

07

Фотоотражение структур GaAs с дельта-⟨Mn⟩-легированным слоем

© О.С. Комков, Р.В. Докичев, А.В. Кудрин, Ю.А. Данилов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“

Научно-исследовательский физико-технический институт

Нижегородского государственного университета

E-mail: okomkov@yahoo.com

Поступило в Редакцию 6 июня 2013 г.

Методом фотомодуляционной оптической спектроскопии (фотоотражения) определена напряженность встроенного электрического поля в структурах арсенида галлия с дельта-слоем при различном содержании марганца в последнем. Исследованные образцы выращивались с использованием технологии, комбинирующей газофазную эпитаксию из металлоорганических соединений и лазерное распыление мишеней Mn и GaAs при пониженной температуре ($T_g = 400^\circ\text{C}$). Увеличение содержания Mn в дельта-слое от нуля до 0.35 долей монослоя приводило к росту усредненного по приповерхностной области встроенного электрического поля с 14 до 25 kV/cm. Полученные данные хорошо согласуются с результатами самосогласованного решения уравнений Шрёдингера и Пуассона для реального профиля распределения примеси марганца.

Метод модуляционной оптической спектроскопии, и в частности его бесконтактная разновидность — фотоотражение (ФО), обладает высокой чувствительностью и информативностью. Ранее [1–3] методом фотоотражения исследовались дельта-⟨Si⟩-легированные слои в GaAs. В этих работах в основном изучалось влияние толщины верхнего покровного слоя GaAs на напряженность поля в дельта-легированной структуре. Публикаций по исследованию ФО дельта-слоев *p*-типа в GaAs значительно меньше. В основном они посвящены изучению дельта-⟨Be⟩-легированных слоев [4]. Также дельта-легированные бериллием более сложные полупроводниковые *n/i-p-i/n*-структуры на основе арсенида галлия изучались в [5]. Нам не известно работ, где метод фотоотражения применялся бы для исследования одиночных дельта-⟨Mn⟩-легированных акцепторных слоев в GaAs.

По сравнению с арсенидом галлия, объемно-легированным марганцем, структуры с дельта(Mn)-слоями обладают рядом интересных для приборных применений особенностей. В частности, в гетероструктурах GaAs с дельта(Mn)-легированным слоем, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии [6], были продемонстрированы ферромагнитные свойства вплоть до температур ≈ 170 К [7].

Оригинальная методика выращивания дельта(Mn)-слоев в GaAs предложена в [8]. Выращенные по этой методике структуры обладают ферромагнитными свойствами [9], а позднее в одиночных GaAs дельта(Mn)-слоях были обнаружены анизотропное магнетосопротивление и планарный эффект Холла [10]. Ферромагнитные дельта(Mn)-слои в структурах на основе GaAs могут являться источником поляризованных по спину носителей заряда. Благодаря высокому кристаллическому совершенству дельта(Mn)-легированной области GaAs, возможно создание светоизлучающих структур с магнитоуправляемой циркулярно-поляризованной фото- и электролюминесценцией. В частности, в работах [11,12] было показано, что при помещении дельта(Mn)-слоя вблизи квантовой ямы InGaAs/GaAs (на расстоянии 3–5 nm) наблюдалось его воздействие на спиновую поляризацию носителей в яме.

Для проведения настоящего исследования была изготовлена серия образцов GaAs с одиночным дельта(Mn)-слоем с различным содержанием марганца (Q_{Mn}) до 0.35 долей монослоя (ML) (согласно работе [6], 1 ML соответствует плотности примеси $6.3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$). В качестве подложки использовались пластины полуизолирующего GaAs (001). Буферный слой нелегированного GaAs толщиной $0.4 \mu\text{m}$ выращивался методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD) при температуре 650°C . Дельта(Mn)-слой наносился при температуре подложки $T_g = 400^\circ\text{C}$ методом лазерного распыления металлического Mn [8]. Выращивание покровного слоя нелегированного GaAs толщиной 25 nm также проводилось при 400°C методом лазерного распыления при использовании в качестве мишени пластины нелегированного GaAs. Пониженная температура выращивания покровного слоя была необходима для уменьшения диффузионного расплывания марганца. Схема структуры и эксперимента показана на вставке рис. 1, а.

Методика измерения спектров фотоотражения ($\Delta R(E)/R(E)$) является стандартной, а детали используемой аппаратуры описаны в [13]. На образец направляется механически прерываемый модулирующий луч лазера (вставка рис. 1, а) с энергией излучения больше ширины

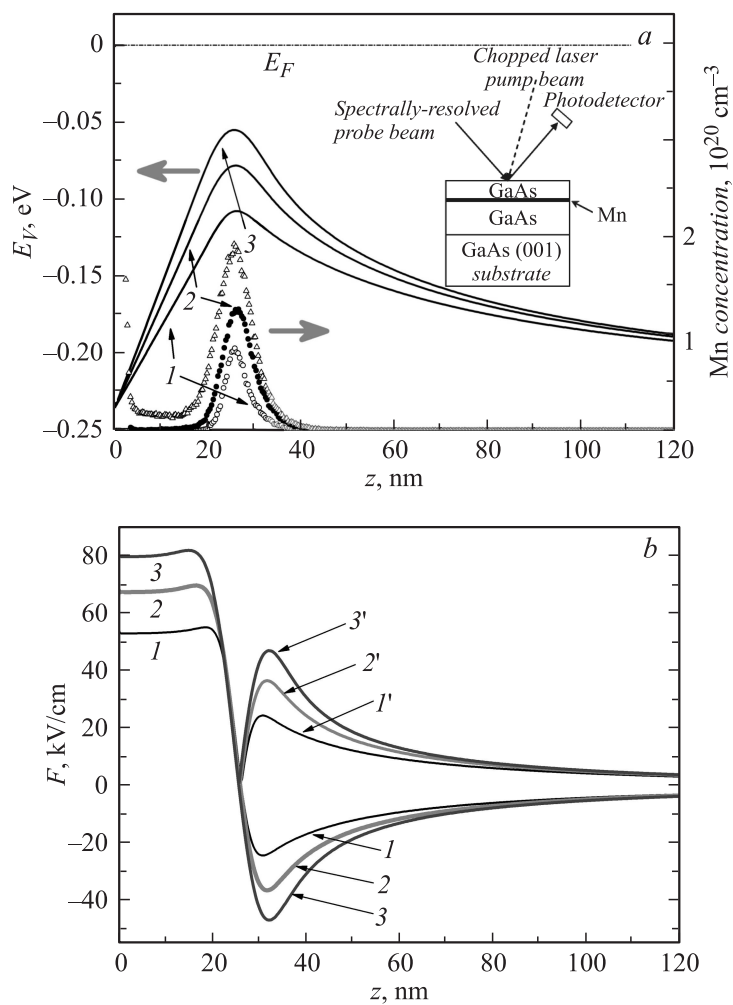


Рис. 1. *a* — зависимость энергии потолка валентной зоны от координаты для трех из исследованных образцов GaAs с дельта(Mn)-легированным слоем. Содержание Mn в долях монослоя (ML) составляло: 1 — 0.09 ML, 2 — 0.18 ML и 3 — 0.35 ML. Правая ось относится к профилям Mn, полученным методом ВИМС и взятым из [14]. *b* — рассчитанные значения напряженности встроенного электрического поля F и модуля этой величины (кривые 1–3).

запрещенной зоны GaAs. В результате фотоинжекции электронно-дырочных пар, разделяемых электрическим полем области объемного заряда, происходит частичная компенсация поверхностных и интерфейсных заряженных состояний, приводящая к уменьшению барьерного электрического поля. Возникающие при этом изменения оптических характеристик вещества приводят к модуляции отраженного зондового света с энергией кванта E , что с помощью фазочувствительной техники детектирования позволяет зарегистрировать дифференциальный спектр отражения $\Delta R(E)$. Полученные данные нормируются на интенсивность обычного отражения $R(E)$ от исследуемой структуры.

Мы провели расчеты энергетической диаграммы исследованных структур, решая самосогласованно уравнения Шрёдингера и Пуассона. Профиль концентрации примеси Mn для расчетов был взят из измерений методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС), опубликованных ранее в [14] (рис. 1, *a*). Приблизительно профили марганца описывались нами функцией Гаусса. При расчетах учитывалось, что при комнатной температуре не вся примесь Mn является электрически активной из-за большой глубины расположения ее акцепторного уровня в запрещенной зоне.

На рис. 1, *a* показаны результаты расчетов зависимости энергии потолка валентной зоны от координаты для образцов с различным содержанием марганца в дельта-слое. Видно, что образованный областью объемного заряда потенциал формирует хорошо выраженную квантовую яму (КЯ) для дырок. Глубина ямы увеличивается с ростом концентрации примеси в дельта-слое. Однако наши последующие измерения ФО, проведенные при комнатной температуре и при температуре кипения жидкого азота, не продемонстрировали спектральных особенностей, связанных с уровнями размерного квантования в КЯ для дырок. Возможно, это связано с тем, что переходы на квантовые уровни не видны на фоне межзонных переходов в однородном полупроводнике, окружающем дельта-слой; другой вероятной причиной может быть то, что в результате диффузии атомов Mn исследуемый дельта-слой оказался размыт.

На рис. 2 приведены типичные спектры фотоотражения, измеренные при комнатной температуре. Пунктирной вертикальной линией на рисунке отмечено значение ширины запрещенной зоны GaAs (E_g). В области энергий больше E_g спектр ФО представляет собой затухающие осцилляции Франца–Келдыша (показаны на рис. 2 стрелками). Видно,

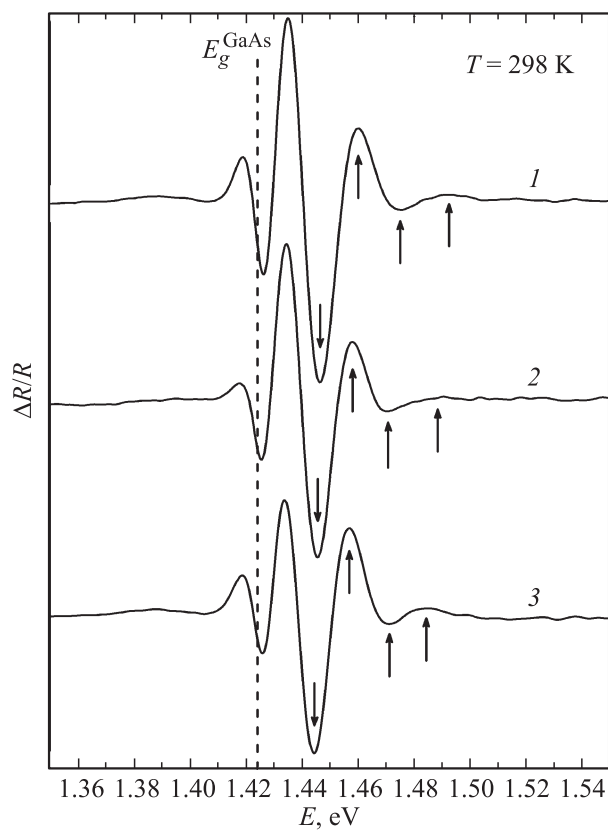


Рис. 2. Типичные спектры фотоотражения структур GaAs с дельта(Mn)-легированным слоем при содержании марганца в дельта-слое, равном: 0.35 (кривая 1), 0.26 (кривая 2) и 0.18 (кривая 3) долей монослоя.

что их период увеличивается с ростом концентрации примеси в дельта-слое. Напряженность встроенного электрического поля (F), связанная с периодом осцилляций Франца–Келдыша, определялась по методике, описанной в [15].

На рис. 3 квадратными символами представлены полученные нами по спектрам ФО экспериментальные значения напряженности встроенного электрического поля F в зависимости от концентрации примеси в

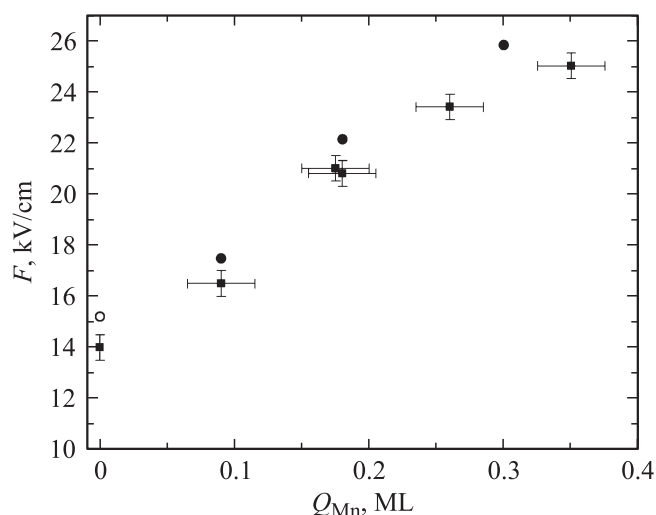


Рис. 3. Экспериментальные (квадратные символы) и расчетные (круглые символы) значения напряженности встроенного электрического поля при различных концентрациях марганца в дельта-слое. Концентрация примеси приведена в долях монослоя.

дельта-слое. Ненулевое значение F при 0 ML (дельта-слой отсутствует) обусловлено полем $p-n$ -гомоперехода „низкотемпературный GaAs — высокотемпературный буферный слой“. Результат решения уравнения Пуассона для этого перехода приведен на рис. 3 круглым светлым символом.

Нужно отметить, что встроенное электрическое поле структур с дельта-слоем является неоднородным. В этом можно убедиться, продифференцировав по координате представленные на рис. 1, *a* зависимости потенциала. На рис. 1, *b* приведены расчетные зависимости от координаты как электрического поля F , так и величины модуля F . Видно, что поле сильно изменяется с координатой и даже меняет знак. На формирование осцилляций Франца–Келдыша, по нашему мнению, оказывают влияние и область структуры, где поле направлено к поверхности, и область структуры, где поле направлено вглубь образца, т. е. определяющим является модуль напряженности встроенного поля. Для корректного сравнения с экспериментальными данными зависимости

$|F(x)|$ усреднялись по области формирования сигнала фотоотражения (величина порядка длины волны, деленной на удвоенный показатель преломления материала [16]). В нашем случае она составила примерно 120 nm. На рис. 3 видно довольно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных по оценке встроенного электрического поля в структурах GaAs с дельта(Mn)-легированным слоем в исследованном диапазоне содержания марганца. Величина встроенного электрического поля монотонно увеличивается с возрастанием содержания марганца и для $Q_{Mn} = 0.35 ML$ достигает 25 kV/cm. Заметим, что при сравнении теории и эксперимента на рис. 3 не использовалось ни одного подгоночного параметра.

Таким образом, в работе впервые метод фотоотражения был применен для диагностики одиночных дельта(Mn)-легированных слоев в GaAs. Показано, что определенная по спектрам фотоотражения напряженность встроенного электрического поля увеличивается с ростом содержания Mn. Экспериментальные данные подтверждаются результатами независимых расчетов напряженности электрического поля, усредненной по приповерхностной области образца. Полученная на рис. 3 зависимость может быть использована для неразрушающей оценки концентрации электрически активного марганца в дельта-слое и для контроля технологии изготовления подобных структур.

Авторы выражают благодарность Б.Н. Звонкову за выращивание исследованных структур.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ (грант № 13-07-00982), Минобрнауки РФ (ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“, гос. контракты № 14.B37.21.0338 и № 14.B37.21.0346).

Список литературы

- [1] Bernussi A.A., Iikawa F., Motisuke P., Basmaji P., Siu Li M., Hipolito O. // J. Appl. Phys. 1990. V. 67. N 9. P. 4149–4151.
- [2] Liu D.G., Chang K.H., Lee C.P., Hsu T.M., Tien Y.C. // J. Appl. Phys. 1992. V. 72. N 4. P. 1468–1472.
- [3] Birkedal D., Hansen O., Sorensen C.B., Jarasiunas K., Brorson S.D., Keiding S.R. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. N 1. P. 79–81.

- [4] Seliuta D., Chechavius B., Kavaliauskas J., Krivaite G., Grigelionis I., Balakauskas S., Valusis G., Sherliker B., Halsall M.P., Lachab M., Khanna S.P., Harrison P., Linfield E.H. // *Acta Physica Polonica. A*. 2008. V. 113. N 3. P. 909–912.
- [5] Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Бугаков И.В., Колмакова Т.П., Червяков А.В. // *Неорганические материалы*. 2011. Т. 47. В. 5. С. 517–520.
- [6] Nazmul A.M., Sugahara S., Tanaka M. // *J. Crystal Growth*. 2003. V. 251. P. 303–310.
- [7] Nazmul A.M., Atemiya T., Shuto Y., Sugahara S., Tanaka M. // *Phys. Rev. Lett.* 2005. V. 95. P. 017 201.
- [8] Звонков Б.Н., Вихрова О.В., Данилов Ю.А., Демидов Е.С., Демина П.Б., Дорохин М.В., Дроздов Ю.Н., Подольский В.В., Сапожников М.В. // *Оптический журнал*. 2008. Т. 75. В. 6. С. 56–61.
- [9] 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.
- [10] Кудрин А.В., Вихрова О.В., Данилов Ю.А. // *Письма в ЖТФ*. 2010. Т. 36. В. 11. С. 46–53.
- [11] Dorokhin M.V., Danilov Yu.A., Demina P.B., Kulakovskii V.D., Vikhrova O.V., Zaitsev S.V., Zvonkov B.N. // *J. Phys. D-Appl. Phys.* 2008. V. 41. P. 245 110.
- [12] Зайцев С.В., Дорохин М.В., Бричкин А.С., Вихрова О.В., Данилов Ю.А., Звонков Б.Н., Кулаковский В.Д. // *Письма в ЖЭТФ*. 2009. Т. 90. В. 10. С. 730–735.
- [13] Комков О.С., Пихтин А.Н., Жилев Ю.В. // *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2011. В. 1. С. 45–48.
- [14] Danilov Yu.A., Drozdov M.N., Drozdov Yu.N., Kudrin A.V., Vikhrova O.V., Zvonkov B.N., Kalentieva I.L., Dunaev V.S. // *J. Spintronics and Magnetic Nanomaterials*. 2012. V. 1. N 1. P. 82–84.
- [15] Комков О.С., Пихтин А.Н., Жилев Ю.В., Федоров Л.М. // *Письма в ЖТФ*. 2008. Т. 34. В. 1. С. 81–87.
- [16] Пихтин А.Н., Комков О.С., Базаров К.В. // *ФТП*. 2006. Т. 40. В. 5. С. 608–613.