

На правах рукописи



Ермолаев Денис Михайлович

**Исследование детектирования терагерцового излучения
короткопериодными массивами полевых транзисторов
на основе наногетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs**

05.27.01 Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро-
и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Черноголовка-2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук.

Научные руководители:

кандидат технических наук, **Шаповал Сергей Юрьевич** (ИПТМ РАН);
доктор физико-математических наук, профессор, **Попов Вячеслав Валентинович** (СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН).

Официальные оппоненты:

Каган Мирон Соломонович, доктор физико-математических наук, профессор, ИРЭ РАН, заведующий лабораторией электронных процессов в полупроводниковых материалах;
Востоков Николай Владимирович, кандидат физико-математических наук, ИФМ РАН, научный сотрудник отдела технологии наноструктур и приборов.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук

Защита состоится «25» июня 2015 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.098.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики микроструктур Российской академии наук по адресу: 607680, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт микроструктур Российской академии наук.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2015 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор физико-математических
наук, профессор

_____ К.П. Гайкович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Непрерывное развитие технологии микро– и наноэлектроники привело элементную базу к освоению терагерцового диапазона частот (0,3-3 ТГц). Полевой транзистор может стать высокочувствительным, перестраиваемым по частоте терагерцовым детектором, работающим при различной температуре, включая комнатную температуру, что обуславливает огромный интерес мирового научного сообщества к данной тематике.

Значимость устройств, работающих на ТГц частотах, определяется шириной их практического применения: медицина и биология, повышенная скорость передачи информации, идентификация веществ, системы промышленной и антитеррористической безопасности, терагерцовая томография, астрофизика в других областях науки и техники.

Приложения ТГц излучения вытекают из важных свойств самого излучения и материалов в этом диапазоне:

- электромагнитные волны ТГц диапазона проникают сквозь мелкодисперсные безводные среды (пластмассы, бумага, текстильные материалы), но отражаются металлическими поверхностями;
- квант ТГц излучения $\sim 10^{-3} \div 10^{-2}$ эВ не является ионизирующим;
- частота ТГц излучения на порядок больше по сравнению с рабочей частотой существующей элементной базы, что может обеспечить передачу больших объемов информации.

Несмотря на это, ТГц технологии недостаточно развиты в особенности в части массовых применений. Для создания достаточно дешевых коммерчески доступных ТГц систем необходимы дальнейшие исследования. Развитие ТГц технологий затруднено, поскольку их рабочие частоты лежат в диапазоне между традиционными радиочастотной и оптической областями электромагнитного спектра. Как правило, ТГц компоненты показывали худшую эффективность по причине «технологического разрыва» между этими традиционными хорошо развитыми областями электромагнитного спектра, который обусловлен различными физическими принципами работы электронных и фотонных устройств.

На данный момент для детектирования ТГц излучения доступны широкополосные детекторы, такие как болометры, пироэлектрические датчики, диоды Шоттки, диоды на сверхрешетках и фотопроводящие детекторы. Эти детекторы используются в двух типах приемников: когерентные (гетеродинные) и некогерентные (прямого детектирования). Приемники в гетеродинных системах перекрывают только узкий спектральный диапазон (< 50 ТГц) вблизи частоты гетеродина. Практически все вышеуказанные детекторы являются достаточно медленными и поэтому непригодными для работы в системах реального времени. Все они обладают определенными недостатками в зависимости от физических принципов работы и имеют сравнительно высокую стоимость. Диоды Шоттки обладают

теми же самыми перспективами, что и полевые транзисторы, кроме возможности электрической подстройки к приему частоты.

Перспективным детектором ТГц излучения является полевой транзистор (ПТ) с высокой подвижностью электронов (НЕМТ). Оценки для реальных параметров полевых транзисторов показывают, что частоты плазменных возбуждений носителей заряда в канале транзистора находятся в ТГц диапазоне. Нелинейные свойства плазменных возбуждений (плазмонов) в двумерном электронном канале НЕМТ могут использоваться для детектирования ТГц излучения. Плазмонные НЕМТ ТГц детекторы могут работать в широком диапазоне ТГц частот при внешней окружающей температуре и показывают хороший баланс между чувствительностью и быстродействием. С использованием плазмонных НЕМТ можно реализовать как резонансный, так и нерезонансный режимы работы. Резонансный режим реализуется при $\omega = \omega_p$ и $\omega\tau \gg 1$, где ω – рабочая частота ТГц излучения, ω_p – частота плазмона и τ – характерное время релаксации импульса электрона в канале НЕМТ, и этот режим удастся получать в настоящее время только при криогенных температурах, в то время как нерезонансный режим детектирования ($\omega\tau \ll 1$) реализуется даже при комнатной температуре.

Степень разработанности темы исследования

Наряду с плазмонной нелинейностью, асимметрия граничных условий на истоковом и стоковом концах электронного канала НЕМТ является обязательными для получения детекторного отклика. В связи с этим для работы ТГц детектора на основе НЕМТ необходимо создавать в нем физическую или геометрическую асимметрию. Обычно, необходимая асимметрия создается путем асимметричного ввода ТГц излучения в канал НЕМТ (или со стороны истока или со стороны стока канала) или путем пропускания постоянного тока стока через канал транзистора.

Несмотря на то, что в полевом транзисторе с одним затвором не возникает серьезных проблем с созданием необходимой физической асимметрии за счет пропускания необходимого тока смещения, плазмонные детекторы на основе таких приборов имеют недостаточную чувствительность (менее 70 мВ/Вт*) из-за слабой связи плазмонов с ТГц излучением, так как длина электромагнитной волны этого диапазона (300 мкм на частоте 1 ТГц) значительно больше типичной длины (порядка единиц-десятков микрон) НЕМТ. В связи с этим практически привлекательную чувствительность плазмонных детекторов можно реализовать при использовании специальных антенных элементов для возбуждения плазмонов падающим ТГц излучением.

Помимо использования антенных элементов, другим возможным способом реализации связи плазмонных колебаний в канале транзистора с ТГц излучением, является изготовление пространственно развитой транзисторной структуры, состоящей из нескольких или множества элементарных транзисторных ячеек. Так например, в плазмонных детекторах

*Nadar S., Videlier H., Coquillat D., Teppe F., Sakowicz M., Dyakonova N., Knap W., Seliuta D., Kasalynas I., and Valusis G. Room temperature imaging at 1.63 and 2.54 THz with field effect transistor detectors // Journal of Applied Physics. – 2010. – V. 108. – P. 054508.

на основе ПТ с решеточным затвором большой площади (сравнимой с характерной площадью поперечного сечения сфокусированного пучка ТГц излучения) металлическая короткопериодическая (с периодом много меньшим длины волны ТГц излучения) решетка затворного электрода выполняет функцию эффективного антенного элемента. Однако чувствительность плазмонных детекторов на основе ПТ с решеточным затвором остается относительно невысокой (менее 10 мВ/Вт*), поскольку технологически затруднительно создать необходимую для получения детекторного отклика асимметрию в каждой элементарной ячейке ПТ с решеточным затвором. Существенное увеличение чувствительности ПТ с решеточным затвором путем пропускания постоянного тока смещения через электронный канал структуры также проблематично, поскольку сильный ток смещения создает большое падение напряжения в длинном канале структуры. В результате эффективное затворное напряжение в разных элементарных ячейках решеточной ПТ структуры оказывается существенно различным, что приводит к уменьшению суммарной чувствительности детектора. Поэтому для увеличения чувствительности ТГц детекторов на основе транзисторных структур с решеточным затвором необходимы другие подходы. Одним из таких методов являются уменьшение ширины щелей между металлическими полосками решеточного затвора и/или введение асимметрии в каждую элементарную ячейку в периодической транзисторной структуре.

Дополнительная антенна также не является необходимой, если идентичные НЕМТ располагаются в виде плотного массива, с апертурой, сравнимой с длиной волны ТГц излучения. Такой массив сам по себе служит в качестве эффективной ТГц антенны в силу сильной электромагнитной связи между различными НЕМТ в массиве. Для достижения необходимой чувствительности ТГц детектора на основе массива транзисторов необходимо тем или иным способом обеспечить асимметрию в каждой элементарной ячейке массива транзисторов.

Таким образом, актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью создания высокочувствительного, перестраиваемого по частоте ТГц детектора, работающего при различных температурах, включая комнатную температуру. Данная работа посвящена исследованию процессов резонансного и нерезонансного детектирования ТГц излучения короткопериодными транзисторными структурами.

Цели и задачи работы

Целью данной работы является разработка детекторов ТГц излучения на плазмонных колебаниях в AlGaAs/InGaAs/GaAs транзисторных структурах с короткопериодной верхней металлизацией и определение характеристик детекторов.

*Peralta X.G., Allen S.J., Wanke M.C., Wanke N.E., Harff A.D., Simmons J.A., Lilly M.P., Reno J.L., Burke P.J. and Eisenstein J.P. Terahertz photoconductivity and plasmon modes in double-quantum-well field-effect transistors // Applied Physics Letters. – 2002. – V. 81. – P. 1627.

Для достижения цели работы были поставлены и решены следующие задачи:

- 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 ТГц детекторов на основе короткопериодных транзисторных структур.

Научная новизна работы

Научная новизна работы состоит в следующих результатах:

- 1) Разработаны конструкции и маршруты изготовления короткопериодических транзисторных структур на основе наногетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs в качестве ТГц детекторов.
- 2) Изготовлены короткопериодные полевые транзисторные структуры на основе наногетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs в качестве ТГц детекторов. Структура для резонансного детектирования конструировалась как полевой транзистор с периодическим решеточным затвором и соотношением периода к ширине щели равным 10. Структуры для нерезонансного детектирования представляют собой плотноупакованные массивы ПТ и несимметричным затвором. Были изготовлены два вида массивов с параллельным и последовательным соединением элементарных ячеек.
- 3) Экспериментально получен резонансный детекторный отклик на частотах в диапазоне 0.4-0.7 ТГц с использованием ТГц детектора на основе транзисторной структуры с периодическим решеточным затвором. Максимумы отклика идентифицированы как возбуждение плазменных колебаний в двумерном электронном газе под затворным электродом. Выполнены оценки чувствительности и эквивалентной мощности шума детектора.
- 4) Экспериментально получен нерезонансный детекторный отклик на частоте ~ 0.6 ТГц при температуре 300 К с использованием ТГц детектора на основе плотноупакованных массивов ПТ. Выполнены оценки чувствительности и эквивалентной мощности шума детекторов.

Теоретическая значимость работы

Экспериментальные исследования детектирования ТГц излучения в транзисторной структуре с периодическим узкощелевым решеточным затвором, выполненные в настоящей работе, подтверждают теоретические результаты численного моделирования данного эффекта, полученные в

научной группе В.В. Попова в СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. В частности, экспериментально 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 этой структуры.

Практическая значимость работы

Продемонстрировано, что использование асимметричного затвора и плотная упаковка элементарных ячеек в массиве ПТ позволяет получить значительно более сильный ТГц детекторный фотоотклик как в режиме суммирования фототока, так и в режиме суммирования фотонапряжения соответственно при параллельном или последовательном электрическом соединении элементарных ПТ в массиве без использования дополнительных антенных элементов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в создании высокочувствительных ТГц НЕМТ детекторов резонансного и нерезонансного типа. На таких детекторах могут быть построены системы теравидения, ТГц спектроскопии и другие приборы для работы в ТГц диапазоне частот.

Результаты исследований детектирующих свойств массивов полевых транзисторов, полученные в данной работе, могут быть использованы для дальнейшего совершенствования плазмонных ТГц детекторов на основе ПТ с высокой подвижностью электронов. Различное (последовательное или параллельное) соединение ПТ в массиве позволяет суммировать фототок или фотоЭДС в массиве ПТ.

Одним из важных практических преимуществ ТГц детекторов на основе массивов ПТ является то, что их можно изготавливать в едином технологическом цикле по хорошо отработанной и сравнительно дешевой технологии изготовления транзисторных интегральных схем, поскольку процедура их изготовления совместима с изготовлением полевого транзистора.

Методология и методы исследования

Топология образцов прорисовывалась в программе AutoCAD. Измерения образцов проводились при комнатной, азотной и гелиевой температурах. Сигнал с детектора регистрировался в схеме синхронного детектирования. В установке использовалось следующее оборудование: генератор ТГц излучения с ЛОВ-74, программируемые источники постоянного напряжения/тока KEITHLEY 2400 SourceMeter, синхродетектор Unipan 232B и SRS RS570, вольтметр SRS SR830, осциллограф LeCroy 324A. Обработка результатов проводилась в программах OriginPro, MATLAB.

Положения, выносимые на защиту

1) Разработаны новые конструкции короткопериодных структур полевых транзисторов для детектирования терагерцового излучения:

- с широкоапертурным решеточным затвором с узкими щелями;
- массивы транзисторов с субмикронными асимметричными затворами.

2) В транзисторной структуре с узкощелевым (соотношение периода к ширине щели равно 10) короткопериодным решеточным затвором наблюдается существенное увеличение чувствительности (на один-два порядка величины) резонансного детектирования ТГц излучения (по сравнению со структурами с соотношением периода к ширине щели равным 2). Оценка минимального значения эквивалентной мощности шума, $8 \text{ нВт/Гц}^{1/2}$, дает улучшение на три порядка.

3) В плотноупакованном массиве параллельно соединенных ПТ с асимметричным затвором наблюдается фотовольтаический отклик на падающее ТГц излучение. Оценка вольт-ваттной чувствительности такого детектора дает 1 кВ/Вт при ампер-ваттной чувствительности детектора 50 мА/Вт .

4) В плотноупакованном последовательно соединенных ПТ с асимметричным затвором наблюдается фотоотклик на падающее терагерцовое излучение. Согласно оценке вольт-ваттная чувствительность детектора превышает 1 кВ/Вт без постоянного тока смещения и достигает величины 2 кВ/Вт в режиме постоянного тока смещения. Оценка минимального значения эквивалентной мощности шума дает $8 \text{ пВт/Гц}^{1/2}$.

Апробация и достоверность работы

Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается применением современного оборудования, достаточным количеством экспериментальных данных и применением современных методов обработки результатов. Все научные выводы в работе основаны на экспериментальных измерениях, проведенных с использованием общепризнанных аттестованных методик или методик, проверенных сопоставлением результатов экспериментов с известными экспериментальными данными других исследователей.

Результаты работы докладывались на 11 научных конференциях:

- 14-м, 15-м, 17-м и 18-м симпозиумах «Нанопизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, проходивших соответственно в 2010, 2011, 2013 и 2014 гг;
- 34th European Workshop On Compound Semiconductor Devices And Integrated Circuits WOCSDICE, Germany, Darmstadt, 2010;
- 38th European Workshop On Compound Semiconductor Devices And Integrated Circuits WOCSDICE, Greece, Delphi, 2014;
- 4 и 5-й Всероссийских конференциях молодых ученых "Микро-, нанотехнологии и их применение", г. Черноголовка, проходившие соответственно в 2010 и 2012 гг;
- Всероссийской конференции по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-2011, г. Петрозаводск, 2011;

- 2nd Russia-Japan-USA Symposium on the Fundamentals and Applied Problems of Terahertz Devices and Technologies (RJUS-2013), Moscow, 2013;
- 3rd Russia-Japan-USA Symposium on the Fundamentals and Applied Problems of Terahertz Devices and Technologies (RJUS-2014), USA, Buffalo, 2014.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 17 печатных работ, из которых 5 статей в журналах, включенных в библиографические базы Web of Science, Scopus и в перечень ВАК и 1 авторское свидетельство.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций по теме диссертационной работы и перечня используемой литературы.

Содержание диссертации изложено на 141 страницах и содержит 70 рисунков, 4 таблицы и 122 цитируемых источников информации включая 17 ссылок на работы автора.

Основное содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации и определены её цели. Сформулированы научная новизна, практическая ценность работы и положения, выносимые на защиту.

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. В разделе 1.1 делается обзор всех существующих твердотельных детекторов терагерцового излучения, приводятся рекордные характеристики, достигнутые на сегодняшний день, а также приводятся эксплуатационные особенности работы детекторов. В разделе 1.2 приводится вывод основных уравнений и результатов, используемых для анализа работы терагерцовых детекторов на основе полевых транзисторов. В последующих разделах рассматриваются вопросы резонансного и нерезонансного ТГц отклика, рассматривается задача с точки зрения оптики, влияния структуры самого транзистора, тока смещения, температуры на ТГц отклик. 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. Разработаны маршруты изготовления образцов с помощью технологического процесса совместимого с НЕМТ технологией. Изготовленные образцы представляют собой транзисторные структуры на основе псевдоморфных наногетероструктур AlGaAs/InGaAs с периодической верхней металлизацией с периодом на один-два порядка меньшим длины волны детектируемого ТГц излучения. Исследуемая транзисторная структура с узкощелевым периодическим решеточным затвором с периодом 3 мкм, шириной щели 0,3 мкм и площадью $2 \times 2 \text{ мм}^2$ предназначена для исследования резонансного детектирования ТГц излучения. Изготовлены массивы параллельно и последовательно соединенных НЕМТ с периодом 17,8 мкм и несимметричным Т-образным затвором с длиной ножки затвора 0,23 мкм предназначены для исследования нерезонансного детектирования. Массив с параллельным соединением транзисторов насчитывает 192 элементарных ячеек, а в массиве с последовательно соединенными транзисторами имеется 4 элементарных ячейки. Несимметричный Т-образный затвор изготавливается путем смещения ножки затвора к истоку.

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. Все измерения были выполнены при температуре жидкого гелия $T = 4,2 \text{ К}$. Пороговое затворное напряжение обеднения канала составляет около $U_{th} = -1 \text{ В}$.

Терагерцовое облучение образца изменяет темновое сопротивление канала ρ_0 на величину фотосопротивления $\delta\rho$. Фиксированный ток смещения $I_d = I_0$ пропускаться между истоком и стоком при заземленном контакте истока (используемая величина тока смещения $I_0 = 0,5 \text{ мА}$ значительно меньше, чем ток насыщения в канале ПТ). Затворное напряжение, U_g , прикладывалось между контактами решеточного затвора и истока. Изменение падения напряжения, δU_d в канале транзисторной структуры, вызываемое ТГц облучением образца, измерялось как функция напряжения на решеточном затворе с помощью стандартной методики синхронного детектирования. В режиме фиксированного тока смещения стока, фотоотклик сток-исток пропорционален ТГц фотосопротивлению $\delta\rho$: $\delta U_d = I_0(\delta\rho)$.

Рисунок 1а показывает зависимость фотоотклик сток-исток от затворного напряжения для пяти различных частот падающего излучения.

Для меньших частот, пики отклика появляются при затворных напряжениях более близких к пороговому напряжению обеднения канала транзисторной структуры.

Вычисляя отношение пикового значения фотоотклика сток-исток, $\delta U_d \approx 4$ мкВ к величине мощности, падающей на детектор ТГц, получаем вольт-ваттную чувствительность $R_V = 280$ мВ/Вт. Полученная чувствительность на два порядка величины больше, чем сообщалось ранее другими авторами для транзисторной структуры с соотношением периода к ширине щелей решеточного затворного электрода равным 2 (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительные характеристики плазмонных резонансных детекторов с решеточным затвором

ссылка	период/щель	μ , м ² /В·с	T, К	I _d , мА	R _V , мВ/Вт	NEP, нВт/Гц ^{1/2}
*	2	170	25	0,1	0,89	6000
**	2	500	20	0,1	<1	-
исследуемый детектор	10	3	4	0,5	280	8,2

* Peralta X. G., Allen S.J., Wanke M.C., Wanke N.E., Harff A.D., Simmons J.A., Lilly M.P., Reno J.L., Burke P.J., Eisenstein J.P. Terahertz photoconductivity and plasmon modes in double-quantum-well field-effect transistors // Applied Physics Letters. – 2002. – V. 81. - P. 1627.
 ** Shaner E.A., Mark Lee, Wanke M.C., Grine A.D., Reno J.L., Allen S.J. Single-quantum-well grating-gated terahertz plasmon detectors // Applied Physics Letters. - 2005. - V. 87. - P. 193507.

Такой гигантский рост чувствительности объясняется значительным усилением связи между падающим терагерцовым излучением и плазменными колебаниями в транзисторной структуре с узкощелевым решеточным затвором.

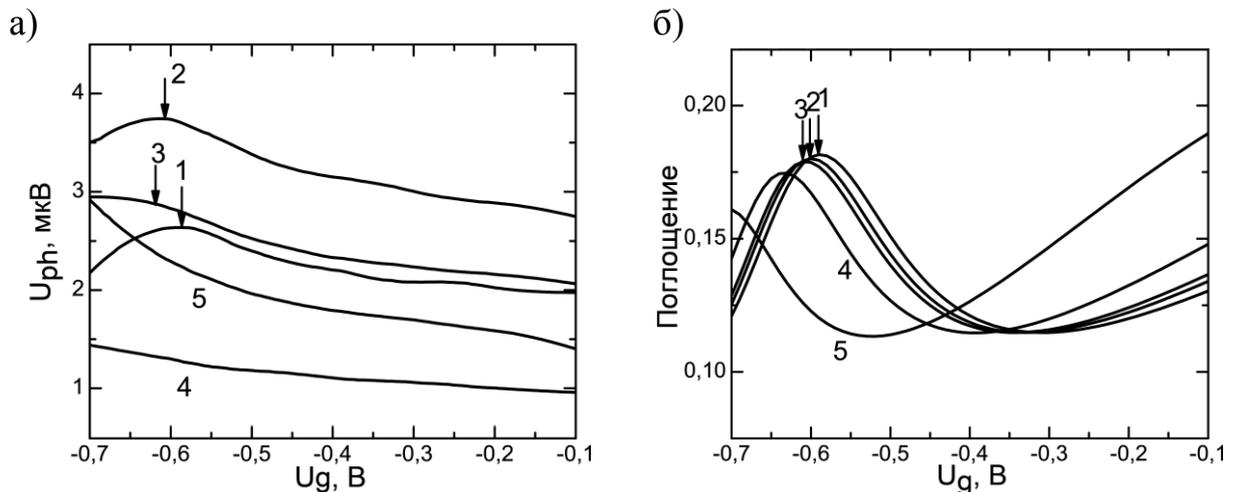


Рисунок 1 – а) Зависимость фотоотклика сток-исток детектора от затворного напряжения на различных частотах; б) Вычисленное поглощение терагерцового излучения в детекторе как функция затворного напряжения (стрелки показывают положение плазмонных резонансов); частоты: 697 ГГц (кривая 1), 688 ГГц (кривая 2), 682 ГГц (кривая 3), 659 ГГц (кривая 4) и 593 ГГц (кривая 5)

Теоретическое моделирование взаимодействия между падающим ТГц излучением и плазменными колебаниями в исследуемой структуре было выполнено с использованием самосогласованного электродинамического подхода.* Профиль периодически модулированной равновесной двумерной плотности электронов в канале вычислялся как функция затворного напряжения, U_g в рамках самосогласованного электростатического метода. Единственным подгоночным параметром, используемым при численном моделировании, являлось значение подвижности электронов в канале транзисторной структуры, которое принималось равным $30\,000\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ для наилучшего совпадения теоретических результатов с экспериментальными данными. Рисунок 1б показывает зависимость вычисленного коэффициента поглощения ТГц излучения в исследуемой транзисторной структуре с узкощелевым решеточным затвором от затворного напряжения для пяти ТГц частот, используемых при измерениях ТГц фотопроводимости.

Пики поглощения соответствуют возбуждению второй плазмонной моды (с волновым вектором плазмона $k_2 = 4\pi/L$) в исследуемой структуре. Положение и форма линий резонансов поглощения в рисунке 1б соответствуют положению и форме линий соответствующих пиков фотоотклика на рисунке 1а. Поэтому можно идентифицировать наблюдаемые пики ТГц фотоотклика с плазмонным откликом в канале исследуемой транзисторной структуры. Пики резонансов слабо выражены на кривых 4 и 5 на рисунке 1а, поскольку они сливаются с более сильным нерезонансным откликом при значениях затворного напряжения близких к пороговому напряжению обеднения канала.

Измеренное значение чувствительности позволяет оценить эквивалентную мощность шума детектора. Эквивалентная мощность шума (NEP) определяется как $NEP = N/R_V$, где N - шум детектора, $V/\sqrt{\Gamma_{\text{ш}}}$ и R_V - чувствительность детектора, В/Вт.

При низких температурах ($T < 20\text{ К}$), тепловой шум значительно меньше, чем дробовой шум при $I_0 = 0,5\text{ мА}$. Дробовой шум оценивается по формуле $N = \rho_0(2eI_0)^{1/2}$, где ρ_0 – темновое сопротивление канала, e – заряд электрона, и I_0 – темновой ток. Темновое сопротивление детектора составляет около $\rho_0 = 180\text{ Ом}$. Следовательно $NEP \approx 8,2 \times 10^{-9}\text{ В}/\sqrt{\Gamma_{\text{ш}}}$. Это значение эквивалентной мощности шума значительно меньше, чем соответствующие значение $NEP = 6 \times 10^{-6}\text{ Вт}/\sqrt{\Gamma_{\text{ш}}}$ (таблица 1) для плазмонного терагерцового детектора на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs с соотношением периода решеточного затвора к ширине щели равным 2.

Таким образом, в настоящей работе продемонстрировано, что резонансный плазмонный отклик ТГц детектирования может значительно усиливаться в транзисторной структуре с узкощелевым решеточным затвором, что обусловлено сильной связью между падающим ТГц

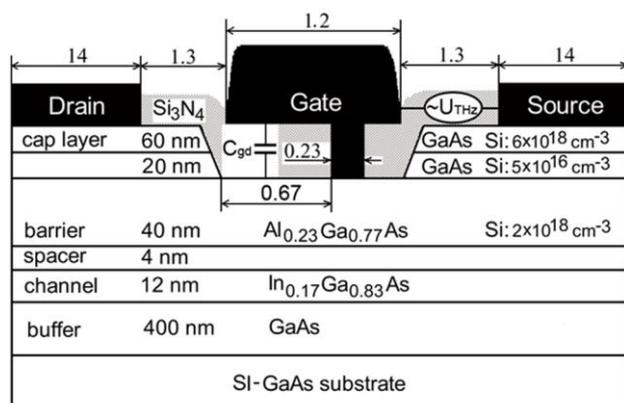
*Фатеев Д.В., Попов В.В., Shur M.S. Трансформация плазмонного спектра в транзисторной структуре с решеточным затвором и пространственно-модулированным двумерным электронным каналом // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44. – В. 11. – С. 1455-1462.

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. Несмотря на то, что полученные значения чувствительности и эквивалентной мощности шума ТГц плазмонных детекторов на основе транзисторных структур со щелевым решеточным затвором уступают аналогичным характеристикам имеющихся некогерентных детекторов, дальнейшая оптимизация устройства наряду с возможностью электрической перестройки рабочей частоты детектирования ТГц плазмонного детектора с решеточным затвором может обеспечить практическое применение таких устройств.

В четвертой главе приводятся результаты исследований ТГц фотоотклика плотноупакованного массива идентичных параллельно соединенных полевых транзисторов на основе наногетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs. Схематический вид индивидуального ПТ в массиве приведен на рисунке 2а.

Приводятся результаты экспериментальных исследований ТГц нерезонансного детектирования с использованием такого детектора. Зависимость измеряемого фототока от затворного напряжения U_g на частоте 0,587 ТГц показана на рисунке 2б для двух значений температуры $T=77$ К и $T=300$ К. На данном рисунке также приведена зависимость проводимости канала транзисторной структуры от затворного напряжения.

а)



б)

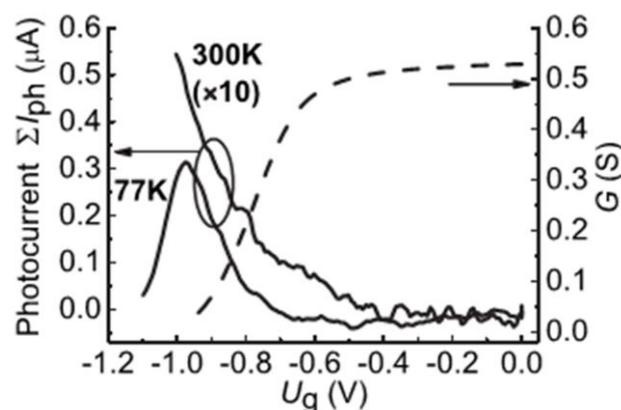


Рисунок 2 – а) Схематический вид индивидуального ПТ в массиве; б) Терагерцовый фототок при двух различных температурах (сплошные линии) и проводимость исток-сток (пунктирная линия) массива параллельно соединенных ПТ как функция затворного напряжения

Различные полевые транзисторы в массиве взаимодействуют электромагнитным образом, но они развязаны электрически, поскольку электронные каналы различных полевых транзисторов изолированы друг от друга. Следовательно, фототок I_{ph} генерируется в каждом полевом транзисторе независимо от других полевых транзисторов в массиве. Так как

все полевые транзисторы в массиве соединены параллельно, измеряемый фототок I_{ph} является суммой фототоков, генерируемых в каждом полевом транзисторе. Вычисляя отношение измеряемого фототока к мощности ТГц излучения, падающего на всю площадь массива полевых транзисторов $3,6 \times 0,075 \text{ мм}^2$, можно оценить ампер-ваттную чувствительность массива полевых транзисторов как $0,3 \text{ А/Вт}$ при $T=77 \text{ К}$ и $0,05 \text{ А/Вт}$ при $T=300 \text{ К}$ при $U_g=-1 \text{ В}$. Проводимость массива параллельно соединенных транзисторов при $U_g=-1 \text{ В}$ равна $G=0,01 \text{ См}$ (при $T=300 \text{ К}$). Это дает вольт-ваттную чувствительность всего массива 5 В/Вт при $T=300 \text{ К}$, что соответствует вольт-ваттной чувствительности 960 В/Вт на каждый транзистор (последняя определяется как отношение между фотонапряжением генерируемым каждым транзистором и величиной ТГц мощности, падающей на площадь одного транзистора).

Так как ножка Т-образного затвора сдвинута к контакту истока в каждом полевом транзисторе, то переменное напряжение U_{THz} индуцируемое ТГц излучением на металлических контактах, прикладывается главным образом между контактами затвора и истока в каждом полевом транзисторе, поскольку стоковый конец электронного канала шунтируется большой емкостью C_{gd} между козырьком шляпки затвора и каналом (рисунок 2а). За счет этого обеспечивается электрическая асимметрия каждого транзистора, необходимая для получения сильного фотовольтаического отклика.

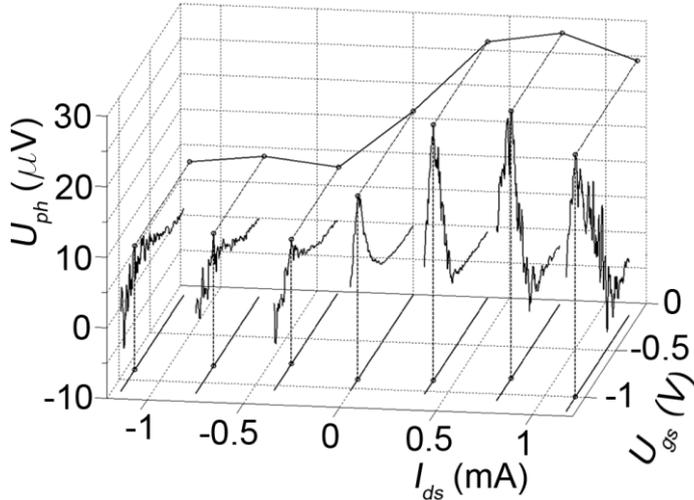
Таким образом, плотно упакованный одномерный массив полевых транзисторов с асимметричным затвором может использоваться как ТГц детектор с высокой чувствительностью без использования дополнительных антенных элементов. Короткопериодная решетка металлических контактных пальцев в массиве ПТ служит эффективной антенной, связывающей падающее ТГц излучение с каждым ПТ в массиве. Асимметричное расположение ножки затвора в каждом полевом 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 приводятся результаты экспериментальных исследований ТГц фотоотклика плотноупакованной цепочки из 4-х ПТ на основе наногетероструктур $\text{AlGaAs/InGaAs/GaAs}$, соединенных последовательно. Схематический вид каждого индивидуального ПТ в цепочке показан на рисунке 2а. Напряжение отсечки канала равняется около $U_{th} = -0,9 \text{ В}$. Измерения проводились на фиксированной частоте 615 ГГц . Мощность ТГц излучения, падающего на площадь образца $50 \times 90 \text{ мкм}^2$ составляла 15 нВт . Электрическое поле падающей ТГц волны было поляризовано поперек полосок затворных электродов ПТ. Фотонапряжение U_{ph} измерялось как изменение падения напряжения через большое нагрузочное сопротивление $R_L = 300 \text{ кОм}$, соединенное последовательно с сопротивлением сток-исток цепочки ПТ. Контакт истока заземлялся, и

затворное напряжение было приложено между контактами затвора и истока. Измерения сигнала фотонапряжения выполнялись с использованием стандартной техники синхронного детектирования. Все измерения проводились при комнатной температуре $T = 300$ К.

На рисунке 3а показана зависимость ТГц фотонапряжения U_{ph} от затворного напряжения и постоянного тока смещения стока в цепочке ПТ.

а)



б)

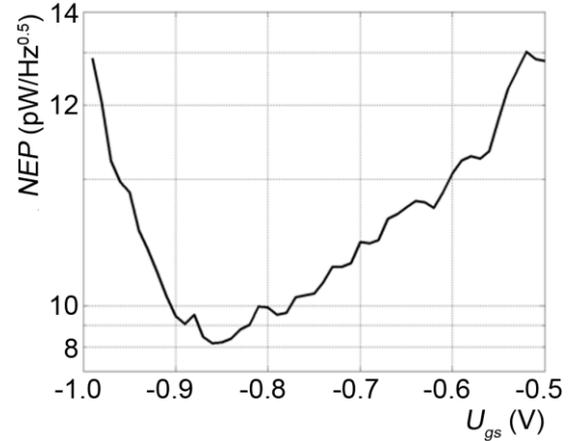


Рисунок 3 – а) Зависимость ТГц фотонапряжения U_{ph} от затворного напряжения и тока смещения стока. Показаны проекции кривых фотонапряжения на плоскости $(I_{ds} - U_{gs})$ и $(U_{ph} - U_{gs})$; б) NEP детектора на основе цепочки ПТ в зависимости от затворного напряжения при $I_{ds} = 0$

В отсутствие постоянного тока смещения стока шум детектора полностью определяется тепловыми шумами. Поэтому NEP детектора может быть вычислена как $NEP = \sqrt{4k_B T r_{D-S}} / R_V$, где k_B – постоянная Больцмана, T – рабочая температура, и r_{D-S} – сопротивления сток-исток цепочки ПТ. Минимальное значение $NEP = 8 \times 10^{-12}$ Вт/Гц^{1/2} достигается при затворном напряжении $U_{gs} = -0,86$ В (рисунок 3б).

Фотонапряжение (рисунок 3а) достигает максимума вблизи напряжения отсечки канала ПТ $U_{gs} \approx U_{th} = -0,9$ В. Фотонапряжение резко уменьшается при отрицательном постоянном токе смещения (направленном от истока к стоку). Однако максимальное значение фотонапряжения растет с увеличением положительного тока смещения стока, достигая насыщения с дальнейшим падением при силе тока смещения $I_{ds} \approx 1$ мА, соответствующем значению электронной скорости насыщения в канале ПТ. Эти результаты могут быть интерпретированы следующим образом. Поскольку добротность плазменных колебаний в канале ПТ равняется $\omega\tau \approx 0,8$ при комнатной температуре на рабочей частоте $\omega/2\pi = 615$ ГГц, имеет место нерезонансное

ТГц детектирование. Поскольку скорость плазмона $s = \sqrt{e(U_{gs} - U_{th})/m}$ (где e и m – соответственно заряд электрона ($e > 0$) и его эффективная масса) достаточна мала вблизи обеднения канала ПТ, длина распространения

плазмона $L_0 = s\sqrt{\tau/\omega}$ меньше, чем длина затвора $L_g = 230$ нм в каждом ПТ из цепочки. Следовательно, имеет место нерезонансное плазмонное детектирование в режиме длинного канала. Вольт-ваттную чувствительность ТГц детектора на основе цепочки ПТ оценивалась как $R_V = U_{ph}/P_{in}$, где $P_{in} = 15$ нВт – мощность ТГц излучения, падающего на площадь цепочки ПТ, что дает $R_V \approx 1,1$ кВ/Вт при $I_{ds} = 0$. Поскольку вольт-ваттная чувствительность не зависит от числа последовательно соединенных ПТ (т.к., фотоЭДС растет пропорционально числу ПТ в цепочке), вольт-ваттная чувствительность каждого ПТ в цепочке также равна 1,1 кВ/Вт. Измеренное значение вольт-ваттной чувствительности хорошо согласуется с соответствующим значением, вычисленным в главе 3 диссертации на основе измерения ампер-ваттной чувствительности массива параллельно соединенных ПТ. Заметим, что плотноупакованная цепочка даже 4 ПТ с суммарной длиной всего 90 мкм (т.е. короче, чем половина длины волны ТГц излучения на рабочей частоте детектора 615 ГГц) обеспечивает сильную связь детектора с падающим ТГц излучением. Этот факт делает плотноупакованную цепочку нескольких ПТ перспективным ТГц детектором для использования в качестве пикселей в матричных фотоприемниках ТГц систем видеоизображения, поскольку в этом случае отпадает необходимость в дополнительных антенных элементах в каждом пикселе.

Несмотря на то, что чувствительность возрастает с увеличением положительного постоянного тока смещения стока (рисунок 3а) примерно в два раза, режим работы детектора без тока смещения является более предпочтительным вследствие меньших шумов и меньшего потребления энергии детектором. Был экспериментально исследовано ТГц фотонапряжение в цепочке электромагнитно несвязанных ПТ соединенных последовательно внешними проводами (разреженный массив ПТ).* Заметим, что значение вольт-ваттной чувствительности, полученное в указанной статье в режиме пропускания постоянного тока смещения, на порядок величины меньше, чем значение чувствительности, полученное в данной работе без тока смещения, в то время как NEP на порядок величины меньше при нулевом токе смещения стока. Преимущества предложенного и исследованного в данной диссертации ТГц детектора на основе плотноупакованных массивов ПТ являются результатом его следующих характерных особенностей:

(I) асимметричная форма Т-образного затворного контакта в каждом ПТ значительно усиливает фотовольтаический отклик детектора даже при нулевом токе смещения;

(II) различные ПТ в массиве связаны ближними электромагнитными полями вследствие плотной упаковки ПТ, что обеспечивает сильную связь детектора с падающим ТГц излучением без использования дополнительных антенных элементов и (III) изготовление цепочки ПТ на одном кристалле

* Elkhatib T. A., Kachorovskii V. Y., Stillman W. J., Veksler D. B., Salama K. N., Zhang X.-C., and Shur M. S. Enhanced plasma wave detection of terahertz radiation using multiple high electron-mobility transistors connected in series // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2010. – V. 58. – I. 2. – P. 331-339.

позволяет избежать использования внешних проводов для соединения различных ПТ.

В заключении приведены основные научные результаты:

1. Изготовлены ТГц детекторы в виде короткопериодных ПТ структур на основе наногетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs. Структура для резонансного детектирования представляет собой ПТ с периодическим решеточным затвором площадью 2×2 мм² с периодом 3 мкм и шириной щели решетки затвора 0,3 мкм (соотношение периода к ширине щели равно 10). Структуры для нерезонансного детектирования представляют собой плотноупакованные массивы ПТ с периодом 17,8 мкм и несимметричным затвором. Изготовлены два вида массивов с параллельным (всего 192 элемента) и последовательным (всего 4 элемента) соединением элементарных ячеек.

2. Экспериментально исследован эффект ТГц фотопроводимости ПТ с периодическим решеточным затворным электродом. Показано, что резонансный плазмонный отклик ТГц детектирования в такой структуре может значительно усиливаться при узкощелевом решеточным затворе, что обусловлено сильной связью между падающим ТГц излучением и плазменными колебаниями в электронном канале транзисторной структуры с узкощелевым решеточным затвором. Минимального значение эквивалентной мощности шума равняется $8 \text{ нВт/Гц}^{1/2}$ при чувствительности 280 мВ/Вт.

3. Экспериментально изучен фотовольтаический отклик нерезонансного ТГц детектора в виде массива параллельно соединенных плотноупакованных ПТ с асимметричным Т-образным затвором на частоте 0,6 ТГц при температурах 300 и 77 К. ФотоЭДС возникает за счет асимметричной формы затвора, в результате чего переменное напряжение, наводимое падающим ТГц излучением, прикладывается преимущественно между истоком и затвором. Ампер-ваттная чувствительность массива параллельно соединенных плотноупакованных ПТ составляет 50 мА/Вт, что соответствует вольт-ваттной чувствительности каждого единичного транзистора в массиве около 1 кВ/Вт.

4. 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 $10^{-11} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$ 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.

Перечень публикаций автора по теме диссертации

1. Маремьянин К.В., Ермолаев Д.М., Фатеев Д.В., Морозов С.В., Малеев Н.А., Земляков В.Е., Гавриленко В.И., Попов В.В., Шаповал С.Ю. Широкоапертурный детектор терагерцового излучения на основе транзисторной структуры GaAs/InGaAs со щелевым решеточным затвором // Письма в Журнал технической физики. - 2010. – Т. 36. - Вып. 8. – С. 39-47.
2. Popov V.V., Ermolaev D.M., Maremyanin K.V., Maleev N.A., Zemlyakov V.E., Gavrilenko V.I., Shapoval S.Yu. High-responsivity terahertz detection by on-chip InGaAs/GaAs field-effect-transistor array // Applied Physics Letters. – 2011. – V. 98. - № 153504.
3. Yermolaev D.M., Maremyanin K.M., Fateev D.V., Morozov S.V., Maleev N. A., Zemlyakov V. E., Gavrilenko V. I., Shapoval S. Yu., Sizov F.F., Popov V.V. Terahertz detection in a slit-grating-gate field-effect-transistor structure // Solid-State Electronics. – 2013. – V. 86. - P. 64-67.
4. Popov V.V., Yermolaev D.M., Maremyanin K.V., Zemlyakov V.E., Maleev N.A., Gavrilenko V.I., Bepalov V.A., Yegorkin V.I., Ustinov V.M., Shapoval S.Yu. Detection of terahertz radiation by tightly concatenated InGaAs field-effect transistors integrated on a single chip // Applied Physics Letters.-2014. – V. 104. - № 163508.
5. Земляков В.Е., Егоркин В.И., Шаповал С.Ю., Ермолаев Д.М. Детектор субтерагерцового диапазона на основе последовательно соединенных полевых транзисторов // Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы. - 2014. - № 2014630108.
6. Yermolaev D.M., Maremyanin K. M., Maleev N. A., Zemlyakov V. E., Gavrilenko V. I., Popov V. V., Shapoval S. Yu. Terahertz detector with series connection of asymmetric gated transistor // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. - V. 486. - № 012016.