

mental Chemical Engineering. – Elsevier, 2022. – Vol. 10, № 2. – P. 107257

2. Kasemset S. Effect of polydopamine deposition conditions on fouling resistance, physical properties, and permeation properties of reverse osmosis membranes in oil/water separation / Kasemset S., Lee A., Miller D., Freeman B., Sharma M. // Journal of Membrane Science. – Elsevier, 2013. – Vol. 425–426. – P. 208–216.

3. Prince J.A. Ultra-wetting graphene-based PES ultrafiltration membrane – A novel approach for successful oil-water separation / Prince J.A., Bhuvana S., Anbharasi V., Ayyanar N. et al // Water Research. – Pergamon, 2016. – Vol. 103. – P. 311–318.

4. Muppalla R. Fouling resistant nanofiltration membranes for the separation of oil–water emulsion and micropollutants from water / Muppalla R., Jewrajka S.K., Reddy A.V.R. // Separation and Purification Technology. – Elsevier, 2015. – Vol. 143. – P. 125–134.

5. Dong B. Bin. Polymer-derived porous SiOC ceramic membranes for efficient oil-water separation and membrane distillation / Dong B. Bin., Wang F.H., Yang M.Y., Yu J.L. et al // Journal of Membrane Science. – Elsevier, 2019. – Vol. 579. – P. 111–119.

УДК 621.315.592.2

И.А. Иванов, Д.А. Нургулеев
ТГПУ им. Л. Н. Толстого (г. Тула, Россия)

ОПИСАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА БАЗЕ МАГНИТНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА EUO

В гетероструктурах наблюдаются гетеропереходы с переходным слоем промежуточного состава толщиной в несколько периодов решётки. Свойства гетероструктур зависят от размера элементов структуры и от их расположения в пространстве. Гетероструктуры могут возникнуть, когда кристаллическая решётка одного из полупроводников переходит в решётку другого, при этом периодичность структуры будет сохранена.

При гетеропереходах меняются ширина запрещённой зоны полупроводника и расположение краёв зоны проводимости и валентной зоны. При гетеропереходах увеличивается концентрация носителей тока и образуется электронный газ, в котором электроны не связаны с ионами кристаллической решётки. При гетеропереходах происходит контакт материалов, являющихся полупроводниками [1].

Выделяется три типа гетеропереходов: 1) идеальный гетеропереход; 2) неидеальный гетеропереход; 3) гетеропереход с промежуточным слоем. В неидеальном гетеропереходе присутствуют локализованные состояния энергии электронов, что отличает его от идеального гетероперехода. Гетеропереход с промежуточным слоем отделяется дополнительным слоем заданной толщины, и локализованные состояния энергии наблюдаются либо в этом слое, либо на границах раздела этого слоя. В изотипных гетеропереходах, которые наблюдаются в гетероструктурах на базе EuO , существуют только основные носители заряда.

Задачей работы будет являться описание особенностей гетероструктур на базе магнитного полупроводника EuO , потому что он является достаточно перспективным магнитооптическим материалом и это связано с сочетанием свойств полупроводника и ферромагнетика.

Уровень Ферми в полупроводниках находится в центре запрещённой зоны. Движение носителей в полупроводнике является упорядоченным и направленным и это приводит к тому, что они распределены в кристалле неравномерно.

Подвижность электронов превышает подвижность дырок, так как электроны движутся между узлами кристаллической решётки, а дырки – по ковалентным связям. Концентрация носителей увеличивается с ростом температуры, а также из-за прямой генерации пары электрон-дырка через запрещённую зону. Диффузия основных носителей заряда разных знаков в приконтактную область обеспечивает создание в приконтактном слое области пространственного заряда. Электрическое поле этой области останавливает диффузию носителей заряда. Вообще все полупроводники имеют зону проводимости, валентную зону и запрещённую зону.

Гетероструктура – совокупность нескольких гетеропереходов размером в десятки нанометров. Гетероструктуру создают полупроводники с постоянными решётки, близкими друг другу по величине такие, например, как ферромагнитный полупроводник EuO , имеющий постоянную решётки 0,51 нм и парамагнитный полупроводник SrO с постоянной решётки 0,508 нм. Гетероструктура может представлять из себя кристалл, у которого можно менять состав и свойства. Гетероструктура с несколькими слоями называется сверхрешёткой. Сверхрешётка – это совокупность квантовых ям, нитей, точек [2].

Быстрое изменение свойств гетеропереходов и возможность управления этими свойствами даёт возможность создавать гетероструктуры с большим количеством слоёв. Важным свойством гетеропереходов является высокое качество границы раздела двух полупроводников. Изменение зонной структуры полупроводников способствует остановке движения носителей тока и размерному квантова-

нию [3]. Если уменьшить объём полупроводника по одной из координатных осей до нанометров, тогда в гетеропереходах будут образовываться квантовые ямы. При это меняется ширина запрещённой зоны из-за возникновения квантово-размерных эффектов и тогда можно создать гетеропереходы с квантовыми ямами, которые вызывают излучение при некой заданной длине волны.

Гетероструктуры на основе EuO – это периодическое повторение потенциальных барьеров и квантовых ям. Экситон в гетероструктуре может образоваться в результате притяжения электронов и дырок. Когда энергия излучения, падающего на кристалл, равна ширине запрещённой зоны или больше неё, электрон получит энергию, необходимую для преодоления запрещённой зоны, и далее достигнет зоны проводимости.

Электроны и дырки распадаются с образованием квантов излучения. Энергия этого излучения связана со временем жизни экситона и его энергией связи. В EuO можно наблюдать экситоны малого радиуса. Энергия связи этих экситонов больше по сравнению с экситонами большого радиуса. В кристалле EuO при температуре ниже температуры Кюри возникают экситонные поляритоны. Поляритоны возникают при взаимодействии экситонов и фотонов. Характеристики поляритонов являются независимыми от характеристик экситонов и фотонов. Поляритоны переносят энергию электрона в кристалле, а также влияют на свойства оптических спектров EuO в интервале экситонных полос. При небольших концентрациях экситоны в кристалле обладают свойствами газа квазичастиц.

При увеличении концентрации они начинают взаимодействовать друг с другом. Если увеличить концентрацию экситонов расстояние между ними будет равно их радиусу, что приведёт к их исчезновению. При малых концентрациях экситоны можно моделировать как бозоны. Бозе-конденсация способствует образованию в кристалле EuO незатухающих потоков энергии. Время жизни триплетного экситона на порядок выше времени жизни синглетного. Для EuO может быть применена s - l модель косвенного обменного взаимодействия, происходящего между l -спинами локализованных электронов, и s -электроны проводимости при этом будут находиться в возбуждённом состоянии [4]. Это возбуждение взаимодействует также с другими локализованными состояниями.

Обменное взаимодействие обуславливает упорядоченную структуру вещества, что может привести к параллельной ориентации спинов соседних атомов Eu в кристалле. Обменное взаимодействие между электронами магнитных атомов Eu способствует приобретению определённой ориентации магнитными моментами всех атомов [5]. В EuO возникает косвенный обмен между магнитными ионами,

когда их волновые функции не перекрываются и между двумя магнитными располагается один немагнитный ион.

Обменный интеграл косвенного обменного взаимодействия оказывает влияние на осцилляции намагниченности и уменьшается с уменьшением расстояния между магнитными атомами. Осцилляции намагниченности создают магнитное поле. Значение остаточной анизотропии магнитного кристалла EuO зависит от количества кристаллитов в объёме обменного связывания.

Осцилляции намагниченности уменьшают время жизни экситонов в гетероструктурах на базе EuO. Время жизни триплетных экситонов в EuO τ_0 может составлять 10^{-7} с, а осцилляции намагниченности могут его сильно уменьшить.

Время жизни экситонов в гетероструктуре рассчитывается по формуле

$$\tau = \frac{4R}{3\lambda} \tau_0 = \frac{4 \cdot 6 \cdot 10^{-9}}{30,47 \cdot 10^{-6}} 10^{-7} = 1,7 \cdot 10^{-9} \text{ с} \quad (1)$$

Длина волны излучения равна

$$\lambda = \frac{2\pi a_0 c}{\nu} \quad (2)$$

Скорость света в среде ν может быть выведена из формул

$$\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{\nu}{c} \quad (3)$$

$$e^2 = \hbar \nu \quad (4)$$

Время жизни экситона связано со скоростью света в вакууме c и среде ν через формулу

$$\tau = \frac{\hbar c}{e^2 \omega} \frac{c^2}{\nu^2} = \frac{\hbar c^3}{e^2 \nu^2 \omega} \quad (5)$$

Это время может быть записано в виде

$$\tau = \frac{4R\nu\tau_0}{3 \cdot 2\pi a_0 c} = \frac{4R e^2 \tau_0}{3 \cdot 2\pi \hbar a_0 c} \quad (6)$$

Энергия связи и сила осциллятора значительно возрастают при таком времени жизни. Энергия связи экситона в EuO равна $E_i = 1,6 \cdot 10^{-4}$ эВ

Силу осциллятора для экситона, измеряющуюся в электрон-вольтах можно рассчитать по формуле,

$$f_{ex} = \frac{E_i \cdot V_0}{R_{ex}^3} = 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-3} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ эВ}$$

где отношение $\frac{V_0}{R_{ex}^3}$ равно 10^{-3} .

В ходе работы были изучены особенности гетероструктур на базе магнитного полупроводника EuO, для этого использованы модель косвенного обменного взаимодействия, происходящего между спина-

ми локализованных электронов и модель осцилляций намагниченности. Также принято, что в EuO возникает косвенный обмен между магнитными ионами, когда не перекрываются волновые функции и между двумя магнитными располагается один немагнитный ион. Также был произведён расчёт времени жизни экситона и его силы осциллятора по соответствующим формулам.

Формула для времени жизни экситона τ выведена через радиус боровского атома a_0 , заряд электрона e , скорость света в среде v . Время жизни экситона, рассчитанное по формуле (1), равно 1,7 нс. Также учтено, что обменное взаимодействие обуславливает упорядоченную структуру вещества, что может привести к параллельной ориентации спинов соседних атомов Eu в кристалле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки: Пер. с англ. М.: Мир, 1989, - 240 с.
2. Физика полупроводниковых наноструктур: учебное пособие / С. И. Борисенко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 115 с.
3. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. Физика низкоразмерных систем – СПб.: Наука, 2001.
4. Нагаев Э.Л. Физика магнитных полупроводников. М.: Наука, 1979. 432 с.
5. Вонсовский С. В. Магнетизм. – Москва «Наука», 1984.

УДК 546.3-126:544.2

^{1,2}А.С. Леньшин, ²К.Б. Ким, ²С.С. Черненко, ²С.И. Нифталиев
¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»;
²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет
инженерных технологий»

ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ МЕДИ НА ПОРИСТОМ КРЕМНИИ

Пористый кремний (por-Si) и композиты на его основе обладают широким спектром уникальных физических свойств, позволяющих использовать эти материалы в устройствах полупроводниковой нано- и оптоэлектроники.

Химическое осаждение коллоидных наночастиц меди на поверхности пористого кремния значительно расширяет сферу применения полученного композитного материала.

Осаждение проводили следующим образом: образцы пористого кремния [1] погружали в раствор сульфата меди ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) на