



Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
Институт физики твердого тела  
Российской академии наук  
(ИФТТ РАН)

142432, Московская обл., г. Черноголовка,  
Ул. Академика Осипьяна, д. 2  
Факс: (496) 522 8160  
E-mail: [adm@issp.ac.ru](mailto:adm@issp.ac.ru)  
<http://www.issp.ac.ru>  
ОКПО 02699796, ОГРН 1025003915243,  
ИНН/КПП 5031003120 / 503101001

15.06.15 № 11214 - 533

Директору ФГБУ ИФМ РАН  
Красильнику З.Ф.  
тел: (831) 417-94-73, факс: (831) 417-94-64  
от директора ИФТТ РАН  
член.-корр. проф. Кведера В.В.

#### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

На диссертацию Ермолаева Д.М. "Исследование детектирования терагерцового излучения короткопериодными массивами полевых транзисторов на основе наногетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs", представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Диссертационная работа Ермолаева Д.М. посвящена исследованию детекторов ТГц излучения на плазмонных колебаниях в AlGaAs/InGaAs/GaAs транзисторных структурах с короткопериодной верхней металлизацией и определению характеристик таких детекторов. Для достижения цели работы были разработаны конструкции и маршруты изготовления AlGaAs/InGaAs/GaAs транзисторных структур с короткопериодной верхней металлизацией; изготовлены и корпусированы образцы транзисторных структур; экспериментально исследован терагерцовый фотоотклик изготовленных структур; проведен анализ экспериментальных результатов, выполнена оценка чувствительности и эквивалентной мощности шума изготовленных ТГц детекторов на основе короткопериодных транзисторных структур.

В диссертации проведено детальное сравнение экспериментальных результатов с теоретическими предсказаниями численного моделирования плазмонных эффектов, полученными в научной группе В.В. Попова в СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. В частности, подтвержден плазмонный характер детекторного отклика транзисторной структуры с периодическим решеточным затвором и продемонстрировано, что использование узкощелевого решеточного затвора позволяет обеспечить более эффективное возбуждение плазменных колебаний в канале транзисторной структуры и увеличения чувствительности ТГц детектора на основе исследуемых структур.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Исполнитель - И.В. Кукушкин  
Тел. 8 (496) 522 2572



Первая глава носит обзорный характер. Приводятся теоретические основы детектирования терагерцового излучения структурами на основе полевого транзистора. Дан обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных детекторам терагерцового излучения различных типов. Также рассматриваются тенденции в исследованиях ТГц детекторов на основе НЕМТ, приводится вывод уравнений для чувствительности детектора, рассматриваются режимы считывания детектированного сигнала и приводится феноменологическое описание появления ТГц детектированного сигнала. Особое внимание уделяется оценкам эффективности согласования детектора на основе НЕМТ с терагерцовым излучением.

Вторая глава описывает технологию изготовления транзисторной структуры с узкощелевым решетчатым затвором и плотноупакованных массивов полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе наногетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs. Приводится физико-технологические обоснования конструкций детекторов ТГц излучения. Приведены схемы и методики измерения статических и фотоэлектрических характеристик детекторных транзисторных структур. Описывается методика измерения параметров транзисторных структур. Рассматривает влияние смещения поляризации в экспериментальной установке на выходные характеристики детекторов.

В третьей главе приводятся результаты исследований резонансного ТГц детектора на основе транзисторной структуры с узкощелевым решеточным затвором на основе наногетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs. Экспериментально исследовано явление плазмонной ТГц фотопроводимости в данной структуре. Данные экспериментов сравниваются с результатами теоретических расчетов группы Попова В.В. Продемонстрировано, что резонансный плазмонный отклик ТГц детектирования может значительно усиливаться в транзисторной структуре с узкощелевым решеточным затвором, что обусловлено сильной связью между падающим ТГц излучением и плазменными колебаниями в электронном канале транзисторной структуры. Эти результаты открывают возможности для значительного улучшения свойств плазмонных ТГц детекторов на основе транзисторных структур с решеточным затвором.

В четвертой главе приводятся результаты исследований ТГц фотоотклика плотноупакованного массива идентичных параллельно соединенных полевых транзисторов на основе наногетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs. Показано, что плотно упакованный одномерный массив полевых транзисторов с асимметричным затвором может использоваться как ТГц детектор с высокой чувствительностью без использования дополнительных антенных элементов. Короткопериодная решетка металлических контактных пальцев в массиве полевых транзисторов (ПТ) служит эффективной антенной, связывающей падающее ТГц излучение с каждым ПТ в массиве. Асимметричное расположение ножки затвора в каждом полевым транзисторе обеспечивает приложение ТГц напряжения между затворными и истоковыми контактами в каждом ПТ, что делает возможным получения сильного фотовольтаического отклика (без использования постоянного тока смещения в канале ПТ). Полученные результаты могут быть использованы для улучшения характеристик плазмонных ТГц детекторов.

В пятой главе экспериментально изучен фотовольтаический отклик нерезонансного ТГц детектора в виде цепочки последовательно соединенных плотноупакованных ПТ с асимметричным Т-образным затвором. Цепочка ПТ демонстрирует сильный ТГц фотовольтаический отклик из-за асимметричной формы Т-образного затвора в каждом ПТ в цепочке. Измеренная вольт-ваттная чувствительность цепочки последовательно соединенных ПТ составляет более 1 кВ/Вт в отсутствие постоянного тока смещения. Полученная эквивалентная мощность шума детектора составляет менее  $10^{-11}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> вследствие отсутствия тока смещения в канале ПТ и внешних



межсоединений между различными ПТ в цепочке. Плотная упаковка ПТ обеспечивает сильную связь детектора с падающим ТГц излучением без использования дополнительной антенны.

Наиболее интересными в работе представляются результаты, связанные с исследованием ТГц фотопроводимости полевого транзистора с узкощелевым периодическим решеточным затвором. Представляет интерес усиление связи падающего ТГц излучения и плазменного колебания в электронном канале. Также важным представляется непосредственная связь полученных результатов с возможными приложениями в области терагерцовой электроники.

Тема выполненной диссертационной работы является актуальной, поскольку непосредственно связана с бурно развивающейся в настоящее время областью знаний - терагерцовой электроникой. Проблеме создания элементной базы терагерцовой электроники сейчас уделяется большое внимание, как в России так и за рубежом. Результаты диссертации вносят значимый вклад в понимание физических принципов детектирования терагерцового излучения полупроводниковыми полевыми транзисторами.

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы в ИПТМ РАН, ФИАН им. Лебедева, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ИФТТ РАН и других организациях, связанных с исследованием низкоразмерных полупроводниковых гетероструктур.

Вместе с тем, необходимо отметить ряд недостатков, имеющих место в диссертационной работе. На протяжении всей работы оценка чувствительности и мощности эквивалентных шумов детекторов на базе ПТ производится из предположения, что на структуру приходится ТГц мощность пропорциональная площади самого ПТ. Этот способ оценки является ошибочным, поскольку не учитывает мощности излучения, которая поступает на структуру ПТ от окружающих металлических частей, например, металлических проводников микросварки. Проводники микросварки имеют миллиметровую длину, поэтому, безусловно, выступают в качестве эффективных антенн ТГц излучения. Очевидно, что автор диссертации осознает о существовании вышеупомянутой проблемы, поэтому планирует дополнительные эксперименты, где к полемому транзистору будет подключена антенная структура.

Также следует отметить, что большинство экспериментов диссертационной работы проведены на единичных структурах. А при попытке констатировать какую-либо зависимость автор ссылается на публикации других авторов, которые проводили свои эксперименты в других условиях и на других образцах. Такой подход особенно неприемлем в главе №3, где изучается терагерцовый отклик транзисторной структуры с узкощелевым решеточным затвором на основе наногетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs.

Кроме этого, хочется порекомендовать автору упомянуть в диссертации о результатах детектирования терагерцового излучения полевыми транзисторами на базе графена. Думается, что обсуждение работ на эту тему только украсило бы диссертацию, поскольку, во-первых, графен интенсивно исследуется в последние несколько лет и, во-вторых, многие свойства графена (рекордная подвижность носителей заряда, возможность создавать уникальные архитектуры структур) крайне интересны с точки зрения высокочастотных измерений.

Указанные недостатки не снижают высокой оценки диссертации Ермолаева Д.М., а могут лишь служить советом по улучшению стиля изложения и подаче полученных результатов. Представленная работа является оригинальным, тщательно выполненным и глубоким по содержанию исследованием. Результаты, полученные в диссертации, представляют в целом существенным вкладом в исследование детектирования терагерцового излучения

Исполнитель - И.В. Кукушкин

Тел. 8 (496) 522 2572



короткопериодными массивами полевых транзисторов на основе полупроводниковых наногетероструктур.

В целом, диссертационная работа Ермолаева Д.М. является самостоятельным и завершенным исследованием, выполненным на современном уровне. Результаты исследований опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах, представлены на многочисленных конференциях и хорошо известны научной общественности. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. По значимости и актуальности полученных результатов диссертационная работа Ермолаева Д.М. соответствует критериям, установленным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Доклад по диссертационной работе Ермолаева Д.М. заслушан и обсужден на семинаре «Спектроскопия полупроводников» в ИФТТ РАН. Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден на заседании Ученого Совета ИФТТ РАН

"8" июня 2015 г., протокол № 10.

Отзыв составил  
член-корреспондент РАН,  
доктор физ.-мат. наук,  
г.н.с. ИФТТ РАН

И.В. Кукушкин



15 июня 2015 г.

Директор ИФТТ РАН



В.В. Кведер

15 июня 2015 г.

Исполнитель - И.В. Кукушкин  
Тел. 8 (496) 522 2572