

УДК 539.2

ЭКСИТОННЫЕ ПОЛЯРИТОНЫ В ФЕРРОМАГНИТНОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ EuO

© 2019 г. Ю. Ф. Головнев¹, Я. В. Власова¹, *

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Тульский государственный педагогический университет имени Л.Н. Толстого”, Тула, Россия

*E-mail: antares1992@inbox.ru

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.

После доработки 31.01.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2019 г.

В работе 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.

DOI: 10.1134/S0367676519070184

ВВЕДЕНИЕ

Направление исследований в физике твердого тела и физике полупроводников, базирующееся на спиновом токопереносе, на сегодняшний день является одним из наиболее актуальных и перспективных. В настоящее время ведется интенсивный поиск материалов, обладающих как ферромагнитными, так и полупроводниковыми свойствами. Задача не из легких – слишком велико различие в кристаллических структурах и характере химических связей. Полупроводниковое соединение EuO является уникальным материалом, обладающим 93–96% степенью спиновой поляризации, в то время как с помощью ферромагнитных металлов можно добиться максимум 10%. В полупроводнике EuO можно создать высокую концентрацию триплетных экситонов за счет высокого времени жизни, что, в свою очередь, приводит к возможности получения бозе-конденсата экситонных поляритонов.

Если квазичастицы образованы смешением экситонов и фотонов, то их называют экситонными поляритонами, волновую функцию которых определяют по формуле:

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

где $\eta_{x,c}$ – коэффициенты, определяющие доли фотонов и экситонов в поляритонной субстанции; ψ_c и ψ_x – волновые функции фотона и экситона. Изменение коэффициентов $\eta_{x,c}$ позволяет получать необходимые комбинации фотонных и экситонных вкладов, что является уникальной возможностью для бозе-систем [1]. В частности, при $\eta_{x,c} = 1/\sqrt{2}$ поляритон представляет собой наполовину фотон, наполовину экситон.

При температуре $T < T_C$, где T_C – точка Кюри, полупроводник EuO переходит в ферромагнитное состояние, когда волны де-Бройля превышают межчастичное расстояние, и нижнее состояние приобретает нулевой импульс, а свободная энергия системы минимизируется. Обменное взаимодействие оказывается устойчивым, а его вклады будут когерентными [2]. Индивидуальные свойства бозе-частиц в конденсате теряются, в результате чего он проявляет коллективные когерентные свойства в макромасштабах. Обнаружена и бозе-эйнштейновская конденсация экситонных поляритонов в квазидвумерных полупроводниках EuO при температуре ниже точки Кюри ($T < T_C$). Это имеет место благодаря высокому времени жизни триплетных возбуждений в рассматриваемом полупроводнике. Смешивающиеся электромагнитные волны и волны поляризации, которые распространяются внутри EuO, являются поляритонами (рис. 1). На входе в кристалл – падающий фотон. В кристалле образуется экситонный поляритон. На выходе из кристалла – пропущенный фотон. Волна поляризации связана с экситонами, которые при движении в EuO излучают электромагнитные волны, а они возбуждают экситоны (см. рис. 1)

Поглощение, т.е., диссипация энергии фотонного поля, входящего в EuO, имеет место благодаря рассеянию на фононах. После неупругого рассеяния некоторые поляритоны выйдут из кристалла EuO в виде фотонов с другой энергией. Поляритоны с высокой энергией имеют в волновых функциях высокие фотонные коэффициенты. Волновые функции имеют большую экситонную компоненту η_x , если теряют энергию при рассеянии на фононах. Это главная причина дис-

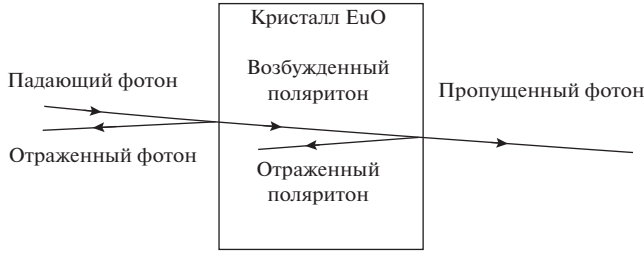


Рис. 1. Экситонный поляритон в кристалле при температуре $T < T_C$. На входе в кристалл EuO – падающий фотон. В кристалле EuO при $T < T_C$ образуется экситонный поляритон. На выходе из кристалла EuO – пропущенный фотон.

сипации энергии поляритонов внутри EuO, которая приводит к оптическому поглощению. Вероятность диссипации энергии фотонного поля определяется вероятностью превращения фотонов в экситоны.

Если в кристалле EuO при $T < T_C$ будет несколько квантовых ям, то при достаточной оптической накачке $na_{ex}^2 \ll 1$, где n – экситонная плотность, a_{ex} – борковский радиус экситона.

Во многих работах по теории экситонов учитываются эффекты “запаздывания”, интересны также некоторые результаты, полученные с использованием модели Лоренца. Проанализируем их подробнее. Запишем уравнение Максвелла, с учетом $\vec{k}\vec{E} = 0$ получим [3]:

$$\left[1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \right] (\vec{k} \cdot \vec{E}) = 0, \quad (2)$$

где $\omega_p^2 = 4\pi n_0 e^2/m$, а n_0 – плотность осцилляторов. Равенство (2) будет верным, если хотя бы один из множителей даст нуль, в соответствии с чем возможны два случая: $\left[1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \right] = 0$ или $\vec{k}\vec{E} = 0$.

Если $\vec{k}\vec{E}$ и вектор смещения осциллятора \vec{u} окажутся параллельными, то получаем продольную волну, частоту которой ω_L можно вычислить, воспользовавшись уравнением (2) [3]:

$$\omega_L^2 = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\omega_p}{\omega_0} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

Соответственно, в случае поперечной волны \vec{u} и \vec{E} будут перпендикулярны волновому вектору \vec{k} . Следовательно, будем иметь:

$$\frac{k^2 c^2}{\omega^2} = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (4)$$

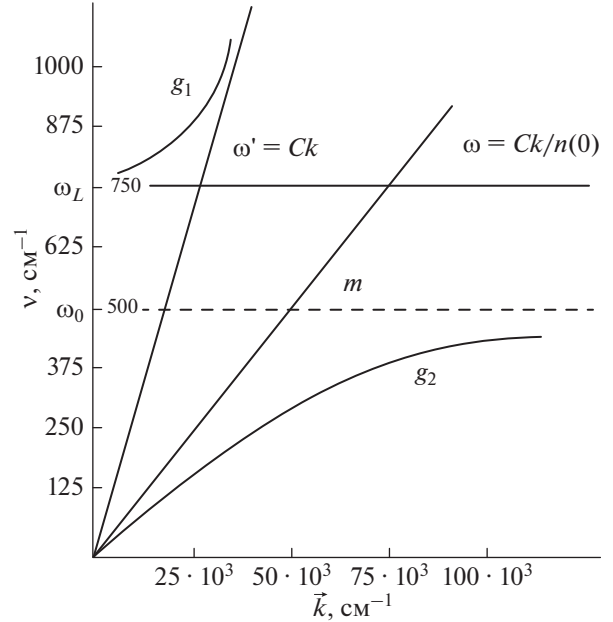


Рис. 2. Дисперсионные кривые экситонных поляритонов.

Таким образом, совокупность осцилляторов Лоренца включает в себя волны двух типов: продольные и поперечные. На осциллятор в продольной волне действует электрическое поле других осцилляторов параллельно распространению волны, в результате чего коэффициент упругой силы повышается. В свою очередь, повышается и частота. Такого электрического поля нет в поперечной волне, и изменения частоты осциллятора не происходит. Двум типам волн соответствуют горизонтальные линии для частот ω_L и ω_0 . Угловым коэффициентом C относится к поперечной волне, распространяющейся в вакууме.

Имеет место смешение поперечных волн, что отражено на рис. 2: дисперсионные кривые расходятся – возникают ветви g_1 и g_2 смешанных состояний. Это – корни уравнения (4).

Благодаря “эффекту запаздывания” частоты нормальных колебаний равны соответственно ω_L и ω_0 . К такому результату приводит решение системы уравнений Максвелла с учетом конечности скорости кулоновского взаимодействия.

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

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \Psi_x \\ \Psi_c \end{pmatrix} = \hat{H} \begin{pmatrix} \Psi_x \\ \Psi_c \end{pmatrix}; \quad i \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \Psi_x \\ \Psi_c \end{pmatrix} = \hat{H} \begin{pmatrix} \Psi_x \\ \Psi_c \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где

$$\hat{H} = \begin{pmatrix} \omega_x^0 - ik_x & \omega_{R/2} \\ \omega_{R/2} & \omega_c(-i\nabla) - ik_c \end{pmatrix}. \quad (6)$$

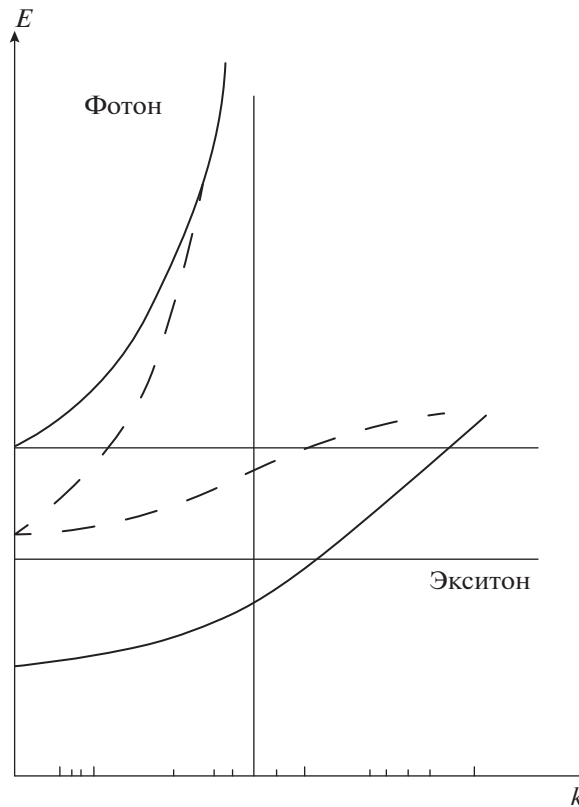


Рис. 3. Штриховые линии – дисперсия двумерных фотонов и экситонов (взаимодействия нет). $k = 0$, в условиях свето-экситонного взаимодействия возникают верхняя и нижняя поляритонные моды (сплошные линии), которые при $k = 0$ “расталкиваются” (расщепление Раби ω_R). Это определяется свето-экситонным взаимодействием (v – волновое число).

В уравнении (6) ω_R – частота расщепления Раби, а $k_{x,c}$ – скорости затухания экситонов и фотонов. Дисперсию верхней и нижней ветвей поляритонов дают такие соотношения:

$$\omega_{L,p}(k) = \frac{1}{2} \left[\omega_c(k) + \omega_{ex}^0 \right] \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left[\omega_c(k) - \omega_{ex}^0 \right]^2 + \omega_R^2}. \quad (7)$$

Нижняя поляритонная ветвь описывает сильное экситон-фотонное взаимодействие (рис. 3). Эффективная масса поляритонов мала $\sim 10^{-5} m_0$ до волнового вектора $\sim 3 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$.

Таким образом, нами были рассмотрены основные особенности экситон-фотонного взаимодействия в ферромагнитном полупроводнике EuO. Представлены результаты решения связанных уравнений Шредингера для фотонных и экситонных полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев В.Б. // ФТП. 2012. Т. 46. № 7. С. 865.
2. Ю П., Кардона М. Основы физики полупроводников. М.: Физматлит, 2002. 560 с.
3. Нокс Р. Теория экситонов. М.: Мир, 1966. 220 с.