

Влияние конструкции и условий роста метаморфных гетероструктур In(Ga,Al)As/GaAs на электрофизические параметры двумерного канала In_{0.75}Ga_{0.25}As/InAlAs

© М.Ю. Чернов, В.А. Соловьев, И.Л. Дричко, И.Ю. Смирнов, С.В. Иванов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: chernov@beam.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 7 мая 2024 г.

В окончательной редакции 12 мая 2024 г.

Принята к публикации 13 мая 2024 г.

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs получены нелегированные метаморфные структуры с квантовой ямой In_{0.75}Ga_{0.25}As и различной конструкцией барьерных слоев (In,Al)As. Представлены результаты исследований электрофизических параметров таких структур четырехконтактным методом Ван дер Пау и бесконтактным методом, основанным на анализе распространения поверхностных акустических волн вдоль границы раздела пьезоэлектрика LiNbO₃ и образца. Увеличение толщины нижнего барьерного слоя (In,Al)As квантовой ямы, а также оптимизация температуры роста и соотношения потоков элементов V и III групп (As₄/III) позволили получить концентрацию и подвижность носителей в двумерном канале In_{0.75}Ga_{0.25}As толщиной 30 нм $\leq 3.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и $\geq 2 \cdot 10^5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ соответственно, при $T = 1.7 \text{ К}$.

Ключевые слова: молекулярно-пучковая эпитаксия, метаморфные гетероструктуры, метаморфный буферный слой, двумерный электронный канал, InGaAs/InAlAs.

DOI: 10.61011/FTP.2024.03.58405.6653

1. Введение

Гетероструктуры InGaAs/InAlAs широко используются в электронике СВЧ-диапазона [1,2]. В частности, НЕМТ-транзисторы на основе гетероструктур In_{0.7}Ga_{0.3}As/In_{0.52}Al_{0.48}As, создаваемые на подложках InP, обладают рекордным быстродействием и минимальными шумовыми характеристиками на сегодняшний день [3,4]. В последнее время особый интерес представляет получение структур с квантовыми ямами (КЯ) In_xGa_{1-x}As ($x > 0.7$) на подложках GaAs, отличающихся от InP более высокой технологичностью и меньшей стоимостью. При этом возникающая в структурах высокая плотность дислокаций, обусловленная сильным рассогласованием параметров кристаллической решетки подложки GaAs и двумерного канала In_xGa_{1-x}As ($x > 0.7$) ($\Delta a/a > 5\%$), оказывает негативное влияние на выходные характеристики приборов на их основе. Для решения данной проблемы применяется технология метаморфного роста, суть которой заключается в использовании метаморфного буферного слоя (МБС) твердого раствора переменного состава для создания низкодефектной, свободной от упругих напряжений виртуальной подложки (ВП) [5]. ВП необходима для формирования на ней псевдоморфных слоев, включая двумерный электронный канал. Электрофизические параметры 2D-канала, такие как концентрация и подвижность носителей, сильно зависят от его конструкции и технологических режимов роста. Так, например, было показано, что путем изменения условий молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) роста

возможно контролировать концентрацию носителей в нелегированных КЯ In_{0.75}Ga_{0.25}As/In_{0.75}Al_{0.25}As толщиной 30 нм от $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ до более чем $4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ [6]. При этом важной задачей является получение высокой подвижности носителей в канале при концентрации, соответствующей заполнению лишь первого уровня размерного квантования во избежание межподзонного рассеяния носителей.

Настоящая работа посвящена исследованию электрофизических характеристик метаморфных структур оригинального дизайна с двумерным электронным каналом In_{0.75}Ga_{0.25}As, получаемых методом МПЭ на подложках GaAs, в зависимости от конструкции барьерных слоев (In,Al)As и условий МПЭ роста (температуры роста и соотношения потоков As₄/III).

2. Эксперимент

Методом МПЭ на нелегированных подложках GaAs(001) с использованием установки RIBER 32P была получена серия метаморфных гетероструктур In(Ga,Al)As (образцы А–Е), схематическая конструкция которых приведена на рис. 1. Образцы А, В и С содержали последовательно от подложки буферный слой GaAs (200 нм), метаморфный буферный слой (МБС) In_xAl_{1-x}As, состав которого изменялся по корневому закону (1 мкм), виртуальную подложку-нижний барьерный слой, представляющий собой сверхрешетку (СР) 1 нм–InAs/4 нм–In_{0.7}Al_{0.3}As, КЯ In_{0.75}Ga_{0.25}As (30 нм), верхний барьерный слой — СР 1 нм–InAs/4 нм–In_{0.7}Al_{0.3}As (105 нм) и прикрыва-

Таблица 1. Отличительные особенности конструкции и условий МПЭ роста исследуемых метаморфных гетероструктур (образцов А–Е)

Образец	Нижний барьерный слой КЯ $In_{0.75}Ga_{0.25}As$ (виртуальная подложка)	Толщина нижнего барьерного слоя, нм	Условия МПЭ роста 2D-канала	
			T_s , °C	As_4/III
A	CP 1 нм–InAs/4 нм– $In_{0.7}Al_{0.3}As$	40	480	13
B	CP 1 нм–InAs/4 нм– $In_{0.7}Al_{0.3}As$	60	480	13
C	CP 1 нм–InAs/4 нм– $In_{0.7}Al_{0.3}As$	60	480	10
D	$In_{0.75}Al_{0.25}As$	120	450	10
E	$In_{0.75}Al_{0.25}As$	120	450	8

Cap	$In_{0.75}Ga_{0.25}As$	5 nm
Top barrier	$In_{0.75}Al_{0.25}As$ or SL InAs/ $In_{0.7}Al_{0.3}As$	105 nm
Channel	$In_{0.75}Ga_{0.25}As$	30 nm
Bottom barrier	$In_{0.75}Al_{0.25}As$ or SL InAs/ $In_{0.7}Al_{0.3}As$	40–120 nm
MBL	$In_xAl_{1-x}As$ ($x = 0.05 - x_{max}$)	1 μm
Buffer	GaAs	200 nm
	GaAs (001) substrate	

Рис. 1. Схематическая конструкция исследуемых метаморфных гетероструктур $In(Ga,Al)As/GaAs$ с двумерным каналом $In_{0.75}Ga_{0.25}As$.

ющий слой $In_{0.75}Ga_{0.25}As$ (5 нм). Конструкция образцов D и E отличалась от образцов A, B и C типом используемых барьерных слоев. Так, в образцах D и E функцию барьерных слоев выполнял тройной твердый раствор $In_{0.75}Al_{0.25}As$. МБС $In_xAl_{1-x}As$, состав которого изменялся по корневому закону $x = x_{min} + (x_{max} - x_{min})(l/l_t)^{1/2}$, где $x_{min} = 0.05$ и x_{max} — начальное и конечное содержание In в МБС соответ-

ственно, а l_t — его толщина, использовался во всех исследуемых в данной работе структурах, так как ранее была продемонстрирована его эффективность в снижении плотности прорастающих дислокаций по сравнению с МБС со ступенчатым или линейным профилем изменения состава [7]. Значение обратной ступени, представляющее собой разницу между конечным составом МБС и составом виртуальной подложки (ВП), выбиралось равным $\Delta x = 0.05$ для образцов A, B, C и 0.06 для образцов D и E. Ранее было показано, что обратная ступень $\Delta x = 0.05 - 0.06$ при использовании МБС с корневым профилем изменения состава позволяет реализовать упругонапряженную ВП и избежать релаксации упругих механических напряжений в слоях, выращиваемых поверх ВП [8]. Таким образом, конечное содержание In в МБС $InAlAs$ составляло $x_{max} = 0.75$ в образцах A–C и 0.81 в образцах D и E. Толщина ВП варьировалась в диапазоне 40–120 нм (см. табл. 1). Предполагалось, что использование CP InAs/4 нм– $In_{0.7}Al_{0.3}As$ в качестве ВП позволит снизить плотность прорастающих дислокаций в двумерном канале и тем самым улучшить его электрофизические характеристики.

Рост всех структур, исследуемых в данной работе, начинался с процедуры низкотемпературного ($T_s < 500^\circ C$) отжига подложек GaAs в потоке Ga. Было показано, что при таком отжиге эффективно проходит реакция превращения оксида Ga_2O_3 в Ga_2O , и поверхность становится значительно более планарной, чем при использовании стандартного высокотемпературного отжига, при котором атомы Ga, необходимые для этой реакции, берутся из подложки, создавая в ней ямки [9]. Условия МПЭ роста МБС $InAlAs$ были аналогичны приведенным в работе [10]. Температура роста двумерного канала $In_{0.75}Ga_{0.25}As$ и барьерных слоев $(In,Al)As$ варьировалась в диапазоне $T_s = 450 - 480^\circ C$ и контролировалась ИК пирометром (IRCON). Калибровка пирометра производилась перед началом роста МБС по изменению реконструкции поверхности GaAs ($(2 \times 4)As \rightarrow c(4 \times 4)As$) с использованием дифракции быстрых отраженных электронов. Данная реконструкция хорошо известна и происходит при $T_s = 500 - 520^\circ C$ в зависимости от давления падающего потока As_4 [11]. Соотношение потоков элементов V и III групп во время

роста КЯ $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ и барьерных слоев $(\text{In},\text{Al})\text{As}$ варьировалось в диапазоне $\text{As}_4/\text{III} = 8 - 13$. Скорость роста всех слоев в структурах составляла 0.7 МС/с . МС означает монослой. Отличительные особенности конструкции и условий МПЭ роста образцов А–Е приведены в табл. 1.

Для определения электрофизических параметров 2D-канала $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$, таких как концентрация и подвижность электронов, использовались два метода: 1) четырехконтактный метод Ван дер Пау для измерений при $T = 80$ и 300 К (для всех образцов) и 2) бесконтактный метод, основанный на анализе распространения поверхностных акустических волн (ПАВ) вдоль границы раздела пьезоэлектрика LiNbO_3 и образца [12], для измерений при $T = 1.7 \text{ К}$ (для образцов А, С и Е).

Схема акустической экспериментальной установки представлена на рис. 2. Образец прижимается пружиной к поверхности пластины из ниобата лития (LiNbO_3), по обеим сторонам которой сформированы встречно-штырьевые преобразователи для генерации и детектирования ПАВ. Затем путем подачи переменного напряжения U_{in} на встречно-штырьевой преобразователь IDT1 за счет пьезоэлектрического эффекта на поверхности LiNbO_3 возбуждается ПАВ. Волна сопровождается переменным электрическим полем, которое проникает в двумерный канал и вызывает токи носителей заряда, из-за которых в свою очередь возникают джоулевы потери.

Взаимодействие электрического поля ПАВ с электронами в 2D-канале приводит к изменению амплитуды и сдвигу фазы ПАВ, которые регистрируются вторым встречно-штырьевым преобразователем IDT2. При этом деформация от ПАВ в образец не передается. Акустическая установка помещалась в гелиевый криостат со сверхпроводящим магнитом. Измерения поглощения (Γ) и изменения скорости ПАВ ($\Delta v/v$) проводились на

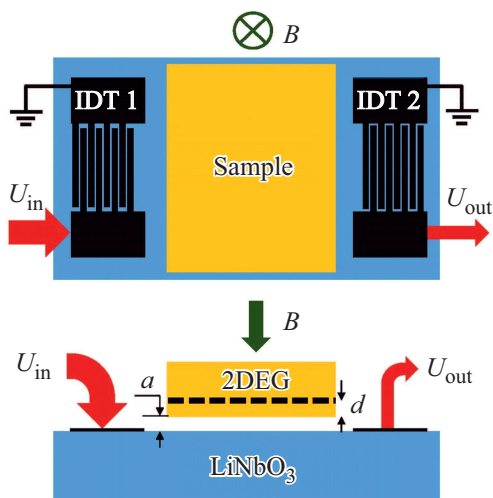


Рис. 2. Схема акустической экспериментальной установки: вид сверху (верхняя панель) и сбоку (нижняя панель).

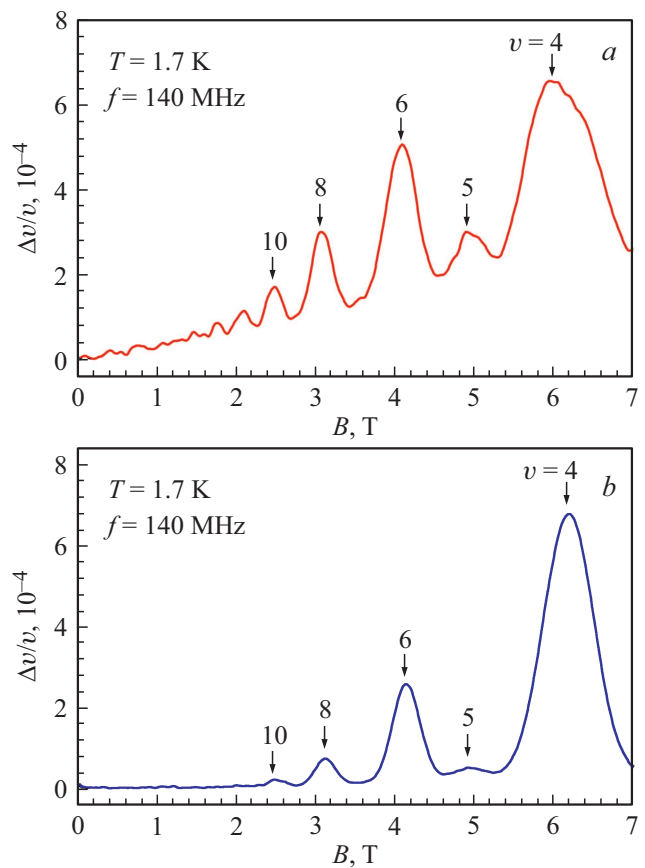


Рис. 3. Зависимости поглощения Γ (a) и изменения скорости $\Delta v/v$ (b) ПАВ от магнитного поля, полученные для образца А на частоте ПАВ $f = 140 \text{ МГц}$. $\nu = 2E_F/\hbar\omega_c$ — числа заполнения, где E_F — энергия Ферми, $\omega_c = eB/m^*c$ — циклотронная частота.

частоте ПАВ, равной 140 МГц , в поперечном магнитное поле $B \leq 8 \text{ Тл}$. Пример зависимостей $\Gamma(B)$ и $\Delta v/v(B)$, полученных для образца А при $T = 1.7 \text{ К}$, представлен на рис. 3. Стрелками на рис. 3 указаны числа заполнения. Аналогичные зависимости были получены для образцов С и Е.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 4 представлены зависимости действительной (σ_1) и мнимой (σ_2) частей высокочастотной проводимости ($\sigma^{AC} = \sigma_1 - i\sigma_2$) от магнитного поля для образцов А (a), С (b) и Е (c) при $T = 1.7 \text{ К}$, вычисленные по полученным экспериментальным зависимостям $\Gamma(B)$ и $\Delta v/v(B)$ в соответствии с работой [13]. Ранее было установлено, что случай $\sigma_1 < \sigma_2$ соответствует прыжковому типу проводимости, при котором носители локализованы на случайном потенциале примеси/дефектов, в то время как случай $\sigma_1 > \sigma_2$ свидетельствует о проводимости, обусловленной делокализованными носителями [14]. Следует отметить, что на всех зависимостях $\sigma_{1,2}(B)$, полученных для образцов А, С и Е при

Таблица 2. Концентрация и подвижность электронов в 2D-канале $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ метаморфных гетероструктур при $T = 1.7, 80$ и 300 К и параметры роста 2D-канала

Образец	$T, \text{ К}$						Условия МПЭ роста 2D-канал	
	$n, 10^{11} \text{ см}^{-2}$			$\mu, \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$			$T_s, ^\circ\text{C}$	As_4/III
	300	80	1.7	300	80	1.7		
A	8.1	6.7	5.9	11200	73300	210000	480	13
B	7.1	6.5	—	11000	61500	—	480	13
C	6.8	5.6	4.6	11000	64000	190000	480	10
D	9.6	4.4	—	9000	72700	—	450	10
E	9.2	3.5	3.4	9000	77500	200000	450	8

$T = 1.7$ К (рис. 4), действительная часть проводимости (σ_1) превалирует над мнимой (σ_2) при $B \leq 3$ Тл (область полей, в которой наблюдаются осцилляции Шубникова-де Гааза), что позволяет сделать вывод об отсутствии эффектов локализации носителей в двумерном канале и косвенно свидетельствует о высоком кристаллическом совершенстве исследуемых структур. При $B > 3$ Тл в исследуемых образцах реализуется режим квантового эффекта Холла. По положению минимумов осцилляций Шубникова-де Гааза в магнитном поле (рис. 4) была определена концентрация электронов (n) в 2D-канале образцов А, С и Е при $T = 1.7$ К (см. табл. 2). Для определения подвижности электронов вычислялась неосциллирующая часть действительной компоненты проводимости (рис. 5) в соответствии с выражениями (1), приведенными в [15]:

$$\sigma_1(B) = \sigma_1^1(B) + \sigma_1^{\text{osc}}(B),$$

$$\sigma_1^1(B) = \frac{en\mu c^2}{\mu^2 B^2} \quad (\omega_c \tau = \mu B/c \gg 1), \quad (1)$$

где σ_1^1 и σ_1^{osc} — осциллирующая и неосциллирующая части действительной компоненты высокочастотной проводимости соответственно, n — концентрация электронов в КЯ, μ — подвижность электронов при $B = 0$, e — заряд электрона, ω_c — циклотронная частота, τ — транспортное время релаксации.

Учитывая то, что $\omega_c \tau \gg 1$, подвижность носителей может быть определена по наклону зависимостей $\sigma_1^1(1/B^2)$ (см. вставки на рис. 5). Результаты измерений электрофизических параметров двумерного канала $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ методом Ван дер Пау при $T = 80$ и 300 К (для образцов А–Е), а также бесконтактным акустическим методом при $T = 1.7$ К (для образцов А, С и Е) представлены в табл. 2.

Сопоставляя конструкцию и условия МПЭ роста исследованных в работе структур (см. табл. 1, условия МПЭ роста продублированы для удобства в табл. 2) с их электрофизическими характеристиками (см. табл. 2), можно сделать ряд следующих выводов. Увеличение толщины нижней СР $1 \text{ нм} - \text{InAs}/4 \text{ нм} - \text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ (в случае образцов А и В) с 40 до 60 нм приводит к незначительному снижению концентрации носителей в двумерном

канале $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ с $8.1 \cdot 10^{11}$ до $7.1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и с $6.7 \cdot 10^{11}$ до $6.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ при $T = 300$ и 80 К соответственно, за счет уменьшения вероятности заброса носителей, локализованных вблизи интерфейса МБС/ВП, в КЯ $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$. При этом подвижность носителей при комнатной температуре остается неизменной и равной $\sim 11000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Меньшая подвижность электронов в 2D-канале в образце В по сравнению с образцом А при $T = 80$ К обусловлена развитием рельефа поверхности в процессе роста СР, вызванным неоптимальными условиями МПЭ ($T_s = 480^\circ\text{C}$, $\text{As}_4/\text{III} = 13$) и, как следствие, возросшим вкладом рассеяния на шероховатостях интерфейса $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}/(\text{In},\text{Al})\text{As}$. Ранее о снижении подвижности электронов в КЯ $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.64}\text{Al}_{0.36}\text{As}$ вследствие рассеяния на шероховатости интерфейсов сообщалось в работе [16]. Уменьшение отношения потоков As_4/III с 13 до 10 при неизменных температуре роста $T_s = 480^\circ\text{C}$ КЯ и конструкции структуры в целом (образец С) позволило получить концентрацию электронов в 2D-канале $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$, не превышающую $6.8 \cdot 10^{11}$, $5.6 \cdot 10^{11}$ и $4.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ при $T = 300$, 80 и 1.7 К соответственно, а также увеличить подвижность носителей при $T = 80$ К до $64000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

В нескольких работах [17,18] сообщается, что основным механизмом, снижающим подвижность электронов в нелегированных КЯ $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$, является рассеяние на флуктуациях состава твердых растворов. Предполагалось, что в структурах, исследуемых в данной работе, использование СР $\text{InAs}/\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ в качестве барьерных слоев для КЯ $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ позволит уменьшить вклад данного механизма рассеяния. Тем не менее в образце D, содержащем тройной твердый раствор $\text{In}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}$ в качестве барьерных слоев, были достигнуты значения подвижности электронов при $T = 80$ К не ниже, чем в образцах, содержащих СР $\text{InAs}/\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$. При этом увеличение толщины нижнего барьерного слоя вдвое (до 120 нм), а также снижение температуры роста барьерных слоев и КЯ до $T_s = 450^\circ\text{C}$ при соотношении потоков As_4/III , равном 10 , позволило получить концентрацию носителей в канале при $T = 80$ К, не превышающую $4.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Наименьшая концентрация носителей в двумерном канале ($3.5 \cdot 10^{11}$

и $3.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ при $T = 80$ и 1.7 K соответственно) была достигнута в образце Е, единственное отличие которого от образца D заключалось в использовании меньшего соотношения потоков $As_4/III = 8$ во время роста КЯ и барьерных слоев. Кроме того, данный образец

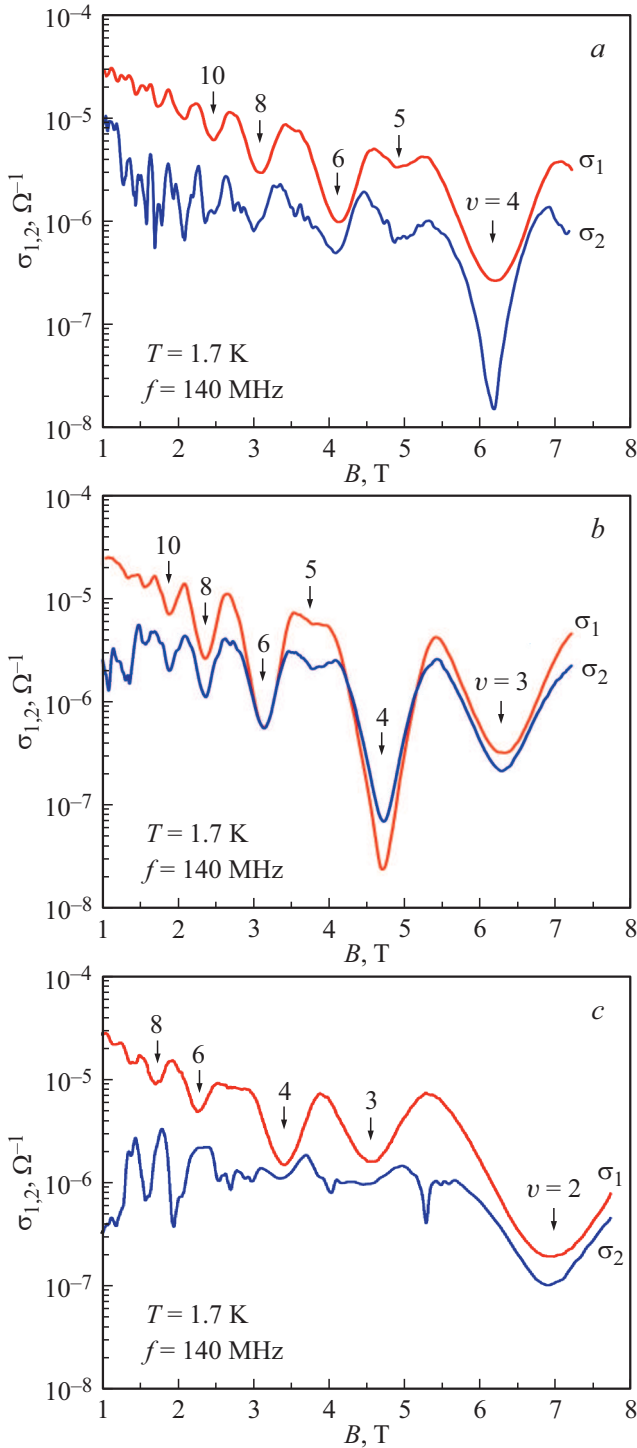


Рис. 4. Зависимости действительной (σ_1) и мнимой (σ_2) частей высокочастотной проводимости от магнитного поля для образцов А (а), С (b) и Е (c) при $T = 1.7 \text{ K}$ и частоте ПАВ $f = 140 \text{ МГц}$. Стрелками показаны числа заполнения (ν).

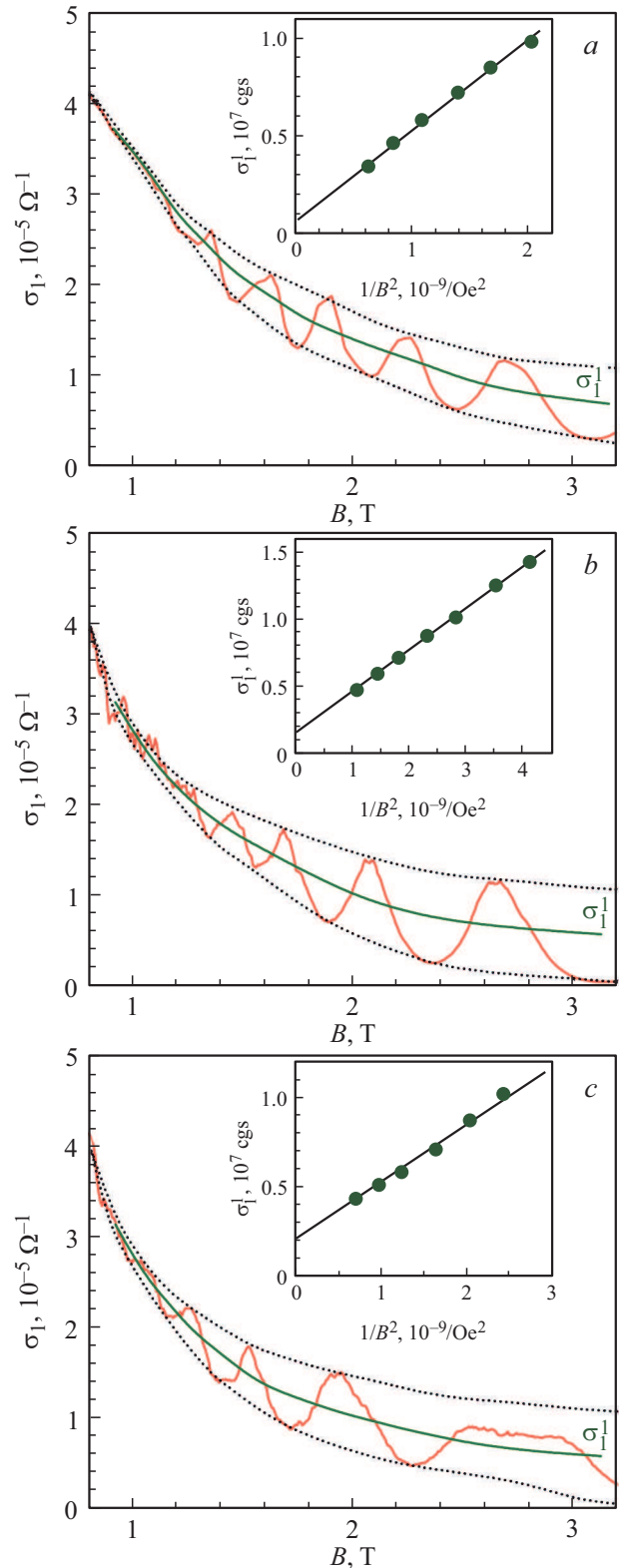


Рис. 5. Зависимости неосциллирующей части проводимости (σ_1^1) от магнитного поля для образцов А (а), С (b) и Е (c) при $T = 1.7 \text{ K}$ и частоте ПАВ $f = 140 \text{ МГц}$. На вставках — зависимости $\sigma_1^1(1/B^2)$, по наклону которых определялась подвижность носителей.

продемонстрировал наибольшую подвижность электронов при $T = 80$ К среди всех исследуемых структур, равную $77\,500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Повышенная концентрация электронов при комнатной температуре в двумерном канале образцов D и E по сравнению с образцами A, B и C объясняется отсутствием СР $\text{InAs}/\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$, в которой слои InAs локализуют часть электронов. Кроме того, в работе [19] было показано, что слои InAs могут выполнять функцию барьеров для распространения оптических фононов, тем самым снижая электрон-фононное рассеяние в КЯ, что объясняет меньшую подвижность носителей при комнатной температуре в образцах D и E ($9000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$) по сравнению с образцами A, B и C ($11\,000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$). Необходимо отметить, что все структуры, исследуемые в данной работе при $T = 1.7$ К (образцы A, C и E), характеризуются высокими значениями подвижности носителей в 2D-канале $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ ($190\,000\text{--}210\,000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$), что находится на уровне лучших мировых результатов. Меньшая подвижность носителей при $T = 1.7$ К в образце C ($190\,000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при $n = 4.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$) по сравнению с образцами A и E, вероятнее всего, объясняется вкладом межподзонного рассеяния носителей, который, как было показано в работе [17], максимален при концентрации носителей $n \sim (3.7\text{--}4.0) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и соответствует заполнению второго энергетического уровня в КЯ.

4. Заключение

Методом МПЭ на подложках $\text{GaAs}(001)$ были получены метаморфные гетероструктуры с КЯ $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ толщиной 30 нм и различной конструкцией барьерных слоев $(\text{In,Al})\text{As}$. Было установлено, что использование СР $\text{InAs}/\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ в качестве барьерных слоев позволяет снизить концентрацию электронов в двумерном канале $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ и увеличить их подвижность при комнатной температуре за счет захвата части носителей и оптических фононов слоями InAs . Кроме того, было показано, что увеличение толщины нижнего барьерного слоя с 40 до 120 нм в совокупности с использованием оптимальных режимов МПЭ роста ($T_s = 450^\circ\text{C}$; $\text{As}_4/\text{III} = 8$) КЯ $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}/\text{In}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}$ позволяет получить значения концентрации электронов в 2D-канале $\leq 3.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ при $T \leq 80$ К, что соответствует заполнению лишь первого уровня размерного квантования, а также подвижность электронов $\geq 77\,500$ и $200\,000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при $T = 80$ и 1.7 К соответственно, за счет подавления вкладов межподзонного рассеяния и рассеяния носителей на шероховатостях интерфейсов КЯ. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности подобных гетероструктур как для изучения фундаментальных спиновых явлений, так и для создания на их основе с использованием модулированного легирования КЯ структур НЕМТ-транзисторов.

Финансирование работы

М.Ю. Чернов благодарит Российский научный фонд (грант № 22-79-00265) за частичную поддержку данных исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.Y. Park, B.-G. Min, J.-M. Lee, W. Chang, D.M. Kang, E.-S. Jang, J. Kim, J.-G. Kim. *Electron. Lett.*, **59** (14), e12886 (2023).
- [2] J. Ajayan, T. Ravichandran, P. Mohankumar, P. Prajoun, J.C. Pravin, D. Nirmal. *IETE J. Res.*, **67** (3), 366 (2021).
- [3] J. A. del Alamo. *Nature*, **479**, 317 (2011).
- [4] F. Heinz, F. Thorne, A. Leuther, O. Ambacher. *IEEE Trans. Microwave Theory Techniques*, **69** (8), 3896 (2021).
- [5] S.V. Ivanov, M.Yu. Chernov, V.A. Solov'ev, P.N. Brunkov, D.D. Firsov, O.S. Komkov. *Progr. Cryst. Growth Charact. Mater.*, **65** (1), 20 (2019).
- [6] F. Capotondi, G. Biasiol, I. Vobornik, L. Sorba, F. Giazotto, A. Cavallini, B. Fraboni. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **22**, 702 (2004).
- [7] M.Yu. Chernov, O.S. Komkov, D.D. Firsov, B.Ya. Meltser, A.N. Semenov, Ya.V. Terent'ev, P.N. Brunkov, A.A. Sitnikova, P.S. Kop'ev, S.V. Ivanov, V.A. Solov'ev. *J. Cryst. Growth*, **477** (1), 97 (2017).
- [8] V.A. Solov'ev, M.Yu. Chernov, M.V. Baidakova, D.A. Kirilenko, M.A. Yagovkina, A.A. Sitnikova, T.A. Komissarova, P.S. Kop'ev, S.V. Ivanov. *Superlat. Microstruct.*, **113**, 777 (2018).
- [9] Y. Asaoka. *J. Cryst. Growth*, **251**, 40 (2003).
- [10] V.A. Solov'ev, M.Yu. Chernov, A.A. Sitnikova, P.N. Brunkov, B.Ya. Meltser, S.V. Ivanov. *Semiconductors*, **52**, 120 (2018).
- [11] Ю.Г. Галицин, Д.В. Дмитриев, В.Г. Мансуров, С.П. Мощенко, А.И. Торопов. *Письма ЖЭТФ*, **84** (9), 596 (2006).
- [12] I.L. Drichko, I.Yu. Smirnov. *Semiconductors*, **31**, 933 (1997).
- [13] V.D. Kagan. *Semiconductors*, **31**, 407 (1997).
- [14] I.L. Drichko, A.M. Diakonov, I.Y. Smirnov, Y.M. Galperin, A.I. Toropov. *Phys. Rev. B*, **62**, 7470 (2000).
- [15] T. Ando. *J. Phys. Soc. Jpn.*, **37**, 1233 (1974).
- [16] G.B. Galiev, I.S. Vasil'evskii, E.A. Klimov, S.S. Pushkarev, A.N. Klochkov, P.P. Maltsev, M.Yu. Presniakov, I.N. Trunkin, A.L. Vasiliev. *J. Cryst. Growth*, **392**, 11 (2014).
- [17] F. Capotondi, G. Biasiol, D. Ercolani, L. Sorba. *J. Cryst. Growth*, **278**, 538 (2005).
- [18] S. Gozu, K. Tsuboki, M. Hayashi, C. Hong, S. Yamada. *J. Cryst. Growth*, **201–202**, 749 (1999).
- [19] А. Шиленас, Ю. Пожела, К. Пожела, В. Юцене, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, С.С. Пушкарев, Е.А. Климов. *ФТП*, **47** (3), 348 (2013).

Редактор Г.А. Оганесян

Effect of design and growth conditions of metamorphic In(Ga,Al)As/GaAs heterostructures on electrical properties of In_{0.75}Ga_{0.25}As/InAlAs two-dimensional channel

M.Yu. Chernov, V.A. Solov'ev, I.L. Drichko, I.Yu. Smirnov, S.V. Ivanov

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Undoped metamorphic structures with In_{0.75}Ga_{0.25}As quantum well and various design of (In,Al)As barriers were grown on GaAs substrates by molecular beam epitaxy. Electrical properties of such structures were studied by using a 4-point Van der Pauw method and contactless technique based on the analysis of propagation of surface acoustic waves along the interface of the piezoelectric LiNbO₃ and the sample. Increasing the thickness of the bottom barrier layer of the In_{0.75}Ga_{0.25}As quantum well as well as optimizing the growth temperature and As₄/III ratio allowed achieving concentration and mobility of 2D carriers in 30 nm-thick In_{0.75}Ga_{0.25}As QW of below $3.4 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ and above $2 \cdot 10^5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, respectively, at $T = 1.7 \text{ K}$.