

06

Циркулярно-поляризованная электролюминесценция квантово-размерных гетероструктур InGaAs/GaAs с контактом Шоттки „ферромагнитный металл/GaAs“

© М.В. Дорохин, С.В. Зайцев, В.Д. Кулаковский, Н.В. Байдусь,
Ю.А. Данилов, П.Б. Демина, Б.Н. Звонков, Е.А. Ускова

Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка
E-mail: usk@nifti.unn.ru

Поступило в Редакцию 16 июня 2006 г.

Электролюминесценция (ЭЛ) гетероструктур InGaAs/GaAs с квантовыми ямами и ферромагнитными контактами Шоттки исследована в магнитных полях до 10 Т при 1.5 К. Линия ЭЛ, отвечающая рекомбинации электронов с инжектированными дырками, в магнитном поле расщепляется на линии, соответствующие уровням Ландау, и обнаруживает циркулярную поляризацию, значительно превышающую значения для подобных структур с немагнитным (Au) контактом. Степень циркулярной поляризации является немонотонной функцией магнитного поля и коррелирует с заполнением уровней Ландау. Максимальная степень циркулярной поляризации равна 40%.

PACS: 85.35.Be, 78.60.Fi, 72.25.Hg

Современное развитие спинтроники вызывает интерес к исследованию путей управления спином носителей заряда в полупроводниках и полупроводниковых структурах. Перспективным методом является инжекция носителей со спином, ориентированным в определенном направлении, из ферромагнитного (ФМ) металлического контакта Шоттки в полупроводник [1]. Для детектирования спиновой инжекции при этом обычно используется регистрация циркулярно-поляризованного электролюминесцентного излучения, возникающего в результате рекомбинации спин-поляризованных носителей заряда. Степень циркулярной

поляризации электролюминесценции зависит от эффективности инжекции спин-поляризованных носителей и от процессов рассеяния спина при транспорте носителей к активной области прибора, в качестве которой в полупроводнике обычно используются квантовые ямы (КЯ) или квантовые точки [1,2].

В данной работе приведены результаты исследования электролюминесцентных свойств гетероструктур с КЯ (InGaAs/GaAs) и контактом Шоттки ФМ (Co,Ni)/GaAs в магнитном поле.

Структуры GaAs/In_xGa_{1-x}As/GaAs ($x = 0.15-0.20$) выращены методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении на подложках n^+ -GaAs (100). Ширина КЯ InGaAs была равна 7 nm, а глубина залегания (d), т.е. толщина покровного слоя, составляла 20, 30 и 100 nm. Контакты Шоттки (Ni, Co, Au) были изготовлены методом термического нанесения металла в вакууме. В ряде случаев для предотвращения окисления ФМ металла на его поверхность в том же вакуумном процессе наносился защитный слой Au. Кроме того, для уменьшения реактивной взаимной диффузии ФМ металла и GaAs [3] между ними формировался тонкий промежуточный слой Au. Таким образом, изготавливались структуры с трехслойной металлизацией (Au/Ni/Au/GaAs и Au/Co/Au/GaAs). Общая толщина металла не превышала 100–120 nm. Контрольными образцами служили диоды Au/GaAs. Омический контакт к подложке формировался сплавлением олова.

Измерения ЭЛ проводились при температуре 1.5 К в магнитном поле B величиной до 10 Т, приложенном перпендикулярно поверхности образца и перпендикулярном оси легкого намагничивания ФМ пленки. Излучение регистрировалось со стороны подложки. Анализ циркулярной поляризации излучения проводился по стандартной методике [4]. Степень циркулярной поляризации ЭЛ определялась из соотношения $P_{EL} = (I_+ - I_-)/(I_+ + I_-)$, где $I_+(I_-)$ — интенсивности ЭЛ компоненты с правой (левой) поляризацией, полученные путем интегрирования соответствующей части спектра межзонного излучения.

Свойства и предполагаемые механизмы ЭЛ без магнитного поля в аналогичных структурах с контактами Шоттки описаны в [5–7]. В настоящей работе обнаружено, что во всем исследованном интервале магнитных полей (1–10 Т) наблюдается циркулярная поляризация излучения. Типичные спектры ЭЛ для σ^+ -поляризации излучения представлены на рис. 1 (на вставке изображены спектры для σ^+ - и σ^- -поляризаций).

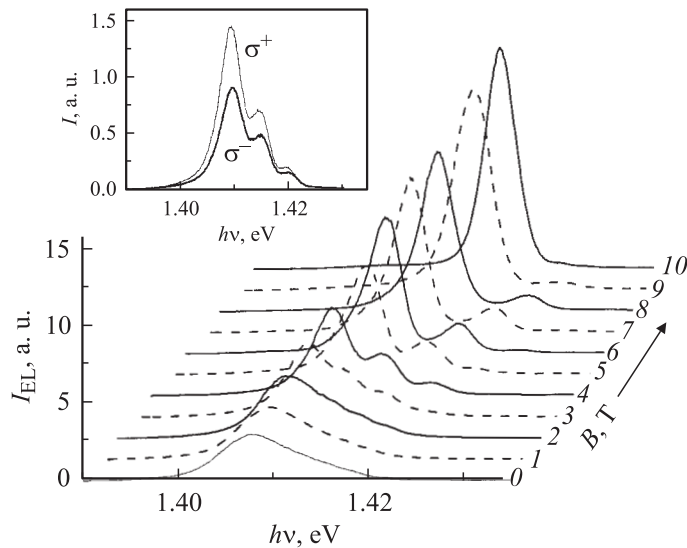


Рис. 1. Спектры ЭЛ структуры с контактом Шоттки Au/Co/Au/GaAs в магнитном поле $B = 0-10$ Т для σ^+ -поляризации. На вставке приведены спектры ЭЛ в поле 4 Т для σ^+ - и σ^- -поляризаций.

Из рис. 1 видно, что в спектрах ЭЛ при $B = 0$ доминирует линия, соответствующая излучательной рекомбинации равновесных электронов в КЯ с инжектированными из металла дырками. Магнитное поле приводит к увеличению интенсивности и „голубому“ сдвигу линии, что обусловлено квантованием движения носителей в КЯ. Кроме того, при $B \geq 3$ Т линия расщепляется на несколько компонент, отвечающих электронным переходам между различными уровнями Ландау. По мере роста магнитного поля ($B \geq 5$ Т) плотность состояний на уровне Ландау увеличивается и высокоэнергетические пики исчезают один за другим вследствие опустошения верхних уровней Ландау в зоне проводимости. В магнитном поле $B = 10$ Т в спектре ЭЛ остается лишь один узкий пик.

Степень поляризации P_{EL} изменяется от пика к пику и максимальна для низкоэнергетического пика, соответствующего нижнему уровню Ландау. Зависимость P_{EL} от магнитного поля (рис. 2) носит немонотон-

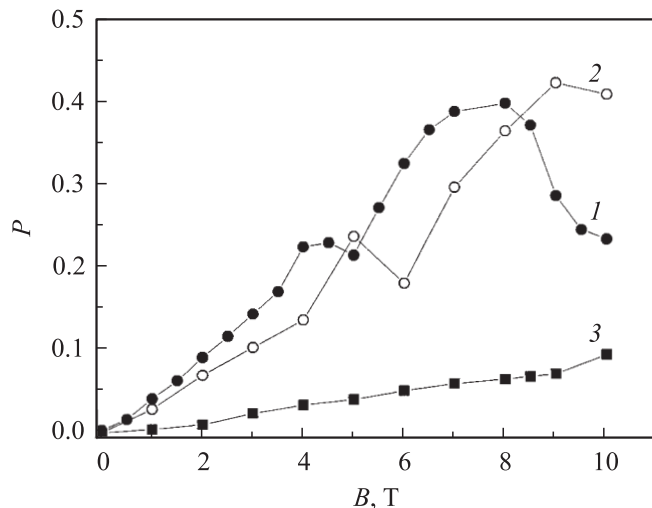


Рис. 2. Зависимость степени циркулярной поляризации от величины магнитного поля для структур с контактами Шоттки Au/Co/Au (кривая 1), Au/Ni/Au (кривая 2) и Au (кривая 3). Толщина покровного слоя составляла 20 nm, а ток = 10 mA.

ный характер, и это является общим для ЭЛ всех исследованных диодов Шоттки. Так, например, на кривой $P_{EL}(B)$ для контакта Au/Co/Au/GaAs (рис. 2, кривая 1) можно отметить два минимума: при $B = 4.5-5$ Т и $B = 9-10$ Т. При этом каждый из минимумов соответствует магнитному полю, при котором со спектра ЭЛ исчезает пик, соответствующий очередному уровню Ландау (см. рис. 1). Аналогичный вид зависимости $P_{EL}(B)$ наблюдается и для контакта Au/Ni/Au/GaAs (рис. 2, кривая 2).

Электроны частично заполненного уровня Ландау экранируют неоднородности потенциала, сглаживая их [8]. При опустошении уровня Ландау (в спектре исчезает соответствующий пик), экранировка неоднородности потенциала уменьшается. Это ведет к увеличению спинового рассеяния инжектируемых из металла дырок и, следовательно, к уменьшению степени циркулярной поляризации ЭЛ. Подобная зависимость степени поляризации от магнитного поля наблюдается и для спектров фотолуминесценции. В связи с этим можно предположить, что на-

Максимально достигнутые (в магнитном поле 10 Т) значения степени циркулярной поляризации ЭЛ при различных типах контактов Шоттки и для нескольких толщин d покровного слоя

d , nm	Металл				
	Степень циркулярной поляризации P_{EL} , %				
	Ni	Co	Au	Au/Ni/Au	Au/Co/Au
20	30	20	12	40	40
30					38
100			12	30	30

личие минимумов на зависимости $P_{EL}(B)$ не связано с изменениями эффективности спиновой инжекции из ФМ металла в полупроводник, а определяется свойствами электронного газа КЯ InGaAs в магнитном поле.

Следует отметить, что положение минимумов на кривой $P_{EL}(B)$ для каждого типа контакта ФМ металл/GaAs слабо зависит от величины рабочего тока (в исследованном интервале 1–20 мА). В то же время вид контакта (Ni или Co, однослойная или многослойная пленка), а также толщина покровного слоя GaAs существенным образом определяют величину степени циркулярной поляризации ЭЛ. Это хорошо видно из таблицы, где приведены данные по циркулярной поляризации ЭЛ для различных контактов.

Максимальное значение $P_{EL} \approx 40\%$ получено для структуры с глубиной залегания КЯ $d = 20$ nm и с трехслойным контактом Шоттки. С увеличением величины d степень циркулярной поляризации ЭЛ для такого же контакта заметно уменьшается. Уменьшить величину d не представляется возможным, поскольку при толщинах $d < 20$ nm (а именно, при $d = 10–12$ nm) в подобных диодах наблюдается существенное, а в случае контакта Ni или Co — полное гашение ЭЛ [7], что является, на наш взгляд, следствием интенсивного твердофазного взаимодействия Co и Ni с арсенидом галлия. В структурах с одиночным ФМ контактом максимальное значение P_{EL} значительно ниже — 20 и 30% для Co и Ni соответственно. Сравнение максимальных величин P_{EL} в разных структурах показывает, что изменение структурного и фазового состава границы ФМ металл/GaAs с помощью промежуточной

тонкой пленки не ферромагнитного, но менее химически активного металла позволяет существенно увеличить значение P_{EL} .

Циркулярная поляризация ЭЛ зависит от нескольких факторов. Основными являются: 1) различие заселенностей уровней с разным направлением спина в магнитном поле вследствие зеемановского расщепления уровней в КЯ, 2) инжекция спин-ориентированных дырок из ФМ металла в КЯ и спиновая релаксация в КЯ. Качественное разделение вкладов от разных механизмов может быть проведено путем анализа таблицы. В контрольных структурах с немагнитными Au контактом и с покровными слоями $d = 20$ nm и $d = 100$ nm циркулярная поляризация ЭЛ обусловлена только зеемановским расщеплением уровней Ландау в КЯ. Значение P_{EL} в этом случае заметно меньше, чем для структур с ФМ контактами, и составляет $\approx 12\%$ в поле 10 Т. Поэтому существенное увеличение величины P_{EL} в структурах с ФМ контактом мы связываем с инжекцией спин-поляризованных дырок из ФМ контакта. Эффективность спиновой инжекции зависит от качества контакта и достижения инжектированными дырками области КЯ без существенной потери спиновой ориентации.

Таким образом, нами получена циркулярная поляризация ЭЛ квантово-размерных гетероструктур InGaAs/GaAs с ФМ (Ni,Co) контактом Шоттки в магнитном поле. Зависимость P_{EL} от магнитного поля имеет немонотонный характер. Максимальное значение степени циркулярной поляризации получено для структуры с покровным слоем 20 nm и трехслойным контактом Au/Ni/Au, Au/Co/Au и составляет 40%.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 05-02-16624), совместной программы CRDF US и Министерства образования РФ (RUX0-001-NN-06/ВР1М01), Минобрнауки РФ (грант РНП.2.1.1.2741) и программы ОФН РАН „Спин-зависимые эффекты в твердых телах и спинтроника“.

Список литературы

- [1] *Adelmann C., Lou X., Strand J. et al. // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. P. 121301.*
- [2] *Pryor C.E., Flatté M.E. // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 91. P. 257901.*
- [3] *Ускова Е.А., Дорохин М.В., Звонков Б.Н. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2006. В. 2. С. 89.*

- [4] *Джиоев Р.И., Захарченя Б.П., Корнеев В.Л., Лазарев М.В.* // ФТТ. 1999. Т. 41. С. 2193.
- [5] *Baidus N.V., Zvonkov V.N., Mokeeva P.V.* et al. // *Semicond. Sci. Technol.* 2004. V. 19. P. S469.
- [6] *Байдусь Н.В., Демина П.Б., Дорохин М.В.* и др. // ФТП. 2005. Т. 39. С. 25.
- [7] *Дорохин М.В., Демина П.Б., Ускова Е.А.* и др. // *Материалы Международной научной конференции „Тонкие пленки и наноструктуры“.* М., 2005. Ч. 1. С. 201.
- [8] *Datal V.L., Dreeben A.B., Triano A.* // *J. Appl. Phys.* 1971. V. 42. P. 2864.