

На правах рукописи

ТЕРЕШКИН ЕВГЕНИЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ

УДК.621.382.323

**ОБРАЩЕННЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С
ДОНОРНО – АКЦЕПТОРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ
И ЦИФРОВЫМИ БАРЬЕРАМИ ДЛЯ
УВЕЛИЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ
ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

**Специальность 2.2.2 «Электронная компонентная база
микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств»**

А в т о р е ф е р а т

**диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

г. Фрязино 2024г.

Работа выполнена в АКЦИОНЕРНОМ ОБЩЕСТВЕ
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «ИСТОК»
ИМЕНИ А. И. ШОКИНА»

Научный руководитель:

Пашковский Андрей Борисович доктор физико-математических наук, заместитель начальника отделения АО «НПП «Исток» им. Шокина» по научной работе.

Официальные оппоненты:

Обухов Илья Андреевич доктор физико-математических наук, технический директор АО «НПП «Радиотехника», г. Москва.

Виниченко Александр Николаевич кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГАОУ ВО «НИЯУ «МИФИ», г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова РАН (ИСВЧПЭ), г. Москва.

Защита состоится 11 апреля 2024 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета 74.1.008.01 при АО «НПП «Исток» им. Шокина» по адресу: 141190, Московская область, г. Фрязино, Вокзальная, д. 2а, Большой конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «НПП «Исток» им. Шокина» и на сайте <http://science.istokmw.ru/Avtoreferati-dissertaciy/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, отправлять по адресу: 141190, Московская обл., г. Фрязино, Вокзальная ул., д. 2а, на имя ученого секретаря Куликовой Ирины Владимировны (dissovet@istokmw.ru).

Автореферат разослан 9 февраля 2024г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Куликова И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Постоянный рост потоков информации требует увеличения пропускной способности каналов связи и соответственно увеличения рабочих частот приема и передачи. Предполагается, что один из возможных стандартов 6 G будет работать в районе 300 ГГц. В свою очередь это требует достаточно мощных и долговечных, и, желательно, не дорогих усилителей мощности способных работать в этом частотном диапазоне. В настоящее время продвижение мощных полупроводниковых приборов в миллиметровый диапазон длин волн связано, в основном, с совершенствованием эпитаксиальных технологий нитрида галлия. Однако промышленное применение таких приборов на частотах заметно выше 100 ГГц как с теоретической, так и с практической точки зрения, пока выглядит достаточно проблематичным. Поэтому при изготовления полевых транзисторов и усилителей на их основе для работы на длинах волн менее 2 мм, в основном, используются метаморфные гетероструктуры и гетероструктуры на основе фосфид индиевых подложек с узкозонным каналом на основе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с молярным содержанием индия $x = 0,8$ и выше. По усилительным характеристикам транзисторы на таких структурах в настоящее время не имеют конкурентов. Однако узкая запрещённая зона канала приводит к низким пробивным напряжениям, а соответственно малым удельным выходным мощностям. В то же время есть ещё один перспективный путь продвижения вверх по частотному диапазону – использование гетероструктур с донорно-акцепторным легированием. Данный технический приём позволил существенно увеличить как удельную мощность полевых транзисторов, так и их коэффициент усиления. Особенно полезен он оказался в случае обращённых (на западе инвертированных) гетероструктур, которые из практически нерабочих превратились в крайне перспективные, особенно для приборов мм диапазона длин волн. Основная отличительная особенность этих структур, а именно легирование только на краю квантовой ямы со стороны подложки, позволяет максимально приблизить канал транзистора к затвору, тем самым существенно увеличивая крутизну исток-затвор, что особенно важно именно в миллиметровом диапазоне длин волн. Далее будет продемонстрировано, что такие структуры имеют ещё один существенный ресурс для улучшения характеристик в плане мощных приборов коротковолновой части мм диапазона длин волн – применение цифровых потенциальных барьеров (ЦПБ).

Использование ЦПБ предполагает введение по краям узкозонного канала решёток из тонких (несколько атомных слоёв) барьеров AlAs/GaAs. ЦПБ совместно с донорно-акцепторным легированием локализуют горячие электроны в канале гораздо эффективней, чем обычные гетеропереходы на основе тройных соединений с той же, или даже большей мольной долей алюминия. Вследствие этого всплеск дрейфовой скорости электронов в таких гетероструктурах приближается к величине всплеска в чистом объёмном узкозонном материале канала.

Цифровые барьеры позволяют сделать ещё один шаг к дальнейшему увеличению рабочих частот транзисторов – уменьшить расстояние затвор-канал за счет использования обращенных гетероструктур. Именно этот факт и определяет актуальность работы.

Цель работы: Создание конструкции обращённой гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием и цифровыми потенциальными барьерами для мощного полевого транзистора, способного при длине затвора **0.05 мкм** работать на частоте **300 ГГц**.

Постановка задачи - для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– проводилось изготовление и анализ малосигнальных характеристик GaAs полевых транзисторов на гетероструктурах с двухсторонним донорно-акцепторным легированием и дополнительными цифровыми потенциальными барьерами;

– проводился анализ особенностей динамики горячих электронов в GaAs гетероструктурах полевых транзисторов с двухсторонним донорно-акцепторным легированием и цифровыми потенциальными барьерами;

– на основе гидродинамического моделирования проводился анализ особенностей и сравнение динамики горячих электронов в классических GaN и GaAs гетероструктурах;

– проводился анализ особенностей динамики горячих электронов в GaAs обращенных гетероструктурах полевых транзисторов с донорно-акцепторным легированием и цифровыми потенциальными барьерами;

– разрабатывались конструкции обращенных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием и цифровыми потенциальными барьерами позволяющие получить максимальный всплеск дрейфовой скорости электронов, при влете электрона в область неоднородного поля.

Объектом исследования служат гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием и цифровыми потенциальными барьерами для полевых транзисторов.

Предметом исследования являются физические процессы в гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием и цифровыми потенциальными барьерами для полевых транзисторов.

Научная новизна. В диссертации впервые получены следующие результаты:

1. Теоретически показано, что в области сильного поля для гетероструктур AlGaIn/GaN поперечный пространственный перенос электронов уменьшает всплеск их дрейфовой скорости по сравнению с чистым объёмным материалом не более чем на 30%.

2. Экспериментально показано, что за счёт роста всплеска дрейфовой скорости электронов при применении цифровых барьеров в гетероструктурах с двухсторонним донорно-акцепторным легированием до двух раз увеличивается коэффициент усиления полевых транзисторов.

3. Показано, что введение цифровых барьеров в обращённые гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием позволяет создавать проводящий канал с расстоянием между первыми квантовыми уровнями энергии не менее трёх энергий оптического фона.

4. Теоретически показано, что использование цифровых барьеров в обращённых гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием за счёт локализации горячих электронов в канале и отсутствия переходов на состояния, локализованные в барьерных решётках до двух раз увеличивает всплеск дрейфовой скорости электронов области сильного поля.

5. Показано, что в обращённых гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием выполнение цифровой барьерной решётки в области легирования с шагом b и менее монослоёв GaAs за счёт локализации горячих электронов в канале обеспечивает увеличение всплеска их дрейфовой скорости в области сильного поля до величины всплеска дрейфовой скорости в чистом объёмном материале.

6. Теоретически показано, что в обращённых гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием выполнение цифровой барьерной решётки в области легирования с шагом b и менее монослоёв GaAs за счёт локализации горячих электронов в канале, позволяет вдвое поднять поверхностную плотность электронов при уменьшении всплеска их дрейфовой скорости в области сильного поля менее чем на 10 %.

7. Показано, что в гетероструктурах полевых транзисторах крутизна транзистора и его входная емкость обратно пропорциональны расстоянию от затвора до центра канала.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Для гетероструктур AlGaIn/GaN поперечный пространственный перенос электронов в области сильного поля уменьшает всплеск их дрейфовой скорости по сравнению с чистым объёмным материалом не более чем на 30%.

2. Применение цифровых барьеров в обращённых гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием позволяет создавать проводящий канал с расстоянием между первыми квантовыми уровнями энергии не менее трёх энергий оптического фотона.

3. Применение цифровых барьеров в обращённых гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием до двух раз увеличивает всплеск дрейфовой скорости электронов в области сильного поля за счет локализации горячих электронов в канале и низкой вероятности переходов на состояния, локализованные в барьерных решётках.

4. В обращённых гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием короткопериодная решётка AlAs/GaAs с толщиной не более 6 монослоёв GaAs в области легирования при поверхностной плотности электронов до $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ за счет локализации горячих электронов в канале обеспечивает увеличение всплеска их дрейфовой скорости в области сильного поля до его уровня в чистом объёмном материале.

5. В обращённых гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием короткопериодная решётка AlAs/GaAs с толщиной не более 6 монослоёв GaAs в области легирования позволяет при сохранении всплеска дрейфовой скорости электронов в области сильного поля на уровне 90 % от теоретического предела довести поверхностную плотность электронов до величины $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Практическая ценность работы.

1. Изготовлены транзисторы с длиной затвора 0,12 мкм имеющие пробивное напряжение около 30 В, при коэффициенте усиления до 20 дБ на частоте 40 ГГц.

Полученные результаты позволяют:

2. Разрабатывать новые эффективные гетероструктуры для мощных полевых транзисторов коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн.

3. Разрабатывать мощные полевые транзисторы с повышенным коэффициентом усиления в коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонах длин волн.

Апробация результатов работы.

Результаты работы опубликованы в материалах следующих международных и российских конференций: Международной Крымской конференции «СВЧ- техника и телекоммуникационные технологии», «КрыМикО», г. Севастополь, 7—11 сентября 2020г., 5—10 сентября 2021г.;

Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», г. Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 30 мая – 4 июня 2021 г., 30 мая – 3 июня 2022 г.;

13-я Международная научно – практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ – электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ» 28 октября 2020 г., 19-20 мая 2021 г., 25-26 мая 2022 г. Москва, НИЯУ «МИФИ»

Публикации. По материалам диссертации автором опубликовано 17 печатных работ, из них 5 работы в журналах индексируемых в международных базах данных, 4 работы в журналах из списка ВАК для защиты кандидатских диссертаций (1 без соавторов), получены 2 патента РФ.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Работа выполнена на 166 страницах текста, содержит 43 рисунка, 2 таблицы и список литературы из 132 наименований.

Содержание и результаты работы.

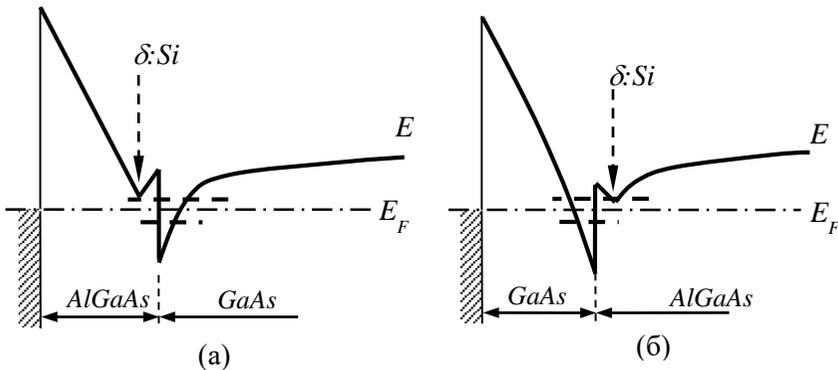
Во введении дано обоснование актуальности работы, определены цели и задачи исследований, перечислены основные результаты, выводы и рекомендации, научные положения, выносимые на защиту. Обоснована практическая значимость работы.

В первой главе рассматриваются различные гетероструктуры и способы описания в них электронного транспорта.

В §1.1 рассматриваются традиционные ГСЛ на основе GaAs. Характеристики гетероструктурных полевых транзисторов определяются в основном параметрами гетероструктуры: такими, как холловская подвижность электронов μ_e , интегральная поверхностная концентрация квазидвумерного электронного газа в InGaAs канале n_s .

Отмечается, что в современных серийно выпускаемых рНЕМТ транзисторах обычно проводится дельта-легирование донорами. Это решение позволяет получить большие величины μ_e и n_s . Оптимизации гетероструктур для мощных полевых транзисторов, сталкиваются с большим набором жестких физических и технологических ограничений, поэтому при использовании однотипных вариантов AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктур, на рабочей частоте 10 ГГц получалась примерно одинаковая для всех вариантов топологий удельная выходная мощность - на уровне 1,0÷1,2 Вт/мм. Рассматриваются основы физики электронного транспорта в GaAs гетероструктурах. Отмечается, что дальнейший прогресс в области развития рНЕМТ транзисторов может быть связан со структурой, в которой будет подавлен поперечный пространственный перенос электронов.

В §1.2 рассматриваются особенности локализации электронов в транзисторных гетероструктурах. Отмечается, что известны три основных варианта конструкции гетероструктур по расположению δ -слоя легирующей примеси относительно канала транзистора.



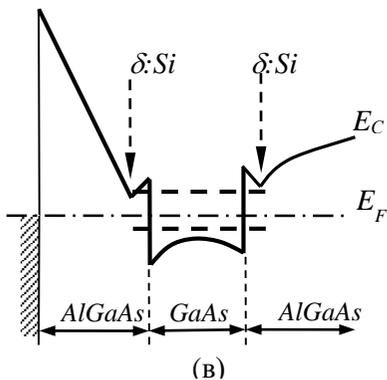


рис. 1

А) прямая структура – легированный донорами широкозонный слой расположен между затвором и каналом рис.1. а

Б) обращенная (в западной литературе инвертированная) структура – легированный донорами широкозонный слой расположен между каналом и подложкой рис. 1. б

В) двойная гетероструктура – легированные широкозонные слои расположены с обеих сторон канала рис 1. в.

В промышленном производстве используются структуры а) и в), так как структура б) имеет два существенных недостатка: туннелирование электронов из затвора в канал и сильный поперечный пространственный перенос электронов.

В §1.3 рассматриваются особенности DA-DpHEMT транзисторов

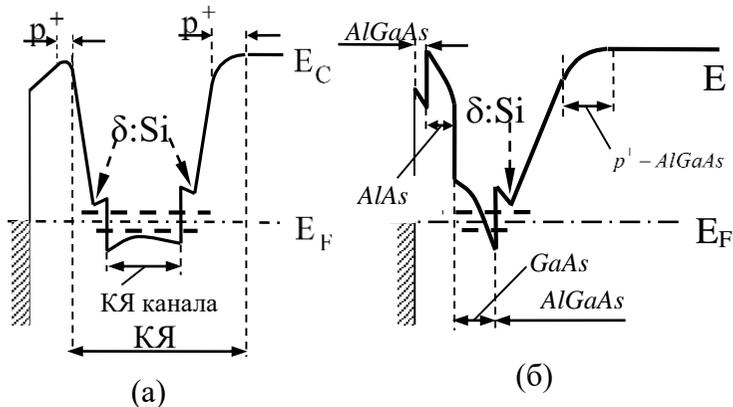


Рис.2

на основе гетероструктур с донорно-акцепторным легированием рис.2.

Проблема интенсивного поперечного пространственного переноса электронов в двойных и обращенной структуре может быть достаточно просто решена введение донорно-акцепторного легирования а) и б). Такие ГСЛ могут иметь много преимуществ перед традиционными рНЕМТ структурами, однако сложность происходящих в них физических процессов требуют достаточно точных предварительных расчётов. Наиболее точно характеристики приборов с характерными размерами порядка десятых долей микрона рассчитываются методом Монте-Карло. Однако, модификации метода Монте-Карло под конкретную задачу расчета DA-DpНЕМТ транзисторов, пока не существует. Поэтому, для быстрых и простых оценок перспективности различных вариантов транзисторных структур пока используется анализ формы и величины всплеска дрейфовой скорости электронов, развивающегося во времени при включении импульсного внешнего электрического поля.

В §1.4 рассматривается математическая модель электронного транспорта в гетероструктурах с сильной локализацией электронов.

В ней потенциальный рельеф и квантовые уровни в направлении перпендикулярном поверхности определяются на основе численного самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{m^*(x)} \frac{d\Psi_i(x)}{dx} \right) + U(x)\Psi_i(x) + E_x(x)\Psi_i(x) = E_i\Psi_i(x) \\
 & U(x) = E_{c0}(x) - q \cdot \varphi(x) \\
 & \frac{d}{dx} \left(\varepsilon(x) \frac{d\varphi(x)}{dx} \right) = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_0} \\
 & E_x(x) = -\frac{q^2}{4\pi\varepsilon(x)\varepsilon_0} \left(\frac{3}{\pi} n(x) \right)^{\frac{1}{3}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь и далее $\Psi_i(x)$ и E_i - собственные функции и собственные значения оператора Гамильтона, $E_x(x)$ – обменная энергия электрона, $E_c(x)$ – дно зоны проводимости, μ – химический потенциал, $N_D(x)$ и $N_A(x)$ - концентрации ионизованных доноров и акцепторов, q – абсолютное значение заряда электрона, $\varepsilon(x)$, ε_0 – диэлектрическая проницаемость полупроводника и вакуума, m^* – эффективная масса электрона, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, \hbar - постоянная Планка.

В области пространства, в которой локализованы волновые функции дискретного энергетического спектра (квантовой области):

$$\rho(x) = q(N_D(x) - N_A(x)) + \rho_c(x) - q \sum_i n_i |\Psi_i(x)|^2$$

$$n_i = \left(\frac{m^*(x)kT}{\pi \hbar^2} \right) \ln \left\{ 1 + \exp \left[\frac{q(\mu - E_i)}{kT} \right] \right\} \quad (2)$$

Здесь $\rho_c(x)$ – плотность объёмного заряда в непрерывном спектре. В направлении параллельном поверхности структуры транспорт электронов описывается на основе феноменологической системы уравнений сохранения импульса и энергии с временами релаксации для объёмных материалов, которая в предположении что частота рассеяния электронов имеет вид:

$$v = v_1 \cdot p_1 + v_2 \cdot p_2 \quad (3)$$

где p_1, p_2, v_1, v_2 вероятности нахождения электронов и их частоты рассеяния в узкозонном и широкозонном материале соответственно записывается как:

$$m^*(\varepsilon) = m_1^*(\varepsilon) p_1 + m_2^*(\varepsilon) p_2 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(m^*(\varepsilon)V)}{\partial t} = q \left(E - \frac{m^*(\varepsilon)V(m_1^*(\varepsilon)V_{s1}(\varepsilon)E_{s2}(\varepsilon)p_2 + m_2^*(\varepsilon)V_{s2}(\varepsilon)E_{s1}(\varepsilon)p_1)}{m_1^*(\varepsilon)V_{s1}(\varepsilon)m_2^*(\varepsilon)V_{s2}(\varepsilon)} \right) \quad (5)$$

$$V_s(E) = \frac{m_1^*(E)V_{s1}(E)m_2^*(E)V_{s2}(E)}{(m_1^*(E)p_1 + m_2^*(E)p_2)(m_1^*(E)V_{s1}(E)p_2 + m_2^*(E)V_{s2}(E)p_1)} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = q(EV - V_s(\varepsilon)(E_{s1}(\varepsilon)p_1 + E_{s2}(\varepsilon)p_2)) \quad (7)$$

Здесь q, V, m^*, ε – заряд, скорость, усредненная эффективная масса и энергия электронов соответственно, E – напряженность электрического поля, $V_{si}(\varepsilon), E_{si}(\varepsilon)$ – статические значения дрейфовой скорости электронов и напряженности электрического поля, соответствующие данной энергии ε , получаемые из расчетов методом Монте-Карло статических характеристик материалов.

Во второй главе рассматривается всплеск дрейфовой скорости электронов в транзисторных гетероструктурах на основе нитрида галлия

В §2.1 рассматриваются всплеск дрейфовой скорости в чистом объемном GaN. Отмечается, что высокочастотные характеристики GaN и GaAs неоднократно сравнивались между собой по всплеску дрейфовой скорости и делался вывод, о существенном преимуществе по частотным свойствам чистого GaAs перед GaN.

В §2.2 оценивается всплеск дрейфовой скорости в полевых транзисторах на основе чистого GaN и GaAs.

Отличительными особенностями GaN являются высокая дрейфовая скорость электронов в сильных полях и не слишком высокая подвижность в объемном материале. Однако в транзисторе средняя скорость определяется совокупностью параметров с учётом нелокального транспорта электронов. Для полевых транзисторов на основе GaN и GaAs приведены результаты расчетов дрейфовой скорости электронов под затвором. Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что быстродействие GaN транзисторов при прочих равных условиях будет не выше быстродействия полевых транзисторов на основе GaAs.

В §2.3 оценивается всплеск дрейфовой скорости электронов в гетероструктурах на основе GaN.

Рассматривались типичная структура DpHEMT транзистора и структура нитридгаллиевого HEMT транзистора. Оказалось, что в гетероструктуре на основе GaAs переходы электронов между слоями сильно влияют на их дрейфовую скорость. Очевидно это происходит из-за того, что скорости электронов в $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ и $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ сильно отличаются, и особенно в случае нелокальной динамики. Поэтому, в итоге, при переходе 20 % электронов в широкозонный материал (вероятность изначально задана) величина всплеска падает почти в два раза. В то же время для структур на основе нитрида галлия ситуация совершенно другая. Даже для чистых материалов в рассмотренных случаях разница нелокальных скоростей электронов в максимуме составляет менее 35%. Таким образом, нелокальная динамика электронов в GaN и $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$ по сравнению с предыдущей гетеропарой отличается не слишком сильно. Зависимости скорости от времени для гетероструктуры должны находиться где-то между или в районе зависимостей скорости от времени для чистого GaN и $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$. Соответственно зависимости всплеска дрейфовой скорости электронов и в самосогласованном расчёте, не слишком сильно отличаются от зависимости в чистом GaN. Таким образом, для

всех рассмотренных случаев уменьшение дрейфовой скорости в максимуме составляет менее 30%.

Поэтому важным фактором, объясняющим высокие усилительные характеристики GaN гетероструктур является удачный состав компонент гетеропары. Делаются следующие выводы: Всплеск дрейфовой скорости электронов в гетероструктурах $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N} - \text{GaN}$ близок к всплеску дрейфовой скорости в чистом GaN. Поэтому, в отличие от GaAs гетероструктур, существенно увеличить скорость электронов в гетероструктурах на основе GaN, без использования принципиально новых подходов будет весьма затруднительно, а, следовательно, будет затруднено и дальнейшее продвижение вверх по частотному диапазону.

В третьей главе экспериментально и теоретически исследуются первые транзисторные гетероструктуры с цифровыми барьерами Q-DpHEMT.

В §3.1 рассматриваются предпосылки разработки структур с цифровыми барьерами.

Рассматривались способы увеличения эффективной глубины квантовой ямы. Отмечено, что кроме донорно-акцепторного легирования эффективным способом является использование набора тонких (несколько моноатомных слоёв) барьеров AlAs с промежутками из нескольких моноатомных слоёв GaAs не только в спейсере но и в промежутке между n - δ -слоем и акцепторами. Барьеры из короткопериодных AlAs/GaAs сверхрешеток позволяют получить более резкие и гладкие границы КЯ и уменьшить концентрацию примесей в КЯ, задерживая их на гетерограницах. Кроме того, захват холодных электронов на состоянии X-долины AlAs/GaAs сверхрешеток, где их подвижность мала, маловероятен из-за большой энергии даже первого уровня сверхрешетки с тонкими слоями AlAs.

В §3.2 рассматривается возможность использования цифровых барьеров в ГСЛ для улучшения подвижности электронов. Демонстрируется, что введение даже одного квантового барьера существенно изменяет волновые функции электронов и характер их локализации как в канале, так и в области легирования.

В §3.3 исследуются первые полевые транзисторы мм. диапазона с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами.

В пункте 3.3.1 рассмотрены эпитаксиальный рост структур и их параметры. Концентрация доноров и толщины спейсеров были выбраны

для получения максимальной проводимости, пропорциональной произведению плотности и подвижности ДЭГ. Для улучшения характеристик Q-DrHEMT, плотность и подвижность ДЭГ увеличивалась до $4.7/4.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $5800/13500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при температурах 300/77 К, соответственно. Концентрация и профиль акцепторов были выбраны так, чтобы увеличить высоту и резкость потенциальных барьеров и подавить эффект перехода горячих электронов в барьеры AlGaAs.

В пункте 3.3.2 рассмотрены разработанные полевые транзисторы и их статические характеристики. Пробивное напряжение затвор-сток оказалось в диапазоне $V_B = 23-31 \text{ В}$, а плотность тока открытого транзистора составила 0.7 А/мм . По оценке выходная СВЧ мощность транзистора составила порядка $1.5-2.1 \text{ Вт/мм}$.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости напряжения пробоя и коэффициента усиления в разработанных транзисторах.

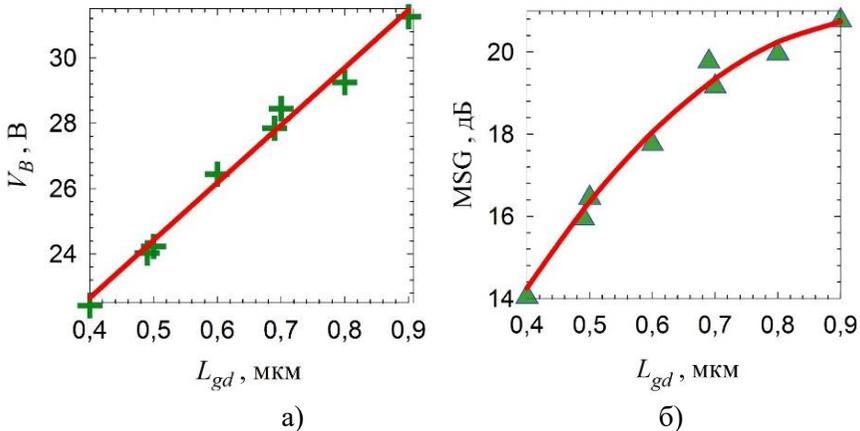


рис.3 Зависимость от расстояния затвор-сток:

а) напряжения пробоя V_B :

б) максимального стабильного коэффициента усиления транзистора на частоте 40 ГГц. Напряжение на стоке $V_{gd} = 4 \text{ В}$.

$+$, Δ эксперимент, $—$ - линейная аппроксимация

В пункте 3.3.3 рассмотрены СВЧ характеристики разработанных полевых транзисторов с цифровыми барьерами.

Основные полученные результаты приведены на рис.4

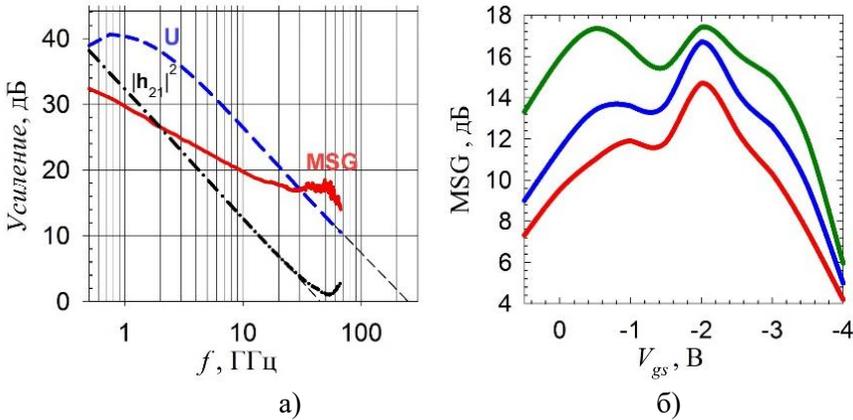


рис.4 Зависимости для транзистора с шириной единичного затвора 50 нм.: а) усиления от частоты б) максимального стабильного коэффициента усиления от напряжения на затворе частота (—) 40 ГГц, (—) 55 ГГц, (—) 67 ГГц. Напряжение на стоке $V_{gd} = 4$ В, расстояние затвор – сток $L_{gd} = 0,7$ мкм.

В пункте 3.3.4 проведен анализ полученных экспериментальных результатов. Приведено сравнение разработанного транзистора с лучшими транзисторами с похожей топологией, с близкой длиной затвора, сделанных по другим технологиям. Для Q-DrHEMT даётся оценка усиления и удельной выходной мощности в мм-диапазоне до 94 ГГц. Показано, что разработанный транзистор превосходит стандартные GaAs DrHEMT по усилению и удельной мощности. Отмечается, что первые экспериментальные образцы Q-DrHEMT сравниваются с устройствами, изготовленными по уже отработанным технологиям. Обнаружены две интересные и пока необъяснённые особенности разработанных транзисторов. Усиление прибора растет с увеличением расстояния затвор-сток, а максимальное усиление оказывается почти постоянной величиной в диапазоне частот 25-55 ГГц.

В §3.4 анализируются перспективы использования цифровых барьеров в ГСЛ для полевых транзисторов.

В пункте 3.4.1 рассматривается степень локализации электронов в канале в зависимости от конструкции гетероструктуры. Отмечается, что дополнительно увеличить степень локализации возможно путем введения тонких слоев $AlAs$ (два – пять монослоев) и $GaAs$ (три - шесть мо-

нослоев). По аналогии с цифровым кодом, потенциальный профиль, обусловленный такой короткопериодной сверхрешеткой $AlAs/GaAs$, назовём цифровым потенциальным барьером (ЦПБ).

В пункте 3.4.2 рассмотрены особенности электронного транспорта и оценена эффективность ЦПБ на примере трех типов гетероструктур: обычные (DrHEMT), с донорно-акцепторным легированием (DA-DrHEMT), гетероструктура с донорно-акцепторным легированием и с ЦПБ (Q-DrHEMT).

Демонстрируется, что распределения концентрации электронов в рассмотренных гетероструктурах сильно отличаются, и в случае появления цифровых барьеров локализация электронов в канале выражена гораздо сильнее.

Показано, что величина всплеска дрейфовой скорости электронов сильно зависит от количества электронов в широкозонном материале. Так, всего при 10% вероятности нахождения электронов в широкозонном материале, величина всплеска дрейфовой скорости падает в 1,5 раза.

В рассмотренных гетероструктурах дрейфовая скорость электронов в гетероструктуре с ЦПБ, даже расположенными заведомо не оптимальным образом, может быть на 30 – 40 % больше, чем в гетероструктуре без ЦПБ. Соответственно примерно на столько же должны вырасти и рабочие частоты транзистора. В свою очередь это может привести к росту коэффициента усиления транзистора почти в 2 раза (примерно на 3дБ).

Данный эффект частично позволяет объяснить очень высокие коэффициенты усиления, полученные на разработанной структуре в §3.3. Введение дополнительных цифровых барьеров и уменьшение расстояния между ними увеличивают всплеск дрейфовой скорости электронов.

Исследуется эффект локализации электронов в сверхрешетках Q-DrHEMT, который должен дополнительно приводить к росту всплеска дрейфовой скорости электронов.

Рассмотрен эффект размытия границ тонких ЦПБ, показано, что он слабо влияет на полученный ранее результат.

Оптимизирована конструкция гетероструктур с ЦПБ. В таких структурах повышена локализация электронов в канале. В результате всплеск дрейфовой скорости в такой структуре заметно растёт по сравнению со всеми рассмотренными ранее случаями и приближается к теоретическому пределу для данной модели – всплеску дрейфовой скорости в чистом объёмном материале канала.

Отмечается, что в рассмотренных гетероструктурах расстояние между квантовыми уровнями существенно превышает энергию оптического фонона. Это дополнительно увеличивает всплеск дрейфовой скорости, а значит позволяет увеличить рабочие частоты полевых транзисторов на основе таких гетероструктур.

Оценки позволяют сделать вывод, что при укорочении длины затвора транзистора до 0,05 мкм, оптимизация структур с ЦПБ может позволить транзисторам на их основе работать на частотах вплоть до 300 ГГц при сохранении высоких уровней удельной мощности, в несколько раз превосходящей удельную мощность современных транзисторов с каналом на основе $In_xGa_{1-x}As$ с высоким молярным содержанием индия.

В главе четыре рассмотрены перспективы использования обращенных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами в транзисторах миллиметрового диапазона длин волн.

В §4.1 описаны попытки разработки обращенных структур, отмечается, что одним из главных преимуществ обращенных структур по сравнению с обычными является возможность приблизить канал транзистора к затвору.

В §4.2 рассмотрены различные варианты конструкций обращенных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием. Отмечается особенность обращенных структур – повышенная линейность их переходной характеристики (dn_s/dU_g), и большой энергетический зазор между квантовыми уровнями этих структур.

В §4.3 рассматривается всплеск дрейфовой скорости в обращенных ГСЛ. Демонстрируется, что поперечный пространственный перенос электронов сильно снижает всплеск дрейфовой скорости электронов в обращенных гетероструктурах по сравнению с двойными гетероструктурами и гетероструктурами традиционных малошумящих транзисторов. Введение донорно-акцепторного легирования позволяет сильно увеличить локализацию электронов в канале обращенных гетероструктур и таким образом существенно поднять всплеск дрейфовой скорости электронов.

В §4.4 даны простейшие оценки границы канала с сильным квантованием.

Известно, что в обычных полевых транзисторах крутизна транзистора и входная емкость обратно пропорциональны расстоянию от затвора до края обедненной области. Показано, что в гетероструктурах полевых транзисторов роль этой величины выполняет расстояние от затвора до центра канала транзистора.

Показано, что из-за снижения роли паразитной емкости в транзисторах на обращенных гетероструктурах при коротком Т-образном затворе за счет приближения канала к затвору, может быть достигнут рост частоты на 20 – 30 %, что примерно соответствует росту коэффициента усиления около 2 дБ.

В §4.5 проведена оптимизация обращенных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами по всплеску дрейфовой скорости.

Демонстрируется, что в обращенных гетероструктурах с ЦПБ и донорно-акцепторным легированием (Q-iHEMT) без существенного уменьшения всплеска дрейфовой скорости электронов их поверхностная плотность в канале можно поднять до $n_s = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Рассматривается локализация электронов в канале Q-iHEMT, расстояния между квантовыми уровнями, особенности механизмов рассеяния. Предложен технический прием позволяющий делать сверхрешетки таких структур близкими к идеальным (Q-iHEMT++) рис. 5а.

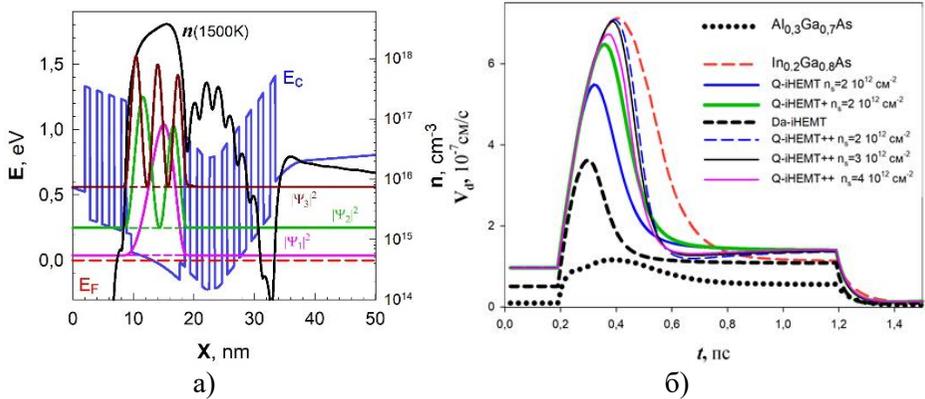


Рис.5

Решётка с одинаковым шагом настолько хорошо локализует электроны в канале, что расчёт как с учетом, так и без учета того, что горячие электроны за время импульса не будут переходить на локализованные внутри барьерной решётки состояния мало отличается.

С увеличением поверхностной плотности электронов в канале, всплеск дрейфовой скорости начинает падать. Однако даже при $n_s = 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ он остаётся в максимуме чуть больше, чем при $n_s = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (Q-iHEMT+) в случае, когда барьерная решётка – не идеальна (рис. 5б).

Следует отметить еще одну крайне интересную особенность данных структур см.рис. 5а. В них первые три уровня расположены очень далеко друг от друга. Расстояние между первым и вторым составляет около 0.2 эВ, между вторым и третьим около 0,3 эВ, что в несколько раз превосходит энергию оптического фонона (около 0.04 эВ) в данных материалах. Это означает, что, один из основных механизмов рассеяния в таких структурах будет частично подавлен, что в свою очередь, должно привести к увеличению всплеска дрейфовой скорости электронов, а значит дополнительно улучшить характеристики полевых транзисторов на таких гетероструктурах.

В §4.6 приведены оценки, демонстрирующие возможность работы транзисторов на разработанных структурах при длине затвора 0.05 мкм на частоте 300 ГГц с коэффициентом усиления по мощности 6-8 дБ.

В заключении сформулированы основные полученные результаты:

1. На основе теоретических исследований показано, что за счет близости электронных транспортных свойств материалов гетероструктуры, в области сильного поля для гетероструктур на основе GaN поперечный пространственный перенос электронов уменьшает всплеск их дрейфовой скорости по сравнению с чистым объёмным материалом, менее чем на 30%.
2. На структурах с цифровыми потенциальными барьерами изготовлены полевые транзисторы с длиной затвора около 0,12 мкм. Показано, что за счёт роста всплеска дрейфовой скорости электронов при введении цифровых барьеров в гетероструктуры с двухсторонним донорно-акцепторным легированием до двух раз увеличивается коэффициент усиления полевых транзисторов на их основе.
3. На основании расчетов на основе самосогласованной системы уравнений Шредингера-Пуассона показано, что введение цифровых барьеров в обращённые гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием позволяет создавать проводящий канал с расстоянием между первыми квантовыми уровнями в три – четыре раза больше энергии оптического фонона.
4. На основании расчетов по самосогласованной модели из системы уравнений Шредингера-Пуассона и гидродинамических уравнений показано, что введение цифровых барьеров в обращённые гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием за счет локализа-

ции горячих электронов в канале и отсутствия переходов на состояния, локализованные в барьерных решётках до двух раз увеличивает всплеск дрейфовой скорости электронов в области сильного поля.

5. Теоретически показано, что в обращённых гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием выполнение цифровой барьерной решётки в области легирования с шагом b и менее монослоёв GaAs за счет локализации горячих электронов в канале обеспечивает увеличение всплеска их дрейфовой скорости в области сильного поля до его величины в чистом объёмном материале.
6. На основании расчетов по самосогласованной модели включающей систему уравнений Шредингера-Пуассона и гидродинамических уравнений показано, что в обращённых гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием выполнение цифровой барьерной решётки в области легирования с шагом b и менее монослоёв GaAs за счет локализации горячих электронов в канале, позволяет вдвое поднять поверхностную плотность электронов при уменьшении всплеска их дрейфовой скорости в области сильного поля менее чем на 10 %.
7. Теоретически показано, что в гетероструктурах полевых транзисторах крутизна транзистора и входная емкость обратно пропорциональны расстоянию от затвора до центра канала.
8. Разработана конструкция обращённой гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием и цифровыми потенциальными барьерами для мощного полевого транзистора, способного при длине затвора **0.05 мкм** работать на частоте **300 ГГц**.

Публикации по теме диссертации в журналах индексируемых в международных базах данных.

1. С.А. Богданов, А.К. Бакаров, К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, И.А. Рогачёв, Е.В. Терешкин, С.В. Щербачков “Полевой транзистор миллиметрового диапазона длин волн на основе псевдоморфной гетероструктуры с дополнительными потенциальными барьерами”// Письма в Журнал Технической Физики, 2021, том 47, вып. 7 с.52 – 54

2. Andrey V. Pashkovskii, Sergey A. Bogdanov, Askhat K. Bakarov , Alexandr B. Grigorenko, K. S. Zhuravlev , Vladimir G. Lapin, Vladimir M. Lukashin, Ilya A. Rogachev, Evgeniy V. Tereshkin, and Sergey V. Shcherbakov «Millimeter Wave Donor – Acceptor Doped DpHEMT», IEEE Trans. On Electron Devices, jan. 2021, vol. 68, issue 1, p. 53-56.

3. С.А. Богданов, А.А. Борисов, С.Н. Карпов, М.В. Кулиев, А.Б. Пашковский, Е.В. Терешкин “Нелокальная динамика электронов в Al-GaN/GaN-транзисторных гетероструктурах”// Письма в Журнал Технической Физики, 2022, том 48, вып. 2 с.44 – 46

4. А.Б. Пашковский, С.А. Богданов, А.К. Бакаров, К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, С.Н. Карпов, Д.Ю. Протасов, И.А. Рогачёв, Е.В. Терешкин “Всплеск дрейфовой скорости электронов в обращенных транзисторных гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием и дополнительными цифровыми потенциальными барьерами”// Письма в Журнал Технической Физики, 2022, том 48, вып. 12 с.11 – 14.

5. А.Б. Пашковский, С.А. Богданов, А.К. Бакаров, К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, С.Н. Карпов, И.А. Рогачёв, Е.В. Терешкин “Всплеск дрейфовой скорости электронов в гетероструктурах с двусторонним донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами”// Физика и Техника Полупроводников, 2023, том 57, В.1, стр. 21-28.

Публикации по теме диссертации в журналах из перечня ВАК.

6. С.А. Богданов, С.Н. Карпов, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, И.А. Рогачёв, Е.В. Терешкин, С.В. Щербаков, А.К. Бакаров, К.С. Журавлев “DA-DrHEMT миллиметрового диапазона длин волн”// Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2021, В.2 (549), С. 19 - 31.

7. С.А. Богданов, А.А. Борисов, С.Н. Карпов, Д.Э. Ключкова, Я.Б. Мартынов, А.Б. Пашковский, Е.В. Терешкин. “Всплеск дрейфовой скорости электронов в транзисторных гетероструктурах на основе нитрида галлия”// Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2021, В.4 (551), С. 6 - 14.

8. С.А. Богданов, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, С.Н. Карпов, А.Б. Пашковский, И.А. Рогачёв, Е.В. Терешкин, А.К. Бакаров, К.С. Журавлев, Д.Ю. Протасов “Цифровые барьеры и их перспективы в развитии мощных полевых транзисторов с двухсторонним донорно – акцепторным легированием в миллиметровом диапазоне длин волн”// Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2022, В.3 (554), С. 22 - 37.

9. **Е.В. Терешкин** «Перспективы использования обращенных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами в миллиметровом диапазоне длин волн”// Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2022, В.4 (555), С. 64 - 78.

Патенты

1. Патент РФ на изобретение №2781044 по заявке № 2021133029/28(069483). Приоритет от 12.11.2020. Зарегистрировано: 04.10.2022. Мощный полевой транзистор СВЧ на полупроводниковой гетероструктуре//, А.Б. Пашковский, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.А. Маковецкая, С.А. Богданов, Е.В. Терешкин, К.С. Журавлев.

2. Патент РФ на изобретение №2799735 С1, 11.07.2023. Заявка № 2022131120 от 27.01.2023. Мощный полевой транзистор СВЧ на полупроводниковой гетероструктуре//, Пашковский А.Б., Богданов С.А., Бакаров А.К., Журавлев К.С., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Карпов С.Н., Рогачев И.А., Терешкин Е.В.

Другие публикации по теме диссертации.

1. Богданов С.А., Бакаров А.К., Григоренко А.Б., Журавлёв К.С., Лапин В. Г., Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Рогачёв И.А., Терешкин Е.В., Щербаков С.В. “Полевые транзисторы миллиметрового диапазона длин волн разработки АО «НПП «Исток» им. Шокина» ” 30-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2020). Севастополь, Крым, Россия. 7—11 сентября 2020г.: Тезисы докладов, С. 282 – 283.

2. А.Б. Пашковский, С.А. Богданов, А.К. Бакаров, А.Б. Григоренко, К.С. Журавлёв, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, И.А. Рогачёв, Е.В. Терешкин, С.В. Щербаков “Полевые транзисторы миллиметрового диапазона длин волн с высоким коэффициентом усиления” 11-я Международная научно – практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ – электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ» 28 октября 2020 г. Москва, НИЯУ «МИФИ» Сборник трудов конференции С.13 – 14.

3. Богданов С.А., Бакаров А.К., Журавлёв К.С., Карпов С.Н., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Рогачёв И.А., Терешкин Е.В. “Дополнительные потенциальные барьеры в псевдоморфных гетероструктурах с двухсторонним донорно-акцепторным легированием” 12-я Международная научно – практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ – электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ» 19-20 мая 2021 г. Москва, НИЯУ «МИФИ» Сборник трудов конференции С.21 – 22.

4. С.А. Богданов , А.К. Бакаров , К.С. Журавлёв , В.Г. Лапин , В.М. Лукашин , А.Б. Пашковский , И.А. Рогачёв , Е.В. Терешкин “Полевые транзисторы миллиметрового диапазона длин волн АО «НПП «Исток» им. Шокина» на гетероструктурах с донорно – акцепторным легированием” Электроника и микроэлектроника СВЧ, X Всероссийская научно-техническая конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ 30 мая – 4 июня 2021 г. Сборник статей конференции С. 4 – 6.

5. С.А. Богданов , А.К. Бакаров , К.С. Журавлёв , С.Н. Карпов , В.Г. Лапин , В.М. Лукашин , А.Б. Пашковский , И.А. Рогачёв , Е.В. Терешкин “Анализ динамики электронов в гетероструктурах с двухсторонним донорно-акцепторным легированием и дополнительными потенциальными барьерами” Электроника и микроэлектроника СВЧ, X Всероссийская научно-техническая конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ 30 мая – 4 июня 2021 г. Сборник статей конференции С. 43 – 46.

6. С.А. Богданов, А.К. Бакаров, К.С. Журавлёв, С.Н. Карпов, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, И.А. Рогачёв, Е.В. Терешкин «Перспективы улучшения быстродействия DA-DpHEMT транзисторов миллиметрового диапазона длин волн»31-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2020). Севастополь, Крым, Россия. 5—10 сентября 2021г.: Тезисы докладов, С. 250 – 251. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2021. Вып. 3. ISSN 2619-1628.

7. С.А. Богданов, А.К. Бакаров, К.С. Журавлёв, С.Н. Карпов, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, Д.Н. Протасов, И.А. Рогачёв, Е.В. Терешкин. “Цифровые потенциальные барьеры в обращенных гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием ” 13-я Международная научно – практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ – электроники «МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ» 25-26 мая 2022 г. Москва, НИЯУ «МИФИ» Сборник трудов конференции С.18 – 19.

8. С.Н. Карпов, С.А. Богданов, А.Б. Пашковский, Е.В.Терешкин “О влиянии цифровых потенциальных барьеров на характеристики обращенных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием” Электроника и микроэлектроника СВЧ, XI Всероссийская научно-техническая конференция, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ 30 мая – 3 июня 2022 г. Сборник статей конференции С. 71 – 73.

