

Бесконтактная характеристика дельта-слоев марганца и углерода в арсениде галлия

© О.С. Комков¹, А.В. Кудрин²

¹ Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ»,
197376 Санкт-Петербург, Россия

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: okomkov@yahoo.com

(Получена 27 апреля 2017 г. Принята к печати 12 мая 2017 г.)

Метод спектроскопии фотоотражения применен для диагностики одиночных дельта-слоев марганца и углерода в нелегированном GaAs. Показано, что определяемая этим методом напряженность встроенных электрических полей растет с увеличением слоевой концентрации введенных примесей и хорошо коррелирует с технологическими данными и результатами, полученными методом Холла. Фазочувствительное фотоотражение позволило независимо измерить приповерхностное поле и поле, обусловленное дельта-легированием. Это дает возможность бесконтактно определять долю электрически активной примеси Mn и выявлять вклад δ -слоев углерода в гетеросистемы на основе GaAs.

DOI: 10.21883/FTP.2017.11.45093.07

1. Введение

Дельта-легирование позволяет вводить в полупроводниковую структуру достаточное количество примеси, при этом сохраняя относительно высокую подвижность свободных носителей заряда [1]. Особый интерес представляет δ -легирование GaAs акцепторной примесью марганца, поскольку оно приводит к возникновению ферромагнитных свойств у структуры, а также к преимущественной спиновой поляризации носителей в δ -слое [2,3] и в расположенной вблизи δ -слоя квантовой яме (КЯ) [4]. Размещение с другой стороны от этой КЯ δ -слоя углерода [5] добавляет в систему дополнительные дырки, что приводит к усилению наблюдаемых спиновых явлений. Введенные с углеродом дырки, возможно, компенсируют нежелательные электроны, образовавшиеся за счет попавших в междоузлия атомов Mn.

В этой связи актуальным представляется разработка оптических методик контроля электрически активного марганца в δ -слоях, а также выявление дырочного вклада δ -слоев углерода в систему. Для достижения этой цели в данной работе использован метод фотоотражения (ФО) — бесконтактная разновидность модуляционной оптической спектроскопии. Ранее названный метод активно применялся в основном для исследования δ -слоев n -типа. Существует большое количество работ по ФО GaAs, δ -легированного кремнием [6–10]. Вместе с тем, насколько нам известно, среди δ -примесей p -типа в GaAs данным методом исследовался лишь бериллий [11,12].

В нашей более ранней работе [13] была показана применимость метода ФО для бесконтактной диагностики одиночных δ -слоев Mn. Наблюдаемые в них осцилляции Франца–Келдыша позволили определить величину встроенного электрического поля в зависимости от концентрации введенного в δ -слой марганца. Однако в случае наложения сигналов ФО от поверхности и от δ -слоя

существует необходимость разделения этих сигналов для индивидуального анализа каждого из них. Для разделения можно применить методику фазочувствительного фотоотражения, предложенную в [9] и активно используемую в более поздних работах [14–17]. Эта методика позволяет выделять искомую составляющую сигнала, обусловленную исследуемым δ -слоем, и не учитывать вклад приповерхностной области полупроводника. Применение в настоящей работе фазочувствительного ФО к δ -слоям углерода демонстрирует расширенные возможности бесконтактной характеристики δ -слоев p -типа в арсениде галлия.

2. Исследуемые образцы и методика измерений

Образцы с δ -слоями углерода выращивались методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (MOCVD) на подложках i -GaAs(001) при температуре 650°C. На буферный слой GaAs толщиной 0.38 мкм из источника CCl_4 наносился δ -слой C различной толщины (определяемой в первую очередь временем подачи CCl_4), после чего структура зарастивалась нелегированным GaAs (20 нм). В случае δ -слоев марганца применялась комбинация MOCVD и лазерного нанесения. Буферный слой нелегированного GaAs толщиной 0.4 мкм выращивался на такой же i -GaAs подложке методом MOCVD при температуре 650°C. Дальнейший рост выполнялся при пониженной температуре (400°C) методом лазерного распыления металлического Mn [18]. Зарастивание арсенидом галлия (25 нм) также проводилось методом лазерного распыления с использованием в качестве мишени пластины нелегированного GaAs. Пониженная температура нанесения Mn и выращивания покровного слоя уменьшала диффузионное распыление

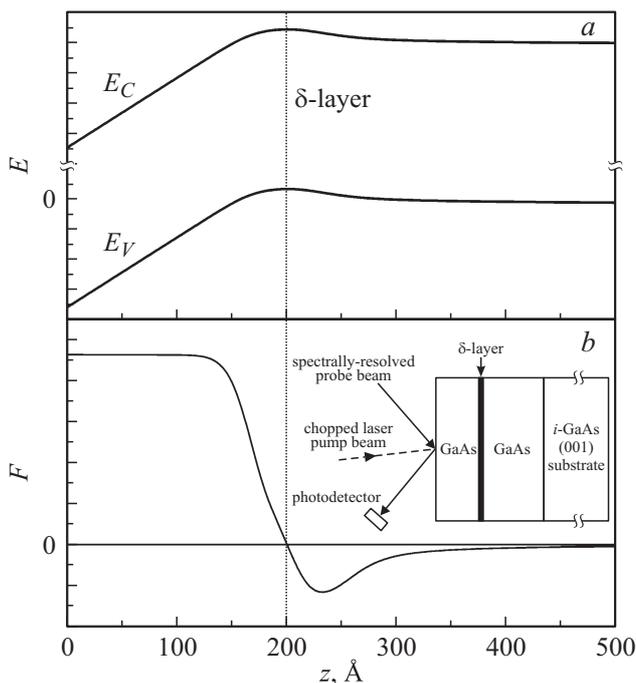


Рис. 1. Зонная диаграмма $E(z)$ (a) и распределение встроенного электрического поля $F(z)$ (b) полупроводниковой структуры с δ -слоем p -типа. На вставке приведены схема образца и геометрия эксперимента по измерению фотоотражения.

марганца [19]. Концентрация введенной примеси Mn варьировалась от образца к образцу (см. табл. 1, где эта концентрация указана в долях монослоя). Согласно работе [20], один монослой Mn соответствует плотности примеси $6.3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 1, a приведена энергетическая диаграмма структуры с δ -слоем p -типа. При построении учитывалось размытие δ -слоя, приближенно описываемое функцией Гаусса. Сложный изгиб дна зоны проводимости E_C и потолка валентной зоны E_V обусловлен наличием встроенных электрических полей F . Ниже, на рис. 1, b, представлено распределение этих полей в глубь образца. В приповерхностной области присутствует электрическое поле F_1 , являющееся следствием наличия поверхностных заряженных состояний. Они вызывают закрепление (пиннинг) уровня Ферми на поверхности, которое зависит от типа проводимости, концентрации носителей заряда (в случае высокого уровня легирования) и состояния поверхности GaAs. Для естественно окисленного p -GaAs (при $p < 10^{18} \text{ см}^{-3}$) уровень Ферми закреплен на 0.5 эВ выше потолка валентной зоны [21].

В области δ -слоя присутствует встроенное электрическое поле F_2 , сформированное ионизованной примесью p -типа. Оно сильно неоднородно и меняет знак (направление) при удалении от поверхности в глубь образца. Величина этого поля может стать надежным критерием, характеризующим δ -слой.

При измерении спектров ФО происходит слабая модуляция приповерхностного и встроенного электрических

полей при помощи накачивающего лазерного луча малой мощности. Этот луч поглощается в GaAs, генерируя электронно-дырочные пары. Разделяясь в поле, электроны частично компенсируют поверхностный заряд, а дырки изменяют заряд в области δ -слоя. При этом внутренние поля тоже слабо изменяются, а следовательно, изменяются оптические свойства образца и, в частности, его коэффициент отражения R . При помощи синхронного детектора (Lock-in усилителя) регистрируется изменение отражения зондового луча ΔR от структуры на частоте модуляции. Спектр ФО представляет собой отношение ΔR к отражению R образца без лазерной модуляции в зависимости от энергии E падающего зондирующего излучения. Геометрия эксперимента показана на вставке к рис. 1, b. Отметим, что изменение отражения регистрировалось от той же области, которая модулировалась прерываемым лазерным лучом. Спектры измерялись при комнатной температуре на установке, описанной в [22].

3. Экспериментальные результаты

3.1. Результаты измерений ФО без предустановки фазы

На рис. 2 представлены типичные измеренные спектры ФО. В нижней части рисунка приведен спектр ФО δ -слоя углерода образца 7669 (табл. 2). Для наглядности спектр ФО δ -слоя Mn (образец 5451) сдвинут по оси ординат вверх и домножен на 0.5.

В области энергий более E_g GaAs (1.424 эВ при $T = 298 \text{ K}$) спектр ФО представляет собой затухающие осцилляции Франца–Келдыша (ОФК). Их период связан с величиной встроенного электрического поля в структуре и увеличивается с ростом его напряженности [23]. Величина поля F определялась по методике, описанной в работе [24] для GaAs. Более сложные методики,

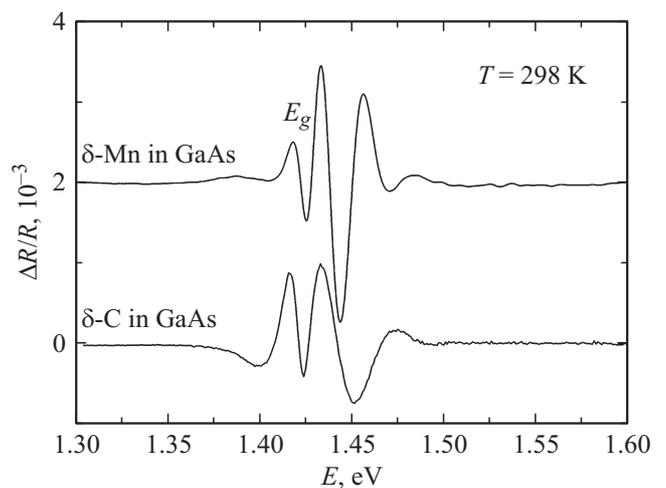


Рис. 2. Типичные спектры фотоотражения структур GaAs с δ -слоем C 7669 (внизу) и с δ -слоем Mn 5451 (вверху).

Таблица 1. Параметры и результаты измерения образцов с δ -слоями марганца при 298 К

№ образца	Содержание Mn, доли монослоя	Слоевая концентрация дырок p_s (Холл), 10^{13} см^{-2}	Напряженность поля F (ФО), кВ/см
6782	0	—	14
5450	0.09	1.51	16.5
5451	0.18	4.56	20.8
5452	0.26	4.33	23.4
5453	0.35	8.67	25

Таблица 2. Результаты измерения образцов с δ -слоями углерода при 298 К

№ образца	Подвижность дырок (Холл), $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	Слоевая концентрация дырок p_s (Холл), 10^{12} см^{-2}	Напряженность поля F (ФО), кВ/см
7669	323	0.98	36
7671	298	1.92	50
7670	295	2.59	61
7672	253	5.92	79
7673	232	13.7	96

учитывающие, например, экситонные явления, в данном случае не использовались, поскольку в рассмотрение был взят только период наблюдаемых ОФК. В работе [25] было показано, что учет экситонных эффектов лишь увеличивает амплитуду ОФК, не изменяя при этом их период.

Результаты бесконтактного определения величины встроенных электрических полей приведены в табл. 1 и 2. Точность определения F составила ± 0.5 кВ/см. Величина поля хорошо коррелирует с технологическими данными по количеству введенной примеси Mn (измеряемой в долях монослоя) [13]. Кроме этого, наблюдается практически полное соответствие с данными, полученными независимым контактным методом Холла. Для δ -слоев углерода также наблюдается хорошая корреляция F с подвижностью и слоевой концентрацией свободных носителей заряда (дырок) при той же температуре измерений.

Охлаждение образцов δ -Mn до температуры, близкой к температуре кипения жидкого азота (85 К), приводило к вымораживанию свободных носителей заряда, что связано с глубоким акцепторным уровнем Mn [26,27]. Измеряемая методом ФО напряженность встроенного электрического поля при этом слабо менялась от образца к образцу и составляла 13 ± 1 кВ/см.

Нужно отметить, что определенные выше значения поля F являются полями, усредненными по области формирования сигнала ФО. Это может быть как среднее значение изменяющегося по глубине структуры (неод-

нородного) поля, так и результат суперпозиции полей, имеющих различную природу. В силу особенности низкотемпературного GaAs, полученного методом лазерного распыления (возможного отсутствия пиннинга уровня Ферми на поверхности), в случае δ -легированных Mn образцов измеряемое поле F определялось в первую очередь концентрацией примеси марганца, введенной в структуру, а также полем гомоперехода высокотемпературный/низкотемпературный GaAs (см. поле для образца 6782 в табл. 1, куда Mn не вводился).

В случае образцов с δ -слоями углерода измерялась суперпозиция приповерхностного поля и поля δ -слоя. Выделить вклад исключительно δ -легирования можно, применив методику фазочувствительного фотоотражения.

3.2. Результаты фазочувствительного фотоотражения

Повышение частоты модуляции при измерении ФО может приводить к запаздыванию одной или нескольких составляющих модуляционного сигнала, относительно других. Суть примененного здесь фазочувствительного анализа заключается в следующем. При любой установленной на двухканальном Lock-in усилителе фазе записываются спектры ФО на канале X (спектр $\Delta R(E)/R(E)$ при фазе φ_1) и канале Y (который отстает от X на 90°), т.е. спектр $\Delta R(E)/R(E)$ при φ_2 , где $\varphi_2 = \varphi_1 - 90$. Фаза может быть установлена по сигналу фотолюминесценции, но лучше экспериментально подобрать такую фазу, чтобы интенсивность сигналов ФО по обоим каналам была примерно одинаковой. Потом для всех энергий E строится зависимость $Y(X)$, она называется фазовой диаграммой. В случае образца 7670 на ней получаются области точек, хорошо укладывающиеся на две прямые (с углом (фазой) 94 и 107°). По формуле из диссертации [28]:

$$\frac{\Delta R}{R}(\varphi) = \frac{\Delta R}{R}(\varphi_1) \frac{\sin(\varphi_2 - \varphi)}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} - \frac{\Delta R}{R}(\varphi_2) \frac{\sin(\varphi_1 - \varphi)}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (1)$$

вычисляются спектры при этих фазах. Эти спектры приведены на рис. 3.

Применение фазочувствительных измерений ФО позволило разделить сигналы не только для образца 7670, но также для 7669 и 7671. Так, для структуры 7669 (спектр которой приведен на рис. 2 внизу) фазочувствительный анализ дал „слабополевую“ компоненту (без ОФК) и отстающую от нее (на 14°) по фазе компоненту с ОФК. Поскольку это был самый слабо легированный образец, было сделано предположение, что отстающая компонента (соответствующая более сильному полю) принадлежит приповерхностному изгибу зон. Аналогичная ситуация наблюдалась в [17] для одиночной квантовой ямы. Отстающая компонента содержала ОФК, в то время как „быстрая“ компонента демонстрировала переходы с участием уровней размерного квантования.

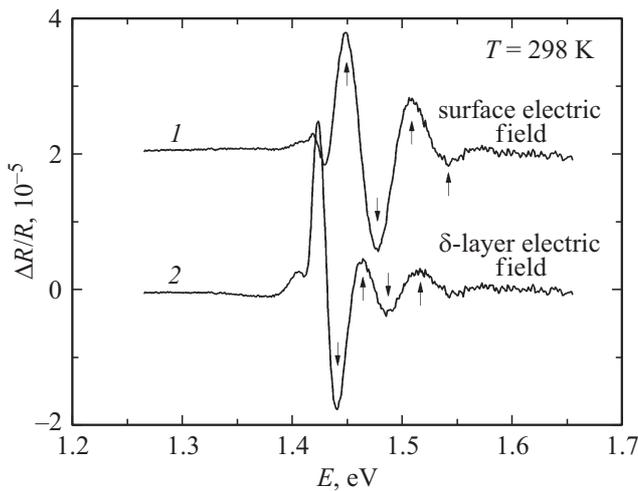


Рис. 3. Результат фазочувствительного анализа спектров фотоотражения образца 7670. Кривая 1 построена при $\varphi = 94^\circ$, а кривая 2 — при $\varphi = 107^\circ$.

Как видно на рис. 3, для образца 7670 обе компоненты сигнала ФО имели характерные ОФК (их экстремумы показаны стрелками). По их периоду были определены как электрическое поле, вызванное закреплением (пиннингом) уровня Ферми на поверхности GaAs ($F_1 = 53$ кВ/см) (кривая 1 на рис. 3), так и искомое встроенное электрическое поле, обусловленное только наличием δ -слоя углерода ($F_2 = 46$ кВ/см) (кривая 2 на рис. 3). Близкие значения были получены для образца 7671 с меньшей, чем у образца 7670, слоевой концентрацией дырок ($F_1 = 52$ кВ/см и $F_2 = 43$ кВ/см). Для более сильно легированных структур (7672 и 7673) разложить спектры ФО на компоненты не удалось даже при максимальной из использованных в работе частоте модуляции (1333 Гц).

4. Обсуждение полученных результатов

Проведенные исследования показали, что величины встроенных электрических полей значительно выше в структурах с δ -слоем углерода, чем в структурах с δ -слоем марганца (табл. 1 и 2). В структурах 7670 и 7671 фазочувствительные измерения ФО выявили наличие значительного по величине поля, вызванного закреплением уровня Ферми на поверхности GaAs, которое, вероятно, отсутствует в структурах с δ -слоем марганца. Однако это не единственная причина различия в величине встроенного электрического поля для структур с δ -слоем Mn и C. Фазочувствительные измерения для структур с δ -C (в частности для 7670) дают большую величину поля от области δ -слоя ($F_2 = 46$ кВ/см), чем для структур с δ -Mn (25 кВ/см для структуры 5453). При этом концентрация носителей заряда, определенная по исследованиям эффекта Холла, значительно выше в

структурах с δ -слоем Mn. В частности, слоевая концентрация дырок при комнатной температуре в образце 5453 составляет $8.67 \cdot 10^{13}$ см $^{-2}$, а в образце 7670 составляет $2.59 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$. В предположении, что носители заряда (дырки) находятся в валентной зоне, большее значение концентрации дырок должно приводить к большему значению встроенного электрического поля в структурах с δ -слоем Mn, что на первый взгляд противоречит результатам исследований фотоотражения. Однако меньшее значение встроенного электрического поля в структурах с δ -Mn связано с особенностью сильного легирования GaAs глубокой акцепторной примесью (марганцем). Сильное легирование марганцем приводит к образованию не единичного уровня в запрещенной зоне, располагающегося на 110 мэВ выше E_V [26,27], а к формированию примесной зоны конечной ширины, отделенной от валентной зоны энергетическим зазором 60–70 мэВ [29] (также существует предположение о слиянии примесной и валентной зон). Поэтому перенос тока осуществляется не только носителями заряда в валентной зоне, но и носителями, локализованными в пределах примесной зоны. В этом случае экспериментально определяемые значения слоевого сопротивления R_S и коэффициента Холла R_0 могут быть выражены следующим образом [30]:

$$R_S = 1/(ep_V\mu_V + ep_i\mu_i), \quad (2)$$

$$R_0 = \frac{1}{e} \frac{p_V\mu_V^2 + p_i\mu_i^2}{(p_V\mu_V + p_i\mu_i)^2}, \quad (3)$$

где p_V, μ_V — слоевая концентрация и подвижность дырок в валентной зоне, p_i, μ_i — слоевая концентрация и подвижность дырок в примесной зоне. Как видно из выражения (2) для R_0 , на экспериментально определяемую из эффекта Холла величину слоевой концентрации носителей p_S значительное влияние может оказывать концентрация в примесной зоне p_i . При этом концентрация носителей в валентной зоне p_V (определяющая величину электрического поля в области δ -слоя) может быть значительно меньше экспериментальной p_S . В качестве иллюстрации рассмотрим следующий возможный случай соотношения концентраций p_S, p_V и p_i . В табл. 3 представлены экспериментальные значения при 300 и 80 К слоевого сопротивления R_S , коэффициента Холла R_0 , а также значения слоевой концентрации $p_S = 1/(e \cdot R_0)$ и подвижности $\mu = R_0/R_S$ для структуры 5451 с δ -слоем Mn.

Согласно выражению (2) для R_0 , экспериментально определенная величина $p_S = 4.56 \cdot 10^{13}$ см $^{-2}$ при 300 К может быть получена для значений концентрации в зоне проводимости p_V на 2 порядка меньшей, если значение концентрации в примесной зоне p_i составляет порядка $5 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$. Подобная величина p_i представляется разумной. В частности, в [29] для GaAs, объемно легированного марганцем, экспериментально определенная слоевая концентрация в области проводимости по примесной зоне (при 40 К) составляла $\sim 2 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$.

Таблица 3. Сравнение экспериментальных и расчетных транспортных характеристик для структуры 5451 с δ -слоем марганца

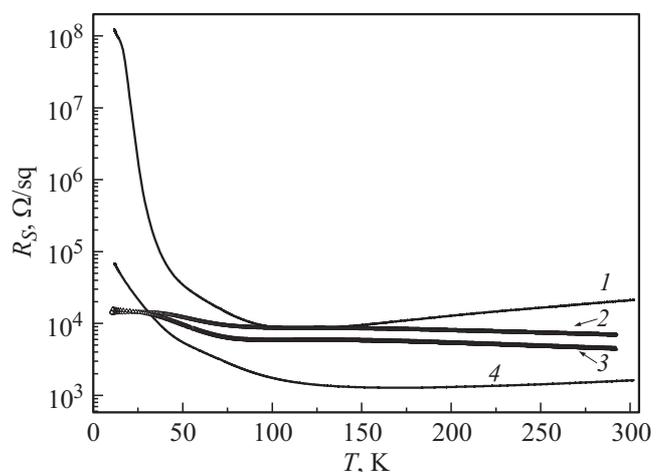
Структура δ -Mn 5451	Эксперимент при 300 К	Рассчитанные значения R_S, R_0, p_S, μ для $p_V = 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, $p_i = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, $\mu_V = 250 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $\mu_i = 0.2 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	Эксперимент при 80 К	Рассчитанные значения R_S, R_0, p_S, μ для $p_V = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, $p_i = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, $\mu_V = 3500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $\mu_i = 0.2 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
R_S (Ом/кв)	6062	5548.6	8318	10856
R_0 ($\text{м}^2/\text{Кл}$)	13.7	15.5	1163	1156
p_S (см^{-2})	$4.56 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{13}$	$5.4 \cdot 10^{11}$	$5.4 \cdot 10^{11}$
μ ($\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$)	22.6	28	1840.8	1065

При температуре 80 К экспериментально определенная величина p_S для структуры 5451 значительно уменьшается (до $5.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$), что в предположении о сохранении высокой концентрации в примесной зоне ($\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$) может соответствовать еще более низкой величине концентрации носителей в валентной зоне ($\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$). Проведенные рассуждения показывают, что относительно невысокие значения встроенного электрического поля для структур с δ -Mn, определенные при комнатной температуре методом ФО, могут быть связаны с невысокой концентрацией носителей заряда в валентной зоне структуры. Значительное уменьшение концентрации носителей в валентной зоне при температуре 85 К приводит к уменьшению величины поля от δ -слоя. Регистрируемое при 85 К электрическое поле (одинаковое для всех структур и равное $13 \pm 1 \text{ кВ/см}$), по-видимому, связано с полем гомоперехода высокотемпературный/низкотемпературный GaAs.

Предположение о преобладании проводимости по примесной зоне для структур с δ -слоем Mn подтверждается температурными зависимостями слоевого сопротивления. На рис. 4 представлены зависимости $R_S(T)$ для образцов δ -Mn 5451 (кривая 2) и 5453 (кривая 3). Для этих структур наблюдается относительно небольшое изменение сопротивления в диапазоне температур 10–300 К. Подобная слабая температурная зависимость сопротивления характерна для слоев (Ga,Mn)As, ферромагнитных при температурах ниже 150 К, и описывается как проводимость на „металлической“ стороне перехода „метал–изолятор“. При этом в настоящее время нет однозначного представления о расположении носителей заряда (и уровня Ферми) в зонной структуре (Ga,Mn)As, обеспечивающих подобный тип проводимости (и ферромагнетизм). Существуют экспериментальные и теоретические подтверждения локализации уровня Ферми как в пределах изолированной примесной зоны [31], так и в валентной зоне в результате перекрытия примесной и валентной зон [32]. Результаты совместных исследований транспортных свойств и фотоотражения показывают, что в структурах с δ -слоем Mn уровень Ферми локализован в пределах примесной зоны, отделенной от потолка валентной зоны. Следствием этого

является малая концентрация носителей заряда в валентной зоне даже при комнатной температуре. Это позволяет предположить, что ферромагнитные свойства структур при температурах ниже 30 К определяются преимущественно носителями заряда в пределах примесной зоны Mn.

Иной характер расположения носителей заряда наблюдается в исследованных структурах с δ -слоем углерода. На рис. 4 представлены температурные зависимости слоевого сопротивления для структуры 7669 с минимальной слоевой концентрацией дырок (кривая 1) и для структуры 7673 с максимальной концентрацией (кривая 4). В обоих случаях величина слоевого сопротивления имеет более сильную температурную зависимость, чем для структур с δ -слоем марганца. Сопротивление наиболее сильно зависит от температуры для структуры 7669. Это связано с вымерзанием акцепторной примеси углерода. Из температурной зависимости слоевой концентрации дырок была оценена энергия активации примеси, составившая $\sim 0.015 \text{ эВ}$. Вымерзание акцепторной примеси указывает на то, что транспортные свойства

**Рис. 4.** Температурная зависимость слоевого сопротивления для структур δ -C с минимальным (кривая 1 — 7669) и максимальным (кривая 4 — 7673) содержанием примеси, а также для δ -Mn (кривая 2 — 5451 и кривая 3 — 5453).

структур с δ -слоем углерода определяются носителями заряда, локализованными в валентной зоне. В этом случае определяемая из эффекта Холла концентрация носителей заряда p_S близка к концентрации дырок в валентной зоне p_V . Эти носители заряда определяют встроенное электрическое поле, измеряемое методом фотоотражения. Несмотря на то что в структурах с δ -слоем углерода экспериментально полученная величина p_S меньше, чем p_S для структур с δ -слоем марганца, величина p_V и, следовательно, величина встроенного электрического поля выше в структурах с δ -слоем углерода.

Обращает на себя внимание ослабление зависимости $R_S(T)$ для структуры 7673 с максимальной слоевой концентрацией дырок (рис. 4, кривая 4). Это может быть связано с формированием примесной зоны углерода в сильно легированной структуре 7673. Поскольку глубина уровня углерода в запрещенной зоне GaAs значительно меньше глубины уровня Mn, возможно перекрытие примесной зоны углерода с потолком валентной зоны. В этом случае носители заряда оказываются в валентной зоне и формируют встроенное электрическое поле. Однако это может приводить к неким особенностям, осложняющим реализацию фазочувствительных измерений фотоотражения.

5. Заключение

В работе методом фотоотражения измерена напряженность встроенных электрических полей в δ -легированных GaAs структурах p -типа. Полученная величина поля хорошо коррелирует с технологическими данными и данными, измеренными независимым методом Холла.

Было показано, что сигнал ФО, формируемый приповерхностной областью объемного заряда, отстает по фазе от сигнала δ -слоя углерода. Применяв фазочувствительный анализ, удалось разделить вклады этих двух составляющих в измеряемые сигналы ФО. Отмечено, что, в то время как от образца к образцу приповерхностное поле оставалось почти одинаковым, с ростом слоевой концентрации дырок наблюдается увеличение поля, обусловленного δ -слоем углерода.

Совместными исследованиями транспортных свойств и фотоотражения установлено, что в структурах GaAs с δ -слоем Mn носители заряда локализованы преимущественно в пределах примесной зоны марганца, отделенной от потолка валентной зоны GaAs. При этом носители заряда в валентной зоне, формирующие встроенное электрическое поле, имеют значительно меньшую концентрацию, чем концентрация, определяемая из исследований эффекта Холла.

Авторы выражают благодарность Б.Н. Звонкову за выращенные образцы. Работа выполнена в рамках реализации государственного задания (проекты № 8.1751.2017/ПЧ и 16.1750.2017/4.6 Министерства образования и науки России), а также при поддержке гранта президента РФ (МК 8221.2016.2).

Список литературы

- [1] E.F. Schubert, J.E. Cunningham, W.T. Tsang. Sol. St. Commun., **63** (7), 591 (1987).
- [2] О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, И.Л. Калентьева, А.В. Кудрин. Письма ЖТФ, **35** (14), 8 (2009).
- [3] А.В. Кудрин, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов. Письма ЖТФ, **36** (11), 46 (2010).
- [4] С.В. Зайцев, М.В. Дорохин, А.С. Бричкин, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, В.Д. Кулаковский. Письма ЖЭТФ, **90** (10), 730 (2009).
- [5] M.A.G. Balanta, M.J.S.P. Brasil, F. Iikawa, U.C. Mendes, J.A. Brum, Yu.A. Danilov, M.V. Dorokhin, O.V. Vikhrova, B.N. Zvonkov. Sci. Rep., **6**, 24537 (2016).
- [6] A.A. Bernussi, F. Iikawa, P. Motisuke, P. Basmaji, M. Siu Li, O. Hipolito. J. Appl. Phys., **67**, 4149 (1990).
- [7] D.G. Liu, K.H. Chang, N.H. Lu, T.M. Hsu, Y.C. Tien. J. Appl. Phys., **72** (4), 1468 (1992).
- [8] T.M. Hsu, Y.C. Tien, N.H. Lu. J. Appl. Phys., **72** (3), 1065 (1992).
- [9] V.L. Alperovich, A.S. Yaroshevich, H.E. Scheibler, A.S. Terekhov. Phys. Status Solidi B, **175**, K35 (1993).
- [10] D. Birkedal, O. Hansen, C.B. Sorensen, K. Jarasunas, S.D. Brorson, S.R. Keiding. Appl. Phys. Lett., **65** (1), 79 (1994).
- [11] D. Seliuta, B. Chechavius, J. Kavaliauskas, G. Krivaite, I. Griigelionis, S. Balakauskas, G. Valusis, B. Sherliker, M.P. Halsall, M. Lachab, S.P. Khanna, P. Harrison, E.H. Linfield. Acta Phys. Polon. A, **113** (3), 909 (2008).
- [12] Л.П. Авакянц, П.Ю. Боков, И.В. Бугаков, Т.П. Колмакова, А.В. Червяков. Неорг. матер., **47** (5), 517 (2011).
- [13] О.С. Комков, Р.В. Докичев, А.В. Кудрин, Ю.А. Данилов. Письма ЖТФ, **39** (22), 56 (2013).
- [14] V.L. Alperovich, A.S. Yaroshevich, H.E. Scheibler, A.S. Terekhov. Sol. St. Electron., **37** (4–6), 657 (1994).
- [15] А.В. Ганжа, В. Кирхер, Р.В. Кузьменко, Й. Шрайбер, Ш. Хильдебрандт. ФТП, **32** (3), 272 (1998).
- [16] Р.В. Кузьменко, Э.П. Домашевская. ФТП, **36** (3), 278 (2002).
- [17] I.D. Tyurin, O.S. Komkov. Proc. 2016 IEEE North West Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. (2016 EIConRusNW): (St.Petersburg, Russia, 2016) p. 97.
- [18] Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Е.С. Демидов, П.Б. Демина, М.В. Дорохин, Ю.Н. Дроздов, В.В. Подольский, М.В. Сапожников. Оптический журн., **75** (6), 56 (2008).
- [19] Yu.A. Danilov, M.N. Drozdov, Yu.N. Drozdov, A.V. Kudrin, O.V. Vikhrova, B.N. Zvonkov, I.L. Kalentieva, V.S. Dunaev. J. Spintronics and Magnetic Nanomaterials, **1** (1), 82 (2012).
- [20] A.M. Nazmul, S. Sugahara, M. Tanaka. J. Cryst. Growth, **251**, 303 (2003).
- [21] W.E. Spicer. J. Vac. Sci. Techn., **17**, 1019 (1980).
- [22] О.С. Комков, А.Н. Пихтин, Ю.В. Жилиев. Изв. вузов. Мат. эл. техн., **1**, 45 (2011).
- [23] А.Н. Пихтин, О.С. Комков, К.В. Базаров. ФТП, **40** (5), 608 (2006).
- [24] О.С. Комков, А.Н. Пихтин, Ю.В. Жилиев, Л.М. Федоров. Письма ЖТФ, **34** (1), 81 (2008).
- [25] O.S. Komkov, G.F. Glinskii, A.N. Pikhtin, Y.K. Ramgolam. Phys. Status Solidi A, **206** (5), 842 (2009).

- [26] J.S. Blakemore, W.J. Brown, M.L. Stass, D.A. Woodbury. J. Appl. Phys., **44**, 3352 (1973).
- [27] M. Ilegems, R. Dingle, L.W. Rupp. J. Appl. Phys., **46**, 3059 (1975).
- [28] Г.Э. Шайблер. Автореф. канд. дис. (Новосибирск, Ин-т физики полупроводников СО РАН, 2001).
- [29] D.A. Woodbury, J.S. Blakemore. Phys. Rev. B, **8**, 3803 (1973).
- [30] H. Fritzsche. Phys. Rev., **99**, 406 (1955).
- [31] M. Dobrowolska, K. Tivakornsasithorn, X. Liu, J.K. Furdyna, M. Berciu, K.M. Yu, W. Walukiewicz. Nature Materials, **11**, 444 (2012).
- [32] M. Wang, K.W. Edmonds, B.L. Gallagher, A.W. Rushforth, O. Makarovskiy, A. Patane, R.P. Campion, C.T. Foxon, V. Novak, T. Jungwirth. Phys. Rev. B, **87**, 121301 (2013).

Редактор Г.А. Оганесян

Contactless characterization of delta-layers of manganese and carbon in gallium arsenide

O.S. Komkov¹, A.V. Kudrin²

¹ St. Petersburg Electrotechnical University „LETI“,
197376 St. Petersburg, Russia

² Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The photoreflectance spectroscopy method was applied for diagnostics of single δ -layers of manganese and carbon in undoped GaAs. It was shown that the built-in electric field determined by this method increased with the layer concentration of introduced impurities and correlated well with the technological data and results obtained by the Hall method. Phase-sensitive photoreflectance enabled us to measure the surface electric field and the field due to the δ -doping, independently. This makes it possible to determine the share of the electrically active Mn impurity and identify the contribution of carbon δ -layers in heterosystems based on GaAs.