

ФИЗИКА

PHYSICS

Научная статья

УДК 621.315.592

ББК 22.379.231.52

И 20

DOI: 10.53598/2410-3225-2024-3-346-29-33

Определение температуры бозе-конденсации экситонов в гетероструктурах на основе EuO

(Рецензирована)

Игорь Алексеевич Иванов¹, Дамир Абдулганович Нургулеев²

^{1,2} Тульский государственный педагогический университет имени

Л. Н. Толстого, Тула, Россия

¹ igor.ii01@yandex.ru

² damir625@gmail.com

Аннотация. Рассчитана температура бозе-конденсации экситонов в гетероструктурах на основе EuO. Она получена из приравнивания длины волны де Бройля для электронов к среднему расстоянию между электронами и дырками. В гетероструктурах на основе EuO образуются как триплетные, так и синглетные экситоны. Большое время жизни триплетных экситонов приводит к низкой температуре их бозе-конденсации.

Ключевые слова: гетероструктура, температура бозе-конденсации, время жизни экситона, вероятность образования экситонов, спектр энергии экситонов

Для цитирования: Иванов И. А., Нургулеев Д. А. Определение температуры бозе-конденсации экситонов в гетероструктурах на основе EuO // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. : Естественно-математические и технические науки. 2024. Вып. 3 (346). С. 29–33. DOI: 10.53598/2410-3225-2024-3-346-29-33

Original Research Paper

Determination temperature of bose condensation of excitons in heterostructures based on EuO

Igor A. Ivanov, Damir A. Nurguleev

^{1,2} Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy, Tula, Russia

¹ igor.ii01@yandex.ru

² damir625@gmail.com

Abstract. The temperature of bose condensation of excitons in EuO-based heterostructures has been calculated. It is obtained from equating the de Broglie wavelength for electrons to the average distance between electrons and holes. Both triplet and singlet excitons are formed in EuO-based heterostructures. The large lifetime of triplet excitons leads to a low temperature of their bose-condensation.

Keywords: heterostructure, bose condensation temperature, exciton lifetime, exciton formation probability, exciton energy spectrum

For citation: Ivanov I. A., Nurguleev D. A. Determination temperature of bose condensation of excitons in heterostructures based on EuO // The Bulletin of the Adyghe State University. Ser. : Natural-Mathematical and Technical Sciences. 2024. Iss. 3 (346). P. 29–33. DOI: 10.53598/2410-3225-2024-3-346-29-33

Введение

В настоящее время гетероструктуры находят широкое применение в полупроводниковых лазерах, транзисторах, светодиодах, фотоприемниках и других приборах. Гетероструктуры состоят из слоев полупроводников с разным химическим составом, и в них происходит непрерывное соединение двух полупроводников. Период гетероструктуры достигает значения сотен нанометров. Для гетероструктур ширина квантовой ямы может составлять один атомный монослой. Размер одного атомного монослоя в гетероструктурах $\text{EuO} - \text{SrO}$ составляет 0,15 нм.

Для образования гетероструктуры необходимо обеспечить минимальное рассогласование периодов кристаллических решеток материалов, которые ее образуют. У EuO и SrO рассогласование периодов решеток составляет менее 0,5 %, что соответствует условию образования гетероструктуры. В гетероструктурах можно наблюдать квантово-размерные эффекты.

Гетероструктуры на основе магнитных полупроводников являются перспективными материалами из-за больших времен жизни, энергии связи и силы осциллятора экситонов. Ширина запрещенной зоны для EuO составляет 3,6 эВ, а для $\text{SrO} - 5,8$ эВ [1]. Край оптического поглощения определяется шириной запрещенной зоны полупроводника: чем она больше, тем край оптического поглощения больше. На гетеропереходе тонких слоев EuO его заполненная зона ограничивается запрещенной зоной, в которой расположена образовавшаяся заполненная $4f$ -полоса вследствие расщепления спина $4f$ -уровня внутренним обменным полем.

При анализе гетероперехода на основе оксидов европия и стронция сталкиваются с проблемой учета взаимодействий $4f$ -полосы, попавшей в запрещенную зону EuO , с $6s$ -состояниями зоны проводимости монооксида стронция, так как состояния $4f$ -полосы ограничены областью приповерхностного заряда и оказываются в квантовой яме, потому что периодический потенциал гетероструктуры $\text{EuO} - \text{SrO}$ приводит к образованию минизон в квантовых ямах SrO и влияет на соответствующее уширение $4f$ -полосы в EuO .

Возбуждение энергетических уровней обусловлено переходом электрона в ближайшее незанятое состояние с большей энергией. Чтобы произошло образование экситона, на полупроводник нужно подействовать излучением, энергия которого может быть порядка энергии запрещенной зоны полупроводника. В условиях низких температур в EuO устанавливается магнитный порядок, тогда в отсутствие магнитного поля вещество обладает намагниченностью, отличной от нуля, вырождение снимается полем обмена магнитных ионов. Возбуждение в EuO передается с иона на ион, благодаря ковалентному обменному взаимодействию.

Важной характеристикой экситона является его время жизни. Оно определяется рекомбинацией пары электрон-дырка. В гетероструктурах на основе EuO возникает бозе-конденсация триплетных экситонов при низких температурах, и экситоны, являясь магнитными, будут иметь большое время жизни из-за запрета оптических переходов по спину.

В гетероструктурах и сверхрешетках $\text{EuO} - \text{SrO}$ образуются триплетные и синглетные экситоны. Триплетные экситоны являются магнитными, а синглетные экситоны являются немагнитными. Триплетные экситоны – это низшие состояния возбужденных электронов в кристаллах полупроводников. В триплетных экситонах на спин электрона и дырки действует внутреннее обменное поле магнитных ионов. Экситон взаимодействует с другими локализованными состояниями. У синглетных экситонов суммарный спин равен нулю. Среднее расстояние между экситонами сравнимо с их боровским радиусом, так как они являются статическим образованием.

Модель

Разрешить бозе-конденсацию можно, охладив частицы бозе-газа до низких температур. По своим свойствам бозе-конденсация экситонов похожа на бозе-конденсацию в охлажденных атомных бозе-газах. Образованию бозе-конденсата способствует экситонное возбуждение, анализ спектра которого покажет наличие бозе-частиц. Тогда в состоянии бозе-конденсата экситонный газ имеет узкую линию излучения, так как отсутствует ее уширение из-за неподвижности бозе-частиц.

Бозе-конденсация способствует образованию в гетероструктурах на основе EuO потоков излучения. Приведенная масса электронов в EuO равна по порядку приведенной массе дырок и составляет $0,9m_0$ для электронов и m_0 для дырок, где m_0 – истинная масса электрона. Температура бозе-конденсации в экситонах может быть получена из равенства длины волны де Бройля для электрона и среднего расстояния между электронами и дырками – модели бозе-эйнштейновской конденсации в магнитных полупроводниках, применимой для идеального газа:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{mT}}, \quad (1)$$

$$a_0 = \sqrt[3]{\frac{V}{N}}, \quad (2)$$

где N – число бозе-частиц, V – объем, занимаемый бозе-частицами.

Ряд особенностей экситонов в гетероструктурах, таких как время жизни и сила осциллятора, связан со спином. В EuO триплетные экситоны образуются так: электрон переходит с $4f$ -состояния, расположенного в запрещенной зоне, в зону проводимости и образует с дыркой экситон. Это связано с присутствием у EuO не до конца заполненных $4f$ -уровней. На них находятся магнитные атомы Eu.

Также триплетные экситоны образуются при переходе электрона из валентной зоны на $5d$ -уровень, находящийся под дном зоны проводимости, и образовании при этом притяжением с дыркой экситона. Триплет-синглетный переход запрещен по правилам отбора, когда не меняется магнитное квантовое число, поэтому вероятность образования в данном случае только триплетных долгоживущих экситонов является высокой.

Энергия связи и время жизни синглетных экситонов являются небольшими. Так как EuO является магнитным полупроводником, то с большой долей вероятности в нем и гетероструктурах на его основе будут образовываться триплетные экситоны. Большое время жизни триплетных экситонов позволяет сохраняться магнитному порядку в гетероструктурах на основе EuO. При определении времени жизни экситонов в EuO разрешенным является переход с $4f$ - на $5d$ -уровень, при котором могут образоваться только триплетные экситоны. Это дает большую вероятность образования именно их в магнитных полупроводниках, в том числе в EuO.

Расчеты и обсуждение

В гетероструктурах на основе EuO ниже температуры Кюри, равной 69 К, будет действовать поле обменного взаимодействия. Возбужденные состояния экситонов зависят от положения ионов европия в кристалле и от величины поля обменного взаимодействия. Поэтому ион Eu^{2+} в основном состоянии Γ_{25} имеет спин $\frac{7}{2}$, так как у Eu на f -оболочке 7 электронов. Низшие уровни в основном и возбужденном состояниях мультиплета соответствуют значениям спина $\frac{7}{2}$ и $\frac{5}{2}$. Спин возбужденного состояния со-

ставляет $S - 1$, и он на единицу меньше спина основного состояния S из-за того, что при поглощении света в паре электронов возбуждается один ион.

В ферромагнитном полупроводнике EuO обменное взаимодействие возникает между центральным ионом европия с двенадцатью ближайшими ионами. Рассчитанная температура в 33 К меньше температуры Кюри для EuO, равной 69 К. Концентрация экситонного газа n в EuO равна 10^{23} м^{-3} [2]. Концентрация экситонов в EuO равна концентрации электронов, потому что именно электроны в нем способствуют установлению магнитного порядка. Температура бозе-конденсации в магнитных экситонах прямо пропорциональна концентрации экситонного газа n и обратно пропорциональна их эффективной массе m^* :

$$T_{bc} = \frac{h^2}{m^*} n^{2/3} = \frac{(10^{-34})^2}{4,31 \cdot 10^{-31}} 10^{46/3} = 4,6 \cdot 10^{-22} \text{ Дж} = 2,875 \cdot 10^{-3} \text{ эВ} = 33 \text{ К} . \quad (3)$$

В работе [3] температура бозе-конденсации для халькогенида европия оценена в величину порядка 16 К, и для расчета по формуле (3) эта температура по порядку сопоставима с этим значением. Разница рассчитанной температуры 33 К и температуры из работы [3] 16 К связана с тем, что в гетероструктурах на базе халькогенида европия есть парамагнитный слой, разделяющий квантовые ямы, и стабильные экситонные состояния образуются из-за этого слоя. Дипольный момент экситонов в основном состоянии препятствует их связыванию в молекулы.

В экситонах бозе-конденсация возможна только при определенной температуре, не превышающей температуру Кюри для полупроводника EuO. При таких условиях в EuO будет существовать магнитный порядок. В данном случае рассчитанная температура удовлетворяет этому условию.

Заключение

В ходе данной работы была определена температура бозе-конденсации экситонов в гетероструктурах на основе EuO. Межъямные триплетные экситоны охлаждаются до температур, при которых будет возможна бозе-конденсация. Низкая температура бозе-конденсации способствует большому времени жизни триплетных экситонов.

Экситоны в EuO образуются при переходах с $4f$ - на $5d$ - уровни, и это способствует установлению магнитного порядка. Вероятность переходов синглет-триплет мала по сравнению с переходами синглет-синглет. Возбуждение экситонов в EuO возникает в обменном поле, величина которого является большой. Тогда рассматривают только долгоживущие триплетные экситоны.

Обменное взаимодействие между экситонным электроном $5d(t_{2g})$ и $4f$ -электронами ближайших соседей меньше, чем взаимодействие $d-f$ -типа в триплетном экситоне, так как между экситонным электроном и $4f$ -электронами EuO обменное взаимодействие определяет экситонный спектр.

Время жизни межъямных экситонов в двойных квантовых ямах превышает время жизни прямых экситонов в одиночных квантовых ямах, так как в этом случае электрон и дырка являются пространственно разделенными. Увеличение плотности экситонного газа способствует уменьшению его энергии связи. Температура бозе-конденсации в магнитных экситонах пропорциональна концентрации экситонного газа и эффективной массе экситона. В экситонах бозе-конденсация возможна только при определенной температуре, не превышающей температуру Кюри. Магнитный порядок в халькогениде европия при этом не исчезает. Магнитные экситоны тоже продолжают существовать. Результаты расчета соответствуют этому условию.

Примечания

1. Головнев Ю. Ф., Лаковцев А. Б., Сомова Н. Ю. Бозе-эйнштейновская конденсация межъямных экситонов в гетеросистеме EuO – SrO // Многомасштабное моделирование структур, строение вещества, наноматериалы и нанотехнологии : материалы II Междунар. конф., посвящ. памяти профессора А. Н. Никитина. Тула : Тульский гос. пед. ун-та им. Л. Н. Толстого, 2013. С. 68–71.

2. Головнев Ю. Ф., Сомова Н. Ю., Лаковцев А. Б. Конденсация композитных бозонов в ферромагнитных полупроводниках // Многомасштабное моделирование структур, строение вещества, наноматериалы и нанотехнологии : материалы II Междунар. конф., посвящ. памяти профессора А. Н. Никитина. Тула : Тульский гос. пед. ун-та им. Л. Н. Толстого, 2013. С. 88–91.

3. Головнев Ю. Ф., Лаковцев А. Б. Конденсация магнитных экситонов в сверхрешетках типа ферромагнитный/парамагнитный полупроводник // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. : Естественно-математические и технические науки. 2009. Вып. 2 (49). С. 74–80. URL: <http://vestnik.adygnet.ru>

References

1. Golovnev Yu. F., Lakovtsev A. B., Somova N. Yu. Bose-Einstein condensation of interjunction excitons in the EuO – SrO heterosystem // Multiscale modeling of structures, structure of matter, nanomaterials and nanotechnologies : Proceedings of the 2nd International conference memory of professor A. N. Nikitin. Tula : Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy, 2013. P. 68–71.

2. Golovnev Yu.F., Somova N. Yu., Lakovtsev A. B. Condensation of composite bosons in ferromagnetic semiconductors // Multiscale modeling of structures, structure of matter, nanomaterials and nanotechnology : Proceedings of the 2nd International conference memory of professor A. N. Nikitin. Tula : Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy, 2013. P. 88–91.

3. Golovnev Yu. F., Lakovtsev A. B. Condensation of magnetic excitons in superlattices of the ferromagnetic/paramagnetic semiconductor type // The Bulletin of the Adyghe State University. Ser. : Natural-Mathematical and Technical Sciences. 2009. Iss. 2 (49). P. 74–80. URL: <http://vestnik.adygnet.ru>

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.06.2024; одобрена после рецензирования 01.07.2024; принята к публикации 02.07.2024.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 20.06.2024; approved after reviewing 01.07.2024; accepted for publication 02.07.2024.

© И. А. Иванов, Д. А. Нургулеев, 2024