

## О Т З Ы В

официального оппонента

о диссертации Д.М. Ермолаева “Исследование детектирования терагерцового излучения короткопериодными массивами полевых транзисторов на основе наногетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – “Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах”.

В настоящее время радиотехнические устройства и полупроводниковые элементы, функционирующие в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот вызывают пристальный интерес исследователей. Это объясняется тем, что указанное излучение представляет особый интерес для множества приложений - дистанционного экологического мониторинга, глобальных метеорологических наблюдений, применяется в радарных системах, астрономии космического базирования, медицине, молекулярной спектроскопии и других областях науки и техники. Тем не менее, этот диапазон частот до сих пор остается наименее изученным. В основном, это связано с отсутствием компактных, перестраиваемых и достаточно мощных источников, а также перестраиваемых резонансных и нерезонансных приемников ТГц излучения, работающих при комнатной температуре.

Физика полупроводников последних трех десятилетий фактически стала физикой полупроводниковых структур пониженной размерности. Исследования таких структур чрезвычайно интересны с научной точки зрения и перспективны для применений благодаря значительному прогрессу полупроводниковой технологии. Низкоразмерные полупроводниковые структуры имеют большие преимущества по сравнению с объемными материалами для применений в оптоэлектронике, в частности, в качестве детекторов ТГц диапазона, так как энергетический спектр носителей заряда можно перестраивать, меняя состав и профиль легирования структур. Дополнительные возможности для управления характеристиками полупроводниковых наноструктур дает вариация размеров структурных элементов.

Среди полупроводниковых детекторов ТГц диапазона большой интерес вызывают полевые транзисторы с высоким быстродействием и возможностью работы при комнатной температуре. Регистрация ТГц излучения в полевых транзисторах с двумерным электронным каналом происходит за счет возбуждения плазменных колебаний, частота и

амплитуда которых может перестраиваться либо напряжением на затворе, изменяющим концентрацию электронов в канале, либо протекающим током. В диссертационной работе Д.М. Ермолаева разработаны детекторы ТГц излучения на плазменных колебаниях в многоэлементных транзисторных структурах AlGaAs/InGaAs/GaAs с короткопериодной решеткой и исследованы различные режимы детектирования как при низкой (гелиевой), так и при комнатной температуре.

В силу сказанного выше, **актуальность** тематики диссертации не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Во введении дана общая характеристика работы: обоснована ее актуальность, изложены цели и задачи работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен обзор работ, посвященных детектированию ТГц излучения и анализу работы различных существующих детекторов и их сравнительных характеристик. Приводятся основные уравнения, используемые для анализа детектирования ТГц излучения с помощью полевых транзисторов, и формулируются условия наблюдения резонансного и нерезонансного ТГц отклика. Рассматриваются возможности улучшения согласования детекторов на основе полевых транзисторов с регистрируемым терагерцовым излучением.

Во **второй главе** изложены физические основы увеличения ТГц чувствительности полевых транзисторов, на основе которых разработана технология изготовления детекторных структур с решеточным затвором. Основная идея – использование решеточных затворов с узкими двумерными каналами между затворными электродами. Такая структура позволяет резко увеличить поглощение падающего на образец ТГц излучения. Кроме того, для эффективного детектирования необходима некоторая асимметрия полевого транзистора. Д.М. Ермолаев предложил использовать для этого асимметричный затворный электрод в каждом из транзисторов многоэлементной системы. Для изготовления этих сложных структур диссертанту пришлось решить непростую технологическую задачу. Исходная структура была выращена с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии. Затем с помощью фото- и электронной литографии были изготовлены несколько типов транзисторных структур AlGaAs/InGaAs/GaAs с периодическими затворными электродами: с периодом 3 мкм, шириной щели 0.3 мкм и площадью  $2 \times 2 \text{ мм}^2$  для исследования резонансного детектирования, структура из 192 параллельно соединенных полевых транзисторов с периодом 17.8 мкм, шириной щели 0.3 мкм и несимметричным T-образным затвором с длиной ножки затвора 0.23 мкм, структура из последовательно соединенных четырех ячеек с теми же параметрами - для изучения

нерезонансного детектирования. В этой главе описаны также аппаратура, схемы и методики измерений.

**Третья глава** посвящена исследованию резонансного ТГц фотоотклика одиночного полевого транзистора на основе AlGaAs/InGaAs/GaAs с узкощелевым решеточным затвором при температуре жидкого гелия. Измерены зависимости фотоотклика от напряжения на затворе для разных частот ТГц излучения. Обнаружены максимумы на этих зависимостях, которые связываются с плазменными резонансами на затворной решетке. Действительно, сопоставление положения и формы максимумов с расчетами демонстрирует неплохое согласие. Измерена пиковая чувствительность резонансного детектора, которая составила 0,28 В/Вт и почти в 300 раз превышает чувствительность аналогичных полевых транзисторов с соотношением длин затвора и щели 1:1. Проведена также оценка эквивалентной мощности шума, полученное значение 8 нВт/Гц<sup>1/2</sup> на три порядка ниже, чем величина, полученная для полевого транзистора GaAs/AlGaAs с равными длинами затвора и щели. Автор связывает эти рекордные результаты с резким увеличением ТГц поглощения за счет применения узких щелей.

В **четвертой главе** изложены результаты исследования отклика короткопериодной решетки параллельно соединенных полевых транзисторов AlGaAs/InGaAs/GaAs на терагерцовое излучение с частотой 0,6 ТГц. Измерения проведены как при азотной, так и при комнатной температуре. В каждом отдельном транзисторе сформирован Т-образный затвор с «ножкой», смещенной к одному из электродов. Такая конструкция обеспечивает асимметрию, необходимую для эффективного детектирования. Установлено, что выпрямленный постоянный ток обусловлен механизмом нерезонансного детектирования. Получена рекордная на сегодняшний день чувствительность этой системы, составившая почти 1000 В/Вт в расчете на один транзистор. Такая высокая чувствительность достигнута без использования дополнительных антенных элементов, поскольку короткопериодная решетка плотно упакованных транзисторов является эффективной антенной, связывающей терагерцовое излучение с каждым транзистором.

Для получения прямых данных о высокой чувствительности, рассчитанной на один элемент для параллельного соединения транзисторов, проведено исследование последовательной цепочки аналогичных полевых транзисторов, результаты которого изложены в **пятой главе**. Эти измерения проводились при комнатной температуре на частоте 615 ГГц. Измерены зависимости продетектированного сигнала от напряжения на электродах транзистора и от затворного напряжения. Достигнутая в этих опытах чувствительность составила ~1100 В/Вт и почти 2000 В/Вт при нулевом и ненулевом смещении. Это подтверждает результат, полученный при изучении решетки из

параллельно соединенных 192 транзисторов (гл. 4). Оцененная эквивалентная мощность шума также значительно меньше, чем аналогичные значения других авторов, приведенные в литературе.

В заключении подводиться итог полученным в диссертационной работе научным результатам. Следует отметить что, работа базируется на достаточном числе исходных данных, примеров, расчетов и их анализе. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы. Сама диссертация написана доходчиво и аккуратно оформлена.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Основные результаты, выводы и положения диссертации достаточно полно отражены в публикациях автора.

В диссертационной работе Д.М. Ермолаева получен целый ряд важных **новых** результатов. Их **достоверность** обусловлена использованием апробированных методик, перекрестным характером проведенных измерений и расчетов, сопоставлением с результатами других авторов. **Положения**, вынесенные на защиту, четко сформулированы и **обоснованы**, они вытекают из результатов диссертационной работы. Полученные результаты, помимо несомненного **фундаментального** интереса, имеют явную **практическую** направленность и хорошие перспективы. Показано, что использование системы с последовательным или параллельным соединением полевых транзисторов и асимметричных Т-образных затворов позволяет достичь рекордных значений чувствительности и эффективной мощности шумов. Цепочка всего нескольких полевых транзисторов с Т-образными затворами может быть использована в качестве пикселей в матричном устройстве для регистрации ТГц изображения. Существенным достоинством предложенных многоэлементных ТГц детекторов является совместимость с хорошо отработанной технологией изготовления транзисторных интегральных схем.

Некоторые замечания по работе.


1. Несомненно, что представленные в работе доказательства рассматриваемых физических эффектов убедительны, но хотелось бы иметь прямую экспериментальную проверку влияния поляризации регистрируемого ТГц излучения на эффективность детектирования, а также оценка величины мощности шумов.
2. В работе утверждается, что из-за асимметрии затвора продетектированный ток между затвором и стоком значительно больше, чем между истоком и затвором. Это также было бы полезным подтвердить экспериментально.
3. Детектирование сигнала многоэлементной схемой является весьма серьезной технической задачей, поэтому важна экспериментальная проверка реализуемости такого

решения с точки зрения разброса параметров отдельных транзисторов на эффективность детектирования всей многоэлементной системы.

4. В оформлении диссертации заметна известная поспешность. Например, на рис. 3.5, на котором приведены нормированные к максимуму кривые рис. 3.3, почему-то отсутствует кривая 5 рис. 3.3, кривые на рис 3.5 обозначены значками, а в тексте – номерами; в п. 3.3 указан использованный диапазон частот 0.4-0.7 ТГц, а на рис. 3.3 - ~0.6-0.7 ТГц и т.д. В тексте также встречаются интересные выражения, например, “взаимодействие ...излучения с конструкцией детектора” (стр. 49), “превращения энергии из внешнего электромагнитного излучения ... в мощность”(стр. 53), “теоретическая кривая косинуса ...в квадрате” (стр. 97) и пр.

Замечания имеют, в основном, характер пожеланий к дальнейшему развитию работы и не снижают высокой оценки диссертационной работы в целом. Диссертация Д.М. Ермолаева представляет собой законченную фундаментальную научную работу в актуальном направлении физики полупроводников. Результаты работы опубликованы в ведущих научных журналах и известны по многочисленным докладам на конференциях. Диссертационная работа Д.М. Ермолаева соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – “Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах”.

Официальный оппонент:



18.09.2015

Оболенский Сергей Владимирович, заведующий кафедрой электроники радиофизического факультета ННГУ им. Н.И.Лобачевского, д.т.н., профессор. Адрес: г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 4, комн. 408. Тел. 952-472-19-46, E-mail: [obolensk@rf.unn.ru](mailto:obolensk@rf.unn.ru), сайт: [www.unn.ru](http://www.unn.ru).

Подпись удостоверяю:

Проректор по научной работе и инновациям  
ННГУ им. Н.И.Лобачевского



В.Б. Казанцев