

06

Магнитоуправляемый светодиод с S-образной вольт-амперной характеристикой

© А.В. Кудрин, М.В. Дорохин, Ю.А. Данилов

Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород
E-mail: kudrin@nifti.unn.ru

Поступило в Редакцию 4 августа 2012 г.

Светодиодная $p-i-n$ -гетероструктура с квантовыми ямами InGaAs/GaAs была создана с помощью комбинированного метода газофазной эпитаксии и лазерного нанесения. При температуре 77 К в структуре наблюдались эффект отрицательного дифференциального сопротивления и магнитодиодный эффект. При приложении к структуре импульсного напряжения возможно переключение структуры из низкоомного в высокоомное состояние и гашение ее электролюминесценции внешним магнитным полем.

Представляет интерес создание светоизлучающих структур, характеристики которых (степень поляризации или интенсивность излучения) контролируются внешним магнитным полем. Подобные структуры могут быть использованы для считывания, обработки и передачи информации, а также в качестве магнитных сенсоров. Основным подходом при получении таких структур является использование магнитного материала или структуры (например, спинового клапана) в качестве магниточувствительной части светодиода [1–3]. В данной работе представлены результаты по созданию магнитоуправляемого светодиода нового типа на основе гетероструктуры с квантовыми ямами InGaAs/GaAs.

Светоизлучающая диодная структура была получена с помощью комбинированного метода газофазной эпитаксии и лазерного нанесения. На подложке n -GaAs(001) методом газофазной эпитаксии при температуре 620°C были выращены: буферный слой GaAs толщиной 0.8 μm ; три квантовые ямы (КЯ) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (толщиной 10, 9 и 8 nm и с

содержанием индия $x = 0.1, 0.15$ и 0.2 соответственно), разделенные спейсерными слоями GaAs толщиной 26 nm . Верхняя КЯ закрывалась спейсерным слоем GaAs толщиной 13 nm . Слои имели фоновое легирование p -типа с концентрацией дырок порядка $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. На верхний спейсерный слой GaAs при температуре 410°C последовательно наносились: легирующий слой Mn толщиной ~ 1 монослоя и покровный слой GaAs толщиной 50 nm . Нанесение слоев Mn и GaAs осуществлялось методом лазерного распыления мишеней Mn и GaAs в потоке водорода. Детали формирования слоев методом лазерного нанесения представлены в [4]. На поверхность образца наносился контакт Au методом термического испарения в вакууме. На подложке формировался омический контакт Sn методом искрового вжигания. В полученной $p-i-n$ -диодной структуре n -областью являлась подложка, а p -областью — легированный покровный слой Mn. Методом фотолитографии формировались меза-структуры диаметром $500 \mu\text{m}$. Были исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) и электролюминесцентные свойства полученной структуры при температуре 77 K в диапазоне напряженности магнитного поля $0-4000 \text{ Oe}$. Получение ВАХ проводилось в режиме развертки прикладываемого к меза-структуре напряжения, а также в режиме развертки пропускаемого тока.

На рис. 1 представлены ВАХ структуры при температуре 77 K . Особенностью является наличие S -образного участка ВАХ (эффект отрицательного дифференциального сопротивления), проявляющегося в режиме развертки пропускаемого через структуру тока (зависимость I на рис. 1). Следствием присутствия S -образного участка является возникновение гистерезиса ВАХ при последовательной развертке приложенного к структуре напряжения от 0 до 2.1 V и от 2.1 V до 0 (зависимости $2A$ и $2B$ на рис. 1 соответственно). При приложении напряжения V_{SW} происходит резкое возрастание (на 3 порядка величины) протекающего через структуру тока, т.е. происходит переключение структуры из высокоомного в низкоомное состояние. Напряжение переключения в низкоомное состояние составляло порядка $1.8-1.9 \text{ V}$ в зависимости от расположения меза-структуры на поверхности образца.

Возникновение участка отрицательного дифференциального сопротивления может быть связано с „разогревом“ носителей заряда при их поперечном транспорте в гетероструктурах со слабо легированными широкозонными областями [5,6]. Согласно мнению авторов указанных

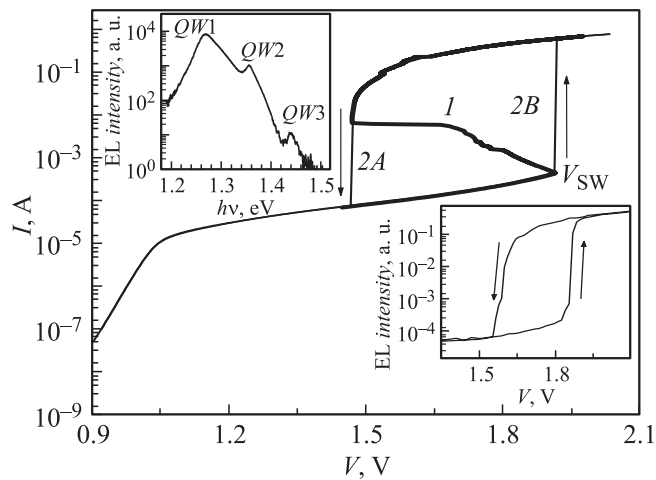


Рис. 1. ВАХ структуры при 77 К в режиме развертки пропускаемого через структуру тока (зависимость I) и в режиме развертки прикладываемого напряжения (зависимости $2A$ и $2B$). Стрелки указывают направление изменения напряжения. На верхней вставке представлен спектр электролюминесценции структуры при 77 К. На нижней вставке представлена зависимость интегральной интенсивности электролюминесценции от приложенного напряжения при 77 К.

работ, в таких структурах (hot-electron diode) носитель заряда может набирать значительную энергию при движении в низколегированной широкозонной области, поскольку рассеяние в этой области мало, а электрическое поле может быть велико. После попадания разогретого носителя в узкозонную область с большой концентрацией носителей происходит его термализация за счет частых столкновений с локализованными носителями. При этом повышается средняя энергия локализованных носителей, что приводит к их выбросам из потенциальной ямы и, как следствие, к увеличению плотности тока через структуру за счет увеличения концентрации носителей заряда. Можно предположить, что подобный эффект наблюдается и в рассматриваемой структуре. В этом случае возможен тепловой выброс носителей из квантовых ям InGaAs после термализации в них носителей заряда, „разогретых“ в слабо легированной широкозонной области буферного слоя GaAs.

Возникает вопрос: как связано появление отрицательного дифференциального сопротивления на ВАХ структуры с наличием нескольких квантовых ям? Кроме структуры с тремя квантовыми ямами была выращена полностью аналогичная структура, но содержащая только одну самую мелкую квантовую яму InGaAs (с толщиной 10 nm и содержанием индия $x = 0.1$). В структуре с одной квантовой ямой S-образной ВАХ при температуре 77 K не наблюдалось. Это позволило предположить, что причиной возникновения особенностей является наличие нескольких квантовых ям в низколегированной i -области.

Переключение структуры в низкоомное состояние сопровождается возникновением электролюминесценции (ЭЛ), связанной с излучательной рекомбинацией носителей заряда в квантовых ямах InGaAs. На верхней вставке к рис. 1 представлен спектр ЭЛ при 77 K. На спектре присутствуют три пика, положение которых соответствует основным переходам в квантовых ямах InGaAs/GaAs со значениями ширины и состава, заданными при росте структуры. На нижней вставке к рис. 1 представлена зависимость интегральной интенсивности ЭЛ при 77 K от приложенного к структуре напряжения для случая последовательной развертки напряжения от 0 до 2.1 V и от 2.1 V до 0. В этом случае зависимость, как и ВАХ, демонстрирует гистерезисный характер. Приложение внешнего магнитного поля вдоль плоскости структуры (т.е. перпендикулярно направлению протекания тока) вызывает смещение ВАХ в сторону больших напряжений (рис. 2). Это приводит к возрастанию в магнитном поле напряжения переключения в низкоомное состояние ($V_{SWField}$) относительно величины V_{SW} . Влияние магнитного поля на ход ВАХ может определяться магнитодиодным эффектом [7,8]. В диодах с длинной низколегированной областью может происходить значительное падение напряжения на i -области, а во внешнем магнитном поле сила Лоренца приводит к уменьшению подвижности носителей заряда, и, следовательно, к увеличению последовательного сопротивления диода.

Было обнаружено, что при приложении к структуре импульсного напряжения, лежащего в диапазоне от V_{SW} до $V_{SWField}$, возможно переключение структуры в высокоомное состояние внешним магнитным полем. На рис. 3, а представлены магнитопольные зависимости сопротивления структуры и интегральной интенсивности ЭЛ при 77 K для величины прикладываемого импульсного напряжения 1.88 V. Переключение структуры в высокоомное состояние в магнитном поле сопровождается полным гашением ЭЛ (рис. 3, а). Наблюдаемый эффект

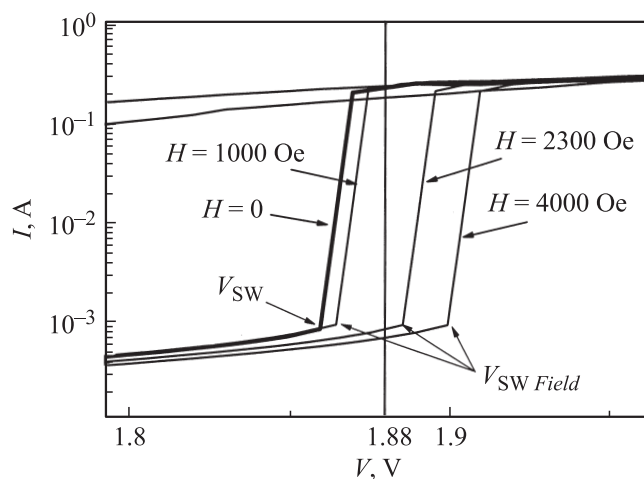


Рис. 2. ВАХ структуры при 77 К в режиме развертки прикладываемого напряжения при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля.

переключения структуры магнитным полем в высокоомное состояние связан с одновременным присутствием магнитодиодного эффекта и эффекта отрицательного дифференциального сопротивления.

Рассмотрим постепенное увеличение магнитного поля H от 0 до 4000 Oe при приложенном импульсном напряжении 1.88 V (рис. 2). При $H = 0$ структура будет находиться в низкоомном состоянии. С ростом напряженности магнитного поля ВАХ будет сдвигаться в сторону больших напряжений вследствие магнитодиодного эффекта. В магнитном поле порядка 2300 Oe приложенное напряжение 1.88 V станет меньше напряжения переключения в низкоомное состояние $V_{SWField}$ и при очередном импульсе напряжения (т.е. при снятии и подаче напряжения) структура окажется в высокоомном состоянии.

В зависимости от величины подаваемого импульсного напряжения в диапазоне от V_{SW} до $V_{SWField}$ переключение в высокоомное состояние наблюдается в магнитном поле различной напряженности (рис. 2). Это позволяет выбрать величину магнитного поля, при котором происходит переключение в высокоомное состояние и, как следствие, выключение

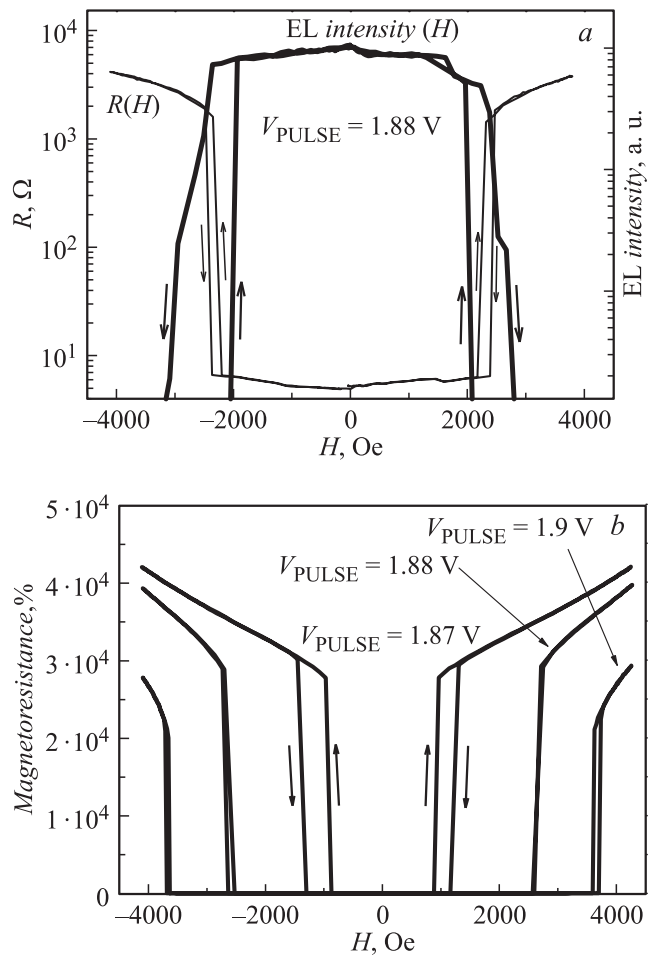


Рис. 3. *a* — магнитопольевые зависимости сопротивления структуры и интегральной электролюминесценции при 77 К для величины прикладываемого импульсного напряжения 1.88 В; *b* — зависимости сопротивления структуры от магнитного поля при 77 К для различных значений прикладываемого импульсного напряжения. Стрелки указывают направление изменения магнитного поля.

ЭЛ (рис. 3, *b*). Значение магнитосопротивления для разных мезоструктур может достигать 45 000–75 000% (сопротивление изменяется от 5–7 до 3000–3750 Ω в магнитном поле).

Ранее было показано, что структуры GaAs, полученные тем же методом, что и в данной работе, и содержащие одиночный легирующий слой Mn, проявляют ферромагнитные свойства при температурах ниже 30 К [4,9]. Это позволяет сделать вывод, что рассматриваемая структура не обладает ферромагнитными свойствами при 77 К, а легирующий слой Mn выступает только в качестве области *p*-типа. Поэтому можно предположить, что гистерезис, присутствующий на магнитопольевых зависимостях сопротивления и интенсивности электролюминесценции (рис. 3), имеет немагнитную природу. Причины возникновения гистерезиса требуют дополнительного исследования.

Таким образом, полученная структура может быть использована в качестве как эффективного магниторезистивного элемента, так и магнитоуправляемого светодиода. Особенностью структуры является возможность выбора значения напряженности магнитного поля, при котором происходит изменение характеристик структуры. Следует отметить, что, поскольку функциональные особенности структуры, судя по всему, связаны с характером распределения легирующей примеси и носителей заряда, возможно создание подобной структуры, функционирующей при комнатной температуре.

Авторы работы выражают признательность Б.Н. Звонкову за выращивание образцов для исследований.

Работа выполнена при поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы и гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых (МК-5198.2012.2).

Список литературы

- [1] Saha D., Basu D., Bhattacharya P. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 194 104(1–3).
- [2] Appelbaum I., Russell K.J., Monsma D.J., Narayanamurti V., Marcus C.M., Hanson M.P., Gossard A.C. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. P. 4571–4573.
- [3] Кудрин А.В., Дорохин М.В., Данилов Ю.А., Мальшева Е.И. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 24. С. 57–65.

- [4] Вихрова О.В., Данилов Ю.А., Дорохин М.В., Звонков Б.Н., Калентьева И.Л., Кудрин А.В. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 14. С. 8–17.
- [5] Hess K., Hightm T.K., Etanuel M.A., Coleman J.J. // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. P. 3775–3777.
- [6] Алфёров Ж.И., Мезрин О.А., Синицын М.А., Трошков С.И., Явич Б.С. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 3. С. 494–499.
- [7] Егиазарян Г.А., Стафеев В.И. Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение. М., 1987.
- [8] Абрамов А.А., Горбатый И.Н. // ФТП. 2003. Т. 37. В. 9. С. 1078–1081.
- [9] Кудрин А.В., Вихрова О.В., Данилов Ю.А. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 11. С. 46–53.