

Рассеяние и подвижность электронов в комбинированно-легированных HFET-структурах AlGaAs/InGaAs/AlGaAs с высокой концентрацией электронов

© Р.А. Хабибуллин[¶], И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев*, Е.А. Климов*, Д.С. Пономарев,
Р.А. Лунин[†], В.А. Кульбачинский[†]

Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
154409 Москва, Россия

* Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники
Российской академии наук,
117105 Москва, Россия

[†] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991 Москва, Россия

(Получена 11 апреля 2011 г. Принята к печати 11 апреля 2011 г.)

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии были выращены структуры, отличающиеся способом и степенью легирования с высокой концентрацией двумерных электронов n_s в квантовой яме. Исследовано применение комбинированного легирования, сочетающего в себе однородное и δ -легирование, на электронные транспортные свойства гетероструктур. Предложен новый тип структуры с двусторонним δ -легированием кремнием переходных слоев GaAs, расположенных на границах квантовой ямы. При таком легировании одновременно с высокой концентрацией электронов, $n_s = 1.37 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, получено наибольшее значение электронной подвижности $\mu_n = 1520 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при 300 К. Это связано с уменьшением рассеяния электронов на ионизированной примеси, что подтверждается проведенными расчетами.

1. Введение

Одной из важных задач твердотельной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники является создание мощных высокочастотных приборов на основе гетероструктурных полевых транзисторов [1,2]. Увеличение мощности требует одновременного увеличения максимального тока стока и сохранения высоких значений пробивного напряжения транзистора. Ток стока обеспечивается высокими значениями концентрации и дрейфовой скорости насыщения электронов. Значительное увеличение концентрации двумерного (2D) электронного газа может быть получено в PHEMT (Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor) гетероструктурах с квантовой ямой (КЯ) AlGaAs/InGaAs/AlGaAs с двусторонним δ -легированием кремнием через спейсерные слои. Типичный диапазон концентраций в таких структурах $n_s = (2-4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ [3,4]. Однако еще большее увеличение легирования приводит к параллельной проводимости по донорным слоям и, как следствие, к значительному снижению электронной подвижности [5].

Дизайн слоев гетероструктуры для мощных транзисторов затрагивает несколько аспектов. Во-первых, к затвору мощных транзисторов прикладывается достаточно большая амплитуда напряжения и для уменьшения тока утечки затвор–канал необходим высокий энергетический барьер в широкозонном подзатворном слое [6]. Во-вторых, в мощных транзисторах необходимо обеспечить большое пробивное напряжение между истоком и стоком, в особенности при закрывании канала. Для этой цели стараются избежать областей с пони-

женным потенциалом, за исключением области канала. Применение технологии δ -легирования автоматически связано с созданием V-образной потенциальной ямы, образованной ионизированными донорами кремния. При этом через донорные состояния в барьере возникает туннельный всплеск тока утечки затвора, в том числе и при положительном смещении, поданном на затвор [7,8]. К тому же в случае легированного барьера возрастает встроенное поле между поверхностью гетероструктуры и КЯ [9], что приводит к увеличению туннельной прозрачности барьерного слоя и, как следствие, к уменьшению пробивного напряжения.

Увеличение пробивного напряжения сток–исток в значительной степени зависит от компоновки топологии транзистора, расположения затвора относительно стока [10], продуманного рецесса верхних слоев гетероструктуры [11–13], использования нависающего затвора [14]. Некоторое увеличение пробивного напряжения наблюдалось в так называемых обращенных гетероструктурах, где донорный слой располагался снизу от канала [15,16]. Однако с точки зрения фундаментальных свойств, связанных с конструкцией гетероструктуры, важно минимизировать эффект ударной ионизации, для чего приходится увеличивать энергию запрещенной зоны в наиболее узкозонной области гетероструктуры — канале [17]. Так, в слое InGaAs содержание InAs обычно уменьшают до 10–15% по сравнению с PHEMT-гетероструктурами [18]. При этом для сохранения емкости КЯ необходимо увеличить высоту барьерного слоя. Также необходимо увеличивать чистоту и структурное совершенство барьера AlGaAs [19]. Однако использование легированных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ограничено условием

[¶] E-mail: khabibullin_r@mail.ru

$x < 0.25$. При содержании AlAs выше $x = 0.25$ часть донорной примеси Si образует DX-центры — ловушки для электронов, что негативно сказывается на работе прибора [20].

Одним из перспективных направлений создания мощных транзисторов СВЧ диапазона является использование структур типа DC-HFET (Doped Channel Heterostructure Field Effect Transistor) с объемно-легированной КЯ [21,22]. Однородно легированный канал транзистора DC-HFET позволяет создать высокую концентрацию электронов и, как следствие, большой ток стока и большую выходную мощность. Данный тип транзисторов имеет высокую линейность (вольт-амперная характеристика, сток-затворная характеристика), так как нет паразитных проводимостей в слое AlGaAs по сравнению с PHEMT-структурой на такой же КЯ [23,24]. DC-HFET структуры являются хорошим компромиссом между PHEMT и ПТШ технологией при создании транзисторов с большой канальной проводимостью (и естественно выходной мощностью) и высоким пробивным напряжением. Однако существует ряд недостатков, связанных с использованием DC-HFET. Во-первых, в данных структурах электронная подвижность значительно уменьшается по сравнению с PHEMT-структурами из-за сильного кулоновского взаимодействия, так как ионизированные доноры находятся в той же пространственной области, что и электроны 2D газа. Таким образом, в данном типе структур проявляется сильное рассеяние электронов, а значит, и сниженный КПД в связи с омическим разогревом канала. Другой негативный эффект — увеличение вероятности межподзонного рассеяния электронов между первой и второй подзонами размерного квантования для широких КЯ (свыше 15 нм).

В данной работе предложены и изучены несколько типов структур с комбинированно легированным каналом, сочетающих в себе принципы DC-HFET с однородно легированной КЯ и PHEMT с двусторонним δ -легированием в переходных слоях (ПС) GaAs на границах КЯ. Таким образом, подбирались оптимальная конструкция структуры, чтобы, с одной стороны, сохранить высокую концентрацию 2D газа, а с другой — максимально уменьшить нежелательное рассеяние на донорах.

2. Приготовление образцов и методики измерений

Исследуемые структуры были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии. В качестве подложек использовались пластины полуизолирующего GaAs с ориентацией (100). Выращенные образцы отличались степенью и способом легирования кремнием. Структура слоев исследуемых образцов схематично представлена на рис. 1.

Образцы 662 и 663 (см. таблицу) являются структурами с однородно легированной КЯ и изготовлены

<i>i</i> -GaAs
Barrier layer $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$
Sublayer 2 – GaAs
QW $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$
Sublayer 1 – GaAs
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$
Superlattice 2 – $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$
Buffer 2 – GaAs
Superlattice 1 – $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$
Buffer 1 – GaAs
Semiinsulating substrate GaAs (100)

Рис. 1. Схема слоев образцов (легирование не показано).

для сравнения как опорные. Концентрация кремния в однородно легированных слоях задавалась температурой кремниевого источника и составляла $T_{\text{Si}} = 1140^\circ\text{C}$ для образца 662 и $T_{\text{Si}} = 1160^\circ\text{C}$ для образца 663, что соответствует степени легирования $N_d = 5.8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $N_d = 9.8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Напротив, дизайн структуры 656 таков, что в центральной части КЯ доноры отсутствуют. В данном образце применялось двустороннее δ -легирование кремнием в ПС GaAs на границах КЯ — в верхнем ПС (2) находятся два δ -слоя Si ($N_d = 3.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ для каждого δ -слоя), разделенные слоем 1.5 нм GaAs, в нижнем ПС (1) находятся два δ -слоя Si ($N_d = 2.2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ для каждого δ -слоя), разделенные слоем 1.5 нм GaAs. Размещение доноров не в одном, а в двух δ -слоях в каждом ПС связано с уменьшением риска амфотерного поведения кремния при большой степени легирования [25,26]. В образце 659 применялось комбинированное легирование, т.е. одновременно применялось однородное легирование КЯ ($N_d = 3.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), два δ -слоя Si ($N_d = 1.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $3.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) в ПС (2), разделенные слоем 1.5 нм GaAs, и один δ -слой Si ($N_d = 1.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) в ПС (1).

Толщина КЯ InGaAs для всех образцов, кроме 656, составляла $L_{\text{QW}} = 15 \text{ нм}$. В образце 656 $L_{\text{QW}} = 18 \text{ нм}$. Температура роста слоев AlGaAs была 580°C , слоев GaAs — 570°C , слоев InGaAs — 470°C , а мольные доли компонент в тройных соединениях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ равнялись $x = 0.38$ и $y = 0.15$ для всех выращенных образцов.

Во всех образцах со стороны подложки введены две сверхрешетки (CP1 и CP2) AlGaAs/GaAs. CP1 введена с целью подавления возможной сегрегации ненамеренных

примесей с подложки в буферный слой GaAs (буфер 2), а также для уменьшения дефектов кристаллической структуры растущего слоя. CP2 вводится для создания широкозонного барьера снизу КЯ для предотвращения перетекания электронов из активной области в буфер GaAs при закрывании транзистора.

Подвижность и концентрация электронов 2D газа определялись из измерений эффекта Холла при температурах 300 и 77 К. Измерения проводились при помощи метода Ван-дер-Пау. При температуре 1.5 К в магнитном поле до 7 Тл исследовались эффект Холла и осцилляции Шубникова–де-Гааза (ШДГ).

3. Расчеты зонной структуры и подвижности электронов

С помощью самосогласованного решения системы уравнений Шредингера и Пуассона были рассчитаны и проанализированы пространственный профиль дна зоны проводимости и распределение электронной плотности в выращенных структурах аналогично работе [27]. В расчетах использовались следующие значения эффективных масс: в GaAs $m^* = 0.0667m_0$, в $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ $m^* = 0.060m_0$, в $Al_{0.38}Ga_{0.62}As$ $m^* = 0.1m_0$. Разрывы дна зоны проводимости относительно GaAs принимались равными $\Delta E_c = -0.1$ эВ для $In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs$ и $\Delta E_c = +0.34$ эВ для $Al_{0.38}Ga_{0.62}As/GaAs$. Значение потенциала на поверхности принималось равным $\phi_s = 0.7$ эВ. Все расчеты были проведены для температуры 300 К. На рис. 2 и 3 представлены зонные диаграммы образцов 662 и 656 соответственно. Нуль энергии соответствует уровню Ферми.

На рис. 2 приведены профили зоны проводимости и волновые функции (ВФ) электронов для образца 662 с однородно легированной КЯ. Профиль КЯ достаточно симметричен. ВФ электронов Ψ_0 первой подзоны размерного квантования также симметрична и расположена

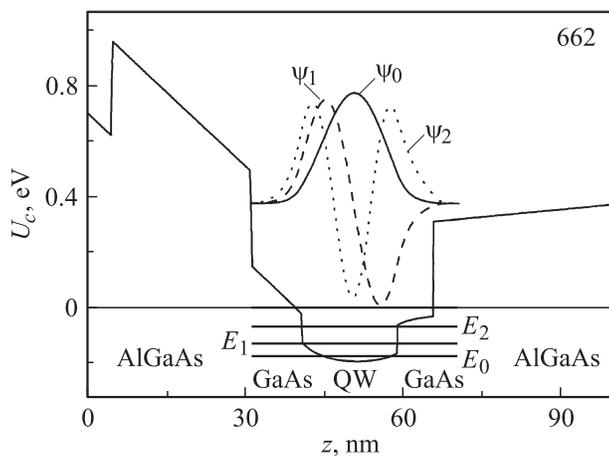


Рис. 2. Профиль зоны проводимости U_c , уровни подзон размерного квантования E_0 , E_1 и E_2 , волновые функции электронов ψ_0 , ψ_1 и ψ_2 для образца 662 с однородно легированной КЯ.

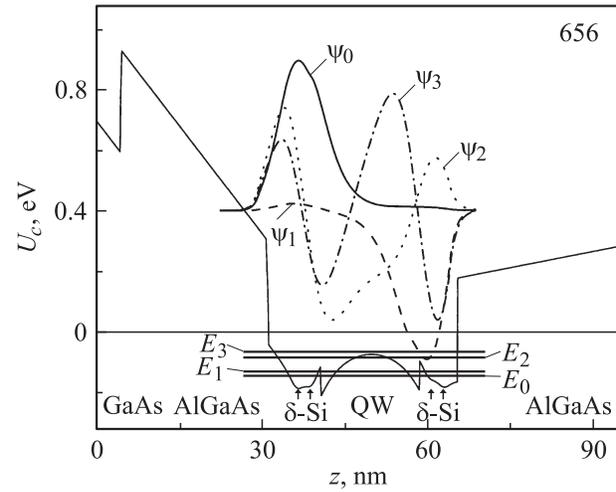


Рис. 3. Профиль зоны проводимости U_c , уровни подзон размерного квантования E_0 , E_1 , E_2 и E_3 , волновые функции электронов ψ_0 , ψ_1 , ψ_2 и ψ_3 для образца 656 с двусторонним δ -легированием кремнием в ПС GaAs.

в центральной части КЯ. Если заменить однородное легирование δ -легированием, размещение доноров ближе к границе КЯ приведет к увеличению пространственного разделения 2D газа и ионизованных доноров. Однако максимально неоднородное расположение примеси в достаточно широкой КЯ (20 нм) приводит к появлению дополнительного изгиба дна ямы и уменьшает выгоду от несимметричного распределения доноров. Такая КЯ более чувствительна к изменению профиля дна при ее обеднении. В этом мы видим причину двуполосной зависимости крутизны транзистора в [28] от тока стока. Поэтому в предлагаемых нами структурах использовано более симметричное легирование, с использованием двустороннего δ -легирования, причем расстояние между δ -слоями сравнимо с эффективной шириной составной КЯ. В этом случае перераспределение электронной плотности при закрывании транзистора не приводит к уменьшению рассеяния в электронной системе и деградация крутизны отсутствует.

Как показано в работах [29,30], в δ -легированных кремнием полупроводниках из-за процессов диффузии и сегрегации доноры расплываются существенно шире одного атомного слоя. Для того чтобы легирующая примесь не заходила в барьерный слой AlGaAs, δ -слои кремния в образце 656 располагались в ПС GaAs, как показано на рис. 3. Из [29] известно, что слои GaAs хорошо легируются и имеют большое пороговое значение концентрации электронов: $\sim 8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Кроме того, как видно из рис. 2, ПС GaAs образуют потенциальную ступеньку, которая ограничивает ВФ 2D электронов. Таким образом, ПС GaAs выполняют несколько функций. Во-первых, они предотвращают образование DX-центров из-за диффузии атомов примеси в широкозонный барьер AlGaAs. Во-вторых, они образуют промежуточный

барьер в КЯ, повышая энергию электронов в области δ -слоя.

Из рис. 3 видно, что дно КЯ InGaAs у образца 656 сильно изогнуто. Это связано с большой концентрацией 2D электронов в КЯ (заполнены 4 подзоны размерного квантования). При увеличении кривизны дна КЯ 2D электроны смещаются к гетерограницам InGaAs/GaAs, вблизи которых расположены ионизованные доноры. Идея образца 659 состоит в частичной компенсации изгиба дна в центре КЯ — нелегированном слое InGaAs. Для этого можно использовать комбинированное легирование кремнием, при котором δ -легирование в ПС сочетается со слабым однородным легированием КЯ. При этом возникают две противоположные тенденции. С одной стороны, 2D газ отдалется от ионизованных доноров, расположенных на границах КЯ, с другой — возрастает рассеяние электронов на ионизованных донорах в центральной части КЯ.

Для оценки особенностей рассеяния в предложенных структурах был проведен расчет транспортной подвижности электронов в подзонах μ_i при рассеянии на ионизованной примеси с учетом межподзонных переходов [31]. Транспортная подвижность рассчитана в рамках кинетического уравнения при рассмотрении рассеяния на примесях в борновском приближении. Обобщение теории рассеяния на случай более чем одной заполненной подзоны было проведено аналогично работе [32]. По расчетным значениям подвижности электронов, в каждой подзоне размерного квантования вычислена усредненная холловская подвижность μ_i 2D электронов в КЯ. Значения рассчитанных μ_i для выращенных гетероструктур представлены в таблице.

4. Результаты измерений и их обсуждение

Экспериментальные значения электрофизических параметров исследуемых образцов (холловская концентрация n_H и подвижность μ_H электронов) представлены в таблице. Стоит отметить, что в образцах 662, 656 и 659 концентрация 2D газа ($n_H \approx 10^{13} \text{ см}^{-2}$) не уступает значениям концентраций, полученных в гетеросистемах AlGaIn/GaN [33]. Для всех выращенных образцов подвижности μ_H , измеренные при температурах 300 и 77 К, имеют близкие значения. Таким образом, в исследуемых образцах доминирующим механизмом рассеяния является рассеяние на ионизованных донорах кремния для всего исследованного диапазона температур.

Образцы с однородным легированием КЯ (образцы 662, 663) показали невысокую подвижность электронов. Комбинированное легирование немного увеличивает подвижность (образец 659), а легирование только в ПС GaAs приводит к наибольшим значениям подвижности (образец 656). Наблюдаемые изменения μ_H

связаны со взаимным расположением примеси и электронных ВФ, а также с экранированием при больших концентрациях электронов. В образце с максимальной проводимостью (образец 656) 2D газ двух нижних подзон сконцентрирован в области треугольного потенциала на гетерогранице GaAs/InGaAs, а основная часть 2D газа двух верхних подзон сосредоточена в КЯ InGaAs. В случае комбинированного легирования (образец 659), за счет более плоского дна КЯ, 2D газ всех 4 подзон располагается в центральной части КЯ. Однако, из-за того что в данном образце однородно легирован слой InGaAs, электроны сильнее рассеиваются на ионизованных донорах по сравнению с образцом 656. Теоретический расчет μ_i при рассеянии на ионизованной примеси с учетом нескольких заполненных подзон хорошо согласуется с экспериментальными результатами. Расхождение расчетных значений μ_i с экспериментально измеренной μ_H связано с наличием дополнительных механизмов рассеяния: на гетерограницах, флуктуациях состава твердых растворов, фононах, которые не учитывались в расчете. Кроме того, расчет проводился с использованием приближенного профиля распределения примесей (что существенно для нижних подзон), при неточности вычисленных в самосогласованном расчете энергий подзон и ВФ электронов (что сказывается на верхних подзонах) и без учета непараболичности энергетического спектра электронов.

Поведение транспортной подвижности в зависимости от номера подзоны определяется двумя конкурирующими факторами. Если при фиксированной концентрации электронов в КЯ рассматривать подвижность электронов в различных подзонах, то с увеличением номера подзоны подвижность должна понижаться вследствие уменьшения фермиевского импульса. С другой стороны, рост номера подзоны увеличивает ширину области локализации электрона, т. е. среднее расстояние от электронов до примесей, что должно увеличивать подвижность. В образцах 662, 656 и 659 подвижность μ_i увеличивается с ростом номера подзоны, а в образце 663 наблюдается обратная тенденция. Это связано с тем, что образец 663 имеет примерно в 2 раза меньшую концентрацию электронов по сравнению с остальными образцами. Кроме того, в образце 663 дно КЯ более гладкое, что уменьшает влияние фактора увеличения ширины области локализации электронов при росте номера подзоны.

В образце 656 с наибольшей подвижностью электронов при температуре 1.5 К в магнитном поле до 7 Тл наблюдались осцилляции ШдГ с несколькими частотами. На рис. 4 приведена осциллирующая часть магнетосопротивления (монотонная часть вычиталась). На вставке показан фурье-спектр осцилляций, позволяющий определить концентрацию электронов n_{sdH} в подзонах размерного квантования. Помимо этого, по интенсивности пиков фурье-спектра можно судить о соотношении подвижностей в подзонах КЯ.

Значения холловской концентрации n_H и подвижности электронов μ_H , а также теоретически рассчитанные транспортная подвижность в подзонах μ_i и усредненная холловская подвижность μ_t

№ образца	Тип легирования ПС–КЯ–ПС	300 К		77 К	Расчет 300 К		
		$n_H, 10^{12} \text{ см}^{-2}$	$\mu_H, \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$\mu_H, \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	i	$\mu_i, \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$\mu_t, \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
663	n^+ (КЯ)	5.9	1300	1330	0	2990	2830
					1	2820	
					2	1470	
662	n^{++} (КЯ)	11.7	1150	1320	0	2450	2540
					1	2540	
					2	2735	
656	$2\delta-i-2\delta$	13.7	1520	1780	0	3405	4310
					1	3860	
					2	4340	
					3	5310	
659	$2\delta-n^+-\delta$	12.0	1200	1450	0	3790	4070
					1	3940	
					2	4030	
					3	4925	

Примечание. ПС — переходной слой, КЯ — квантовая яма.

На фурье-спектре образца 656 отчетливо видны 4 частоты, отвечающие 4 заполненным подзонам, что совпадает с теоретическим расчетом (рис. 3). Однако особенностью полученных данных является то, что максимальную интенсивность на фурье-спектре имеет пик от подзоны с низкой концентрацией электронов ($n_{\text{SDH}} = 10^{12} \text{ см}^{-2}$). При расчете подвижностей в подзонах наибольшей μ_i действительно обладает верхняя подзона КЯ (см. таблицу). Это связано с тем, что основная часть ВФ электронов Ψ_3 расположена в центральной области КЯ (рис. 3), т.е. электроны верхней подзоны максимально пространственно разделены от ионизованных доноров. Кроме того, возникает экранирование кулоновского потенциала ионизованных примесей за счет высокой электронной плотности нижних подзон. Таким образом, экспериментально и теоретически установлено, что в образце с симметричным δ -легированием в пе-

реходных слоях наибольшую электронную подвижность имеет верхняя подзона размерного квантования.

5. Заключение

В работе изучены особенности электронного транспорта в структурах с высокой плотностью 2D электронов в КЯ при различных способах легирования канала. Предложен и исследован новый тип структуры, одновременно сочетающий в себе высокую концентрацию и подвижность электронов с двусторонним σ -легированием в переходных слоях GaAs на границах КЯ. Получено увеличение подвижности электронов по сравнению с традиционными однородно легированными и комбинированно-легированными структурами за счет уменьшения пространственного перекрытия доноров в δ -слоях и электронной плотности в структуре с симметричным δ -легированием в переходных барьерах GaAs. Исследование низкотемпературного магнетотранспорта в образце с двусторонним δ -легированием показало аномальное увеличение подвижности электронов в верхней подзоне, что объясняется спецификой пространственного распределения доноров и волновых функций электронов. Наблюдаемые особенности подтверждаются расчетами подвижности при рассеянии на ионизованной примеси с учетом нескольких заполненных подзон.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта 2010-218-02-136.

Список литературы

[1] G.M. Dunn, A. Phillips, P.J. Topham. *Semicond. Sci. Technol.*, **16**, 562 (2001).
 [2] А.Ю. Егоров, А.Г. Гладышев, Е.В. Никитина, Д.В. Денисов, Н.К. Поляков, Е.В. Пирогов, А.А. Горбачевич. *ФТП*, **44** (7), 950 (2010).

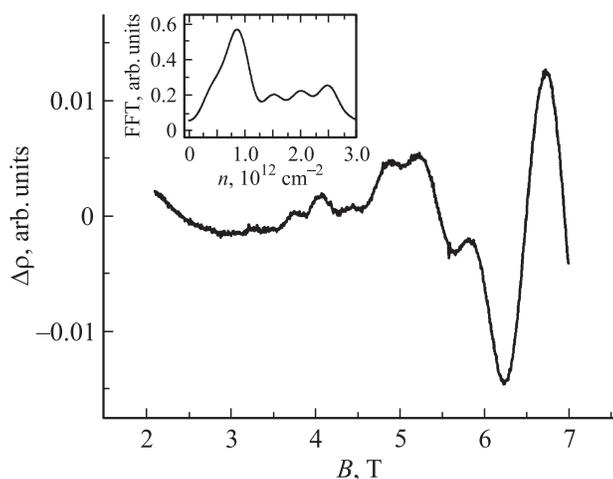


Рис. 4. Осцилляции Шубникова–де-Гааза для образца 656. На вставке приведен фурье-спектр осцилляций.

- [3] И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, В.Г. Мокеров, С.С. Широков, Р.М. Имамов, И.А. Субботин. ФТП, **42** (9), 1102 (2008).
- [4] Y. Gui, S. Guo, G. Zheng, J. Chu, X. Fang, K. Qiu, X. Wang. Appl. Phys. Lett., **76** (10), 1309 (2000).
- [5] H.M. Shieh, W.C. Hsu, C.L. Wu. Appl. Phys. Lett., **63** (4), 509 (1993).
- [6] S.R. Bahl, J.A. del Alamo. IEEE Trans. Electron. Dev., **41** (12), 2268 (1994).
- [7] S.D. Cho, H.T. Kim, D.M. Kim. IEEE Trans. Electron. Dev., **50** (4), 1148 (2003).
- [8] Y.-W. Chen, W.-C. Hsu, H.-M. Sheih, Y.-J. Chem, J.-S. Lin, Y.-J. Li, T.-B. Wang. IEEE Trans. Electron. Dev., **49** (2), 221 (2002).
- [9] Р.А. Хабибуллин, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Д.С. Пономарев, В.П. Гладков, В.А. Кульбачинский, А.Н. Клочков, Н.А. Юзева. ФТП, **45** (5), 666 (2011).
- [10] W. Marsetz, A. Huelsmann, T. Kleindienst, S. Fischer, M. Demmler, W. Bronner, T. Fink, K. Koehler, M. Schlechtweg. Proc. 27th Eur. Microwave Conf., (1997) с. 1030.
- [11] S.-S. Lu, C.-C. Meng, Y.-S. Lin, H. Lan. IEEE Trans. Electron. Dev., **46** (1), 48 (1999).
- [12] N.I. Cameron, S. Murad, H. McLelland, A. Asenov, M.R.S. Taylor, M.C. Holland, S.P. Beaumont. Electron. Lett., **32** (8), 770 (1996).
- [13] S.R. Bahl, J.A. del Alamo. IEEE Electron. Dev., **13**, 195 (1992).
- [14] W.-S. Lour, C.-Y. Lia. Semicond. Sci. Technol., **13**, 796 (1998).
- [15] S.S. Lu, C.L. Huang, T.P. Sun. Sol. St. Electron., **38** (5), 25 (1995).
- [16] W.-C. Liu, K.-H. Yu, K.-W. Lin, J.-H. Tsai, C.-Z. Wu, K.-P. Lin, C.-H. Yen. IEEE Trans. Electron. Dev., **48** (8), 1522 (2001).
- [17] T. Baksht, S. Solodky, M. Leibovitch, G. Bunin, Y. Shapira. IEEE Trans. Electron. Dev., **50** (2), 479 (2003).
- [18] S.R. Bahl, J.A. del Alamo. Proc. 2nd Int. Conf. on InP and Related Materials (1990) с. 100.
- [19] К.С. Журавлев, А.И. Торопов, Т.С. Шамирзаев, А.К. Бакаров, Ю.Н. Раков, Ю.Б. Мякишев. Письма ЖТФ, **25** (15), 8 (1999).
- [20] A. Leuther, A. Forster, H. Luth, H. Holzbercher, U. Breuer. Semicond. Sci. Technol., **11**, 766 (1996).
- [21] W.-C. Liu, K.-Y. Yu, R.-C. Liu, K.-W. Lin, K.-P. Lin, C.-H. Yen, C.-C. Cheng, K.-B. Thei. IEEE Trans. Electron. Dev., **48** (12), 2677 (2001).
- [22] Y.-J. Chan, M.-T. Kang, C. Li. IEEE Electron. Dev. Lett., **16** (1), 33 (1995).
- [23] D.R. Greenberg, J.A. del Alamo, J.P. Harbison, L.T. Florez. IEEE Electron. Dev. Lett., **12** (8), 436 (1991).
- [24] Y.-C. Lin, E.Y. Chang, H. Yamaguchi, W.-C. Wu, C.-Y. Chang. IEEE Trans. Electron. Dev., **54** (7), 1617 (2007).
- [25] M. Kondo, C. Akayama, N. Okada, H. Sekiguchi, K. Domen, T. Tanahashi. J. Appl. Phys., **76**, 914 (1994).
- [26] L. Pavesi, M. Henini, D. Johnston. Appl. Phys. Lett., **66**, 2846 (1996).
- [27] Г.Б. Галиев, И.С. Васильевский, Е.А. Климов, В.Г. Мокеров, А.А. Черечукин. ФТП, **40** (12), 1479 (2006).
- [28] M. Nawaz, J.M. Miranda, P. Sakalas, S.M. Wang, Q.X. Zhao, M. Willander, H. Zirath. Semicond. Sci. Technol., **15**, 728 (2000).
- [29] J.M. Fernandez, M.E. Lazzouni, L.J. Sham, H.H. Wieder. J. Appl. Phys., **74** (2), 1161 (1993).
- [30] E.F. Schuber, J.M. Kuo, R.F. Kopf, A.S. Jordan, H.S. Luftman, L.C. Hopkins. Phys. Rev. B, **42**, 1364 (1990).
- [31] В.А. Кульбачинский, В.Г. Кыгин, Р.А. Лунин, В.Г. Мокеров, Ф.П. Сенечкин, Ф.С. Бугаев, А.Л. Карузский, А.В. Пересторонин, R.T.F. van Schaijk, A. de Visser. ФТП, **33** (7), 839 (1999).
- [32] E.D. Sigga, P.C. Kwok. Phys. Rev. B, **2** (4), 1024 (1970).
- [33] В.Г. Мокеров, А.Л. Кузнецов, Ю.В. Федоров, Е.Н. Енюшкина, А.С. Бугаев, А.Ю. Павлов, Д.Л. Гнатюк, А.В. Зуев, З.З. Галиев, Е.Н. Овчаренко, Ю.Н. Свешников, А.Ф. Цакульников, В.М. Устинов. ФТП, **43** (4), 561 (2009).

Редактор Т.А. Полянская

Electron mobility and scattering in combination doped HFET structures AlGaAs/InGaAs/AlGaAs with high electron density

R.A. Khabibullin, I.S. Vasil'evskii, G.B. Galiev*, E.A. Klimov*, D.S. Ponomarev, R.A. Lunin†, V.A. Kulbachinskii†

National Research Nuclear University „MEPHI“, 115409 Moscow, Russia

* Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences, 117105 Moscow, Russia

† Lomonosov Moscow State University, 119991 Moscow, Russia

Abstract This study is concerned with the comprehensive investigation of the structures with the high density of two-dimensional electrons in the quantum well with both the various doping technique and the doping level. A new type of structure is proposed with double-side δ -doping in the GaAs sublayers introduced close to the borders of the quantum well. In such method of doping the highest value of the electromobility $\mu_n = 1520 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ is obtained at the room temperature simultaneously with high electron density $n_s = 1.37 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. It is attributed to the lowering of electron scattering by the ionized donors and confirmed by the calculations.