

07

Нелинейный эффект Холла при комнатной температуре в слоях InFeAs электронного типа проводимости

© А.В. Кудрин^{1,2}, Ю.А. Данилов^{1,2}, В.П. Лесников¹,
Е.А. Питиримова²

¹ Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород
E-mail: kudrin@nifti.unn.ru

Поступило в Редакцию 17 марта 2015 г.

Методом лазерного распыления в вакууме получены ферромагнитные эпитаксиальные слои InFeAs электронного типа проводимости. В слоях InFeAs, полученных на подложках GaAs(111), наблюдается нелинейный по магнитному полю эффект Холла вплоть до комнатной температуры. Обнаружено влияние кристаллографической ориентации подложки GaAs на магнитные свойства слоев InFeAs.

Полупроводниковые материалы, в которых носители заряда обладают преимущественной поляризацией по спине, рассматриваются как основа для создания приборов спиновой электроники. Ведутся работы по созданию таких материалов и структур на основе полупроводников различного типа (Ge, Si, A³B⁵, оксидных), легированных атомами 3d-элементов (Mn, Co, Fe). Наибольшие успехи достигнуты по созданию ферромагнитных структур на основе полупроводников A³MnB⁵. Структуры такого типа обладают дырочным типом проводимости, что связано с акцепторным поведением электрически активного марганца. Для создания различных полупроводниковых приборов спинтроники, как и для традиционной электроники, необходимо получение полупроводниковых материалов как *p*-, так и *n*-типа. Таким материалом может являться InAs, легированный Fe. Недавно методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) были получены слои InFeAs, проявляющие ферромагнитные свойства до 70 К [1].

В этом сообщении мы представляем результаты по созданию и исследованию эпитаксиальных структур InFeAs/GaAs, проявляющих ферромагнитные свойства вплоть до комнатной температуры. Слои InFeAs толщиной 15–30 нм были получены на подложках *i*-GaAs методом распыления мишеней InAs и Fe в вакууме [2]. Содержание Fe характеризовалось технологическим параметром $Y_{\text{Fe}} = t_{\text{Fe}} / (t_{\text{InAs}} + t_{\text{Fe}})$, где t_{Fe} и t_{InAs} — время распыления мишени Fe и InAs соответственно. Величина Y_{Fe} варьировалась в диапазоне 0.08–0.2. Температура ростового процесса (T_g) составляла 250–400°C. Исследования дифракции электронов на отражение при ускоряющем напряжении 50 keV показали, что слои InFeAs, выращенные на подложках GaAs с кристаллографической ориентацией (100) и (111), являются монокристаллическими для всех указанных выше Y_{Fe} и T_g : на электронограммах наблюдаются точечные рефлексы от слоя InFeAs. Исследования магнитных и магнитотранспортных свойств структур показали, что слои InFeAs с $Y_{\text{Fe}} = 0.2$, полученные при $T_g = 300^\circ\text{C}$, обладают ярко выраженными ферромагнитными свойствами. В частности, в этих слоях наблюдается аномальный эффект Холла. Все изготовленные структуры согласно знаку коэффициента Холла и термоэдс демонстрировали электронный тип проводимости.

На рис. 1 приведены магнитополевые зависимости аномальной компоненты сопротивления Холла ($R_{\text{AH}}(H)$) при различных температурах для слоя InFeAs с $Y_{\text{Fe}} = 0.2$ и $T_g = 300^\circ\text{C}$, нанесенного на подложки GaAs ориентации (100) и (111). На вставках к рис. 1 показаны исходные зависимости сопротивления Холла от магнитного поля ($R_{\text{H}}(H)$) при 10 и 300 К. Измерения эффекта Холла были проведены на постоянном токе в геометрии ван дер Пау с использованием гелиевого криостата замкнутого цикла. Для получения зависимостей $R_{\text{AH}}(H)$ было проведено вычитание из полного $R_{\text{H}}(H)$ линейной части исходной зависимости сопротивления Холла от магнитного поля, измеренной в магнитном поле более 2500 Ое (вставки к рис. 1). Линейная часть зависимости $R_{\text{H}}(H)$ связана с обычным эффектом Холла, определяемым действием силы Лоренца на носители заряда и доминирующим в зависимости $R_{\text{H}}(H)$ после выхода на насыщение намагниченности материала. Линейная часть зависимости $R_{\text{H}}(H)$ позволяет определить величину нормального коэффициента Холла при температуре измерения и, следовательно, рассчитать концентрацию носителей заряда и с учетом сопротивления слоя — холловскую подвижность.

Для слоя InFeAs с $Y_{\text{Fe}} = 0.2$ и $T_g = 300^\circ\text{C}$ зависимости $R_{\text{AH}}(H)$ являются нелинейными и гистерезисными (рис. 1), что свидетельствует

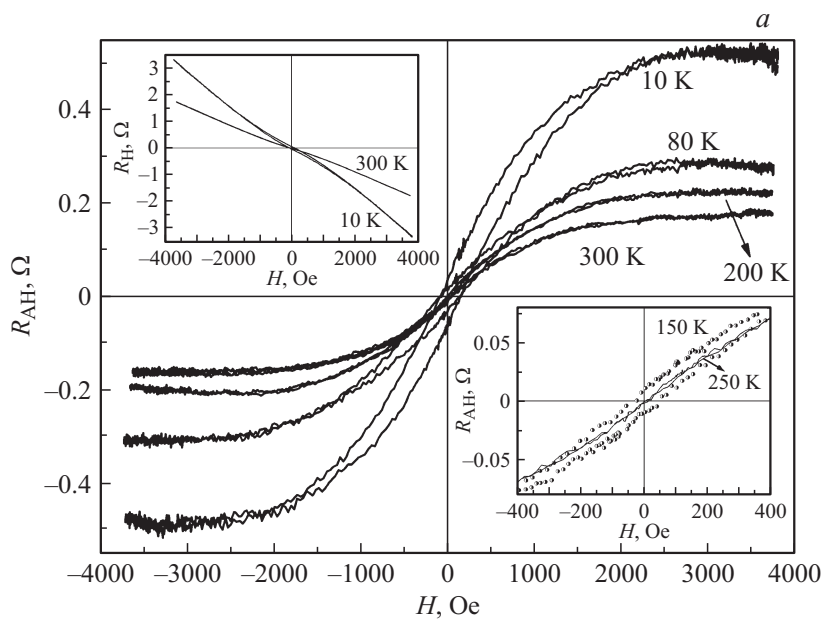


Рис. 1. Магнитополевые зависимости аномальной компоненты сопротивления Холла при различных температурах для слоя InFeAs ($Y_{Fe} = 0.2$, $T_g = 300^\circ\text{C}$): *a* — структура InFeAs/GaAs(111), *b* — структура InFeAs/GaAs(100). На верхних вставках показаны исходные зависимости сопротивления Холла от магнитного поля при 10 и 300 К. На нижней вставке *a* представлены увеличенные участки магнитополевых зависимостей аномальной компоненты сопротивления Холла при 150 и 250 К.

о ферромагнитных свойствах слоя InFeAs и о проявлении ферромагнитных свойств в транспорте носителей заряда (электронов). Как видно из рис. 1, *a* и *b*, аномальный эффект Холла проявляется по-разному в слое InFeAs, нанесенном на подложки GaAs (100) и GaAs (111). Зависимости $R_{AH}(H)$ для структуры InFeAs/GaAs(111) являются гистерезисными до 150 К, а для структуры InFeAs/GaAs(100) до 20 К. Для структуры InFeAs/GaAs(111) зависимости $R_{AH}(H)$ являются нелинейными вплоть до комнатной температуры, в то время как для структуры InFeAs/GaAs(100) нелинейная компонента зависимостей $R_H(H)$ пропадает при температурах выше 150 К (рис. 1).

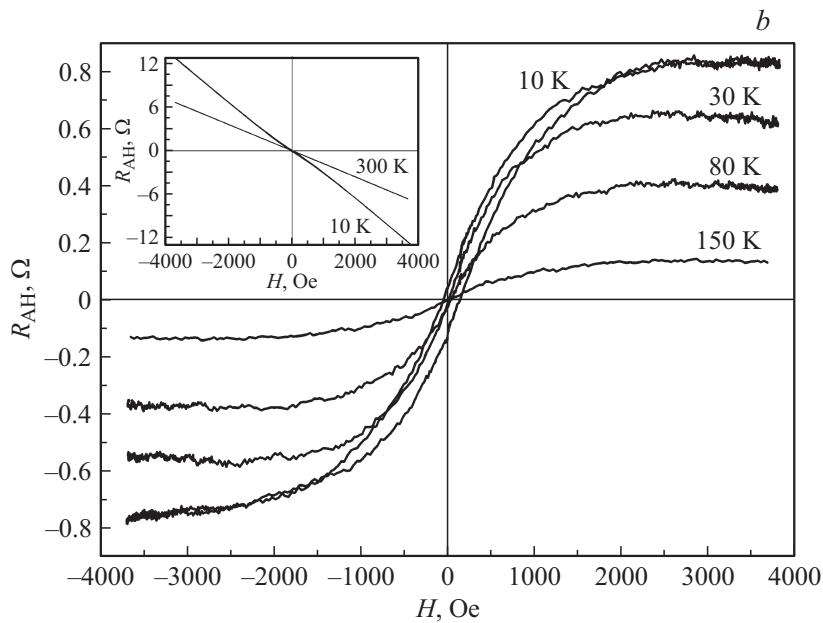


Рис. 1 (продолжение).

На рис. 2 представлены магнитополевые зависимости намагниченности ($M(H)$) при 300 К слоя InFeAs с $Y_{\text{Fe}} = 0.2$ и $T_g = 300^\circ\text{C}$, нанесенного на подложки GaAs ориентации (100) и (111). Зависимости $M(H)$ получены с использованием магнитометра переменного градиента поля [3]. Зависимость намагниченности от магнитного поля после вычитания линейного по магнитному полю диамагнитного вклада от подложки GaAs является гистерезисной как для структуры InFeAs/GaAs(111), так и для InFeAs/GaAs(100). Как видно из рис. 2, зависимости $M(H)$, так же как и зависимости $R_{\text{AH}}(H)$, выявляют различия в магнитных свойствах слоя InFeAs, выращенного на подложках GaAs(111) и GaAs(100). Величина намагниченности насыщения для структуры InFeAs/GaAs(100) примерно в три раза ниже, чем для структуры InFeAs/GaAs(111), при этом структуры демонстрируют различные значения коэрцитивного поля, но сходные значения остаточной намагниченности.

Различие в свойствах слоев InFeAs, выращенных на подложках GaAs(111) и GaAs(100), проявляется также в различии их электриче-

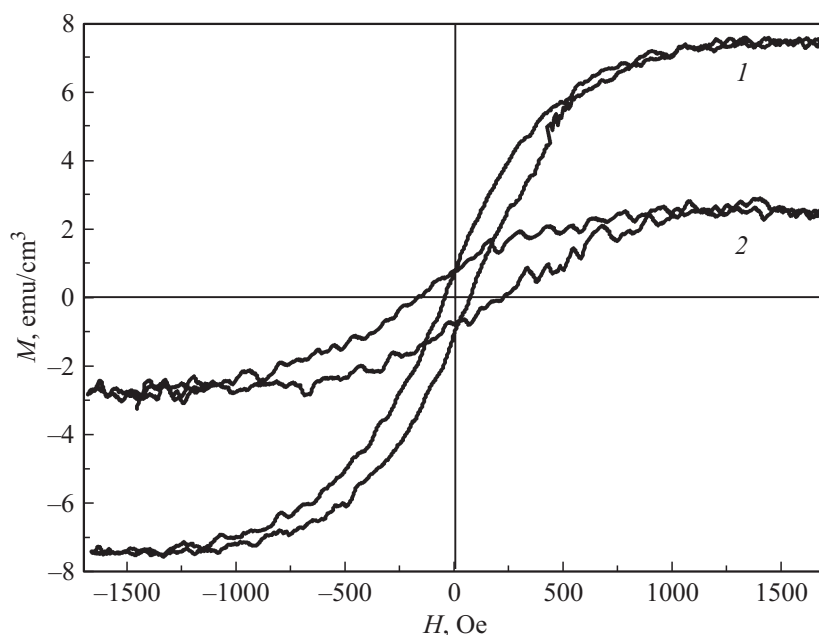


Рис. 2. Магнитолевые зависимости намагниченности для структуры InFeAs/GaAs(111) (кривая 1) и структуры InFeAs/GaAs(100) (кривая 2) при 300 К. Внешнее магнитное поле приложено перпендикулярно плоскости структуры.

ских параметров. На рис. 3 представлены температурные зависимости удельного сопротивления, концентрации и подвижности носителей заряда для структур InFeAs/GaAs(111) и InFeAs/GaAs(100). Зависимость удельного сопротивления для слоя InFeAs имеет полупроводниковый характер: с уменьшением температуры наблюдается увеличение сопротивления слоя InFeAs. Следует отметить, что наибольший рост сопротивления структур наблюдается при уменьшении температуры от 300 до 70 К (рис. 3, а). При дальнейшем понижении температуры сопротивление структур увеличивается менее значительно (рис. 3, а). Температурное изменение сопротивления определяется уменьшением концентрации носителей заряда с понижением температуры, при этом величина подвижности носителей заряда в диапазоне температур

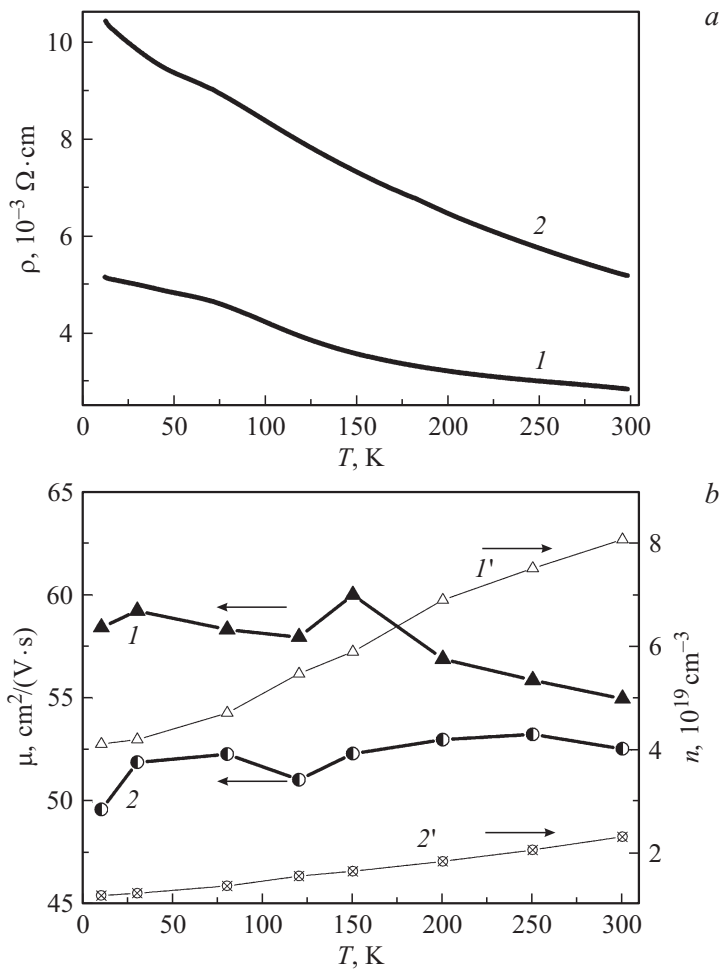


Рис. 3. Температурные зависимости удельного сопротивления (а), концентрации и подвижности (b) носителей заряда для структуры InFeAs/GaAs(111) (зависимости 1 и 1') и структуры InFeAs/GaAs(100) (зависимости 2 и 2').

300–10 К изменяется незначительно (рис. 3, *b*). Температурное изменение концентрации и подвижности носителей заряда (а следовательно, и удельного сопротивления) качественно совпадает для структур InFeAs/GaAs(111) и InFeAs/GaAs(100). При этом для слоя InFeAs, выращенного на подложке GaAs(111), в исследованном диапазоне температур величина концентрации носителей заряда примерно в три раза выше, чем для слоя InFeAs, выращенного на подложке GaAs(100). Судя по всему, влияние кристаллографической ориентации подложки на электрические свойства является характерной особенностью эпитаксиальных слоев InAs. В частности, в работе [4] сообщается о различии в электрических и структурных свойствах эпитаксиальных слоев InAs, полученных методом МЛЭ на подложках GaAs(111) и GaAs(100). В [4] было установлено, что для слоев InAs, полученных при температурах ниже 450°C, в структурах InAs/GaAs(111) наблюдается более высокая концентрация носителей заряда (электронов), чем в структурах InAs/GaAs(100).

Для нелегированных эпитаксиальных слоев узкозонного полупроводника InAs характерен электронный тип проводимости, что связано с электрической активностью (преимущественно донорного типа) структурных дефектов в нем. В частности, электрически активным является антиструктурный дефект As_{In} , являющийся двойным донором [5]. Например, при создании в InAs радиационных точечных дефектов уровень Ферми смещается в направлении зоны проводимости, что приводит к возрастанию концентрации электронов в материалах *n*-типа проводимости и конверсии типа проводимости в материалах *p*-типа [6]. Отметим, что в лазерно-нанесенных слоях InFeAs возможно возникновение радиационных дефектов из-за бомбардировки растущей поверхности частицами лазерной плазмы, имеющими энергии порядка сотен eV [2]. Наиболее вероятно, что атомы Fe не являются электрически активными в слоях InFeAs [1], а электронный тип проводимости обусловлен дефектами. Более высокое значение концентрации электронов в структуре InFeAs/GaAs(111), возможно, связано с большим количеством дефектов в слое InFeAs.

Для повышения концентрации электронов в слоях InFeAs, полученных методом МЛЭ, проводилось их дополнительное легирование Be, являющимся донором в низкотемпературных слоях InAs [1], при этом максимальная концентрация электронов составляла $2.8 \cdot 10^{19}$ и $1.6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ при 300 и 10 К соответственно [1]. Для сформированных нами слоев InFeAs наблюдаются сравнимые либо более высокие

значения концентрации электронов. Для структуры InFeAs/GaAs(100) концентрация электронов составляет $2.3 \cdot 10^{19}$ и $1.2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ при 300 и 10 К соответственно, а для структуры InFeAs/GaAs(111) при указанных температурах — $8.1 \cdot 10^{19}$ и $4.1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. При этом дополнительного легирования не проводилось. Отметим, что подвижность электронов при этом имеет значения (рис. 3, *b*), сравнимые со значением подвижности в слоях InFeAs, полученных методом МЛЭ [1].

Концентрация носителей заряда играет определяющую роль для возникновения ферромагнетизма в полупроводниках, легированных магнитной примесью, поскольку дальнедействующее обменное взаимодействие между ионами магнитной примеси осуществляется посредством носителей заряда [7]. Для слоев InFeAs, полученных методом МЛЭ, ферромагнитные свойства возникали при концентрации электронов проводимости более $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (при содержании Fe более 5%) [1]. При этом наблюдалась зависимость температуры Кюри (T_C) от концентрации электронов, а максимальное значение T_C составило 70 К, аномальный эффект Холла наблюдался до температуры порядка 80 К [1].

Температура Кюри наших слоев InFeAs не ниже комнатной. Зависимости намагниченности от магнитного поля при 300 К демонстрируют петлю гистерезиса (рис. 2). Это может быть связано с присутствием в слое InFeAs второй ферромагнитной фазы, например массива кластеров Fe с температурой блокирования выше комнатной, аналогично тому, как наблюдалось образование кластеров ферромагнитной фазы MnAs в слоях InMnAs, полученных лазерным распылением в газовой атмосфере [8]. При этом различный характер магнитопольевых зависимостей намагниченности для структур InFeAs/GaAs(111) и InFeAs/GaAs(100) может указывать на отличие в формировании кластеров Fe на подложках GaAs(111) и GaAs(100), приводящее, например, к разным размерам кластеров и различию их магнитной анизотропии. Наиболее интересным свойством слоев InFeAs, полученных методом лазерного распыления, является наблюдение аномального эффекта Холла вплоть до комнатной температуры. Ранее, на примере слоев InMnAs с ферромагнитными включениями фазы MnAs, нами было показано, что гистерезисная форма зависимости сопротивления Холла от внешнего магнитного поля может являться следствием неоднородного распределения плотности тока и действия силы Лоренца, вызванной магнитными полями ферромагнитных включений [9]. Для выяснения природы ферромагнетизма и его проявления в транспорте носителей заряда в полученных слоях InFeAs необходимо проведение дополнительных исследований.

Таким образом, методом лазерного распыления в вакууме получены эпитаксиальные слои InFeAs, проявляющие ферромагнитные свойства в транспорте носителей заряда (электронов) вплоть до 150 К и демонстрирующие нелинейную зависимость сопротивления Холла от магнитного поля вплоть до комнатной температуры. Обнаружено влияние кристаллографической ориентации подложки GaAs на ферромагнитные свойства слоев InFeAs. Полученные слои InFeAs имеют перспективу для применения в полупроводниковой спинтронике в качестве материала электронного типа проводимости, например в качестве инжектора поляризованных по спину электронов.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки России (задания № 3.285.2014/К и № 8.1054.2014/К), РФФИ (грант № 15-02-07824) и гранта-соглашения 02.В.49.21.0003 Минобрнауки России.

Список литературы

- [1] Tanaka M., Ohya S., Hai P.N. // *Appl. Phys. Rev.* 2014. V. 1. P. 011102.
- [2] Красильников В.С., Лесников В.П., Подольский В.В., Хохлов А.Ф., Чернов А.Л. // *Высокочистые вещества*. 1988. № 6. С. 74.
- [3] Flanders P.J. // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 63. P. 3940.
- [4] Hooper S.E., Westwood D.I., Woolf D.A., Heghoyan S.S., Williams R.H. // *Semicond. Sci. Technol.* 1993. V. 8. P. 1069.
- [5] Takushima M., Y. Kajikawa // *Phys. Stat. Sol. (c)*. 2008. V. 5. P. 2783.
- [6] Брудный В.Н., Колин Н.Г., Потанов А.И. // *ФТП*. 2003. Т. 37. С. 408.
- [7] Zutic I., Fabian J., Das Sarma S. // *Rev. Mod. Phys.* 2004. V. 76. P. 323.
- [8] Вихрова О.В., Данилов Ю.А., Звонков Б.Н., Кудрин А.В., Подольский В.В., Дроздов Ю.Н., Сапожников М.В., Moura C., Vasilevskiy M.I., Темиряева М.П. // *ФТТ*. 2008. Т. 50. С. 50.
- [9] Kudrin A.V., Shvetsov A.V., Danilov Yu.A., Timopheev A.A., Pavlov D.A., Bobrov A.I., Malekhonova N.V., Sobolev N.A. // *Phys. Rev. B*. 2014. V. 90. P. 024415.