

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физико-математических наук

Виниченко Александра Николаевича

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», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

Актуальность темы диссертации.

Полевые транзисторы, основанные на РНЕМТ-гетероструктурах с селективным легированием, до сих пор занимают основную часть рынка СВЧ электроники и являются наиболее технологически-освоенной технологией в России. Помимо низкой стоимости, по сравнению с приборами на основе нитрида галлия, они имеют ряд дополнительных преимуществ: высокое усиление и линейность, поэтому во всем мире продолжают работы по их совершенствованию. В работе было предложено два новых перспективных метода улучшения электронных транспортных свойств гетероструктур: введении в РНЕМТ-гетероструктуру потенциальных барьеров на основе донорно-акцепторного легирования и ограничения поперечного пространственного переноса электронов из канала в широкозонный материал с сильным рассеянием за счет введения систем тонких (несколько монослоев) AlAs цифровых потенциальных барьеров.

Диссертационная работа Терешкина Е.В. посвящена исследованию электронного транспорта в перспективных транзисторных гетероструктурах. Соискателем рассматривается транспорт горячих электронов в гетероструктурах на основе GaN и сравнивается с транспортом в традиционных ДРНЕМТ-структурах на GaAs подложках. Также рассматривается динамика горячих электронов в арсенидгаллиевых обращенных (инвертированных) гетероструктурах (Q-iHEMT) с целью повышения в них подвижности горячих электронов и вопросы их практического применения в мощных СВЧ транзисторах, способных работать в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн.

Данная тема диссертационной работы, безусловно, актуальна, а сама работа имеет большую практическую значимость.

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 проверенных экспериментальных данных. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными исследованиями, полученными для экспериментальных транзисторов с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами.

Значимость для науки и практики результатов исследований.

В рецензируемой работе необходимо отметить следующие научные и практические результаты:

1. Экспериментально разработаны и изготовлены транзисторы с длиной затвора 0,12 мкм, имеющие пробивное напряжение около 30 В, при коэффициенте усиления до 20 дБ на частоте 40 ГГц.
2. В приближении прямоугольной потенциальной ямы показано, что в гетероструктурах полевых транзисторах, крутизна транзистора и его входная емкость обратно пропорциональны расстоянию от затвора до центра канала.
3. 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.
4. 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%.
5. 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.
6. 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.
7. Показано, что в обращённых гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием использование 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.

8. Теоретически показано, что в обращённых гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием выполнение цифровой барьерной решётки в области легирования с шагом 6 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 %.

Структура, объем и содержание диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, двух глав, заключения, списка литературы. Текст диссертации содержит 166 страницы машинописного текста, 43 рисунка, 2 таблицы, список литературы из 132 наименований, а также 1 приложение, в котором отражен личный вклад автора в научные публикации, выполненные с его непосредственным участием.

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

В первом разделе главы рассматриваются традиционные транзисторные ГСЛ на GaAs подложках.

В последующих двух разделах автор рассматривает проблему поперечного пространственного переноса в различных типах гетероструктур, а также особенности локализации электронов в различных типах квантовых ям.

В разделе 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 традиционным способом на основе численного самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона. Электронный транспорт в направлении параллельном поверхности структуры описывается на основе феноменологической системы уравнений сохранения импульса и энергии с временами релаксации для объёмных материалов. Далее обе системы решаются самосогласованно. Обсуждаются границы применимости данного приближения.

Во второй главе рассматривается транспорт горячих электронов в транзисторных гетероструктурах на основе нитрида галлия.

В §2.1 рассматриваются всплеск дрейфовой скорости в чистом объёмном GaN.

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

В §2.3 оценивается всплеск дрейфовой скорости электронов в гетероструктурах на основе GaN. Важной особенностью оказывается то что переходы электронов между слоями гетероструктуры слабо влияет на всплеск дрейфовой скорости. Демонстрируется, что для всех рассмотренных случаев уменьшение дрейфовой скорости в максимуме составляет менее 30%. Из этого следует, что, в отличие от GaAs гетероструктур, существенно увеличить скорость электронов в гетероструктурах на основе GaN без использования

принципиально новых подходов будет весьма затруднительно, а значит будет затруднено и дальнейшее продвижение вверх по частотному диапазону.

В третьей главе экспериментально и теоретически исследуются транзисторные гетероструктуры с цифровыми барьерами и полевые транзисторы на их основе Q-DpHEMT.

В §3.1 рассматриваются предпосылки разработки структур с цифровыми барьерами.

Отмечается, что кроме донорно-акцепторного легирования эффективным способом увеличения глубины квантовой ямы канала является использование набора тонких (несколько моноатомных слоёв) цифровых барьеров AlAs. Особенно эффективным этот приём оказывается, когда барьеры вводятся не только в спейсерный слой, но и в область между донорами и акцепторами.

В §3.2 рассматривается возможность использования цифровых барьеров в гетероструктуру для улучшения подвижности электронов.

В §3.3 исследуются первые полевые транзисторы мм-диапазона длин волн с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами. Приборы демонстрируют высокие СВЧ характеристики и высокое пробивное напряжение.

В §3.4 анализируются перспективы использования цифровых барьеров в гетероструктурах для полевых транзисторов. Исследуется эффект локализации электронов в канале и его влияние на скорость электронов под затвором транзистора. Рассматривается эффект размытия границ тонких цифровых барьеров, демонстрируется, что он слабо влияет на полученные ранее результаты.

В четвертой главе рассмотрены перспективы улучшения транзисторных характеристик при использовании обращенных (инвертированных) гетероструктур с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами в транзисторах миллиметрового диапазона длин волн.

В §4.1 описаны попытки разработки обращённых структур.

В §4.2 рассмотрены различные варианты конструкций обращённых гетероструктур с донорно-акцепторным легированием.

В §4.3 рассматривается всплеск дрейфовой скорости в обращенных гетероструктурах. Демонстрируется, что поперечный пространственный перенос электронов сильно снижает всплеск дрейфовой скорости электронов в обращенных гетероструктурах по сравнению гетероструктурами с двусторонним легированием и структурами, применяемыми в традиционных малошумящих транзисторах.

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

В §4.5 проведена оптимизация обращённых гетероструктур с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами по всплеску дрейфовой скорости. Показано, что в обращённых гетероструктурах с цифровыми потенциальными барьерами и донорно-акцепторным легированием (Q-HEMT) всплеск дрейфовой скорости электронов можно довести до его теоретического предела в используемой модели – всплеска дрейфовой скорости в чистом объёмном материале канала. Продемонстрировано, что без существенного уменьшения всплеска дрейфовой скорости электронов их поверхностная плотность в канале можно поднять до $n_s = 2 \div 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

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 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.

Замечания и рекомендации.

1. При моделировании зонных структур и пространственного распределения горячих электронов (разделы 3.4. и 4.5) расчет уровней энергии, волновых функций проводился вероятно в однозонном приближении. Так как для барьерных состояний актуально рассмотрение X-долины, может возникнуть резонанс этих состояний с Г-зоной, в этом случае для корректного моделирования необходимо использовать многозонный К·Р метод.

2. При сопоставлении параметров усиления транзисторов на основе традиционных PHEMT структур и предложенных диссертантом новых структур не указано, были ли режимы включения одинаковыми по току стока и напряжению смещения транзисторов, для корректности сопоставления СВЧ параметров.

3. При описании слоевой конструкции гетероструктур не указано: использовались расчетные или экспериментальные значения объёмной и слоевой концентрации? Также в тексте работы не описан механизм легирования, что особенно важно в случае одновременного использования донорной и акцепторной примесей.

4. В работе не приведен сравнительный анализ электронных транспортных свойств опорного образца и экспериментальных гетероструктур с использованием цифровых потенциальных барьеров, а также структур с обращённым (инвертированным) легированием. В частности, недостаточное внимание уделено сопоставлению электронной подвижности при различной степени легирования, в то время как она имеет важное значение для определения механизмов рассеяния и оптимизации гетероструктур в части улучшения дрейфовой скорости насыщения и увеличения F_t и F_{\max} транзисторов на основе таких структур.

Общая оценка диссертационной работы.

Диссертационная работа Терешкина Е.В. является самостоятельной законченной квалификационной научно-исследовательской работой, в которой приведены новые решения актуальной задачи: оптимизации СВЧ выходных параметров полевых транзисторов на основе РНЕМТ гетероструктур. Проведенные соискателем исследования имеют существенное значение для развития теории СВЧ полупроводниковых приборов и их прикладного применения.

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.

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 Терешкин Евгений Валентинович достоин присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

Официальный оппонент,
старший научный сотрудник
ЦРСВЧТ НИЯУ МИФИ,
кандидат физико-математических наук

А.Н. Виниченко
20 марта 2024 г.

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
ДИРЕКТОР ДЕПАРТАМЕНТА
КАДРОВОЙ ПОЛИТИКИ
И СОЦИАЛЬНОЙ РАБОТЫ
Д.В. ВАСИЛЬЧЕНКО

Почтовый адрес организации: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

Тел.: +7(495)788-5699, факс: +7(499)324-2111

Е-mail: info@mephi.ru

Официальный сайт: <https://mephi.ru/>



Виниченко Александр Николаевич

Почтовый адрес: 142701, Российская Федерация, Московская область,
г. Видное, ул. Ольховая, д. 11, кв. 382

Тел.: +7(495)788-5699, доб. 82-37, e-mail: ANVinichenko@mephi.ru