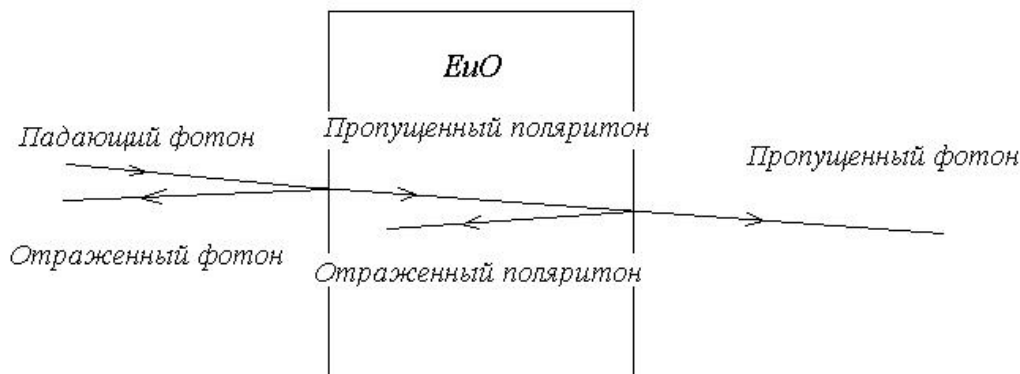


Рис. 1. Экситонный поляритон в кристалле при температуре $T < T_C$.

На входе в кристалл EuO – падающий фотон.

В кристалле EuO при $T < T_C$ образуется экситонный поляритон.

На выходе из кристалла EuO – пропущенный фотон

Если в кристалле EuO ($T < T_C$) будет несколько квантовых ям, то при достаточной оптической накачке $na_{ex}^2 \ll 1$, где n – экситонная плотность, a_{ex} – борковский радиус экситона. После поглощения фотона в яме рождается экситон, то есть электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне. Они связываются между собой из-за кулоновского притяжения, а борковский радиус экситонов в полупроводнике EuO будет $a_{ex} = \frac{\epsilon \hbar^2}{\mu e^2}$, где e – заряд электрона, μ – приведенная масса экситона, а ϵ – диэлектрическая проницаемость.

При распаде экситон испускает фотон. Электрон, принадлежавший экситону, заполняет место дырки в валентной зоне. В результате взаимодействия, показанного на рисунке 2, происходит смешивание фотонного и экситонного состояний (1), вырождение векторов снимается, и возникает два новых состояния, каждое из которых является линейной комбинацией поперечных фотонных и поляризационных экситонных мод. Эти собственные состояния и получили название экситонных поляритонов. На рисунке 2 показаны расщепленные из-за экситон-фотонного взаимодействия нижняя и верхняя ветви поляритонов. В $k = 0$ эти ветви расщеплены на меру экситон-фотонного взаимодействия, а частоту Раби определяют так:

$$\omega_R = e \langle |r| \rangle E / \hbar, \quad (2)$$

где e – заряд электрона, E – амплитуда электромагнитной волны, $\langle |r| \rangle$ – матричный элемент дипольного момента перехода в экситонное состояние.

Частота Раби определяет соответствие между временем жизни поляритона и превращением фотона в экситон и наоборот. Верхняя ветвь, не связанная с электронной поляризацией в функции волнового вектора, будет иметь вид:

$$E = \frac{\hbar \omega}{L_c} k = \frac{\hbar c}{n_c} \sqrt{\left(\frac{2\pi}{L_c} + k^2 \right)}, \quad (3)$$

где первое слагаемое под корнем есть фотонная мода. Они возникают из-за размерного квантования света вдоль оси роста гетероструктуры $z = 2\pi/L_c$, где L_c и n_c – длина и показате-

тель преломления, k – волновой вектор. Для малых k фотоны не релятивистские и дисперсия параболическая. Фотоны имеют малую массу $m_c \sim 10^{-5}m_0$, где m_0 – масса свободного электрона [2].

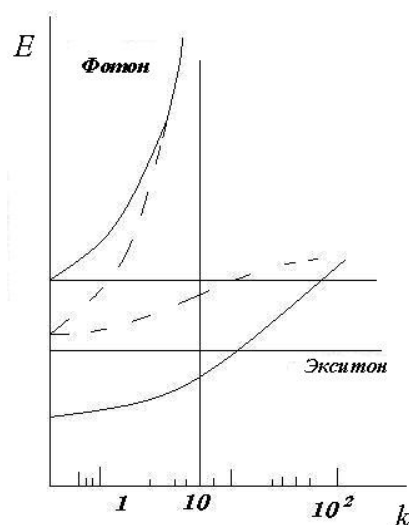


Рис. 2. Штриховые линии – дисперсия двумерных фотонов и экситонов (взаимодействия нет). $k = 0$, в условиях свето-экситонного взаимодействия возникают верхняя и нижняя поляритонные моды (сплошные линии), которые при $k = 0$ «расталкиваются» (расщепление Раби ω_R). Это определяется свето-экситонным взаимодействием

Решаем связанные уравнения Шредингера для фотонных и экситонных полей $\psi_{x,c} = \psi_{x,c}(r, t)$:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \psi_x \\ \psi_c \end{pmatrix} = \hat{H} \begin{pmatrix} \psi_x \\ \psi_c \end{pmatrix}; \quad i \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \psi_x \\ \psi_c \end{pmatrix} = \hat{H} \begin{pmatrix} \psi_x \\ \psi_c \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где

$$\hat{H}' = \begin{pmatrix} \omega_x^0 - ik_x & \omega_{R/2} \\ \omega_{R/2} & \omega_c(-i\nabla) - ik_c \end{pmatrix}. \quad (5)$$

В уравнении (5) ω_R – частота расщепления Раби, а $k_{x,c}$ – скорости затухания экситонов и фотонов. Дисперсию верхней и нижней ветвей поляритонов дают такие соотношения:

$$\omega_{lp}, \omega_p(k) = \frac{1}{2} [\omega_c(k) + \omega_{ex}^0] \pm \frac{1}{2} \sqrt{[\omega_c(k) - \omega_{ex}^0]^2 + \omega_R^2}. \quad (6)$$

Нижняя поляритонная ветвь соответствует сильному экситон-фотонному взаимодействию. Эффективная масса поляритонов мала $\sim 10^{-5}m_0$ до волнового вектора $\sim 3 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$.

Примечания:

1. Самохвалов А.А., Лошкарева Н.Н., Чеботарев Н.М. Тезисы 8-й Уральской конф. по спектроскопии. Свердловск, 1975. 118 с.
2. Тимофеев В.Б. Бозе-конденсация экситонных поляритонов в микрорезонаторах // ФТП. 2012. Т. 42, вып. 7. С. 865–883.

References:

1. Samokhvalov A.A., Loshkareva N.N., Chebotarev N.M. Theses of the 8th Ural Conf. on Spectroscopy. Sverdlovsk, 1975. 118 pp.
2. Timofeev V.B. Bose condensation of exciton polaritons in microresonators // FTP. 2012. Vol. 46, Iss. 7. P. 865–883.