

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук
Обухова Ильи Андреевича

на диссертационную работу **Терешкина Евгения Валентиновича** на тему: «Обращенные гетероструктуры с донорно – акцепторным легированием и цифровыми барьерами для увеличения коэффициента усиления полевых транзисторов миллиметрового диапазона длин волн», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств»

Актуальность темы диссертации

Гетероструктуры на основе арсенида и нитрида галлия с двумерным электронным газом широко используются для создания СВЧ-транзисторов с высокой подвижностью электронов различных видов (HEMT, pHEMT, DrHEMT и др.). Эти приборы являются ключевыми элементами электронных устройств сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн.

В мире активно ведутся исследования, направленные на совершенствование конструкций и улучшение электрофизических параметров указанных гетероструктур. Один из перспективных методов такого совершенствования впервые был предложен в АО «НПП «Исток» им. Шокина». Он состоит в локализации электронов в канале транзистора при помощи введения в гетероструктуру набора дополнительных тонких (размером в несколько монослоев) высоких потенциальных барьеров, названных цифровыми потенциальными барьерами (ЦПБ).

Диссертационная работа Терешкина Е.В. посвящена исследованию динамики горячих электронов в гетероструктурах из нитрида и арсенида галлия и, в частности, в гетероструктурах с ЦПБ с целью их совершенствования и практического применения в мощных СВЧ транзисторах.

Тема диссертационной работы, безусловно, актуальна.

Структура, объем и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Текст диссертации содержит 166 страниц машинописного текста, 43 рисунка, 2 таблицы, список литературы из 132 наименований, а также приложение, в котором отражен личный вклад автора в работы, выполненные в соавторстве.

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

В первом разделе главы рассматриваются традиционные гетероструктуры с селективным легированием (ГСЛ) на основе GaAs.

В последующих двух разделах автор рассматривает особенности локализации электронов и проблему поперечного пространственного переноса в различных типах гетероструктур.

В разделе 1.4 описана математическая модель электронного транспорта в гетероструктурах с сильной локализацией электронов.

Во второй главе анализируется явление всплеска дрейфовой скорости электронов в транзисторных гетероструктурах на основе нитрида галлия.

В разделе 2.1 рассматриваются всплеск дрейфовой скорости в чистом объемном GaN.

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

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что быстродействие GaN транзисторов при прочих равных условиях будет не выше быстродействия полевых транзисторов на основе GaAs.

В разделе 2.3 оценивается всплеск дрейфовой скорости электронов в гетероструктурах на основе GaN. Демонстрируется, что поперечный пространственный перенос электронов слабо влияет на всплеск дрейфовой скорости в гетероструктурах на основе GaN. Делается вывод, что для всех рассмотренных случаев уменьшение дрейфовой скорости в максимуме составляет менее 30%. 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 разделе 3.1 рассматриваются предпосылки разработки структур с цифровыми барьерами.

В разделе 3.2 исследуется возможность использования цифровых барьеров в ГСЛ для улучшения подвижности электронов.

В разделе 3.3 исследуются первые полевые транзисторы миллиметрового диапазона с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами. Отмечаются их хорошие СВЧ характеристики и высокое пробивное напряжение.

В разделе 3.4 анализируются перспективы использования цифровых барьеров в ГСЛ для полевых транзисторов. Исследуется эффект локализации электронов в канале и его влияние на всплеск дрейфовой скорости электронов под затвором транзистора. Рассматривается эффект размытия границ тонких ЦПБ, демонстрируется, что он слабо влияет на полученные ранее высокие результаты.

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

В разделе 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 разделе 4.2 рассмотрены различные варианты конструкций обращенных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием.

В разделе 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.

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

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

В разделе 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-*i*HEMT) без существенного уменьшения всплеска дрейфовой скорости электронов их поверхностная плотность в канале можно поднять до $n_s = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

В разделе 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 кратко отражены полученные результаты и сформулированы выводы из диссертационной работы.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации, а также раскрывает сущность и обоснованность научных положений, выносимых на защиту.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе

Степень достоверности и обоснованности полученных результатов, научных положений, заключений и выводов, сформулированных в диссертационной работе, подтверждается использованием хорошо известных методов исследований, математических моделей с учетом их границ применимости, а также программ моделирования, отработанных на большом объеме экспериментальных данных. Результаты моделирования хорошо согласуются с результатами измерений, проведенными на экспериментальных транзисторах с двухсторонним легированием и цифровыми барьерами.

Научная, практическая и экономическая значимость результатов исследований

В диссертационной работе 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. В приближении прямоугольной потенциальной ямы показано, что в гетероструктурах полевых транзисторах крутизна транзистора и его входная ёмкость обратно пропорциональны расстоянию от затвора до центра канала.
8. Изготовлены транзисторы с длиной затвора 0,12 мкм имеющие пробивное напряжение около 30 В, при коэффициенте усиления до 20 дБ на частоте 40 ГГц.

Научная значимость результатов диссертации заключается в том, что они определяют направления, в которых необходимо совершенствовать гетероструктуры на основе арсенида галлия с целью улучшения частотных

характеристик и повышения выходной мощности транзисторов, создаваемых на их основе.

Практическая значимость результатов состоит в том, что они апробированы экспериментально и могут быть использованы для производства новых гетероструктур и СВЧ-транзисторов миллиметрового диапазона длин волн.

Экономическая значимость работы состоит в научном обосновании технической перспективности использования для производства СВЧ-транзисторов миллиметрового диапазона длин волн гетероструктур на основе арсенида галлия, технология работы с которыми хорошо освоена отечественными предприятиями и значительно дешевле, чем применение для этих целей нитрида галлия и фосфида индия. Особенно с учетом пока ещё не преодоленных в нашей стране технологических проблем использования этих материалов для нужд СВЧ-электроники.

Замечания и рекомендации

1. В диссертационной работе демонстрируется возможность достижения на разрабатываемых гетероструктурах максимальной величины всплеска дрейфовой скорости электронов. Такие результаты крайне важны для малошумящих транзисторов. Однако в диссертационной работе этому аспекту вообще не уделяется внимание.

2. В диссертации подробно анализируются физические явления, определяющие электрические характеристики транзисторов. Однако результаты расчётов выходных и передаточных вольтамперных характеристик не представлены. Также не представлена модель, позволяющая рассчитать эти характеристики на основе параметров гетероструктуры, конструкции и топологии транзистора. Наличие такой модели крайне желательно для проектирования приборов.

3. В текстах диссертации и автореферата имеются опечатки и стилистические ошибки.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертационная работа Терешкина Е.В. является самостоятельной законченной квалификационной научно-исследовательской работой, содержащей новые решения актуальной задачи совершенствования СВЧ полевых транзисторов на псевдоморфных AlGaAs-InGaAs-GaAs-гетероструктурах. Работа выполнена на высоком научном уровне. Полученные результаты значимы для развития теории СВЧ полупроводниковых приборов и для практических инженерных работ по созданию новых транзисторов миллиметрового диапазона длин волн.

Высказанные замечания не снижают высокой оценки научной и практической значимости работы и не влияют на основные теоретические и прикладные результаты диссертации. Актуальность работы, научная новизна и достоверность результатов, полученных Терешкиным Е.В., не вызывают сомнений.

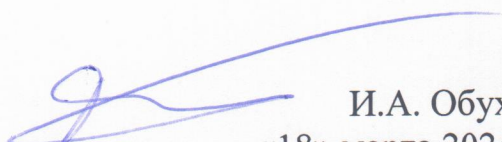
Диссертация имеет законченный вид, оформлена в соответствии с нормативными требованиями, написана технически грамотным языком, имеет достаточное количество иллюстраций.

Результаты диссертации отражены в трудах автора, докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях высокого уровня.

Заключение

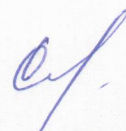
На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Терешкина Е.В. на тему: «Обращенные гетероструктуры с донорно – акцепторным легированием и цифровыми барьерами для увеличения коэффициента усиления полевых транзисторов миллиметрового диапазона длин волн» полностью соответствует требованиям ВАК – п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Евгений Валентинович Терешкин достоин присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

Официальный оппонент,
технический директор
АО «НПП «Радиотехника»,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник


И.А. Обухов
«18» марта 2024 г.

Подпись Обухова Ильи Андреевича заверяю

Генеральный директор АО «НПП «Радиотехника»


Н.А. Сычева

Почтовый адрес организации: 119334, Российская Федерация, Москва, 5
Донской проезд, д. 15, строение 11.

Тел./Факс: +7 (499) 755-85-41

E-mail: office@npprt.ru

Сайт: <https://npprt.ru>



Обухов Илья Андреевич

Почтовый адрес: 141070, Российская Федерация, Московская область,
г. Королёв, ул. Фрунзе, д. 1 Д, корп. 2, кв. 26.

Тел.: +7 (905) 532-95-07

E-mail: iao001@mail.ru, ia@npprt.ru