

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем микроэлектроники и особочистых материалов
Российской академии наук**

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 нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научные руководители:
кандидат технических наук
Шаповал Сергей Юрьевич;
доктор физико-математических наук
Попов Вячеслав Валентинович

Черноголовка-2015

Оглавление

Перечень сокращений	4
1 Детектирование терагерцового излучения полевыми транзисторами (обзор литературы)	17
1.1 Существующие терагерцовые детекторы	17
1.2 Базовые уравнения описания плазменных возбуждений в транзисторной структуре.....	28
1.3 Уравнения для описания резонансного отклика.....	32
1.4 Уравнения для описания нерезонансного отклика.....	34
1.5 Оптические характеристики	36
1.6 Влияние структуры транзистора на терагерцовый отклик	39
1.7 Влияние тока смещения в канале на терагерцовый отклик	43
1.8 Влияние температуры на терагерцовый отклик	45
1.9 Чувствительность терагерцового детектора на основе полевого транзистора.....	47
1.10 Фототоковый/фотовольтаический режимы работы терагерцового детектора на основе НЕМТ	54
1.11 Феноменология детектирования ТГц излучения на основе НЕМТ	56
1.12 Выводы по разделу	59
2 Изготовление детекторов и описание методик измерения	60
2.1 Разработка конструкции плазмонного детектора с решеточным затвором	60
2.2 Разработка конструкции детекторов на основе массивов транзисторов.....	63
2.3 Изготовление транзисторных структур	64
2.3.1 Наногетероструктура в основе транзисторных структур	64
2.3.2 Изготовление образцов транзисторной структуры с узкошелевым решеточным затвором	65
2.3.3 Изготовление образцов транзисторных структур с плотной упаковкой элементарных ячеек в виде полевых транзисторов	74
2.4 Методики измерений	84
2.4.1 Подготовка образцов к измерениям терагерцового отклика.....	84

2.4.2 Измерения терагерцового отклика транзисторной структуры с узкощелевым решеточным затвором и массива последовательно соединенных полевых транзисторов.....	87
2.4.3 Измерениям терагерцового отклика массива параллельно соединенных транзисторов.	91
2.5 Зависимость ТГц отклика от поляризации излучения	94
2.6 Выводы по главе	98
3 Терагерцовый фотоотклик транзисторной структуры с узкощелевым короткопериодным решеточным затвором	100
3.1 Экспериментальные результаты исследований терагерцового отклика транзисторной структуры с узкощелевым короткопериодным решеточным затвором	100
3.2 Анализ исследований терагерцового отклика транзисторной структуры с узкощелевым короткопериодным решеточным затвором	108
3.3 Результаты исследований терагерцового отклика транзисторной структуры с узкощелевым короткопериодным решеточным затвором	109
4 Фотоотклик плотноупакованного массива параллельно соединенных полевых транзисторов на терагерцовое излучение	111
4.1 Исследование терагерцового отклика плотноупакованного массива параллельно соединенных полевых транзисторов.....	111
4.2 Анализ исследований терагерцового отклика плотноупакованного массива параллельно соединенных полевых транзисторов.....	113
4.3 Выводы по главе 4	115
5 Фотоотклик цепочки полевых транзисторов на терагерцовое излучение.....	116
5.1 Исследование терагерцового отклика плотноупакованного массива последовательно соединенных полевых транзисторов.....	116
5.2 Анализ исследований терагерцового отклика плотноупакованного массива последовательно соединенных полевых транзисторов.....	120
5.3 Выводы по главе 5	123
Заключение.....	124
Перечень публикаций автора по теме диссертации.....	126
Список цитируемой литературы	130

Перечень сокращений

- 2МЭС – двумерная электронная система;
- ВАХ – вольтамперная характеристика;
- ИК – инфракрасный;
- ЛОВ – лампа обратной волны;
- ЛСЭ – лазер на свободных электронах;
- МИС – монолитная интегральная схема;
- ПТ – полевой транзистор;
- ПФК – плазменный фотонный кристалл;
- СВЧ – сверхвысокие частоты;
- СИС – сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник;
- ТГц – терагерцовый;
- 2DEG – two-dimensional electron gas (двумерный электронный газ);
- CMOS – complementary metal–oxide–semiconductor (комплементарная логика на транзисторах металл-оксид-полупроводник);
- DTGS – deuterated triglycine sulfat;
- FET – field effect transistor (полевой транзистор);
- FPA – focal plane array (матричное фотоприемное устройство);
- НВТ – heterojunction bipolar transistor (биполярный гетеротранзистор);
- НЕВ – hot electron bolometer (болومتر на горячих электронах);
- НЕМТ – high electron mobility transistor (транзистор с высокой подвижностью электронов);
- IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.;
- MOSFET – metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (канальный полевой униполярный МОП-транзистор);
- NEP – noise equivalent power (эквивалентная мощность шума).

Введение

Непрерывное развитие технологии микро– и нанoeлектроники 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 [1-8], что обуславливает огромный интерес мирового научного сообщества к данной тематике.

Значимость устройств, работающих на ТГц частотах, определяется широтой 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 из-за «технологического разрыва» между этими традиционными

хорошо развитыми областями электромагнитного спектра из-за различных физических принципов 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 ГГц) 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 [2] 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 [3]. Нелинейные свойства плазменных возбуждений (плазмонов) в двумерном электронном канале НЕМТ могут использоваться для детектирования ТГц излучения [1]. Плазмонные НЕМТ ТГц детекторы могут работать в широком диапазоне ТГц частот при внешней окружающей температуре и показывают хороший баланс между чувствительностью и быстродействием [9, 10]. 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 удается получать в настоящее время только при криогенных температурах, в то время как

нерезонансный режим детектирования ($\omega\tau \ll 1$) реализуется даже при комнатной температуре.

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 [1, 3]. Обычно, необходимая асимметрия создается путем асимметричного ввода ТГц излучения в канал НЕМТ (или со стороны истока или со стороны стока канала) [11] или путем пропускания постоянного тока стока через канал транзистора [12].

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 [7]) 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 [8].

Другим способом реализации связи плазмонных колебаний в канале транзистора с ТГц излучением, помимо использования антенных элементов, является изготовление пространственно развитой транзисторной структуры, состоящей из нескольких или множества элементарных транзисторных ячеек. Так например, в плазмонных детекторах 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 [6]), 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 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 [13]. 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.

Цель диссертационной 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.

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

Научная новизна работы состоит в следующих результатах, полученных впервые:

- 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 площади $2 \times 2 \text{ мкм}^2$ 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. Были изготовлены два вида массивов с параллельным (всего 192 элемента) и последовательным (всего 4 элемента) 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.

Научная и практическая значимость работы:

- показано, что при уменьшении ширины щелей в транзисторной структуре с решеточным затвором можно добиться более эффективного возбуждения плазменных колебаний в электронном канале транзисторной структуры и увеличения чувствительности ТГц детектора на основе этой структуры;
- 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. К преимуществам данных детекторов можно отнести то, что их можно изготавливать в едином технологическом цикле с помощью стандартной НЕМТ технологии.

Положения, выносимые на защиту

1) Разработаны 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, $8 \text{ нВт/Гц}^{0.5}$, 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 $8 \text{ пВт/Гц}^{0.5}$.

Личный вклад автора

Работы были выполнены Д.М. Ермолаевым совместно с коллективом авторов из ИПТМ РАН, СО ИРЭ РАН, ИФМ РАН, ФТИ РАН и ИФП НАН.

Выбор направления исследования и постановка задачи выполнялась Д.М. Ермолаевым.

Разработка конструкции выполнялось В.В. Поповым и Д.М. Ермолаевым. Маршруты изготовления транзисторных структур разрабатывались С.Ю. Шаповалом и Д.М. Ермолаевым. Разработка электронного файла для изготовления фотошаблонов и проведения электронной литографии выполнялось Ермолаевым Д.М.

Подготовка образцов и экспериментальные измерения проводились Д.М. Ермолаевым и К.В. Маремьяниным. Обработка экспериментальных результатов выполнялась Д.М. Ермолаевым.

Анализ полученных результатов выполнялся Д.М. Ермолаевым и В.В. Поповым.

Непосредственное участие коллег автора в проведенных исследованиях отражено в виде их соавторства в публикациях.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на следующих 11 научных конференциях:

- 14-м, 15-м, 17-м и 18-м симпозиумах «Нанофизика 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 значимость 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.

Во второй главе описана технология изготовления транзисторной структуры с узкощелевым решетчатым затвором и плотноупакованных массивов полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе наногетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs и излагаются методики их измерения. В разделе 2.1 описывается технологический маршрут изготовления транзисторных структур. В разделе 2.2 приводятся методики измерений и описание технологического процесса подготовки к ним.

В третьей главе приводятся результаты исследований резонансного терагерцового детектора на основе транзисторной структуры с узкощелевым решеточным затвором на основе AlGaAs/InGaAs/GaAs. Полученные экспериментальные данные сравниваются с результатами теоретических расчетов. Чувствительность такого терагерцового детектора превышает ранее сообщаемую чувствительность аналогичного детектора с более широкими щелями решеточного затвора на два порядка величины, что обусловлено

усилением связи между входящим терагерцовым излучением и плазмонными колебаниями в структуре транзистора. NEP уменьшается соответствующим образом на 3 порядка величины. Анализ показывает, что рекордные величины достигаются за счет значительного усиления ближнего поля в узких щелях в решеточном затворе. В разделе 3.1 описаны полученные экспериментальные зависимости: статические характеристики и плазмонный резонансный отклик детектора на падающее терагерцовое излучение. В разделе 3.2 проводится аналитический разбор особенностей детектирования терагерцового излучения изготовленным образцом. В разделе 3.3 сформулирована научная новизна исследований.

В четвертой главе приводятся результаты исследований терагерцового фотоотклика плотноупакованного массива параллельно соединенных полевых транзисторов на основе наногетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs. Приводятся результаты экспериментальных исследований терагерцового нерезонансного детектирования таким детектором. Такой терагерцовый детектор демонстрирует высокую чувствительность без использования дополнительных антенных элементов, поскольку короткопериодная решетка, формируемая металлическими контактами плотно упакованных транзисторов в этом массиве, служит в качестве эффективной антенны, связывающей терагерцовое излучение с каждым транзистором в массиве. Асимметричное положение затвора в каждом полевом транзисторе в этом массиве обеспечивает сильный фотовольтаический отклик. В разделе 4.1 дано описание полученных в диссертации экспериментальных зависимостей: статические характеристики и нерезонансный отклик детектора на падающее терагерцовое излучение. В разделе 4.2 приводится обсуждение полученных результатов. Выводы по результатам исследований приводятся в разделе 4.3.

В пятой главе приводятся результаты исследований фотоотклика на терагерцовое излучение цепочки плотноупакованных полевых транзисторов на основе наногетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs. Плотноупакованная

цепочка InGaAs полевых транзисторов с асимметричным T-образным затвором в каждом транзисторе демонстрирует сильным терагерцовый фотовольтаический отклик без использования дополнительных антенных элементов. Была получена чувствительность свыше 1000 В/Вт и почти 2000 В/Вт соответственно для несмещенных и смещенных током стока транзисторов в цепочке с эквивалентной мощностью шума ниже 10^{-11} Вт/Гц^{0.5} в несмещенном режиме работы детектора. В разделе 5.1 описываются экспериментальные результаты исследований. В разделе 5.2 дается анализ экспериментальных результатов. В разделе 5.3 приводятся выводы по результатам исследований.

1 Детектирование терагерцового излучения полевыми транзисторами (обзор литературы)

В данной главе приводятся теоретические основы детектирования терагерцового излучения структурами на основе полевого транзистора. Приводится обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных детекторам терагерцового излучения различных типов. В разделе 1.1 дается обзор всех 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 обсуждаются 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.

1.1 Существующие терагерцовые детекторы

Освоение терагерцового диапазона было начато в работах российских ученых В. Аркадьева в 1914 году и А. Глаголевой-Аркадьевой в 1924 с использованием вибраторов Герца и подобных устройств. В период второй мировой войны и до 80-х годов использовались электровакуумные приборы и болометрические приемники. В 90-е годы стали применяться лазеры и твердотельные устройства на основе германия и сложных полупроводников. В конце прошлого века стали изготавливать терагерцовые устройства на основе

гетероструктур и на основе сверхпроводниковых переходов (проводник на основе нитрида ниобия с антенной).

Начиная с середины 90-х годов, в Европе и США резко возросла интенсивность исследований в области терагерцовых приборов. В компании «Оксфорд-инструмент» год назад началось производство промышленных терагерцовых спектрометров, фирма «Теравью» объявила о создании терагерцовой телевизионной камеры пассивного видения (рисунок 1.1) и установку, детектирующую наличие взрывчатых веществ.



Рисунок 1.1– Терагерцовая установка пассивного видения (с сайта teraview.com)

Планируется, что приемной и передающей аппаратурой, работающей в терагерцовом диапазоне, будут оснащаться самолеты, стратостаты для астрофизических исследований, зондирования атмосферы, медицинских исследований и диагностики и иных целей [14-18].

Обнаружение терагерцового излучения требует очень чувствительных методов, поскольку на сегодняшний момент большинство источников излучения имеют малую мощность [19]. Оценить мощность современных источников терагерцового излучения можно по рисунку 1.2. За исключением синхротронных источников и гиротронов, мощность которых может составлять

мегаватты в импульсе и киловатты в непрерывном режиме генерации, остальные источники обладают мощностью менее 10 мВт, а обычная мощность источника терагерцового излучения порядка 1 мВт.

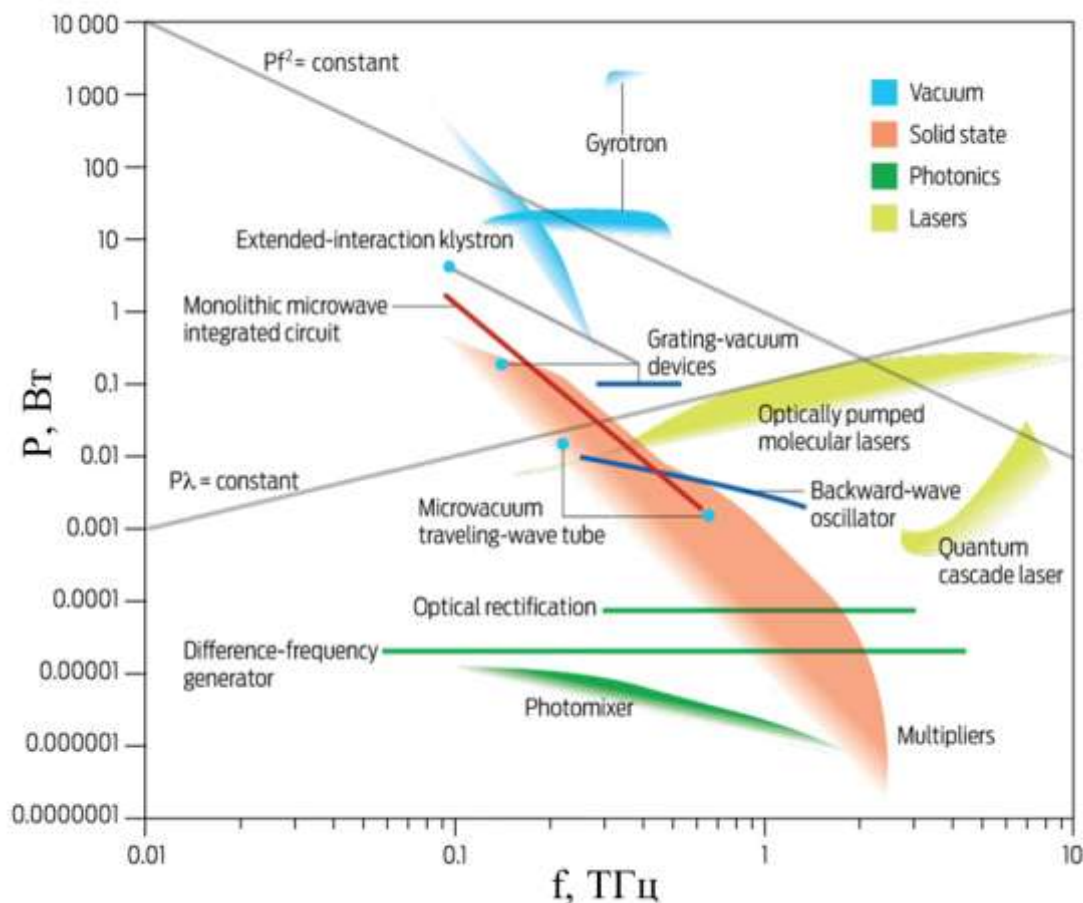


Рисунок 1.2 – Мощность источников терагерцового излучения
[с сайта <http://spectrum.ieee.org>]

Если требуется высокое спектральное разрешение, то используется гетеродинный детектор. В этих системах излучение гетеродина и смешивается с внешним сигналом на нелинейном элементе. Затем сигнал на промежуточной (разностной) частоте усиливается, детектируется и измеряется. Нелинейным элементом может быть диод Шоттки, СИС-смеситель, болометры на двумерном электроном газе. Недостатком работы диода Шоттки является узкая полоса пропускания (порядка 1 ТГц) [20]. СИС-смесители [21-22] обладают высокими показателями детекторных характеристик (рекордные значения

чувствительности и шумов), но крайне низкая рабочая температура около 4 К ограничивает их применимость. Широкополосные детекторы прямого детектирования, обычно используемые, являются тепловыми приемниками излучения, так как терагерцовое излучение фактически принадлежит к дальнему ИК. Системы, использующие такие детекторы, требуют охлаждения, чтобы уменьшить внутренние тепловые шумы. В таких случаях обычно используются криогенно охлаждаемые болометрические детекторы на основе кремния, германия и InSb. Болометры измеряют падающее электромагнитное излучение через поглощение и результирующий нагрев кристаллической решетки или электронного газа. Нагрев в свою очередь измеряется через изменение сопротивления болометра. Чрезвычайно чувствительные болометры делаются на основе изменения состояния сверхпроводника, такого как ниобий. Последние разработанные полупроводниковые болометрические детекторы представляют собой тонкопленочную гетероструктуру AlGaAs/GaAs с высокой подвижностью электронов [23-26]. Однако болометры имеют принципиальное ограничение по быстродействию связанное с инерцией тепловых процессов (разогрев и остывание двумерной электронной системы). Охлаждаемый тонкопленочный электронный болометр имеет ширину полосы 40 ГГц [27], неохлаждаемый – до 10 ГГц [22].

Сложность разработки терагерцовых устройств состоит в том, что при детектировании терагерцового излучения перестают действовать принципы работы фотонных и электронных устройств. Частотный предел для фотонных устройств определяется малой энергией терагерцового излучения ($\sim 1\div 12$ мэВ) и поэтому фотонные терагерцовые устройства с квантовыми переходами могут работать только при пониженных температурах. Предельная частота работы электронных устройств определяется временем пролета электрона в активной области прибора, которая в свою очередь зависит от скорости носителей. Для гетероструктур максимальная скорость пролета электронов активной области порядка несколько единиц 10^7 см/с, в то время как скорость плазменных волн в подзатворном канале транзистора на два порядка выше [2].

История развития электронных приборов подступающих к освоению терагерцового диапазона выглядит так. С конца 90-ых годов прошлого века ТГц-диапазон бывший до этих пор полем деятельности для академических учреждений привлек к себе внимание и мощных радиоэлектронных фирм и корпораций. Успехи традиционной СВЧ-микроэлектроники в области разработки транзисторов на гетероструктурных материалах (гетероструктуры на фосфиде индия, метаморфные структуры на арсениде галлии, гетеробиполярные гетероструктуры), и продвижении размерной обработки в суб-100 нм область сделали возможным создание транзисторов с рабочими частотами, достигающими до терагерцового диапазона.

Начиная с 2000 г были выполнены ряд коммерческих разработок, например, был разработан приемопередающий модуль W-диапазона (75...100 ГГц) с размерами 1 дюйм на 0.25 дюйма для ракетных головок самонаведения. В монолитных схемах усилителей и смесителей были использованы GaAs pHEMT-транзисторы, после замены их на InP снижается общий коэффициент шума [28].

Другое коммерческое применение состоит в применении терагерцового излучения для обнаружения, скрываемого оружия. Обычно в местах контроля используются металлоискатели для проверки людей и рентгеновские системы для контроля ручного багажа. Однако первые непригодны для обнаружения таких современных видов оружия как пластмассовые или керамические пистолеты и ножи, а также пластиковых и жидких взрывчатых веществ. Применение рентгеновских систем сдерживается из-за их влияния на здоровье людей. Удобным средством для обнаружения проносимого людьми оружия и контрабанды могут стать техника использующая частоты терагерцового диапазона, поскольку они не вызывают ионизации, легко проникают сквозь одежду и благодаря малой длине волны (100-300 мкм) системы получения изображений могут обеспечивать высокое разрешение [29, 30].

С учетом развития информационных технологий и увеличением объема передаваемой информации существуют потребности в расширении рабочей

полосы аппаратуры связи, повышении скорости передачи данных, обеспечении мгновенного доступа в Интернет, что вынуждает разработчиков обращаться ко все более высокочастотным диапазонам. Так был разработан усилитель на основе InP-HEMT, который дает 7.2 дБ на частоте 190 ГГц [31].

Следует отметить, что основным активным элементом этих систем является транзистор с все меньшей топологической нормой на размерную обработку. Сообщается, например, о рекордных максимальных рабочих частотах гетероструктурных биполярных транзисторов (HBT) в 478 ГГц [32], 337 ГГц [33].

Одним из основных кандидатов на элементную базу терагерцового диапазона являются HEMT транзисторы с гетероструктурами на основе индия, обеспечивающие высокие подвижности, скорости насыщения и концентрации электронов. Как известно быстродействие полевых транзисторов находится в обратной зависимости от длины затвора. За последние 10 лет появились транзисторы с длиной затвора 0.025 мкм [34]. Конечно, такие достижения невозможны без использования специальных технологических процессов. Так, например, для уменьшения диффузионной деградации свойств эпитаксиальных структур процессы проводят при температуре ниже 300°C. Используют T-образный затвор специальной формы с двухступенчатым подъемом. Частота отсечки таких транзисторов уже находится в ТГц.

Успехи в технологии активных элементов позволили перейти к конструированию монолитных схем усилителей ТГц-диапазона. Так, например, был разработан [35] монолитный усилитель для радиометра на субтерагерцовый диапазон 183 ГГц. Для этого длина затвора транзистора была уменьшена до 0.07 мкм, разработана новая гетероструктура для InP HEMT с каналом $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$, толщина подложки уменьшена до 50 мкм, затвор выполнялся с помощью электронно-лучевой литографии. Монолитный маломощный усилитель, выполненный по такой технологии, показал коэффициент усиления 6 дБ на частоте 200 ГГц.

Следующий частотный диапазон, перекрытый разработками той же фирмы, был анонсирован в [36]. Впервые была продемонстрирована МИС усилителя на частоте 308 ГГц с коэффициентом усиления 4.4 дБ. Было изготовлено несколько образцов однокаскадных монокристаллических усилителей. В усилителях использовались элементы симметричной копланарной линии

Существует также ряд областей применения (связь, радиолокация, системы отображения), где в частотном диапазоне от 26 до 110 ГГц требуются передатчики с выходной мощностью от единиц до десятков ватт. Долгое время для получения таких мощностей использовались электровакуумные приборы, но они не вполне подходят для массового производства и не эффективны по отдаче мощности при небольших уровнях. В настоящее время уровень линейной мощности доступных на рынке твердотельных усилителей (26-40 ГГц) составляет несколько ватт, а на более высоких частотах (75-110 ГГц) около четверти ватта [37]. Одна из трудностей получения высокого уровня мощности связана с резким падением мощности при повышении рабочей частоты транзистора, вторая трудность заключается в наличии потерь связанных с сопротивлением металлических контактов. В GaAs и InP монокристаллических схемах потери в микрополосковых линиях возрастают в мм-диапазоне до 1 дБ на длину волны. Для преодоления этих ограничений такие фирмы как Sanders и Lockheed Martin используют схемы пространственного сложения с десятками и сотнями излучающих элементов размещенных в волноводе специально рассчитанными методами, так называемого квазиоптического согласования.

Также следует отметить, что в продемонстрированном недавно французскими исследователями (при участии ученых из СО ИРЭ РАН (В.В. Попов)) генераторе терагерцового сигнала с помощью плазменных волн, использовался НЕМТ с InGaAs каналом и Т-образным затвором длиной 60 нм, изготовленный с помощью электронно-лучевой литографии [4].

Совсем недавно были продемонстрированы образцы, выполненные на основе CMOS технологии [38]. Опираясь на достижения кремниевой 90 нм

технологии, был выполнен усилитель мм-диапазона, а точнее на частотах 90-110 ГГц с усилением 12 дБ и шириной полосы 3 дБ.

В работе [39] проведен анализ рынков монолитных схем мм- и суб-мм диапазонов. В отчете отмечается, что объем рынка мм-диапазона растет за счет своего расширения и ведется активный спор между производителями за нишу устройств, которые будут работать в суб-мм диапазоне, который будет впоследствии увеличивать свою долю в общемировом рынке электронных изделий за счет уменьшения доли более низкочастотных устройств.

Терагерцовые детекторы, такие как ячейка Галлея, пироэлектрический детектор, терморезистор и их комбинации с антенной также как и диоды Шоттки с болометрами не обладают частотно селективными свойствами по отношению к терагерцовому излучению. Поэтому системы детектирования терагерцового излучения с этими нелинейными элементами должны иметь в своем составе функциональные узлы и блоки, отвечающие за частотную селективность излучения (перестраиваемые интерференционные решетки, узкополосные фильтры), что существенно усложняет устройство и увеличивает его стоимость. Поэтому в связи с возросшей потребностью в устройствах, работающих в терагерцовом диапазоне, требуется компактный, селективный и сравнительно дешевый детектор. Таким детектором может стать полевой транзистор с двумерным электронным газом.

Канал полевого транзистора действует как резонатор для плазменных колебаний. Частота плазменных колебаний зависит от длины резонатора и для микронных и субмикронных длин затворов может достигать терагерцового диапазона. В начале 90-х в теоретической работе [3], было показано, что постоянный поток тока в канале полевого транзистора может стать нестабильным из-за генерации плазменных волн. Эти волны, в свою очередь, могут, приводить к эмиссии электромагнитного излучения на частотах плазменной волны. За этой работой последовала другая [1], где авторы показали, что нелинейные свойства двумерной плазмы в канале транзистора могут использоваться для детектирования и смешивания терагерцового

излучения. Заметим, что в этой работе были рассмотрены режимы как резонансного, так и нерезонансного детектирования.

Терагерцовая эмиссия в нВт диапазоне мощности из субмикронного GaAs и GaN полевых транзисторов наблюдалась и при криогенных и при комнатных температурах [40-42]. На текущий момент, однако, источники терагерцового излучения на основе полевого транзистора не могут соревноваться с существующими квантово-каскадными лазерами или источниками излучения на основе ректификации фемтосекундных оптических лазерных импульсов в практических приложениях. Тем не менее, оказалось, что детектирование терагерцового излучения посредством полевых транзисторов может быть весьма обещающим и пригодным для практического применения. Детектирование терагерцового излучения было получено с использованием различных типов транзисторных структур [43-49]. Многие экспериментальные результаты были получены при криогенных температурах, где могут возбуждаться резонансные плазменные моды [43, 44, 46, 47]. Однако, уже в первых экспериментах, было показано, что GaAs/AlGaAs и GaInAs/GaAs полевые транзисторы могут также работать как широкополосные детекторы терагерцового излучения при комнатной температуре [43, 44, 46]. Нерезонансное детектирование терагерцового излучения транзисторными структурами не характеризуется возможностью электрической перестройки частоты детектирования посредством затворного напряжения, как для резонансного детектирования. Но, с другой стороны, резонансное детектирование пока не реализовано при комнатной температуре, поскольку при комнатной температуре плазменные колебания сильно затухают в силу условия $\omega\tau \ll 1$. На данный момент неизвестны полупроводниковые гетероструктуры с такой подвижностью двумерных электронов, при которой показатель добротности $\omega\tau$ был бы больше 1 при комнатной температуре. При $\omega\tau = 1$ и частоте 1 ТГц в гетероструктуре GaAs/InGaAs/AlGaAs с отношением эффективной массы электрона к массе покоя электрона 0.061 подвижность должна быть порядка $18 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, а типичные значения подвижности меньше

$1 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. По сравнению с другими детекторами терагерцового диапазона, которые работают при комнатной температуре 300 К, использование полевых транзисторов в качестве детекторов имеет ряд преимуществ (таблица 1.1) [50-52].

Таблица 1.1 –Характеристики неохлаждаемых терагерцовых детекторов

Тип детектора	Частота модуляции (время отклика), Гц (с)	Рабочая частота, ТГц	Шумовая эквивалентная мощность, Вт/Гц ^{0.5}
Ячейка Голея	<20	<30	10^{-9} - 10^{-10}
Микроячейка Голея	<30	<0.1	$(1-3)\times 10^{-9}$
Пирозлектрик	(25×10^{-6})	<20	5×10^{-10}
Микроболометры на основе VO_x	<100	<4.3	$>3\times 10^{-10}$
Микроболометры на основе Bi	< 10^6	<3	2×10^{-10}
Микроболометры на основе Nb	-	<30	5×10^{-11}
Микроболометры на основе Ti	530	<0.3	4×10^{-11}
Микроболометры на основе Ni	30	<0.1	2×10^{-11}
Диоды Шоттки	< 10^{10}	<10	$>10^{-10}$
Диоды Шоттки (с нулевым смещением)	-	-	2×10^{-12}
Диоды Мотта	-	<0.1	10^{-12}
Si MOSFET ¹	10^4	0.6	3×10^{-10}
Si FET ¹	-	0.7	$>10^{-10}$
Si CMOS ¹	-	-	5×10^{-11}
Мембрана на основе SiN	<200	1.6-4.3	10^{-9}
HgCdTe НЕВ	< 10^8	0.03-1.5	4×10^{-10}
GaAs/AlGaAs 3D плазмонный детектор ¹	(10^{-9})	1	8×10^{-8}
Коммерческий GaAs НЕМТ ¹	-	0.6	3×10^{-8}

¹Измерение параметров производилось в узкой полосе частот.

Из приведенной таблицы видно, что детектор на основе полевого транзистора по детекторным характеристикам превосходит или не уступает существующим детекторам, в особенности по быстродействию (за исключением чувствительности, которая для детекторов из полевых транзисторов с антеннами менее 10 кВ/Вт, в то время как для коммерческих изделий эта величина достигает 100 кВ/Вт). За счет высокого быстродействия применение нерезонансных детекторов на основе полевых транзисторов особенно перспективно в матричных фотоприемных устройствах (FPA) систем терагерцовой визуализации реального времени [53].

Стоит отметить, что индивидуальные полевые транзисторы в матричном фотоприемном устройстве используемом для терагерцовой визуализации [8] должны быть развязаны по терагерцовому сигналу, для того чтобы сформировать различные пиксели матричного фотоприемного устройства. В этом случае, дополнительный антенный элемент должен присоединяться к каждому полемому транзистору в матрице фотоприемного устройства [8] для того чтобы усилить чувствительность отдельного пикселя.

Главные хорошо установленные факты о детектировании терагерцового излучения полевыми транзисторами состоят в следующем:

- резонансное детектирование, наблюдаемое при криогенных температурах, обуславливается выпрямлением резонансных плазменных колебаний;
- при комнатной температуре плазменные колебания являются сильнозатухающими, но механизм выпрямления остается эффективным и наблюдается широкополосное детектирование терагерцового излучения.

В последующем параграфе приводятся теоретические выкладки и анализ уравнений, определяющих физику явления взаимодействия внешнего терагерцового излучения со структурой детектора и последующее выпрямление плазменных колебаний в электронном канале транзистора.

1.2 Базовые уравнения описания плазменных возбуждений в транзисторной структуре

Возможность использования полевого транзистора для генерации и детектирования терагерцового излучения была продемонстрирована теоретически в работах [1, 3]. Возможность детектирования обуславливается нелинейными свойствами транзистора, которые приводят к выпрямлению переменного тока наводимого падающим излучением. Как результат, фотоотклик появляется в виде постоянного тока между истоком и стоком, который пропорционален мощности излучения. Ясно, что некая асимметрия между стоком и истоком необходима, чтобы навести такое напряжение.

Для вывода уравнений, которые описывают физику процесса движения электронов в двумерном канале полевого транзистора, рассматривают гетероструктуру с проводящим каналом (рисунок 1.3). Для определенности можно считать, что основа транзистора это гетероструктура на основе арсенида галлия.

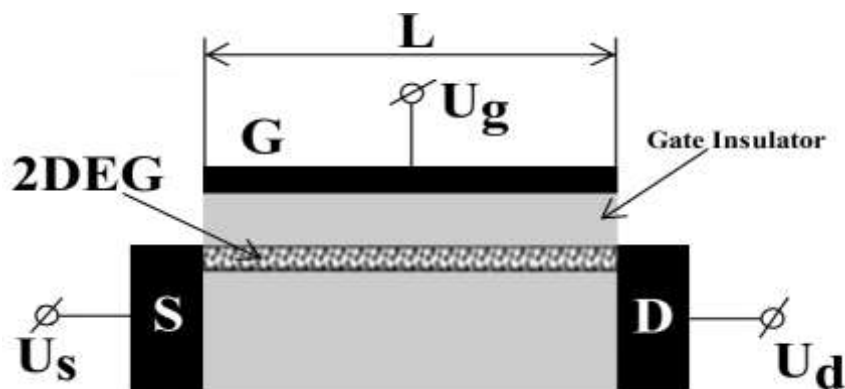


Рисунок 1.3 – Транзисторная структура НЕМТ

Для длин затворов порядка $(0.1 \div 1)$ мкм со скоростью насыщения порядка $(1 \div 3) \times 10^7$ см/с можно добиться режима работы транзистора, при котором время пролета электрона сквозь канал становится меньше чем время рассеяния импульса. Добиться баллистического режима можно, например уменьшением температуры окружающей среды. И при этом число электрон-электронных столкновений велико, поскольку столкновения между электронами происходят

на длине равной межэлектронному расстоянию, что для типичных концентраций $((1\div 3)\times 10^{12} \text{ см}^{-2})$ двумерного газа составляет величину $50\div 100 \text{ \AA}$ согласно формуле

$$\lambda_{ee} = 1/\sqrt{n_s}, \quad (1.1)$$

где n_s – плотность электронов в слое двумерного газа;

λ_{ee} – расстояние между электронами в двумерном электронном газе.

Таким образом, число электрон-электронных столкновений в течение времени пролета велико. При таких условиях электроны ведут себя как поток, движущийся в канале, и движение электронов может описываться гидродинамическими уравнениями.

Уравнения движения (уравнение Эйлера [54]) есть

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{e_0}{m^*} \frac{\partial U}{\partial x} \quad (1.2)$$

где $v = v(x, t)$ – скорость электрона в канале;

$U = U(x, t) = U_{gs}(x, t) - U_{th}$ – локальное напряжение затвор-канал транзистора;

$U_{gs}(x, t)$ – напряжение вдоль канала транзистора относительно истока;

U_{th} – напряжение отсечки канала транзистора;

e_0 – заряд электрона;

m^* – эффективная масса электронная;

x – координата вдоль направления тока ($x = 0$ на истоке, $x = L$ на стоке);

L – длина канала;

t – время.

Для решения уравнения (1.2) требуется еще одно уравнение, поскольку есть две неизвестных переменных v и U . Последнее уравнение получается комбинацией уравнения непрерывности и уравнения связи переменной концентрации носителей заряда в канале транзистора с переменным напряжением на затворе, которое в приближении плавного канала имеет вид

$$n_s = \frac{CU}{e_0} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 U}{d e_0} \quad (1.3)$$

где $C = \varepsilon\varepsilon_0/d$ – емкость затвора на единицу площади;

ε – диэлектрическая проницаемость материала барьера;

ε_0 – электрическая постоянная;

d – толщина барьерного слоя.

Приближение плавного канала справедливо, когда характерный размер изменения потенциала вдоль канала значительно больше чем расстояние d .

Уравнение непрерывности имеет вид:

$$\operatorname{div} \vec{j} + (-e_0) \frac{\partial n_s}{\partial t} = 0, \quad (1.4)$$

где \vec{j} – вектор погонной плотности тока (отношение тока к ширине канала).

Поскольку ток течет в одном направлении, x , и $j = (-e_0)n_s v$, получаем

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(Uv)}{\partial x} = 0 \quad (1.5)$$

Уравнения (1.2) и (1.5) образуют полную систему, и их решение ищется в виде

$$v = v_0 + v_1 e^{-i(\omega t - kx)} \quad (1.6a)$$

$$U = U_0 + U_1 e^{-i(\omega t - kx)} \quad (1.6b)$$

где v_0, U_0 – постоянные величины, связанные со смещением транзистора (соответственно, постоянный ток через канал и напряжение на затворе);

v_1, U_1 – амплитуды переменного сигнала (соответственно, переменного тока через канал и переменного напряжения на затворе);

ω, k – соответственно циклическая частота и волновой вектор гармонических возмущений в канале транзистора.

После подстановки (1.6) в систему уравнений (1.2) и (1.5), линеаризации и использования условия нетривиальности решения получим закон дисперсии в виде

$$\omega_p = sk, \quad (1.7)$$

где s – скорость двумерных плазменных волн (плазмонов), которая равняется

$$s = \sqrt{\frac{e_0 U_0}{m^*}} = \sqrt{\frac{e_0^2 n_s d}{m^* \epsilon \epsilon_0}}, \quad (1.8)$$

где ω_p – частота плазмона.

То, что двумерные плазменные возбуждения имеют линейную дисперсию, было показано в [55, 56]. Из формулы (1.8) следует, что наибольшими рабочими частотами в терагерцовом диапазоне частот будет иметь транзисторная структура на основе материальной системы с наименьшей эффективной массой. И в связи с этим наногетероструктура AlGaAs/InGaAs/GaAs выглядит наиболее подходящей для применений в терагерцовых детекторах.

Настоящий довольно простой вывод демонстрирует метод работы с системой уравнений (1.2) и (1.5). В более общем виде (для каналов длиннее 1 мкм) в уравнении (1.2) следует учитывать затухание электронного потока из-за механизмов рассеяния

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{e_0}{m^*} \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{v}{\tau}, \quad (1.9)$$

где τ – время рассеяния импульса.

Если в транзисторной структуре отсутствует асимметрия (смещение током, асимметричная конструкция, неравномерная засветка и т.д.), то выпрямленный ток будет нулевым (на разных полупериодах падающего излучения выпрямленные токи будут течь в противоположных направлениях и их усредненная сумма по периоду колебания будет нулевой). Поэтому для того чтобы плазмоны проявлялись на ВАХ транзистора, нужно чтобы в структуре появилась асимметрия. Обычно такой асимметрией является наличие разных граничных условий на концах канала за счет пропускания постоянного тока через канал. На истоке фиксируется напряжение, на стоке – ток, то есть в условиях обычного эксперимента: исток заземляется, а в цепи стока включается источник тока. При таких условиях граничные условия выглядят следующим образом

$$U_1(0, t) = 0, \quad (1.10a)$$

$$U_0 v_1(L, t) + v_0 U_1(L, t) = 0, \quad (1.10б)$$

где L – длина канала.

На основе совместного решения уравнений (1.5), (1.9) с (1.6) и (1.10) строится теория работы транзистора в режиме детектирования излучения терагерцового диапазона.

1.3 Уравнения для описания резонансного отклика

Канал полевого транзистора, длиной L , действует как резонансная «полость» для плазменных колебаний с собственными частотами заданными

$$\omega_N = (2N + 1)\omega_0, \quad (1.11)$$

где $N=0,1,2,3,\dots$;

ω_0 – фундаментальная частота плазмона, которая задается формулой

$$\omega_0 = \frac{\pi s}{L}. \quad (1.12)$$

Волновые вектора подзатворных плазмонов, k_n , квантуются в соответствии с длиной затвора как $k_n = (2n-1)\pi/w$ ($n=1, 2, 3,\dots$) (рисунок 1.4). В канале под затвором с четной кратностью полуволны плазмоны не могут связываться с внешним ТГц излучением, поскольку их дипольный момент исчезающе мал, и в свою очередь с внешним излучением связываются плазмоны с нечетной кратностью полуволны с ненулевым дипольным моментом.

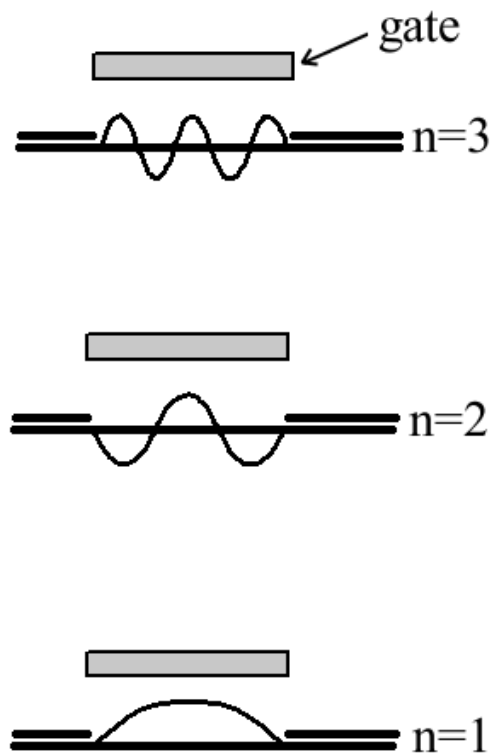


Рисунок 1.4 – Распределение поля плазмонных мод под затвором транзистора (показаны моды 1, 2 и 3)

Если активной частью детектора является много- и коротко периодическая решетка [6, 57, A1], то плазмонные моды в ней гибридизируются [58], что приводит к тому что с внешним излучением связываются четные и нечетные плазмонные моды и $k_n = \pi n/L$ ($n=1, 2, 3, \dots$), где L – период решетки.

Формула (1.12) получается из (1.7) из условия $\lambda_{pl}/2 = L$, где λ_{pl} – длина волны плазмона. Причем эта фундаментальная частота может подстраиваться напряжением на затворе транзистора, поскольку скорость плазмона в канале зависит от концентрации электронов в двумерном слое, которая в свою очередь может изменяться посредством изменения напряжения на затворе.

Показателем добротности резонатора является произведение $\omega_0 \tau_{pl}$ (τ_{pl} – время затухания плазмона в резонаторе). В первом приближении будем считать, что $\tau_{pl} \approx \tau$. При условиях

$$\omega_0 \tau \gg 1, \quad (1.13a)$$

$$\omega \tau \gg 1, \quad (1.13b)$$

где ω – циклическая частота падающего излучения;

полевой транзистор может работать как резонансный детектор, при соответствующем напряжении на затворе.

В этом случае детекторный отклик на падающее излучение имеет вид [1, 3, 46, 59]

$$\Delta U \propto \frac{1}{(\omega - \omega_N)^2 + \left(\frac{1}{2\tau}\right)^2} \quad (1.14)$$

где ΔU – постоянное напряжение сток-исток, вызванное внешним излучением.

Из (1.14) следует, что при приближении частоты падающего на образец терагерцового излучения к собственной моде резонатора, должно наблюдаться резонансное увеличение отклика, что подтверждается экспериментальными и теоретическими работами [3, 6, 59-61, A1, A3].

Чувствительность резонансных плазмонных детекторов в работах [4, 6, 57, 62, 63] достигает нескольких вольт на ватт при криогенных температурах. Несмотря на то, что это достаточно слабая чувствительность, в особенности, если учитывать что для ее получения были затрачены дополнительные ресурсы в виде криогенного охлаждения, использование резонансных плазмонных мод в канале полевого транзистора является весьма перспективным.

1.4 Уравнения для описания нерезонансного отклика

Режим нерезонансного отклика характеризуется неравенствами

$$\omega_0 \tau \leq 1, \quad (1.15a)$$

$$\omega \tau \leq 1. \quad (1.15b)$$

На экспериментальных кривых фотоотклика в зависимости от затворного напряжения пик нерезонансный отклик резко возрастает при приближении затворного напряжения к напряжению отсечки канала. Поскольку при

$$|U_{gs} - U_{th}| \sim \frac{k_B T}{e_0} \quad (1.16)$$

где k_B – константа Больцмана;

T – температура;

перестаёт быть справедливым приближение плавного канала (уравнение (1.3)).

При этом уравнение (1.3) следует заменить более строгим [46]

$$n_s = n_s^* \ln \left[1 + \exp \left(\frac{e_0 U}{\eta k_B T} \right) \right], \quad (1.17)$$

где n_s^* вычисляется по формуле

$$n_s^* = \frac{\eta k_B T C}{e_0^2} \quad (1.18)$$

где η – коэффициент неидеальности.

При $\frac{e_0 U}{\eta k_B T} > 1$ формула (1.17) переходит в (1.3).

Уравнение непрерывности в таком случае примет другой вид, поскольку следует учесть формулу (1.17) и то, что при условии (1.16) нельзя пренебрегать током утечки (ток через канал становится очень малым и сравнимым с током утечки)

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} + \frac{\partial (n_s v)}{\partial x} = \frac{j_g}{e_0}, \quad (1.19)$$

где j_g – плотность тока утечки.

В работе [46] приводится решение системы уравнений (1.9) и (1.19), и полученное выражение для терагерцового отклика имеет вид

$$\Delta U = \frac{e_0 u_t^2}{4m^* s^2} \left(\frac{1}{1 + k \exp\left(-\frac{e_0 U}{\eta k_B T}\right)} - \frac{1}{\left(1 + k \exp\left(-\frac{e_0 U}{\eta k_B T}\right)\right)^2 (sh^2 Q + cos^2 Q)} \right), \quad (1.20)$$

где Q вычисляется по формуле

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{\omega}{2\tau}} L}{s}, \quad (1.21)$$

k вычисляется по формуле

$$k = \frac{j_g L^2 m^* e_0}{2C\tau(\eta k_B T)^2}, \quad (1.22)$$

u_t – амплитуда внешнего напряжения затвор-исток наводимого внешним терагерцовым излучением.

Сравнение формы расчетных кривых с экспериментальными [46] дает почти полное совпадение (рисунок 1.5).

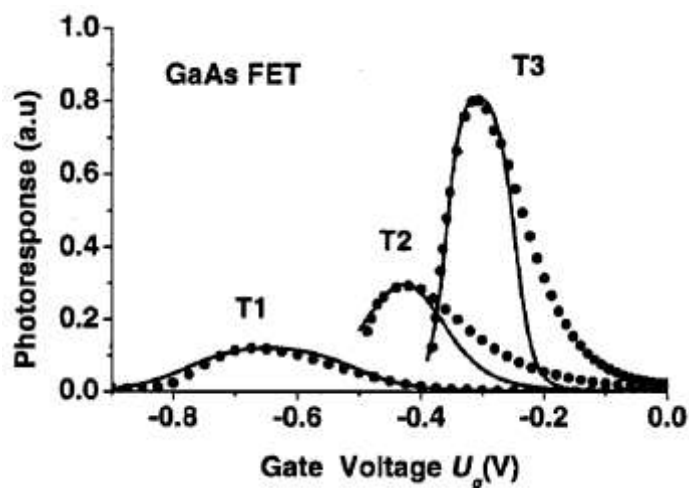


Рисунок 1.5 – Экспериментальные кривые (точечная линия) и расчетные кривые (сплошная линия) при различных условиях эксперимента (T1 – $U_{th} = -0.55$ В, $T = 300$ К, $f = 200$ ГГц; T2 – $U_{th} = -0.42$ В, $T = 300$ К, $f = 100$ ГГц; T3 – $U_{th} = -0.22$ В, $T = 10$ К, $f = 200$ ГГц); при условиях T1 и T3 измерялся один транзистор, условие T2 – другой транзистор

Небольшое разногласие между теорией и экспериментом можно отнести на счет того, что при выводе формулы (1.20) авторы считают, что ток утечки не зависит от напряжения на затворе.

1.5 Оптические характеристики

Для исследований выпрямления терагерцового излучения полевым транзистором важными величинами являются поглощение, рассеяние и прохождение терагерцового излучения в актах взаимодействия с транзистором. Эти параметры также позволяют ответить на вопрос, насколько эффективно

транзисторная структура взаимодействует с внешним терагерцовым излучением. Во все уравнения зависимости фотоотклика от напряжения на затворе входит эффективная величина u_t , расчет которой практически невозможен, так как на неё влияет конструкция детектора (например, металлическая разводка), а также внешние соединительные провода и их положение относительно контактов транзистора и множество других факторов.

Теоретические и экспериментальные работы по поглощению терагерцового излучения структурами типа полевой транзистор из короткопериодических структур с линейными размерами на порядок превышающие длину волны падающего излучения [6, 26, 57, 59-61, 64-74] показали перспективность этого направления. Экспериментальные результаты, полученные в работах [6, 57, 65, 66], хорошо объясняются теорией, разработанной Поповым с соавторами [59, 61, 68, 69, 72]. Коэффициенты отражения, прохождения и поглощения в зависимости от частоты вблизи резонанса задаются уравнениями

$$R(\omega) = R_0 \frac{(\omega - \omega_N)^2 + (\gamma_e + \gamma_r / \sqrt{R_0})^2}{(\omega - \omega_N)^2 + (\gamma_e + \gamma_r)^2}, \quad (1.23a)$$

$$T(\omega) = T_0 \frac{(\omega - \omega_N)^2 + \gamma_e^2}{(\omega - \omega_N)^2 + (\gamma_e + \gamma_r)^2}, \quad (1.23б)$$

$$A(\omega) = \frac{2\gamma_e\gamma_r(1 - \sqrt{R_0})}{(\omega - \omega_N)^2 + (\gamma_e + \gamma_r)^2}, \quad (1.23в)$$

где R – коэффициент отражения от детектора;

T – коэффициент прохождения излучения сквозь детектор;

A – коэффициент поглощения излучения двумерным электронным газом в канале;

γ_e – уширение резонансов, вызываемое рассеянием электронов в квантовой яме (канал);

$\gamma_r = \frac{e^2 \bar{N}_s}{2m^*} \frac{Z_0 \beta_n^2}{(\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1})}$ – описывает радиационное уширение плазмонных резонансов

(\bar{N}_s – средняя поверхностная концентрация 2DEG, Z_0 – импеданс свободного пространства, β_n^2 – коэффициент связи падающего ТГц и n -го плазмонного резонанса, ε_1 и ε_2 – диэлектрические константы соседствующих сред выше и ниже 2DEG);

$R_0 = \frac{(\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1})^2}{(\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1})^2}$ – коэффициент отражения подложки;

$T_0 = \frac{4\sqrt{\varepsilon_1\varepsilon_2}}{(\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1})^2}$ – коэффициент отражения подложки.

Сумма $R+T+A=1$ (из этого условия находится A). Условием эффективной связи внешнего излучения и плазмонов в 2DEG является максимизация поглощения, поскольку только эту часть энергии внешнего поля можно будет преобразовать в выпрямленный ток в канале транзистора.

Так как для увеличения чувствительности нужно максимизировать поглощение излучения двумерной электронной системой, то рассматриваем уравнение (1.23в). Из него видно, что можно управляя концентрацией двумерного электронного газа добиться того, что резонансная частота плазменных колебаний совпадет с частотой внешнего излучения (зависимость

плазменной частоты двумерного электронного газа от концентрации электронов под затвором можно получить явно, используя уравнения (1.7), (1.8), (1.11) и (1.12)). В резонансе (1.23в) сводится к выражению

$$A(\omega) = \frac{2\gamma_e\gamma_r}{(\gamma_e+\gamma_r)^2}(1 - \sqrt{R_0}). \quad (1.24)$$

В этом случае увеличение поглощения зависит от соотношения излучательного и безизлучательного механизмов затухания плазмона. Максимально достижимое поглощение достигается из условия $\gamma_e = \gamma_r$ и

$$A(\omega) = 0.5(1 - \sqrt{R_0}). \quad (1.25)$$

В случаях, когда $\gamma_e \gg \gamma_r$ или $\gamma_e \ll \gamma_r$ поглощение излучения мало ($A(\omega) = 2\frac{\gamma_r}{\gamma_e}(1 - R_0)$ или $A(\omega) = 2\frac{\gamma_e}{\gamma_r}(1 - R_0)$ соответственно). Неравенство $\gamma_e \ll \gamma_r$ означает, что система ведет себя подобно металлической поверхности, отражая падающее на неё излучение. Обратное неравенство $\gamma_e \gg \gamma_r$ означает, что излучение будет проходить через структуру без поглощения (т.е. будет велик коэффициент пропускания).

Коэффициент γ_r отвечает также за силу связи ТГц с плазмонами, так как этот коэффициент отвечает за механизм поглощения энергии из внешнего излучения, при этом эффективность максимальна при $\gamma_r = \gamma_e$. Обычно радиационное затухание меньше электронного рассеяния (в особенности при комнатных температурах), $\gamma_e > \gamma_r$, поэтому исходя из формулы $\gamma_r = \frac{e^2\overline{N_s}}{2m^*} \frac{Z_0\beta_n^2}{(\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1})}$ для более эффективного возбуждения плазмонов требуется брать материальные системы с большей концентрацией 2DEG и меньшей эффективной массой, как например, арсенид галлиевые гетероструктуры с каналом легированным индием или нитрид галлиевую гетероструктуру.

1.6 Влияние структуры транзистора на терагерцовый отклик

Реальная структура транзистора (рисунок 1.6) влияет на оптические и детекторные характеристики прибора.

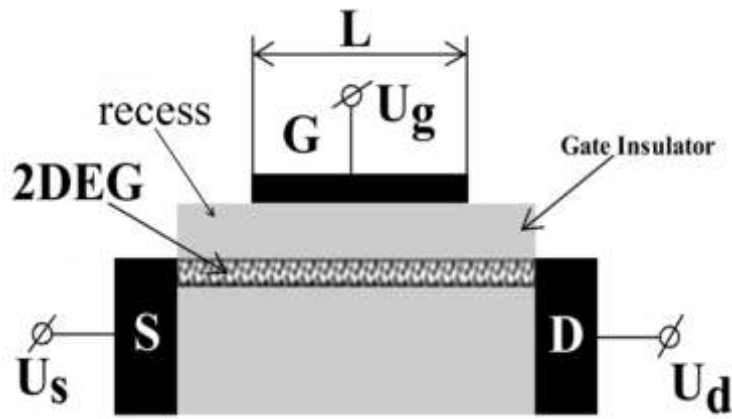


Рисунок 1.6 – Реалистичная структура транзистора (с подводящими областями)

Для понимания работы детектора типа полевой транзистор на терагерцовых частотах нужно знать что, с точки зрения, плазменных возбуждений имеются две области с различной дисперсией плазмы:

- подводящая область (двумерная плазма), частота возбуждений зависит по корневому закону от волнового вектора;
- область под металлизацией затвора (подзатворные плазмоны), линейный закон дисперсии, описываемый формулой (1.7).

В работе [4] было показано, что наблюдаемое уширение плазмонного резонанса не удовлетворяет простой оценке

$$\gamma_e + \gamma_r \approx \frac{1}{2\tau}, \quad (1.26)$$

и расхождение составляет не менее порядка. В статье [75] было показано, что это уширение связано с утечкой подзатворных плазмонов в двумерные плазмоны в подводящих областях, где они затухают, не давая вклада в постоянный выпрямленный ток (рисунок 1.7).

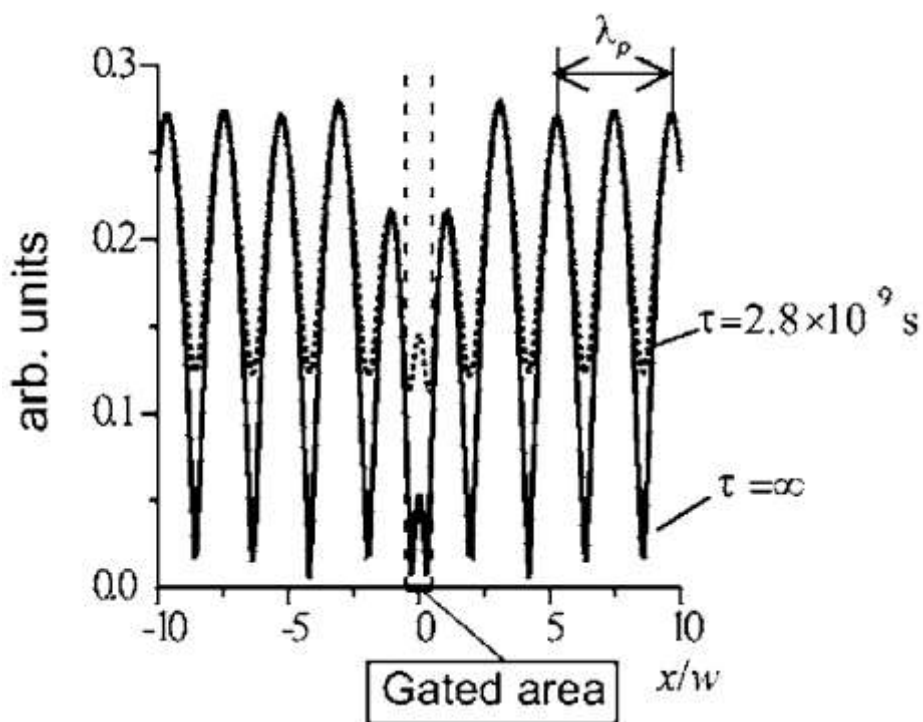


Рисунок 1.7 – Распределение электрического поля в плоскости двумерного электронного слоя с 400 нм затвором для различных времен релаксации импульса электрона (ось абсцисс расстояние, деленное на длину затвора; показана длина волны двумерно плазмона)

Однако возможно производить «закачку» энергии через подводящие участки канала в подзатворные плазменные колебания [76, 77], при совпадении частот подзатворных и двумерных плазмонов. Подзатворные и межконтактные плазменные колебания в рассматриваемой структуре не могут существовать независимо друг от друга. Подзатворные плазмоны возбуждают вынужденные плазменные колебания на межконтактных участках (двумерные плазмоны с корневым законом дисперсии, называемые также межконтактные плазмоны) двумерно электронного канала как существует обратное действие – межконтактные плазмоны возбуждают подзатворные (рисунок 1.8).

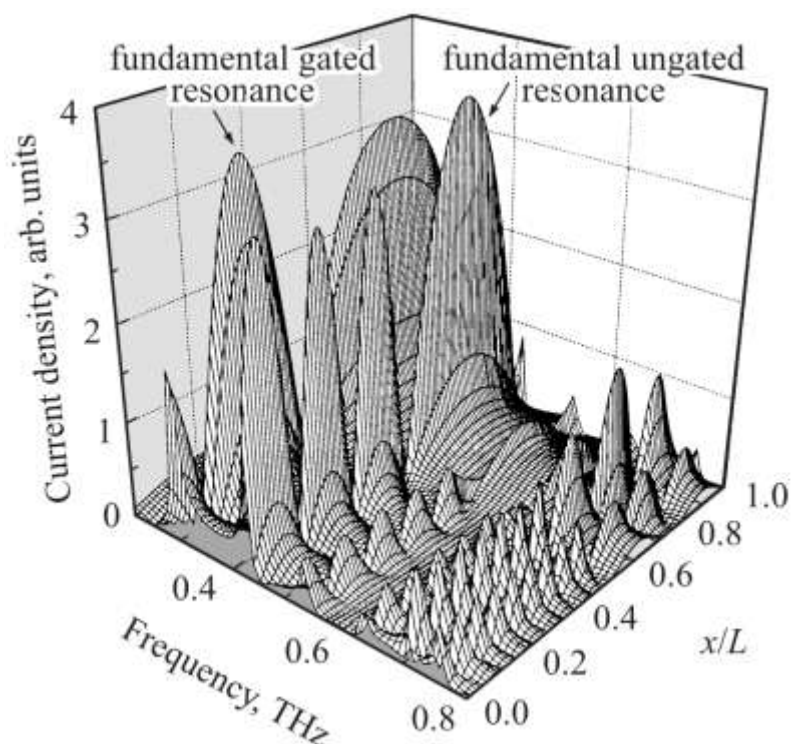


Рисунок 1.8 – Распределение модуля плотности осциллирующего тока по периоду структуры, L , в зависимости от частоты (область затвора $0 < x/L < 0.5$)

Для решеточно-затворных структур важно отметить, что возможность эффективного возбуждения подзатворных плазмонных резонансов определяется наличием незатворенных межконтактных участков электронного канала. Осциллирующие заряды, наводимые внешней ТГц волной на незатворенных участках канала, действуют как электрические вибраторы, возбуждающие подзатворные плазмонные моды. Расчеты показывают, что интенсивность возбуждения подзатворных мод уменьшается на порядки величин в структуре с обедненными межконтактными участками 2DEG [76]. Эффект межконтактных участков электронного канала оказывается особенно сильным на частотах возбуждения межконтактных плазмонных резонансов, когда амплитуда осцилляций наведенных зарядов на межконтактных участках электронного канала значительно возрастает. Это создает возможность эффективного возбуждения высших подзатворных плазмонных резонансов вблизи резонансов межконтактных плазмонов (рисунок 1.8). Несмотря на сильное взаимодействие подзатворных межконтактных

плазменных колебаний, ширина линий обоих типов плазмонных резонансов в транзисторной структуре с решеточным затвором остается достаточно узкой (сравнимой с вкладом, определяемым электронным рассеянием в канале транзисторной структуры) в отличие от одиночного транзистора с коротким затвором [75]. Дело в том, что межмодовое плазмон-плазмонное взаимодействие в транзисторной структуре с решеточным затвором не дает вклада в ширину линии плазмонной моды вследствие синхронизации плазменных колебаний во всех элементарных ячейках периодической структуры и образования коллективной плазмонной моды, распределенной по всей площади структуры.

При рассмотрении измерения вдоль ширины транзистора то, как правило, в транзисторах соотношение ширины затвора к его длине велико (от одного, двух и более порядков). Поскольку направление вдоль ширины транзистора не имеет неоднородностей, то в этом направлении (т.е. поперек канала) плазмоны не могут возбуждаться из-за невыполнения закона сохранения импульса (волновой вектор терагерцового излучения, порядка 210 см^{-1} на частоте 1 ТГц, много меньше, чем волновой вектор плазмона, который для частоты плазмона 1 ТГц и его скорости, согласно [2], $\sim 10^9 \text{ см/с}$ приблизительно равняется 6300 см^{-1}) [9].

Также было показано, что терагерцовому излучению связываться с плазменными колебаниями в канале транзистора способствует внешняя металлическая разводка [78]. И поскольку излучение, поляризованное вдоль ширины затвора, не может возбуждать плазмоны, то падающему ТГц необходимо иметь ненулевую компоненту поля поперек затвора, для получения ненулевого отклика [79].

1.7 Влияние тока смещения в канале на терагерцовый отклик

В симметричных транзисторных структурах, равномерно облучаемых терагерцовым излучением, отклик на терагерцовое излучение (напряжение сток-исток) должен быть нулевым, поскольку сумма генерируемых токов за

период излучения будет равным нулю в этом случае. Чтобы на контактах стока-исток появилось фотонапряжение, обычно пропускают ток смещения, делая одно из направлений выделенным.

В работе [12] было показано, что при резонансном детектировании ширина пика резонансного отклика задается величиной

$$\frac{1}{2\tau_{eff}} = \frac{1}{2\tau} - \frac{v_d}{L} \quad (1.27)$$

где v_d – скорость дрейфа носителей (электронов) в канале транзистора;

τ_{eff} – эффективное время жизни плазмона.

При $v_d = \frac{L}{2\tau}$ имеем $\tau_{eff} \rightarrow \infty$, но в теории, разработанной в [12], не учитывается влияние температурных эффектов, поэтому при $v_d = \frac{L}{2\tau}$, τ_{eff} не будет стремиться к бесконечности, а ширина линии к нулю, поскольку будет присутствовать конечная ширина линии из-за теплового размытия.

Для рассмотрения влияния тока смещения в нерезонансном случае нужно ввести величину длину пробега плазмона

$$L_0 = s \sqrt{\frac{\tau}{\omega}}, \quad (1.28)$$

где L_0 – длина затухания плазмона.

После того как введена величина L_0 можно ввести понятия короткого и длинного образца. Образец, для которого длина затвора $L < L_0$ называется коротким, и образец, для которого длина затвора $L > L_0$ называется длинным.

Для короткого образца

$$\Delta U \approx \frac{u_t^2}{4U_{gs}} \left(\frac{1}{6} \left(\frac{L}{L_0} \right)^4 - \beta \right), \text{ при } \beta = \frac{j_{ds}}{j_{sat}} \ll 1; \quad (1.29a)$$

$$\Delta U \approx - \frac{u_t^2}{4U_{gs}} \frac{\beta}{(1-\beta)^{3/2}}, \text{ при } \beta \rightarrow 1, \quad (1.29b)$$

где j_{ds} – плотность тока в канале;

j_{sat} – плотность тока насыщения в канале транзистора.

Из формулы (1.29а) следует что, короткие образцы с малым током неэффективны для нерезонансного детектирования, так как канал эффективно шунтирует наведенное напряжение и потенциал истока и стока практически одинаковы. В формуле (1.29б) имеется расходимость при $j_{ds} \rightarrow j_{sat}$, поскольку не учитываются эффекты влияния температуры на терагерцовый отклик.

Для длинного образца

$$\Delta U \approx -\frac{u_t^2}{4U_{gs}} \frac{1}{\sqrt{(1-\beta)}}. \quad (1.30)$$

При $\beta \rightarrow 1$ правая часть выражения (1.30) расходится, что связано с увеличением неоднородности распределения потенциала и поля в канале и соответственным увеличением нелинейных свойств полевого транзистора.

1.8 Влияние температуры на терагерцовый отклик

Зависимость отклика детектора на основе полевого транзистора на терагерцовое излучение от температуры, если говорить в общих чертах, имеет максимум при температурах порядка ~ 10 К [57]. Такая зависимость определяется механизмами затухания, проводимости двумерного электронного газа и транспортными режимами переноса носителей заряда [80].

В работе [81] изучались три материала микро- и наноэлектроники наиболее часто используемые в транзисторах: GaAs, GaN и Si. Был исследован широкополосный (нерезонансный) терагерцовый фотоотклик GaInAs/GaAs, GaN/AlGaN и Si полевых транзисторов в диапазоне температур от 5 до 300 К. Фотоотклик увеличивался на порядок величины с уменьшением температуры вплоть до 30 К. Для более низких температур, значение фотоотклика насыщалось, предположительно, из-за изменения доминирующего механизма электронного транспорта. Насыщение фотоотклика в экспериментах объяснялось изменением транспортного режима от диффузионного к баллистическому [80] или к режиму управляемому ловушками [82].

Нерезонансные значения фотоотклика в работе [81] для нитрид галлиевой и кремниевой структур выше, чем для арсенид галлиевой структуры. Однако для нитридных и кремниевых не появлялся пик фотоотклика, характерный для резонансного детектирования, в то время как для GaInAs/GaAs структуры такой пик/перегиб появился, что говорит о перспективности этого материала для использования в резонансных терагерцовых детекторах.

Форма кривой зависимости фотоотклика от напряжения на затворе следует зависимости переходной характеристики согласно [81]

$$\Delta U \approx A \frac{d \ln(I_{ds}(U_{gs}))}{dU_{gs}}, \quad (1.31)$$

где A – некая константа;

I_{ds} – ток сток-исток.

При этом максимальное значение отклика на терагерцовое излучение

$$\Delta U_{max} \approx \frac{u_t^2}{4U^*}, \quad (1.32)$$

где $U^* = \eta k_B T / e_0$.

Кривые максимума фотоотклика в зависимости от U^* хорошо укладываются на теоретическую зависимость вплоть до температуры ~ 30 К, где происходит смена транспортного режима.

В работе [46] показано, что от температуры зависит высота и ширина пика нерезонансного фотоотклика (на зависимости фотоотклика от напряжения на затворе), с уменьшением температуры высота пика растет и уменьшается его ширина. Ширина пика определяется формулой [46] и ΔU_{gs} есть

$$\Delta U_{gs} \approx \eta k_B T \ln\left(\frac{1}{k}\right). \quad (1.33)$$

Зависимость резонансного поглощения от температуры определяется условием (1.13). С точки зрения оптических свойств, максимум в поглощении означает выполнение условия (1.25). Экспериментальное исследование зависимости резонансного отклика от температуры исследовалось в работах [6, 57, 65-67, 83, 84].

1.9 Чувствительность терагерцового детектора на основе полевого транзистора

Одна из главных задач, которую необходимо решить, состоит в том, как связать коротковолновые подзатворные плазмонные колебания с относительно длинноволновым терагерцовым излучением (длина волны терагерцового излучения, как правило, превышает длину волны плазмона на два, или даже на три, порядка величины). Подзатворные плазмоны в однозатворном полевым транзисторе слабо связываются с терагерцовым излучением [60] потому что:

(i) затворные плазмоны сильно экранируются металлическим контактом затвора;

(ii) они имеют исчезающий малый суммарный дипольный момент, что обусловлено их акустической природой (в этом режиме, электроны колеблются в противофазе в контакте затвора и в канале под затвором, что приводит к исчезающе малому суммарному латеральному дипольному моменту);

(iii) подзатворные плазмоны сильно вытекают в подводящие области канала.

Поэтому, специальные антенные элементы требуются для связывания плазмонов в двумерном электронном канале с терагерцовым излучением [11, 85]. Металлический решетчатый затвор является эффективным устройством связи между плазмонами в канале полевого транзистора и терагерцовым излучением [86]. Электромагнитная связь между плазмонами и терагерцовым излучением значительно увеличивается, если решетчатый затвор имеет узкие щели между металлическими полосками решетки. Это происходит, потому что сильное ближнее электрическое поле, возбуждаемое в узких щелях, сильно связывается с плазмонами в канале полевого транзистора [76]. Чувствительность плазмонных детекторов на основе полевых транзисторов с решетчатым затвором все еще остается недостаточно высокой (до нескольких мВ/Вт). Строго говоря, структура полевого транзистора с решетчатым

затвором, обладающим симметричной элементарной ячейкой, проявляет только эффект терагерцовой фотопроводимости, что требует пропускания постоянного тока смещения стока в канале структуры. Эффект терагерцовой фотопроводимости основан на явлениях плазмонного увлечения электронов и (в канале с пространственной моделированной электронной плотностью) плазмонной электрострикции [69, 87]. Фотовольтаический отклик структуры полевого транзистора с асимметричной элементарной ячейкой решеточного затвора недавно был теоретически исследован в [74].

Поглощение терагерцового излучения решеточными полевыми транзисторами был рассмотрен в работах [61, 74, 87]. В работе [61] было показано, что для короткопериодического массива транзисторных структур поглощение излучения с увеличением частоты вплоть до 15 ТГц не теряет своей эффективности (рисунок 1.9).

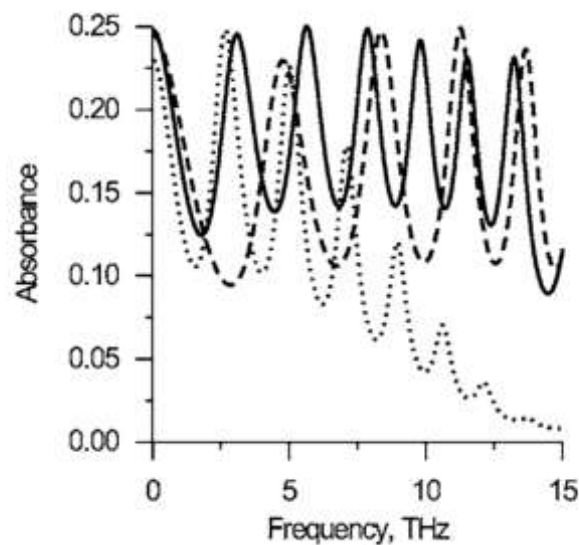


Рисунок 1.9 – Спектр поглощения терагерцового излучения массива AlGaIn/GaN полевых транзисторов [61] с периодом 1.2 мкм для двух различных длин полосок затвора: 0.8 мкм (сплошная кривая) и 0.5 мкм (пунктирная кривая) при комнатной температуре и нулевом напряжении на затворе (точечная кривая показывает спектр поглощения AlGaIn/GaN полевого транзистора с однородным двумерным электронным каналом)

Такой эффект является результатом эффективного взаимодействия внешнего падающего излучения с конструкцией детектора. В данном случае в качестве эффективной приемной антенны использовалась решетчатая структура. Поскольку в модели [61] рассматриваются только два механизма затухания (рассеяние электронов и радиационное затухание), то согласно принципу детального равновесия для статического поля (нулевая частота) вклад каждого затухания равен друг другу и при нулевой частоте получаем конечное максимальное поглощение (формула 1.23). В работе [74] приводятся результаты расчетов, согласно которым возможно получить чувствительность подобных транзисторных структур вплоть до 10 кВ/Вт.

В простом приближении (следуя [87]) нелинейную динамику электронов в двумерной электронной системе можно описать гидродинамическими уравнениями

$$\frac{\partial V(x, t)}{\partial t} + V(x, t) \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} + \frac{V(x, t)}{\tau} + \frac{e}{m} E(x, t) = 0, \quad (1.34)$$

$$e \frac{\partial N(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial j(x, t)}{\partial x} = 0, \quad (1.35)$$

где $E(x, t)$ – электрическое поле, наведенное плазмонной волной в плоскости двумерного электронного газа;

τ – время рассеяния импульса;

$j(x, t) = -eN(x, t)V(x, t)$ - плотность тока;

$V(x, t)$ – гидродинамическая скорость электрона;

$N(x, t)$ – плотность электронов в слое;

e ($e > 0$) – заряд электрона;

m – эффективная масса электрона.

Трактуя поле $E(x, t)$ как возмущение и оставляя члены второго порядка и ниже в ряду, получим суммарную плотность электрического тока

$$j(x, t) = -eN_0(x)V^{(1)}(x, t) - eN_0(x)V^{(2)}(x, t) - eN^{(1)}(x, t)V^{(1)}(x, t), \quad (1.36)$$

где $N^{(1)}(x, t)$ – возмущение плотности электронов;

$V^{(1)}(x, t)$ - возмущение гидродинамической скорости;

$V^{(2)}(x, t)$ - возмущение гидродинамической скорости второго порядка;

$N_0(x)$ - равновесная плотность электронов в двумерном электронном газе.

Из уравнения 1.36 получаем выпрямленный ток, усредняя по пространственному и временному периоду осцилляций

$$j_0 = -e\langle N_0(x)V^{(2)}(x, t) \rangle_{T,L} - e\langle N^{(1)}(x, t)V^{(1)}(x, t) \rangle_{T,L}, \quad (1.37)$$

где $\langle \dots \rangle_{T,L}$ значит усреднение по времени и пространственному периоду осцилляций.

Линеаризация уравнений (1.34) и (1.35) с $E(x, t) = E_0 \cos(\omega t - qx)$ дает

$$j_0^{(drag)} = -\frac{qe^3 N_0}{2m^2 \omega (\omega^2 + \gamma^2)} E_0^2, \quad (1.38)$$

где $\gamma = 1/\tau$ - частота столкновений электронов.

Физический механизм выпрямления описываемый уравнением (1.38) иллюстрируется рисунком 1.10. Осцилляции возмущений плотности заряда и скорости электрона происходят в одной фазе, поэтому при усреднении по периоду получается постоянная выпрямленная составляющая тока. Эта составляющая выпрямленного тока, $j_0^{(drag)}$, возникает из-за увлечения электронов плазмонами.

Теперь рассмотрим выпрямленный ток, наводимый пространственно периодической плотностью электронов, $N_0(x) = N_0 + \Delta N_0 \cos(q_0 x)$, посредством стоячей плазмонной волной с электрическим полем, $E(x, t) = 2E_0 \cos(\omega t) \cos(qx + \varphi)$, φ - сдвиг фазы. Поскольку стоячая волна состоит из двух волн, которые бегут в разных направлениях, то суммарный ток увлечения будет равен нулю. Скорость нелинейной конвекции электрона можно получить путем усреднения уравнения (1.34) по периоду осцилляций

$$V_0^{(2)}(x) = -\frac{1}{\gamma} \langle V^{(1)}(x, t) \frac{\partial V^{(1)}(x, t)}{\partial x} \rangle_T = \frac{qe^2}{m^2(\omega^2 + \gamma^2)} E_0^2 \sin[2(qx + \varphi)]. \quad (1.39)$$

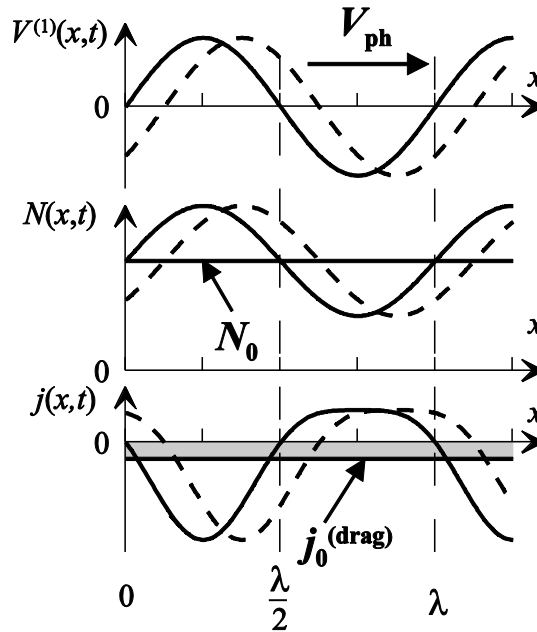


Рисунок 1.10 – Механизм плазмонного увлечения в двумерной системе [87]. Плазменная волна движется в положительном направлении оси x с фазовой скоростью $V_{ph} = \omega/k$, которая схематически показывается на верхнем графике путем отображения двух форм волны соответствующие более раннему (непрерывная кривая) и более позднему моменту времени. Непрерывный ток $j_0^{(drag)}$ оказывается усредненным произведением осциллирующей скорости электрона и плотности электронов.

При условии, что $q_0 = 2q$, подставляя (1.39) в (1.37) и усредняя по периоду осцилляций, получаем

$$j_0^{(conv)} = -\frac{qe^3 N_0}{2m^2 \gamma (\omega^2 + \gamma^2)} E_0^2 \sin(2\varphi). \quad (1.40)$$

Согласно уравнению (1.40) $j_0^{(conv)}$ меняет знак в зависимости от сдвига фазы, и это значит, что ненулевая компонента конвекционного тока появляется в системах, где нет симметрии в плоскости y - z и равновесного распределения плотности электронов. Поэтому генерирование такого тока в двумерной

электронной системе можно интерпретировать как эффект плазмонного храповика, где $j_0^{(conv)} = j_0^{(ratch)}$. На рисунке 1.11 показано образование конвекционного тока при $\varphi = \pi/4$.

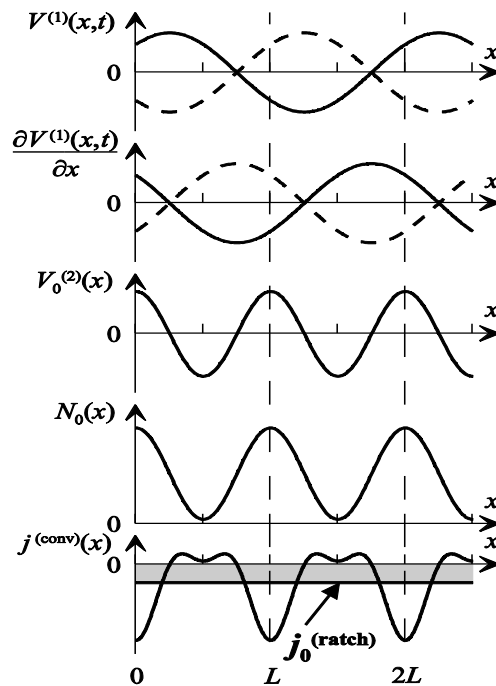


Рисунок 1.11 – Конвекционный плазмонный механизм в пространственно-периодической двумерной электронной системе [87]. Стоячая плазмонная волна схематически показывается путем отображения двух форм волны соответствующие более раннему (непрерывная кривая) и более позднему моменту времени. Постоянный ток $j_0^{(conv)}$ появляется как усреднение произведения x -зависимой нелинейной конвекционной $V_0^{(2)}(x)$ и равновесной плотности электронов $N_0(x)$.

На рисунке 1.12 приведен график чувствительности гетероструктуры InAlAs/InGaAs/InP и однослойного графена в зависимости от частоты при комнатной температуре. Падающая мощность оценивалась как $P_{inc} = Re[\sigma(\omega)] E_0^2/2$, где $\sigma(\omega) = e^2 N_0/[m(\gamma - i\omega)]$ – проводимость двумерного электронного газа. Подвижность полагалась для InAlAs/InGaAs/InP равной $10\,000\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и для графена - $200\,000\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

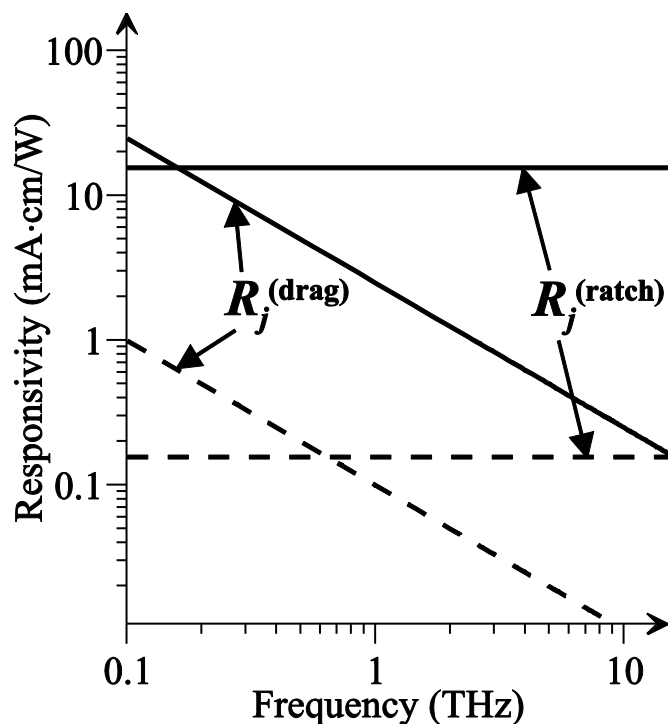


Рисунок 1.12 – Чувствительность по выпрямленному току на единицу ширины периодической двумерной электронной системы [87] в гетероструктуре InAlAs/InGaAs/InP (пунктирные линии) и графене (сплошные линии) как функция частоты для $2\pi/q = 1\text{ мкм}$, $\Delta N_0/N_0 = 0.9$, и $\varphi = \pi/4$

Из рисунка 1.13 следует, что в терагерцовом диапазоне от 0.3 до 3 ТГц чувствительность 2МЭС типа InAlAs/InGaAs/InP изменяется в пределах одного порядка, в то время как для более высокоподвижного материала изменение будет 2-3 раза. Для оценки абсолютной чувствительности в В/Вт возьмем сопротивление канала (при напряжении отсечки) равным 100 кОм и ширину канала 100 мкм, что дает чувствительность порядка 1 кВ/Вт. Оценка согласно [87] (если взять сопротивление канала (при напряжении отсечки) порядка 100 кОм и ширину канала порядка 100 мкм) дает значение порядка 1 кВ/Вт для 2МЭС типа InAlAs/InGaAs/InP. Кроме того в работе [88] был проведен анализ эффективности превращения энергии из внешнего электромагнитного излучения терагерцового спектра в мощность выпрямленного тока в детекторе на основе НЕМТ. Было показано, что эффективности преобразования энергии не может превышать 10%. В связи с этим для детекторов на основе НЕМТ

возникают сложности в получении чувствительности, сравнимой с коммерческими образцами детекторов.

1.10 Фототоковый/фотовольтаический режимы работы терагерцового детектора на основе НЕМТ

Для оптимального применения детектора необходимо также рассматривать последующие цепи, которые отвечают за считывание сигнала с детектора. Возможна реализация двух режимов считывания в зависимости от внутреннего сопротивления детектора: фототоковый при малом сопротивлении и фотовольтаический при большом сопротивлении. Такое разделение возникает из-за того, что нужно согласовывать сопротивления детектора и считывающей цепи. При режиме съема тока с детектора необходим усилитель тока (усилитель с малым входным сопротивлением). Для режима снятия напряжения необходимо иметь в цепи усилитель напряжения с большим входным сопротивлением. Для более подробного рассмотрения этого вопроса необходимо обратиться к специальной литературе по радиотехнике, например [89].

Преимуществом режима считывания тока является то, что на амплитудно-частотную характеристику детектора не влияют паразитные емкости, так как они параллельны считывающей цепи с малым входным сопротивлением (усилитель тока). Главной выгодой от режима считывания напряжения является простота реализации усилителя напряжения, по сравнению с усилителем тока. Однако, недостаток, связанный с высоким выходным сопротивлением НЕМТ, будет большая постоянная времени детектора из-за шунтирования сигнала паразитными емкостями и емкостями считывающей цепи.

В работе [90] (рассматривался транзистор CMOS с напряжением отсечки 0.61 В) экспериментально исследовались два режима работы ТГц детектора. На

рисунках 1.13 и 1.14 приведены графики чувствительности детектора в зависимости от режимов работы.

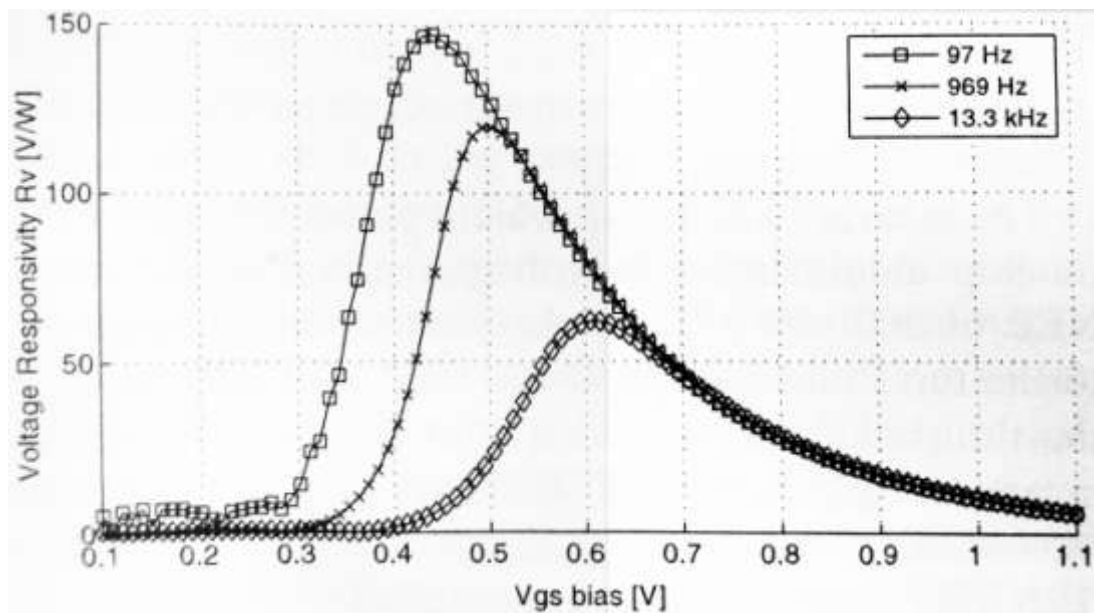


Рисунок 1.13 – Сигнал с детектора в режиме фотовольтанического отклика при различных частотах модуляции

В режиме считывания напряжения (рисунок 1.13) максимум чувствительности получался ниже напряжения отсечки канала из-за высокого выходного сопротивления детектора. Из-за высокого выходного импеданса детектора в режиме отсечки на более высоких модулирующих частотах сигнал ослаблялся больше вследствие емкостной нагрузки внешней измеряющей цепи и кабелей. Поэтому максимум сдвигается к более высоким напряжениям на затворе с увеличением частоты модуляции, где импеданс детектора ниже. При низких частотах модуляции эффекты дополнительных нагрузочных емкостей нивелируются и чувствительность достигает своего значения насыщения.

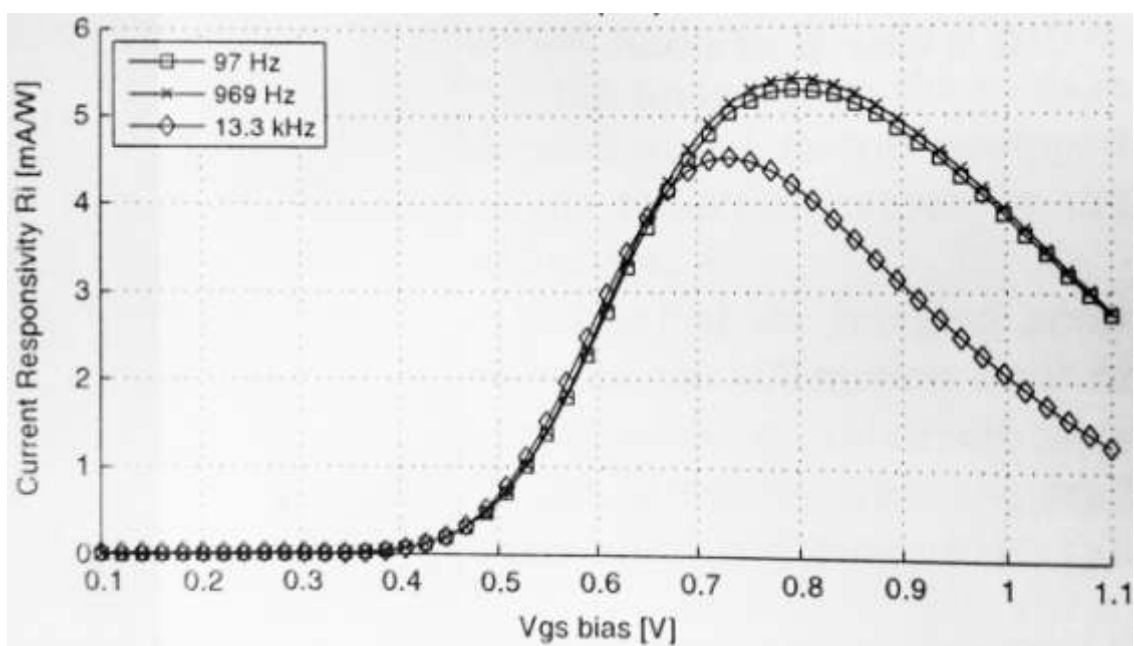


Рисунок 1.14 – Сигнал с детектора в режиме фототокового отклика при различных частотах модуляции

В режиме считывания фототока (рисунок 1.14) ТГц отклик достигал максимального значения чуть выше напряжения отсечки канала. Постепенное уменьшение сигнала после прохождения напряжения отсечки отражает отклонения сопротивления детектора от сопротивления усилителя тока. Уменьшение ТГц отклика при понижении смещения на затворе является результатом уменьшения плотности носителей. Так как используется усилитель тока с низким входным сопротивлением, то паразитные емкости по пути считывания сигнала эффективно шунтируются. Поэтому частота модуляции слабо влияет на отклик детектора. Чувствительность остается постоянной для частот модуляции от 0 до 1 кГц, и только потом слабо уменьшается при значительном увеличении частоты модуляции на порядок.

1.11 Феноменология детектирования ТГц излучения на основе НЕМТ

Работу НЕМТ как ТГц детектора можно рассмотреть на основе радиоэлектронной схемы самосмесителя (рисунок 1.15).

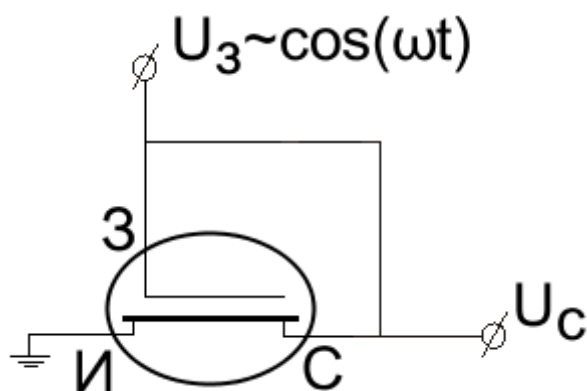


Рисунок 1.15 – Принципиальная схема работы транзистора в режиме самосмешивания

Самосмеситель работает следующим образом: переменное напряжение подается на затвор и в тоже время через какую-либо связь на сток (в нашем случае для простоты считаем, что связь осуществляется по проводнику без изменения амплитуды и фазы сигнала), в результате происходит модуляция проводимости (модуляция концентрации носителей заряда) и скорости носителя заряда в канале (считается, что сигнал малый и амплитуда скорости не достигает скорости насыщения). Получаемый ток в канале

$$J_{\sim} = e(n_0 + C_g U_A \cos \omega t) v_A \cos \omega t \quad (1.41)$$

где J_{\sim} – полный ток в канале;

e – заряд электрона;

n_0 – равновесная концентрация свободных носителей;

C_g – емкость затвор-канал на единицу площади;

U_A – амплитуда переменного напряжения на затворе;

v_A – амплитуда скорости свободных носителей заряда в канале.

Из (1.41) следует, что в канале транзистора появляется постоянный ток $J_0 = 0.5eC_g U_A v_A$, который находит свой отклик во внешних цепях. Таким образом, происходит детектирование высокочастотного сигнала в режиме самосмешивания.

Самосмешивание ТГц излучения, падающего на планарную структуру НЕМТ, появляется за счет поляризации на контактах транзистора (рисунок 1.16).

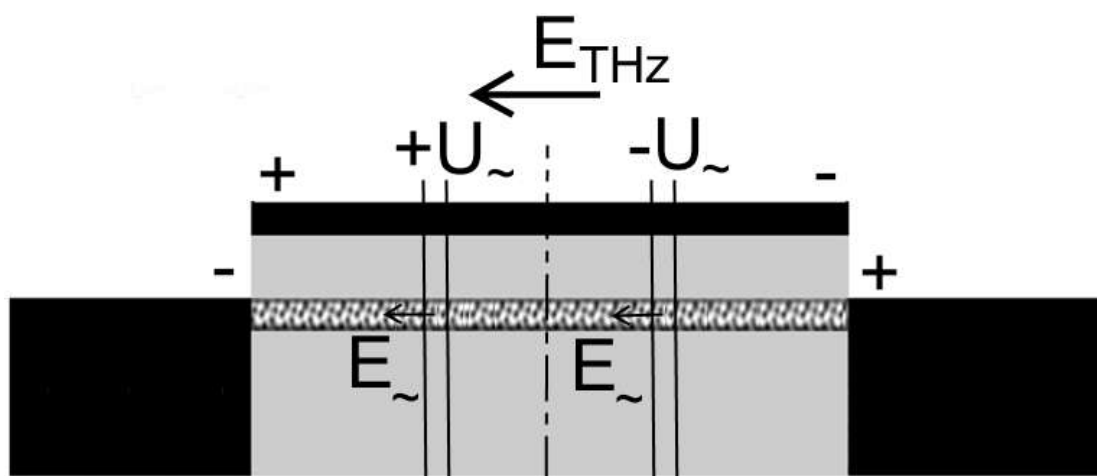


Рисунок 1.16 – Поляризация, наводимая внешним излучением на транзисторе

Из рисунка 1.16 видно, что скорость носителей в канале модулируется поляризационным напряжением на стоке и истоке. На различных половинках затвора появляются разные заряды (относительно равновесной концентрации по центру канала) и как следствие потенциалы, наводимые на равноудаленные от центральной оси затвора участки, находятся в противофазе. Поэтому каждая из половинок затвора дает постоянный ток, который находится в противофазе с током из другой половинки затвора и суммарный отклик будет нулевым. Следовательно, для получения ТГц отклика необходимо получать преимущество одного генерированного тока над другим находящимся в противофазе. Обычно это достигается путем приложения внешнего поля к структуре. При появлении дополнительного поля в канале оно будет притормаживать заряды, движимые в одном направлении, и ускорять движение зарядов направленных в другом направлении. В результате на клеммах сток-исток появится ненулевое постоянное напряжение, вызванное детектированием ТГц излучения.

1.12 Выводы по разделу

В разделе приведено рассмотрение теоретических и экспериментальных работ по теме взаимодействия терагерцового излучения с транзисторными структурами. Дан обзор по существующим решениям и результатам исследований для плазмонных детекторов терагерцового излучения.

Рассмотрены вопросы, по которым ведется научно-исследовательский поиск: зависимости терагерцового фотоотклика от конструкции и режимов работы детектора, эффективность взаимодействия терагерцового излучения с транзисторной структурой, оптимизация геометрии структуры для улучшения его детектирующих характеристик, достижимая величина чувствительности, оптимальная схема считывания сигнала с детектора.

2 Изготовление детекторов и описание методик измерения

В этой главе приводится технология изготовления транзисторной структуры с узкощелевым решеточным затвором и плотноупакованных массивов полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе наногетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs и дается описание методик их измерения. В разделах 2.1 и 2.2 приводятся физико-технологические основания для выбора конструкции детекторов. В разделе 2.3 описывается технологический маршрут изготовления транзисторных структур. В разделе 2.4 приводятся методики измерений и описание технологического процесса подготовки к ним. В разделе 2.5 обсуждается влияние смещения поляризации в волноводе экспериментальной установке на детектируемый ТГц отклик.

2.1 Разработка конструкции плазмонного детектора с решеточным затвором

Обычные одиночные полевые транзисторы не являются хорошими детекторами, поскольку имеют низкую чувствительность [7] (ниже 70 мВ/Вт даже при приложении тока смещения) обусловленную слабой связью транзисторной структуры с терагерцовым излучением [61]. Это обусловлено тем, что длина активной части типичного транзистора (порядка микрона) на два порядка меньше чем длина волны терагерцового излучения (300 мкм для частоты 1 ТГц). Поэтому необходим антенный элемент, эффективно связывающий терагерцовое излучение с транзисторной структурой, необходимо, чтобы получить хорошую чувствительность детектора пригодную для практических применений.

На данный момент есть два направления в исследуемых конструкциях детекторов на основе полевых транзисторов, для достижения необходимой чувствительности детекторов:

(I) полевой транзистор со специальной антенной терагерцового диапазона;

(II) использование транзисторных структур с решеточным затвором, имеющих активную площадь сравнимую с площадью поперечного сечения пучка падающего терагерцового излучения.

Результаты исследований детекторов с антенными элементами показывают [11, 83, 84, 91-99], что это решение имеет определенные перспективы и право на жизнь. В указанных работах встречаются разные типы антенн и наиболее популярными являются диполь [91, 95], антенна типа «бабочка» [11, 92, 93], спираль [97], патч-антенна [96, 98], логопериодическая спираль [83, 84, 94], аппертурная антенна [99]. Наибольшую чувствительность (до 5 кВ/Вт) показывает конструкция, предложенная в [11], однако неясно использовался ли там встроенный усилитель. Отдельным решением является применение решеток в качестве связующего элемента между внешним излучением и плазмонными модами в канале транзисторной структуры [100, 101]. В теоретической работе [74] было показано, что транзисторная структура с решеточным затвором может обладать чувствительностью около 10 кВ/Вт. Элементом связи также может стать сама структура, сконструированная должным образом, либо при помощи решеточного затвора [6, 74] либо плотная цепочка транзисторов [13].

В плазмонных детекторах на основе полевого транзистора с решеточным затвором [6, 57, 71], решеточный затвор большой площади (сравнимой с типичной площадью поперечного сечения сфокусированного терагерцового пучка излучения) действует как эффективная антенна. Однако чувствительность плазмонного детектора на основе полевого транзистора с решеточным затвором остается сравнительно невысокой потому что, технологически сложно внести необходимую асимметрию в каждую элементарную ячейку периодической структуры большой площади, которая требуется для получения высокой чувствительности. Требуемая асимметрия может создаваться путем приложения постоянного тока смещения на стоке в канале полевого транзистора. Однако сильный ток стока вызывает большое падение напряжения через длинный канал транзисторной структуры с

решеточным затвором большой площади и, следовательно, оказывается, что различные элементарные ячейки транзисторной структуры с решеточным затвором находятся под различными эффективными затворными напряжениями. В результате, суммарная чувствительность полевой транзисторной структуры с решеточным затвором уменьшается при сильных токах стока. Другим способом увеличить чувствительность транзисторной структуры с решеточным затвором является уменьшение ширины щелей [58, 76].

Согласно [58] чем уже щели, тем сильнее связь плазмонов и внешнего падающего излучения (рисунок 2.1).

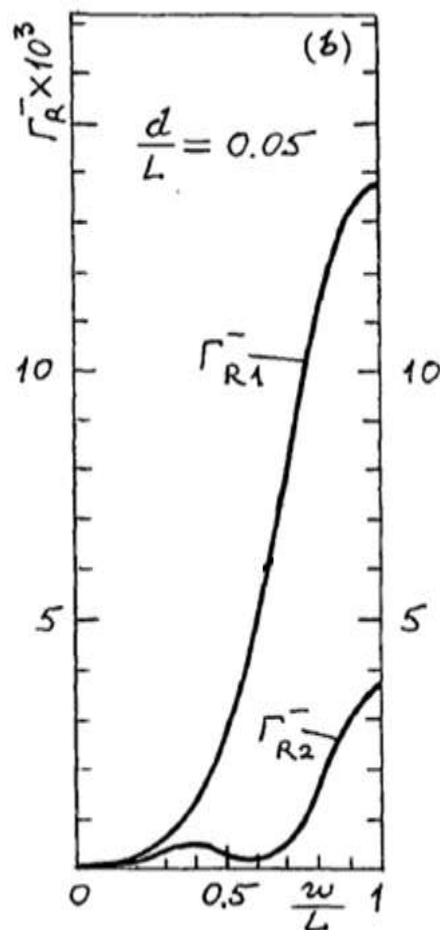


Рисунок 2.1 – Ширина линии затухания плазмонов, Γ_{Rn}^- , первой, $n=1$, и второй моды, $n=2$, в зависимости от соотношения длины металлической полоски, w , и периода решетки, L , при отношении толщины барьерного слоя, d , к периоду решетки 0.05

Из рисунка 2.1 следует, что максимальная связь достигается, когда щелей нет, поскольку не учитывались эффекты близости при стремлении зазора к нулю. До настоящего исследования были выполнены работы [6, 57] в которых соотношение металлизации к периоду было 0.5 и огромной площадью решеточного затвора $2 \times 2 \text{ мм}^2$. Поэтому в целях проверки и сравнения нужно сделать такую же структуру и как можно с более узкой щелью. На длине 2 мм имеющаяся у нас технология позволяет сделать щель 0.3 мкм. Соотношение металлизации и периода можно взять 0.9, поскольку дальнейшее уменьшение щелей не приводит к существенному увеличению связи (рисунок 2.1).

2.2 Разработка конструкции детекторов на основе массивов транзисторов

Другим путем, помимо использования антенных элементов, является изготовление пространственно развитой транзисторной структуры, состоящей из нескольких или множества элементарных транзисторных ячеек.

Дополнительная антенна не является необходимой, если идентичные НЕМТ располагаются в плотный массив, с апертурой, сравнимой с длиной ТГц волны. Такой массив сам по себе служит в качестве эффективной ТГц антенны в силу сильной электромагнитной связи между различными НЕМТ в массиве [13], причем получаемый ТГц отклик пропорционален числу транзисторов в массиве. То есть чувствительность всего массива зависит от чувствительности одного элемента в этом массиве. Следовательно, чем эффективнее будет работать один элемент, тем чувствительнее будет массив в целом.

В работе [13] асимметрия в структуре вводится путем подачи тока смещения через структуру, что ухудшает шумовые характеристики прибора, поскольку к тепловому шуму добавляется дробовой шум. Для достижения необходимой чувствительности ТГц детектора на основе массива транзисторов необходимо тем или иным способом обеспечить асимметрию в каждой элементарной ячейке массива транзисторов, поэтому было принято решение сделать асимметричный затвор. Поскольку соединять элементы в массиве

можно двумя способами: параллельно или последовательно, то были разработаны и изготовлены две конструкции детекторов.

2.3 Изготовление транзисторных структур

2.3.1 Наногетероструктура в основе транзисторных структур

Для изготовления транзисторных структур использовалась материальная система на основе арсенида галлия с каналом из InGaAs, что наиболее перспективно для ТГц приложений (раздел 1.5). Ростовая схема указана в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Схема роста кристалла

№ слоя	Материал	Повтор	Молярная доля (x)		Толщина, (нм)	Профиль легирования		Тип легирования	Легированная примесь
			начало	конец		начало	конец		
16	GaAs	-	-	-	50	4E18	-	N	Si
15	GaAs	-	-	-	20	5E16	4E18	N	Si
14	GaAs	-	-	-	15	5E16	-	N	Si
13	Al(x)Ga(1-x)As	-	0.22-0.23	-	13	5E16	-	N	Si
12	Al(x)Ga(1-x)As	-	0.22-0.23	-	15	2,3E18	5E16	N	Si
11	Al(x)Ga(1-x)As	-	0.22-0.23	-	14	~2,2-2,4E18	-	N	Si
10	Al(x)Ga(1-x)As	-	0.22-0.23	-	2	-	-	-	-
9	GaAs	-	-	-	1,5	-	-	-	-
8	In(x)Ga(1-x)As	-	0.16-0.17	-	12	-	-	-	-
7	GaAs	-	-	-	3	-	-	-	-
6	Al(x)Ga(1-x)As	-	0.22-0.23	-	2	-	-	-	-
5	Al(x)Ga(1-x)As	-	0.22-0.23	-	4,5	~2,2-2,4E18	-	N	Si
4	Al(x)Ga(1-x)As	-	0.22-0.23	-	100	-	-	-	-
3	Al(x)Ga(1-x)As	7	0.22-0.23	-	2	-	-	-	-
2	GaAs	7	-	-	2	-	-	-	-
1	GaAs	-	-	-	400	-	-	-	-
0	GaAs substrate	2 inch GaAs SI (100), thickness 450 micron							

Гетероструктура была изготовлена методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Двумерный электронный канал формировался в 12 нм нелегированном слое InGaAs (слой №8 по таблице 2.1) с 40 нм барьерным слоем AlGaAs (слои с №№ 10-13 по таблице 2.1), который был δ -легирован Si вплоть до $5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (слои с №№ 11-12 по таблице 2.1) и 400 нм нелегированным буферным слоем GaAs (слой №1 по таблице 2.1) сформированным на (100) поверхности полуизолирующей подложке GaAs толщиной 450 мкм (слой №0 по таблице 2.1). Плотность электронов в канале была $3 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ с эффективной массой электрона $m^* = 0.061m_0$, где m_0 - масса свободного электрона, и подвижностью при комнатной температуре $5900 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (по данным холловских измерений), которая соответствует времени рассеяния электрона $\tau = 0.2 \text{ пс}$.

2.3.2 Изготовление образцов транзисторной структуры с узкошелевым решеточным затвором

Схема верхней металлизации транзисторной структуры показана на рисунке 2.2. Данная транзисторная структура представляет собой стандартную топологию НЕМТ транзистора за исключением решеточного затвора и большого размера всей структуры. Так как расстояние между металлическими полосками затвора должно быть 0.3 мкм, а общая площадь решеточного затвора равна $2 \times 2 \text{ мм}$, то данная задача является достаточно сложной с технологической точки зрения.

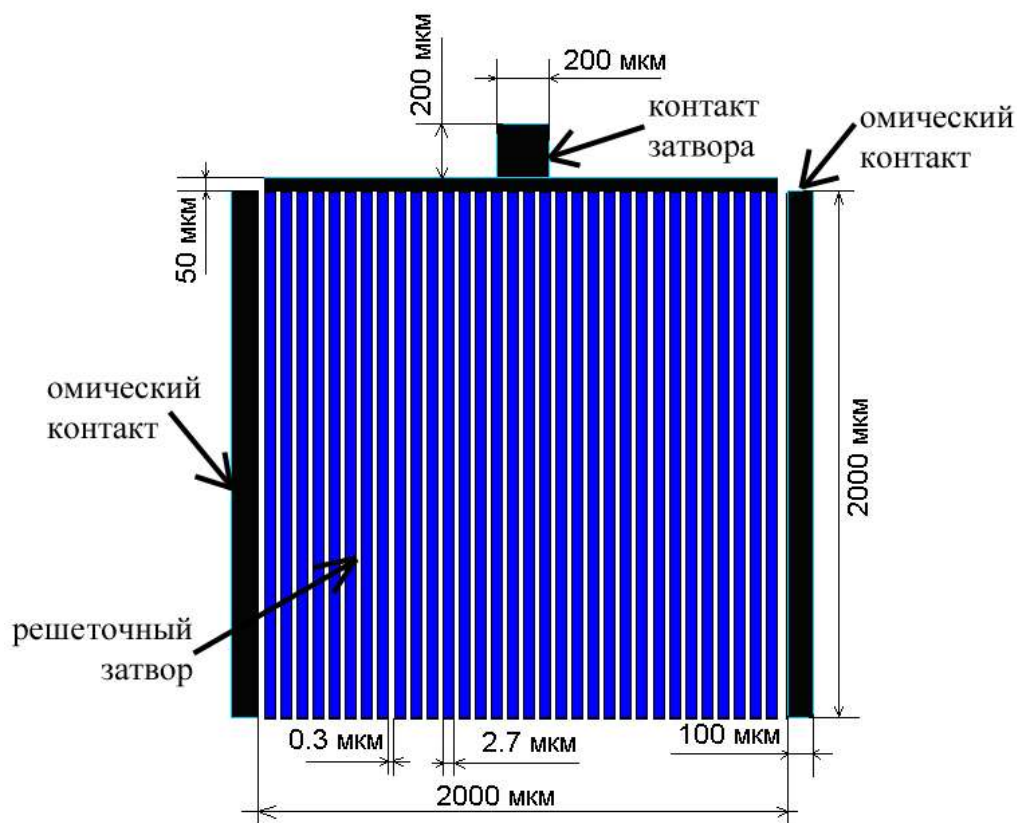


Рисунок 2.2 – Схематический вид верхней металлизации транзистора

Для изготовления такой транзисторной структуры разработан следующий технологический маршрут:

1. Формирование мезы. Технологические процессы: нанесение фоторезиста S18 (положительный фоторезист) и его центрифугирование, сушка, наложение фотошаблона (шаблон №1), экспонирование, травление в среде $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ в течении 1 мин, очистка пластины.
2. Формирование омических контактов. Технологические процессы: нанесение фоторезиста S18 и его центрифугирование, сушка, наложение фотошаблона (фотошаблон №2), экспонирование, травление, очистка пластины, напыление AuGe-Ni-Au контактов толщиной соответственно 300-100-400 нм и их вжигание.
3. Формирование канала. Технологические процессы: нанесение фоторезиста S18 и его центрифугирование, сушка, наложение

фотошаблона (шаблон №3), экспонирование, травление в среде с цитратным травителем для стоп-слоев, очистка пластины.

4. Формирование барьерного контакта (затвора). Технологические процессы: нанесение положительного электронрезиста и его центрифугирование, сушка, электронная литография (шаблон №5), очистка, наложение фотошаблона (фотошаблон №4), напыление 65 нм слоев из Ti/Au, взрывная литография, очистка.
5. Утонение подложки до 100 мкм и резка пластины на кристаллы. Окончательный размер кристалла не более 3×3 мм.

Исходя из технологического маршрута, были сделаны шаблоны для фотолитографии с №1 по №4 (рисунки 2.3-2.7) и электронной литографии шаблон №5 (рисунок 2.8). Цветом обозначена область резиста.

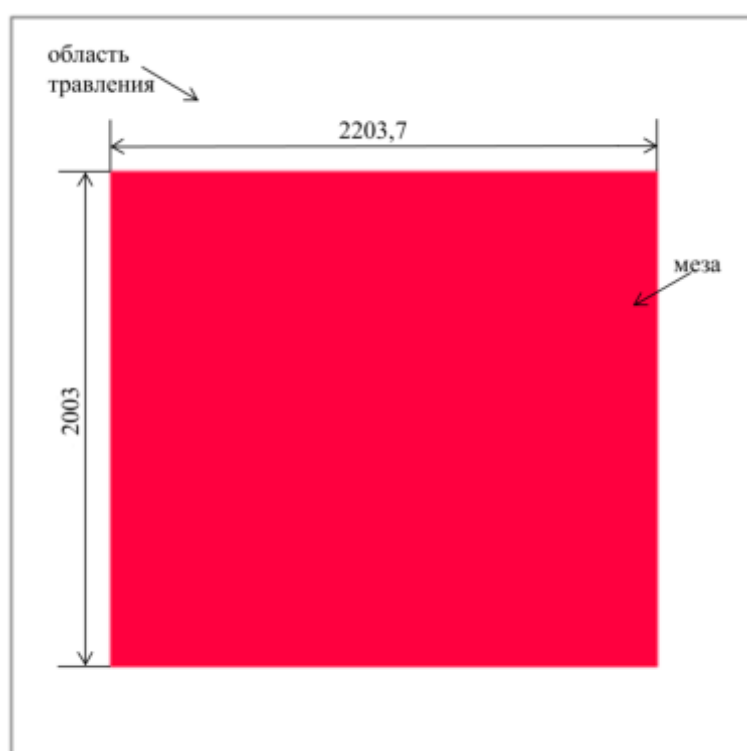


Рисунок 2.3 – Шаблон №1 «Меза»

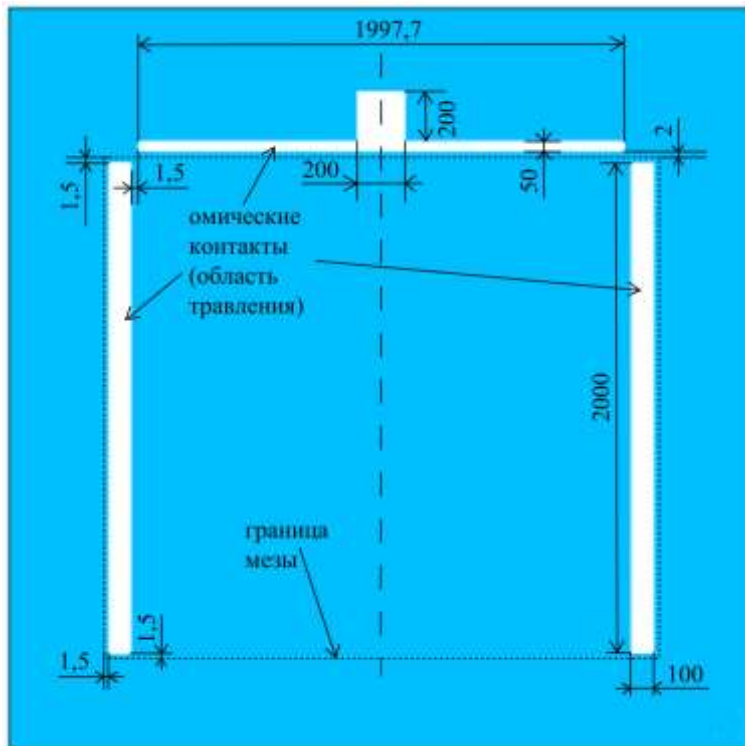


Рисунок 2.4 – Шаблон №2 «Омические контакты»

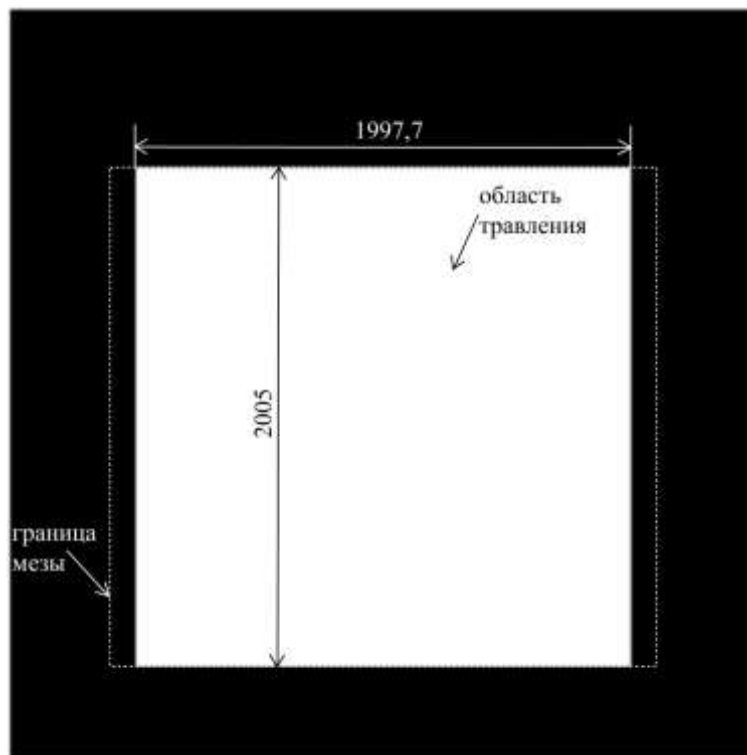


Рисунок 2.5 – Шаблон №3 «Травление «стоп-слой»

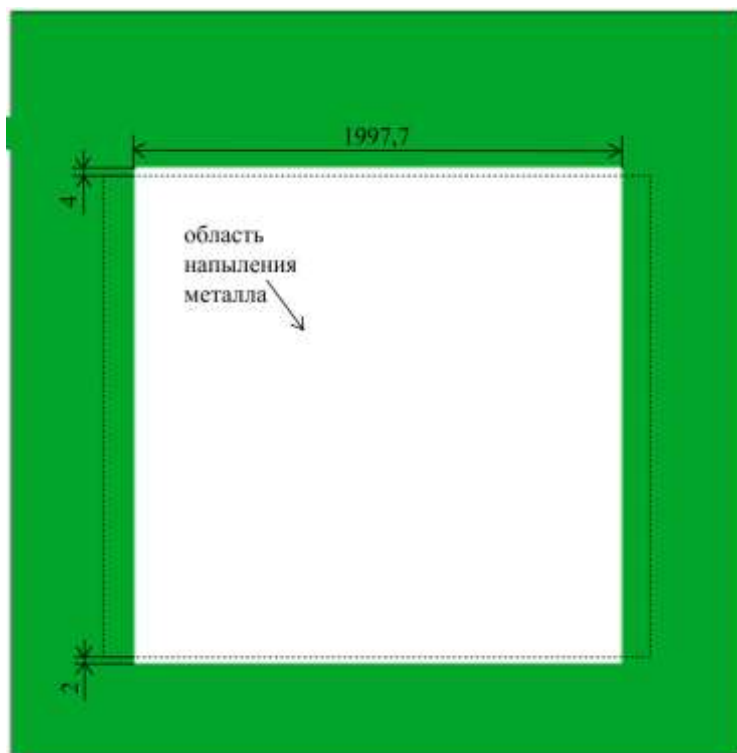


Рисунок 2.6 – Шаблон №4 «Напыление металлизации затвора»

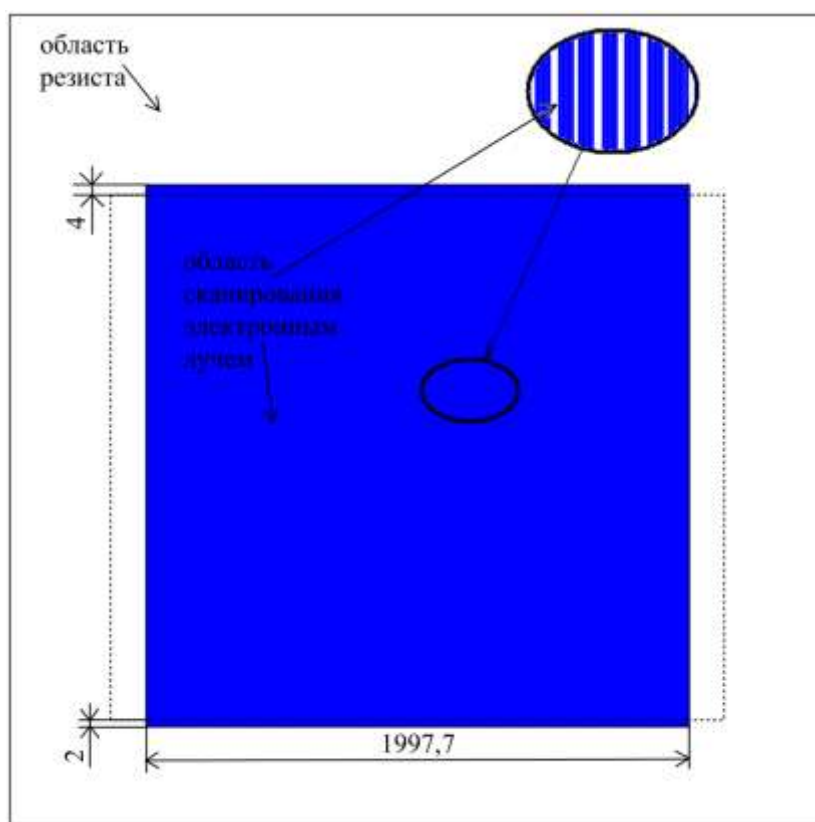


Рисунок 2.7 – Шаблон №5 «Электронная литография затвора»

В результате была изготовлена транзисторная структура с решеточным затвором на основе наногетероструктуры GaAs/InGaAs/AlGaAs с узкими щелями между металлическими полосками решеточного затвора. Вертикальный разрез образца показан на рисунке 2.8.

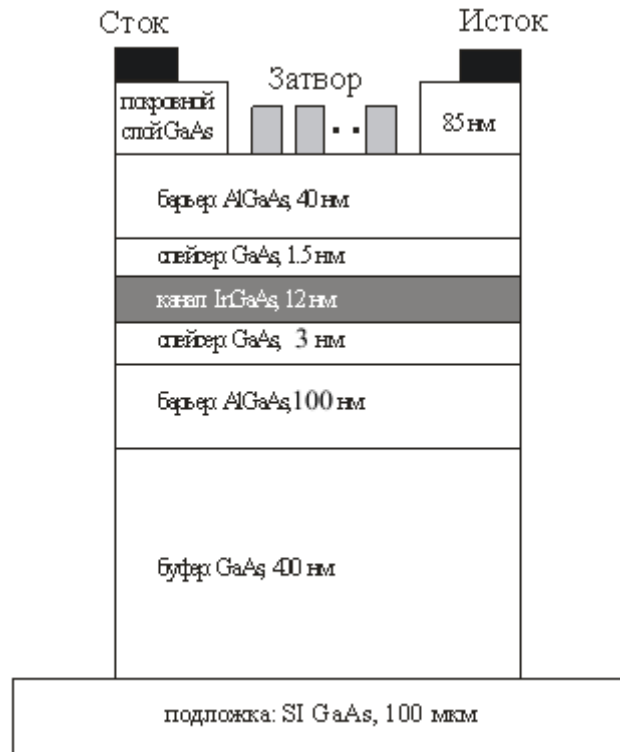


Рисунок 2.8 – Вертикальный разрез транзисторной структуры

На рисунке 2.9 схематически показана верхняя металлизация полученной решеточной транзисторной структуры.

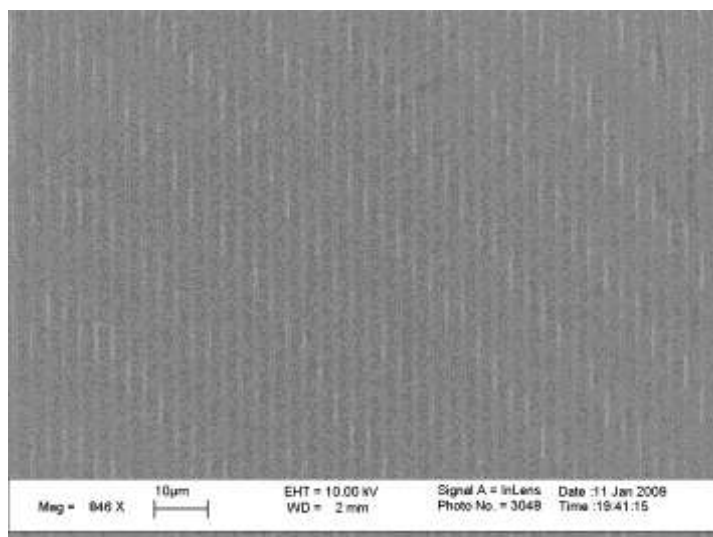


Рисунок 2.11 – Фотография решеточного затвора транзисторной структуры в электронном микроскопе

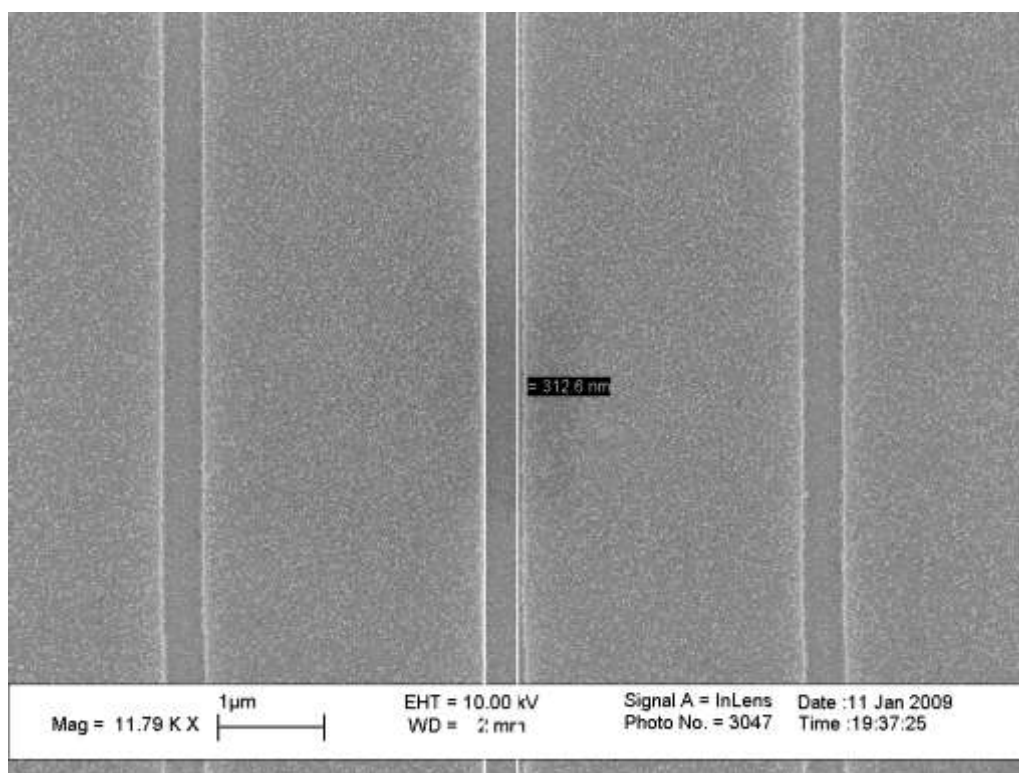


Рисунок 2.12 – Фотография металлических полосок решеточного затвора в электронном микроскопе (ширина щелей равна 312.6 нм)

Изготовленные кристаллы в количестве 24 штук были приклеены и разварены в корпус держателя микросхем 402.16-33.04. Схема монтажа кристалла показана на рисунке 2.13, выводы были присоединены к 5, 9 и 12 контактными площадкам корпуса. Использовались алюминиевые провода диаметром 50 мкм.

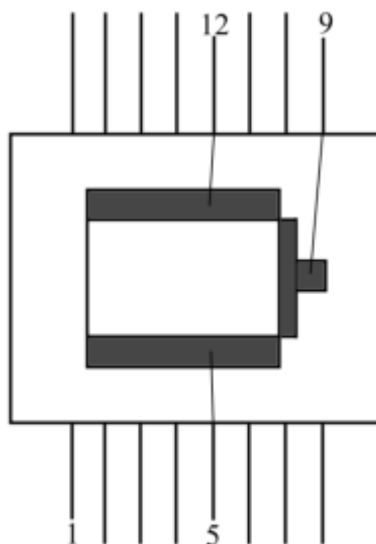


Рисунок 2.13 – Схема разварки изделия в корпус держателя для микросхем

На рисунке 2.14 показана фотография транзисторной структуры с решеточным затвором в корпусе держателя микросхем.

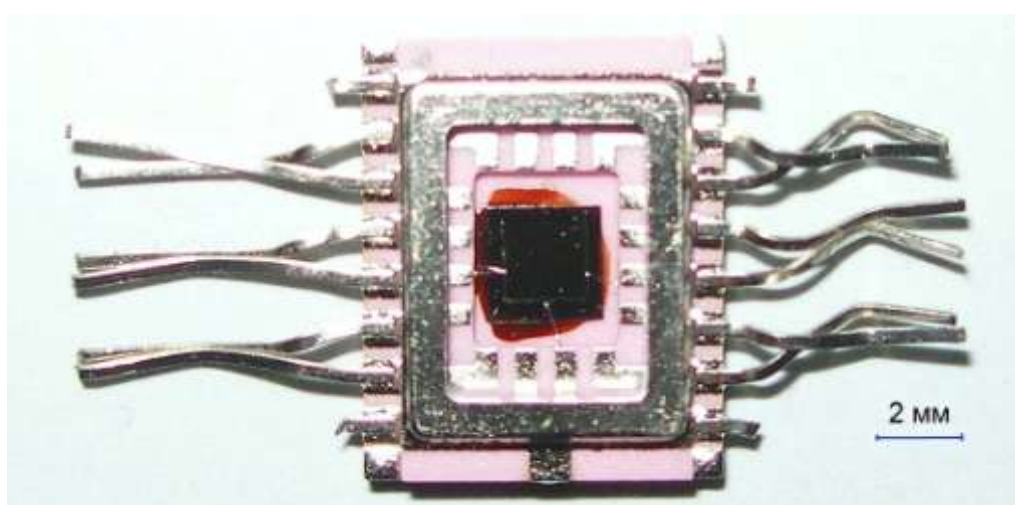


Рисунок 2.14 – Фотография транзистора в корпусе держателя микросхем (на рисунке имеется размерная метка)

На рисунке 2.15 показана увеличенная фотография разваренной структуры в оптическом микроскопе.

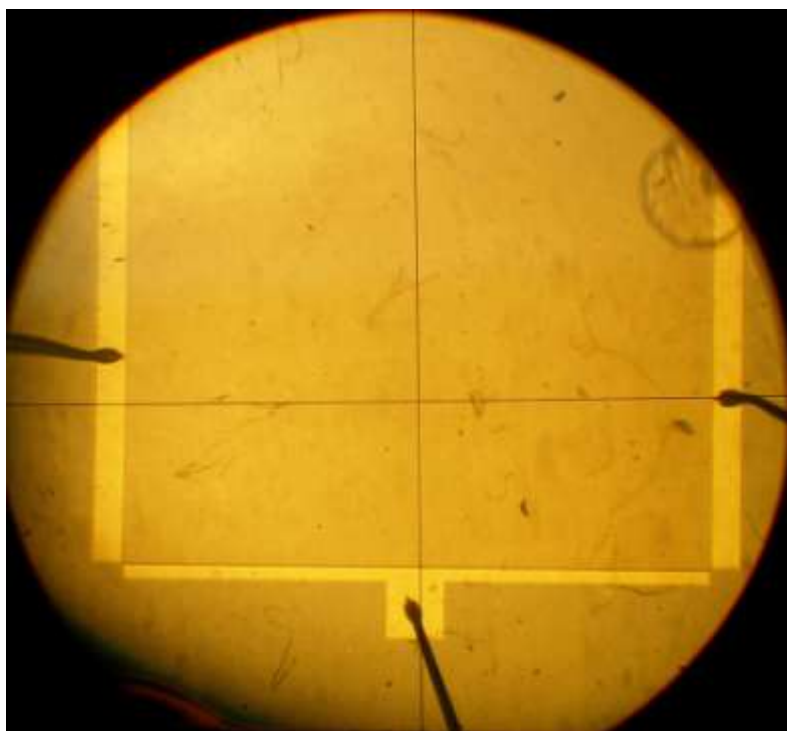


Рисунок 2.15 – Фотография транзисторной структуры с решеточным затвором в оптическом микроскопе

2.3.3 Изготовление образцов транзисторных структур с плотной упаковкой элементарных ячеек в виде полевых транзисторов

Для изготовления плотноупакованных массивов полевых транзисторов с элементарными ячейками в виде однозатворных полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов использовалась та же самая материальная система на основе арсенида галлия с каналом из InGaAs и ростовой схемой приведенной в таблице 2.1. Для разработки маршрута изготовления нужно было учитывать специфику изготавливаемого изделий: верхняя металлизация транзисторных структур различается по принципу соединения элементарных ячеек (параллельное или последовательное) и их количеством и представляет собой чередование металлических полосок стока-истока и затвора, элементарные ячейки одинаковые в вертикальном разрезе, но отличаются по ширине, затвор имеет несимметричную Т-образную форму. В таблице 2.2

приведен перечень технологических процессов для изготовления транзисторных структур, процесс изготовления рассматривается с точки зрения изготовления элементарной ячейки в транзисторных структурах.

Таблица 2.2 – Перечень основных процессов технологии изготовления плотноупакованных массивов полевых транзисторов

Номер процесса	Наименование
1	Формирование фоторезистивной маски для травления мезы
2	Травление мезы
3	Удаление фоторезиста
4	Формирование фоторезистивной маски для напыления омических контактов
5	Напыление AuGe/Ni/Au (30/10/40 нм)
6	Удаление резиста
7	Вжигание при 400 °С в течении 30 с в азотной атмосфере
8	Формирование электронорезистивной маски для травления канавки под канал
9	Травление GaAs
10	Удаление резиста
11	Нанесение нитрида кремния
12	Формирование электронорезистивной маски для формирования ножки Т-образного затвора
13	Травление нитрида кремния
14	Напыление Ti 150 нм
15	Взрывная литография
16	Формирование электронорезистивной маски для формирования шляпки Т-образного затвора
17	Напыление Au 500 нм
18	Взрывная литография

Ниже приводится последовательность рисунков со схематическим изображением последовательных технологических операций изготовления транзисторных структур (рисунки 2.16-2.21).

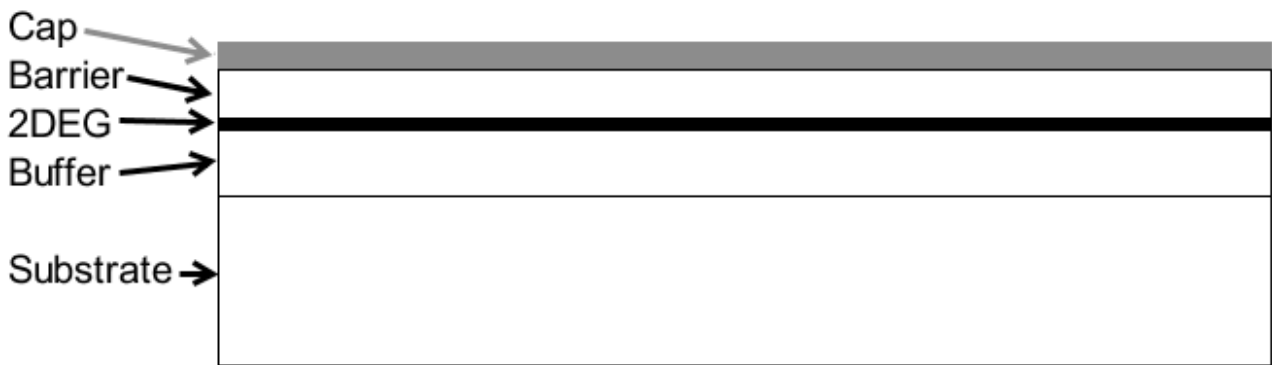


Рисунок 2.16 – Схематический рисунок исходной наногетероструктуры

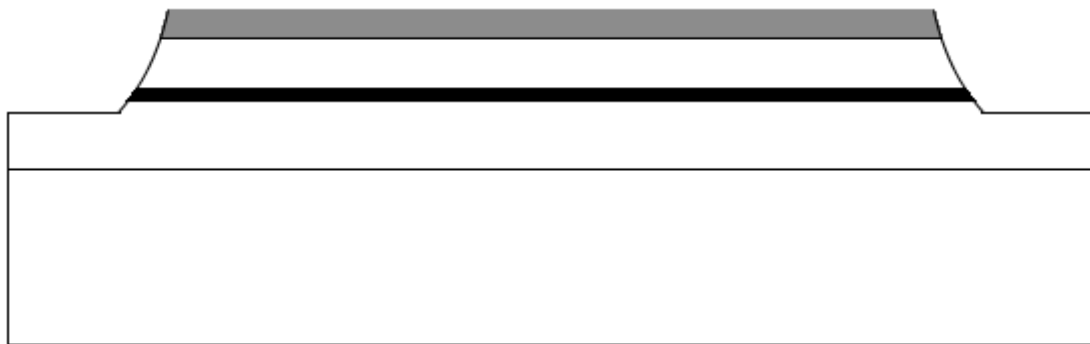


Рисунок 2.17 – Схематический рисунок показывающий результат процессов изготовления (этапы 1-3 из таблицы 2.2) транзисторных структур

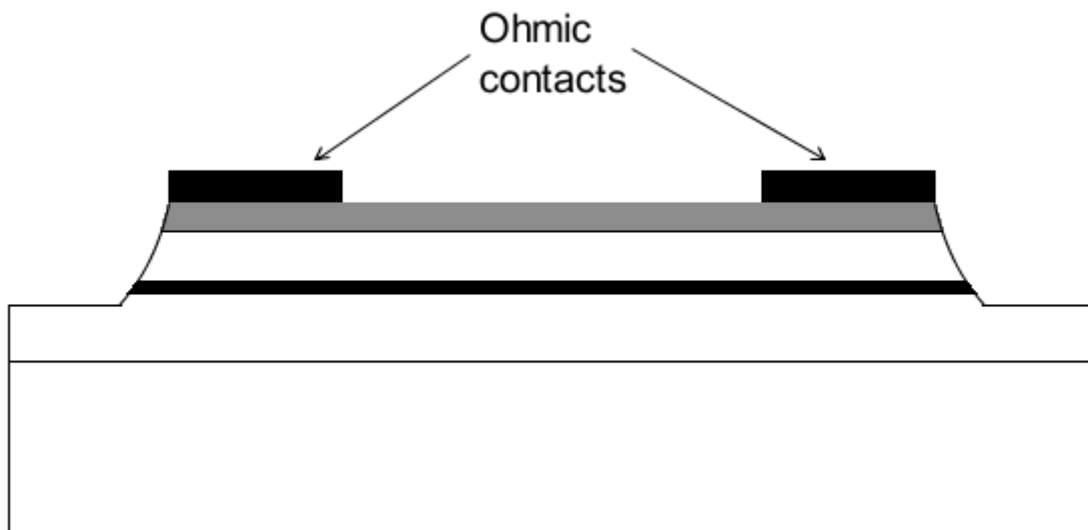


Рисунок 2.18 – Схематический рисунок показывающий результат процессов изготовления (этапы 4-7 из таблицы 2.2) транзисторных структур

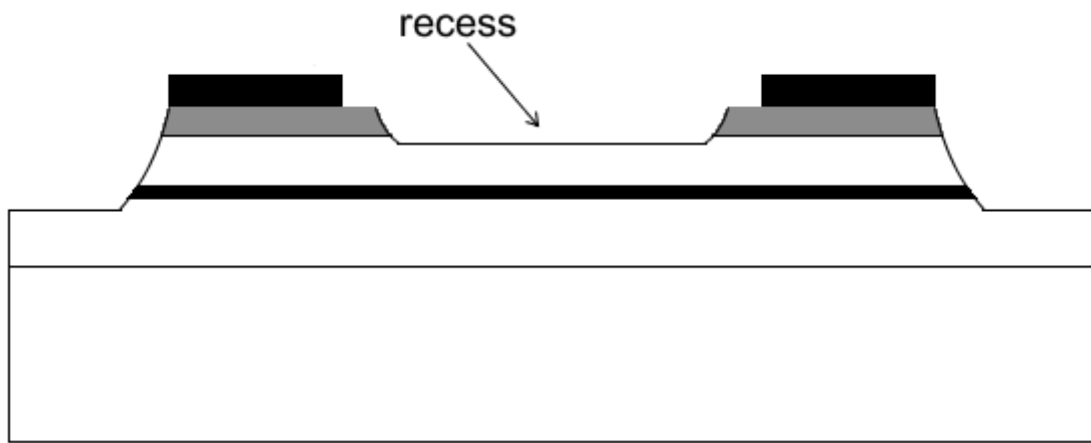


Рисунок 2.19– Схематический рисунок показывающий результат процессов изготовления (этапы 8-10 из таблицы 2.2) транзисторных структур (recess – заглабление в барьерном слое)

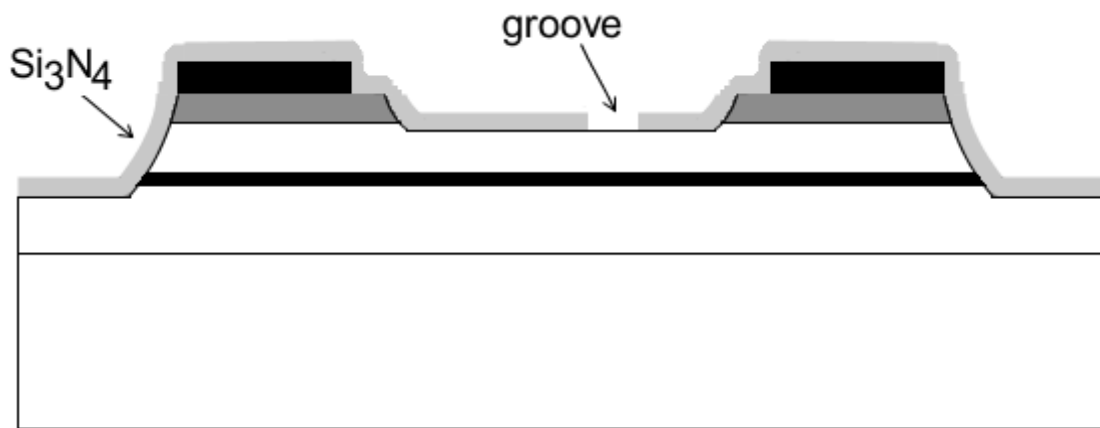


Рисунок 2.20 – Схематический рисунок показывающий результат процессов изготовления (этапы 11-13 из таблицы 2.2) транзисторных структур (groove – канавка под затворную ножку в слое нитрида кремния)

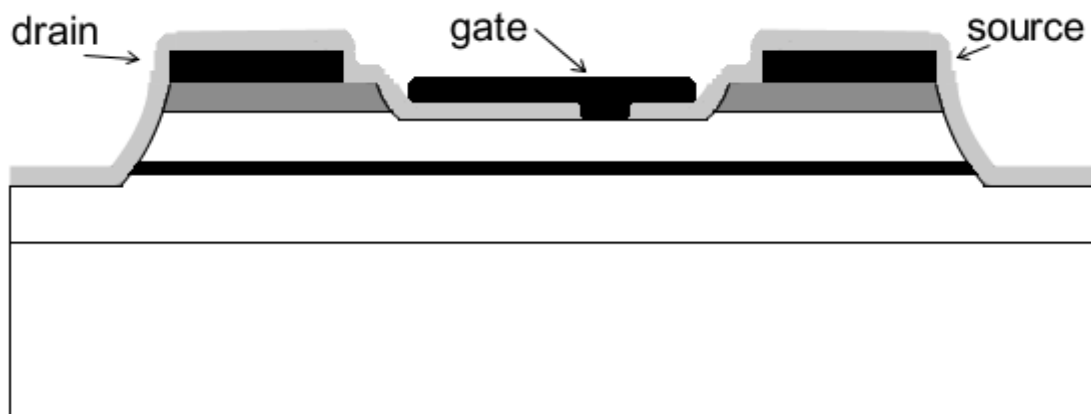


Рисунок 2.21 – Схематический рисунок показывающий результат процессов изготовления (этапы 14-18 из таблицы 2.2) транзисторных структур

На рисунке 2.22 показана электронная фотография ножки Т-образного затвора с асимметричным положением относительно омических контактов. Ножка Т-образного затвора в каждом полевом транзисторе сдвинута к контакту истока, что вносит необходимую асимметрию в каждую элементарную ячейку в массивах, позволяющую получить большой фотовольтаический отклик.

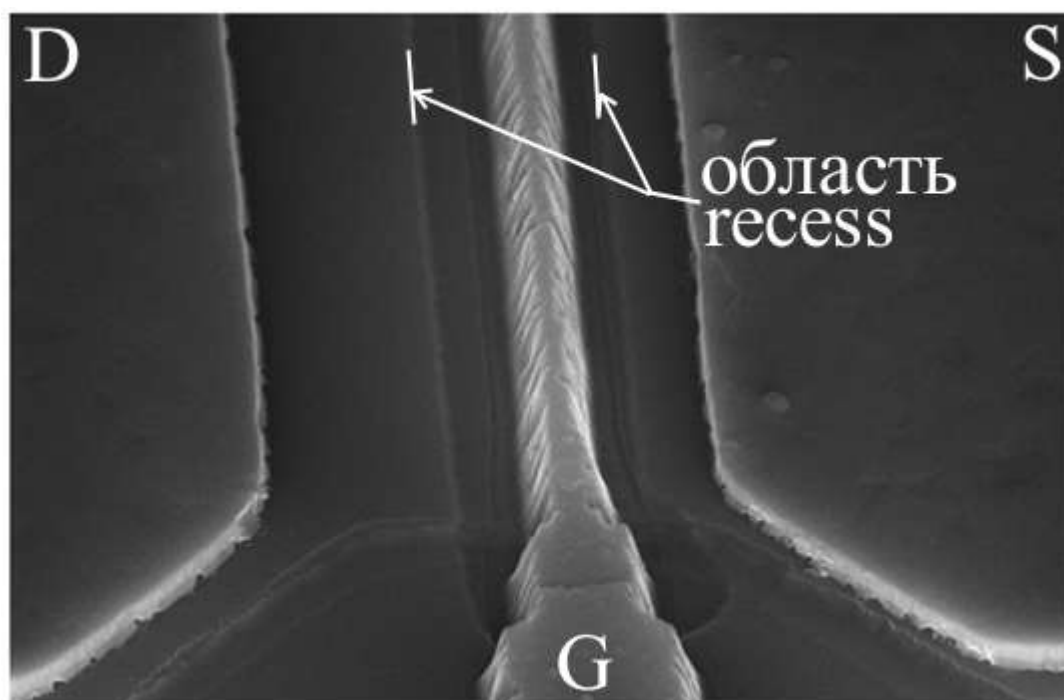


Рисунок 2.22 – Электронная фотография затвора

На рисунке 2.23 показывается фото самого затвора целиком в сканирующем электронном микроскопе.

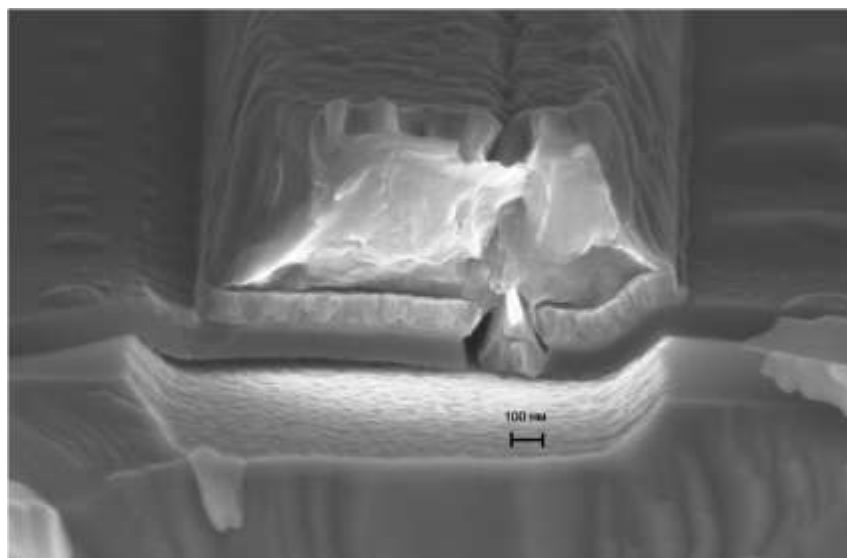


Рисунок 2.23 – Изображение Т-образного затвора в сканирующем электронном микроскопе

Вертикальный разрез элементарной ячейки транзисторных структур показан на рисунке 2.24.

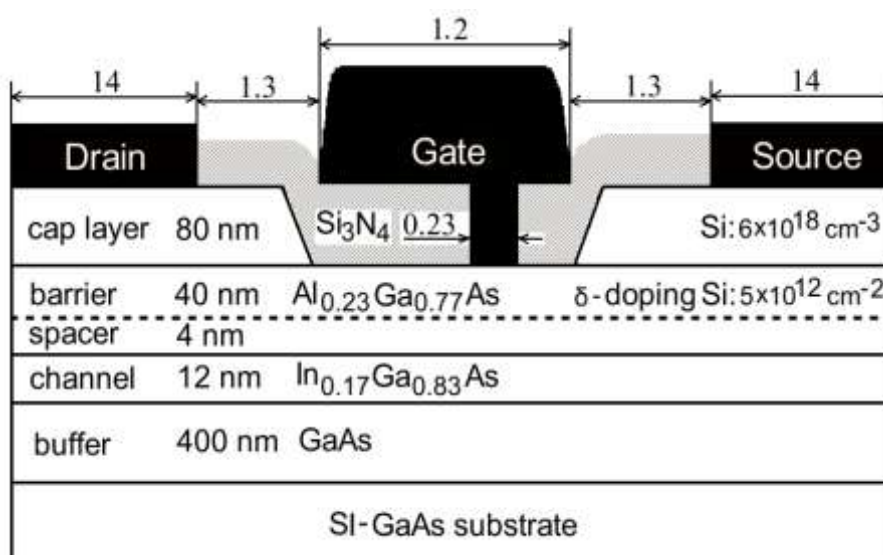


Рисунок 2.24 – Схематический вид элементарной ячейки в массиве (все латеральные размеры даны в микронах)

На рисунке 2.25 показывается часть транзисторной структуры с параллельным соединением полевых транзисторов в плоскости.

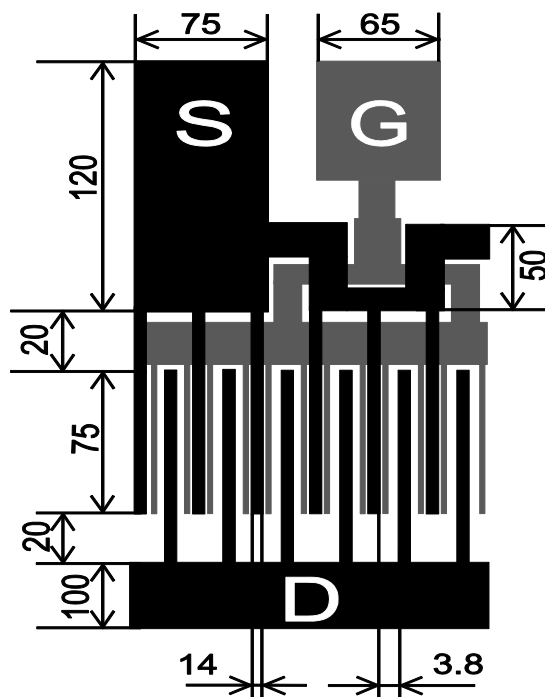


Рисунок 2.25 – Вид части транзисторной структуры с параллельным соединением полевых транзисторов в плоскости (все размеры даны в микронах)

На рисунке 2.26 приведена фотография металлизации транзисторной структуры с параллельным соединением элементарных ячеек в сканирующем туннельном микроскопе.

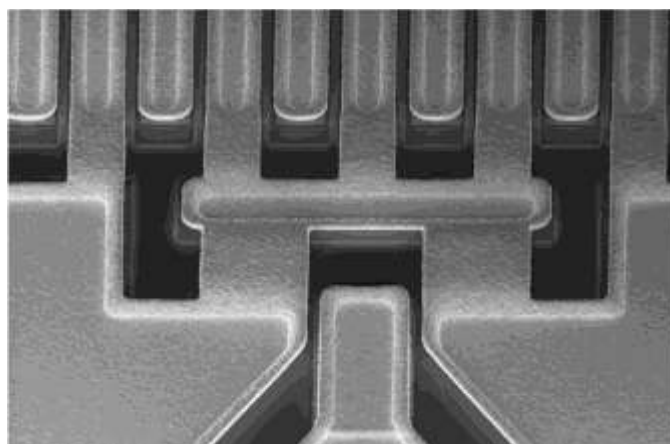


Рисунок 2.26 – Электронная фотография металлизации транзисторной структуры с параллельным соединением элементарных ячеек

Весь массив параллельно соединенных транзисторов формируется путем повторения 16 ячеек, показанных на рисунке 2.25. Три таких соединения показаны на рисунке 2.27.

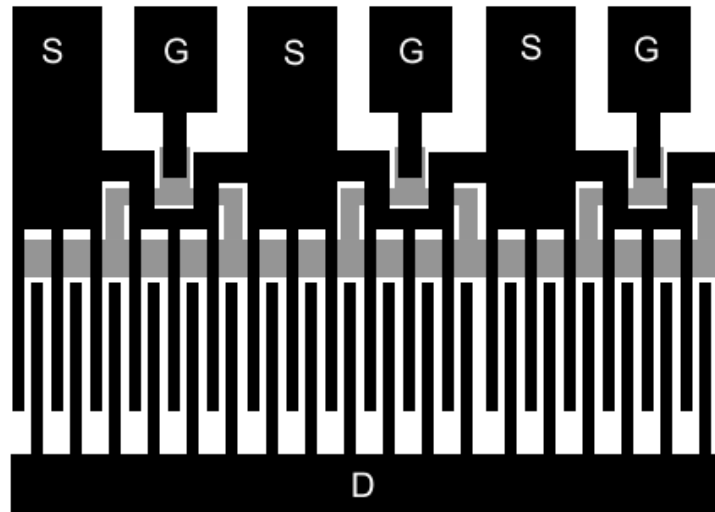


Рисунок 2.27 – Вид транзисторной структуры с параллельным соединением полевых транзисторов в плоскости

На рисунке 2.28 показана фотография металлизации транзисторной структуры, на которой видны ячейки массива. Весь массив состоит из 192 полевых транзисторов и имеет длину 3.6 мм.

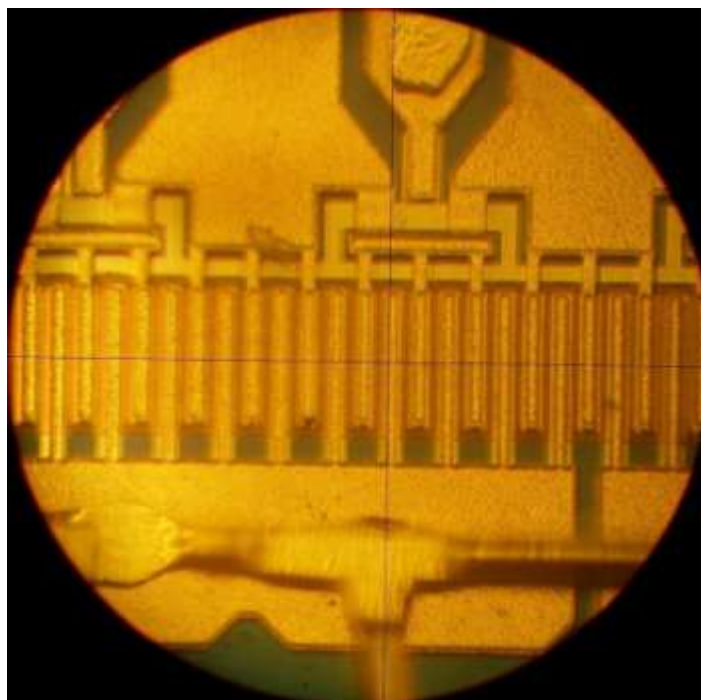


Рисунок 2.28 – Фотография верхней металлизации массива транзисторов с параллельным соединением элементарных ячеек в оптическом микроскопе

Образцы транзисторных структур с параллельным соединением элементарных ячеек в количестве 3 штук были приклеены и разварены в корпус держателя микросхем 4118.24-2.01Н. Схема монтажа кристалла показана на рисунке 2.29, выводы были присоединены к 1, 4 и 9 контактными площадкам корпуса. Использовались золотые провода диаметром 50 мкм.

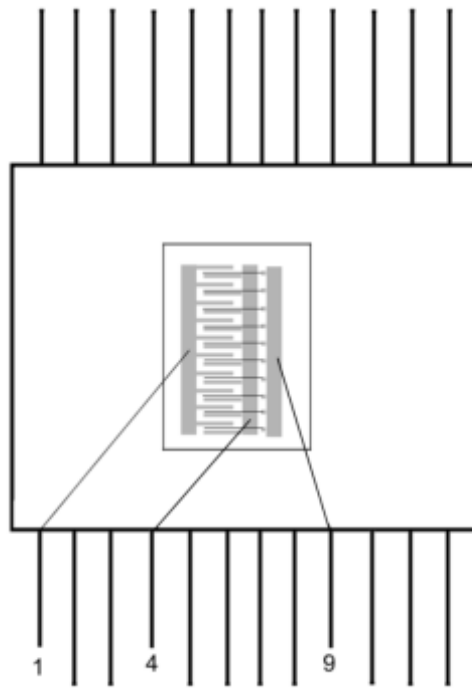


Рисунок 2.29 – Схема разварки образца в корпус держателя микросхем (шины стока, истока и затвора обозначены условно)

Цепочка из 4-х плотно размещенных индивидуальных ПТ была изготовлена на одной микросхеме из GaAs/InGaAs/AlGaAs гетероструктуры. Индивидуальный ПТ схематически показанный на рисунке 2.24 является схожим с индивидуальными ПТ массива последовательно соединенных ПТ. Структура имеет два боковых омических контакта и три свободных омических контакта между различными ПТ в цепочке: контакты стока 1, 2 и 3 ПТ в цепочке соответственно формируют контакты истока 2, 3 и 4 ПТ.

Схематическое изображение планарной структуры массива последовательно соединенных транзисторов показано на рисунке 2.30.

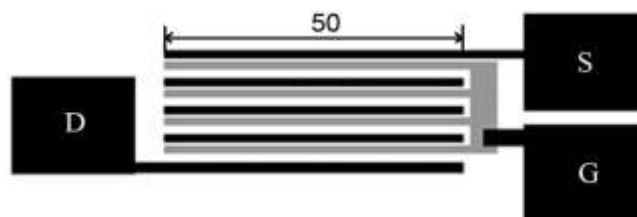


Рисунок 2.30 – Схематическое изображение планарной структуры массива последовательно соединенных транзисторов (размер дан в микронах)

Кристалл с цепочкой ПТ монтировался в кристаллодержатель позволяющий прикладывать постоянное смещение на затвор к общему затворному контакту и постоянный ток смещения стока между боковыми (истоковым и стоковым) контактами цепочки ПТ.

2.4 Методики измерений

2.4.1 Подготовка образцов к измерениям терагерцового отклика

На изготовленных образцах проводились статические измерения вольтамперных и переходных характеристик. В качестве средств измерений использовались приборы KEITHLEY 2400 SourceMeter, управляемые с помощью компьютера посредством специального программного обеспечения. Схема измерительной установки показана ниже на рисунке 2.31.

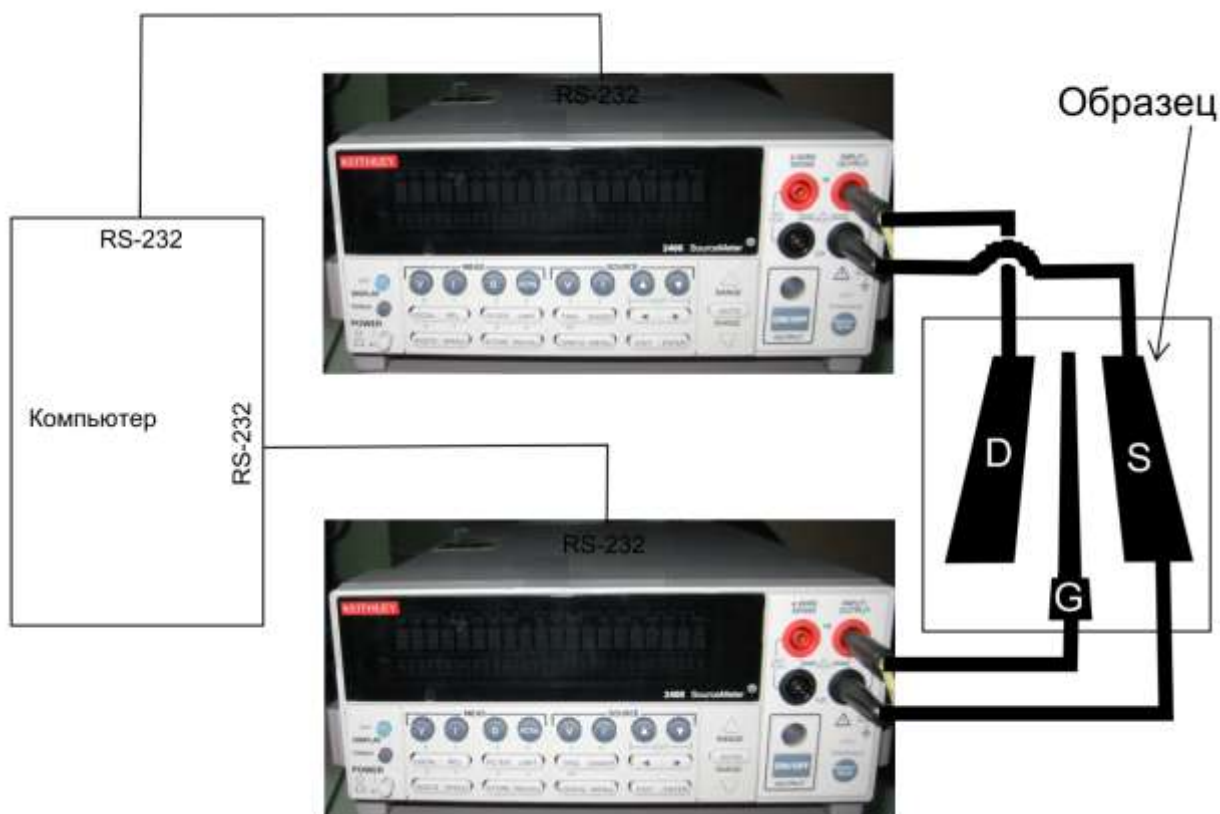


Рисунок 2.31 – Схематическое изображение измерительной установки статических характеристик транзистора

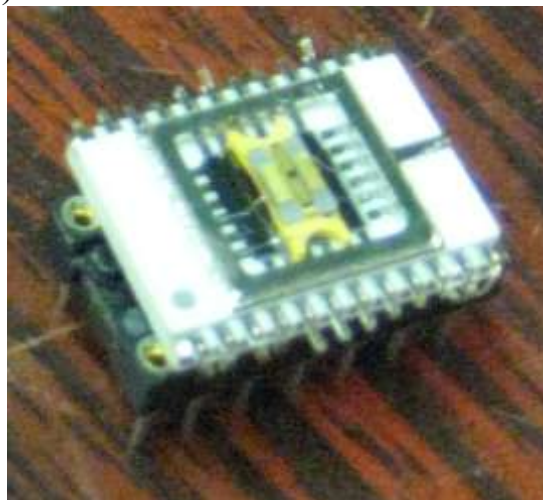
Приборы KEITHLEY 2400 Source Meter позволяют измерять напряжение и ток и служить источниками питания. При измерениях статических характеристик также измерялся ток утечки через затвор.

На рисунке 2.32 показана оснастка для закрепления образцов.

а)



б)



в)



Рисунок 2.32 – а) держатель микросхем; б) держатель со вставленным в него образцом; в) конец волновода с «кроватькой» для вставки в нее держателя микросхем

Образец вставлялся в держатель для микросхем и затем закреплялся на конце волновода. Ослабление мощности в сверхразмерном круглом металлическом волноводе составляет около 10 дБ на частоте $f \sim 600$ ГГц. Измерения ослабления мощности проводились с помощью DTGS пирозлектрического детектора, который является штатным приемником, поставляемым с BOMEM DA3.36 FTIR-спектрометром. Для измерений при

криогенных температурах, конец волновода с образцом погружался в сосуд с жидким гелием (рисунок 2.33) или с жидким азотом.



Рисунок 2.33 – Сосуд с жидким гелием СТГ-40

Источником терагерцового излучения частотой от 0.4 до 0.7 ТГц являлась лампа обратной волны (ЛОВ-74). Выходная мощность ЛОВ на используемых частотах составляла порядка 1 мВт (без затухания в волноводе). Перестройка частоты ЛОВ осуществлялась изменением напряжения источника питания. Калибровка частоты ЛОВ от напряжения источника питания показана на рисунке 2.34.

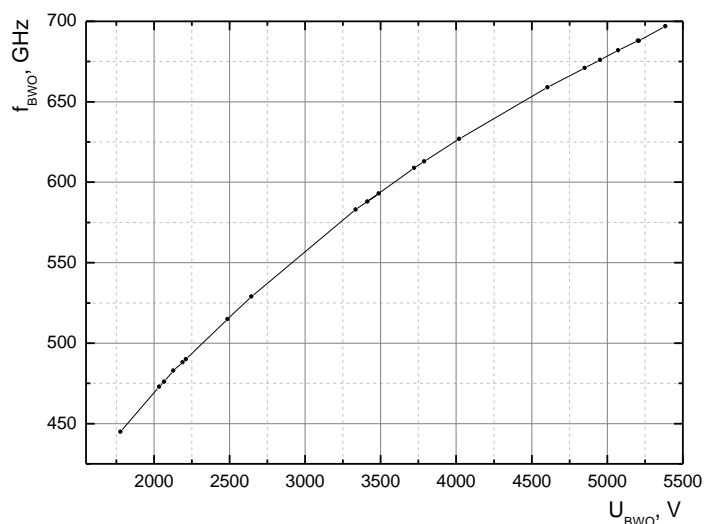


Рисунок 2.34 – Зависимость рабочей частоты ЛОВ от напряжения источника питания

Измерения отклика на терагерцовое излучение выполнялись по схеме синхронного детектирования [89]. Схема измерений транзисторной структуры с узкощелевым решеточным затвором и массива последовательно соединенных полевых транзисторов отличалась от схемы измерения массива параллельно соединенных полевых транзисторов, поскольку сопротивление структуры с параллельным соединением транзисторов являлось малым – необходим был усилитель тока для согласования сопротивлений. При измерениях фотоотклика транзисторной структуры с узкощелевым решеточным затвором и массива последовательно соединенных полевых транзисторов использовалась схема с усилителем напряжения.

2.4.2 Измерения терагерцового отклика транзисторной структуры с узкощелевым решеточным затвором и массива последовательно соединенных полевых транзисторов

Большая активная площадь исследуемой транзисторной структуры с узкощелевым решеточным затвором ($2 \times 2 \text{ мм}^2$) позволяла осуществлять эффективную связь падающего терагерцового излучения с плазменными

волнами в канале транзистора. Измерения были выполнены на пяти фиксированных частотах, где выходная мощность ЛОВ имеет порядок 1 мВт. Данная транзисторная структура предназначена для резонансного детектирования терагерцового излучения, поэтому ее измерения проводились при температуре жидкого гелия.

Терагерцовое излучение ЛОВ механически модулировалось с частотой ≈ 400 Гц и подавалось на образец через сверхразмерный круглый металлический волновод с конусообразным концом с выходной апертурой 6 мм в диаметре, полностью покрывающем всю исследуемую транзисторную структуру. Волновод имел Г-образную форму и в вершине «колена» волновода находилось зеркало. Чтобы в криогенный модуль не попадали пары воды и там не кристаллизовались, ставился тефлоновый фильтр, который прозрачен для ТГц излучения. Выходная апертура этого волновода была расположена непосредственно над образцом, так что падающая терагерцовая мощность распределялась практически однородно по площади образца. Поэтому нормированная терагерцовая мощность, падающая на площадь образца, оценивается как 14 мкВт на выбранных терагерцовых частотах. Считалось, что электрическое поле падающей терагерцовой волны непосредственно на образец было поляризовано поперек полосок решеточного затвора. Часть волновода с образцом опускались в сосуд с жидким гелием. Фиксированный ток смещения $I_d=I_0$ пропускаться между истоком и стоком при заземленном контакте истока (пропускался ток $I_0=0.5$ мА, значение которого много меньше, чем ток насыщения). Затворное напряжение, U_g , прикладывалось между контактами решеточного затвора и истока. Изменение падения напряжения, δU_d , вдоль канала структуры, вызываемое терагерцовым облучением образца, измерялось как функция напряжения на решеточном затворе стандартной методикой синхронного детектирования. Принципиальная схема измерений на рисунке 2.35.

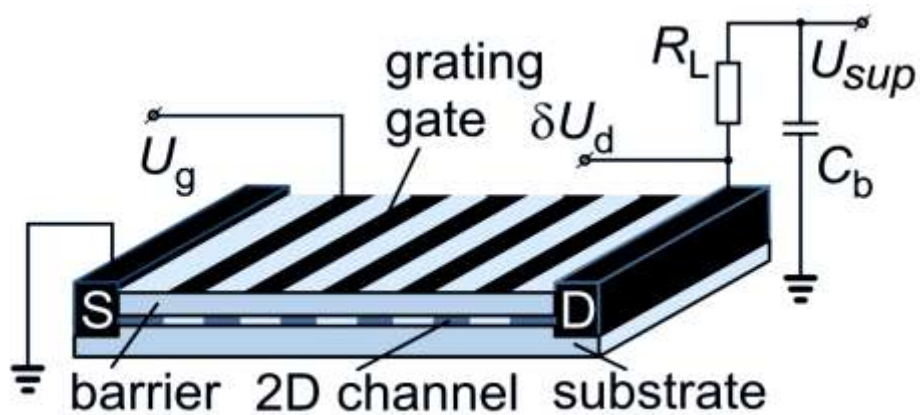


Рисунок 2.35 – Схематический вид транзисторной структуры с узкощелевым решеточным затвором и измерительная схема (терагерцовое излучение падает сверху по нормали к поверхности образца), где C_b - шунтирующий конденсатор, развязывающим постоянный ток смещения цепи стока при приложении напряжения, U_{sup} , от схемы измерения фотоотклика

На рисунке 2.36 показана схема измерений с периферийными устройствами. В схеме измерения используются два усилителя: первый с предусилителем через схемотехническое решение, которого возможно подать смещение на образец (что важно для симметричной структуры транзисторной структуры с узкощелевым решеточным затвором), и с первого усилителя сигнал идет на синхронный детектор, с интерфейсом совместимым с интерфейсом компьютера.

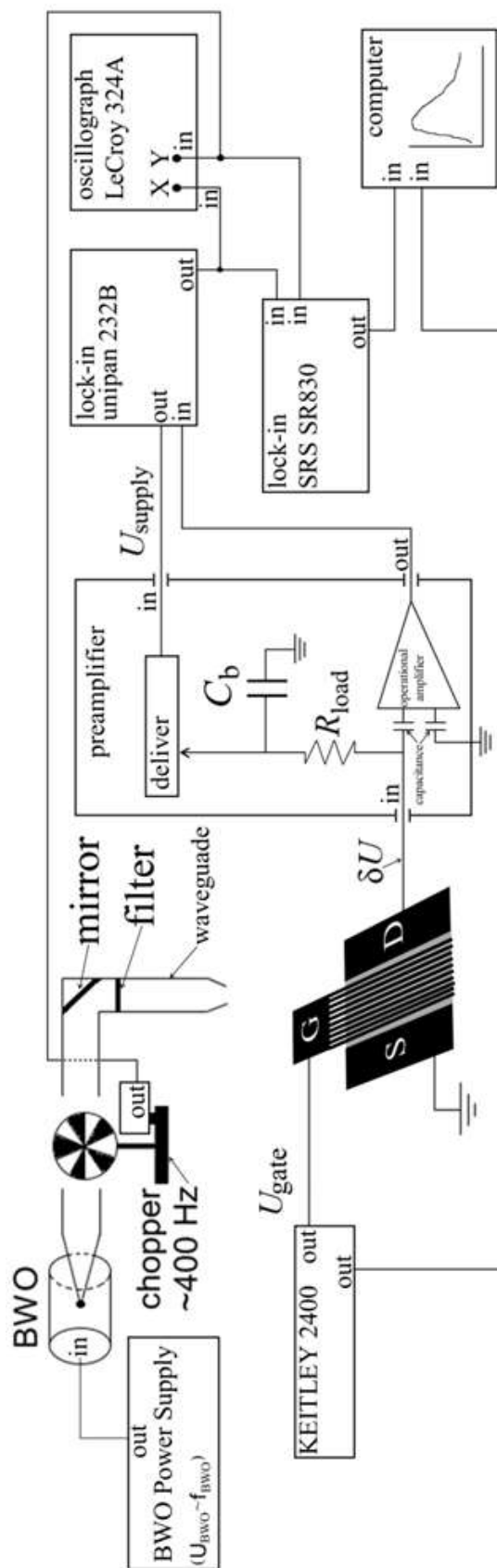


Рисунок 2.36 – Схема измерений терагерцового отклика транзисторной структуры с узкощелевым решеточным затвором и массива последовательно соединенных полевых транзисторов

По схеме на рисунке 2.36 измерялся также массив последовательно соединенных полевых транзисторов при комнатной температуре. Принцип измерений был таким же, как и для транзисторной структуры, с узкощелевым решетчатым затвором с той лишь разницей, что измерения были при комнатной температуре и на фиксированной частоте.

2.4.3 Измерениям терагерцового отклика массива параллельно соединенных транзисторов

В случае массива параллельно соединенных транзисторов принцип измерений тот же, что и для резонансного детектора, за исключением того что используется усилитель с малым входным сопротивлением для согласования с сопротивлением образца (токовый предусилитель SR570, коэффициент усиления измеряется в В/А), поскольку проводимость массива параллельно соединенных полевых транзисторов, измеряемая между шинами стока и истока, равна ≈ 2 Ом при нулевом затворном напряжении. На каждый полевой транзистор в массиве подается одно и то же затворное напряжение, с общего затворного контакта. Все полевые транзисторы в массиве электрически соединяются в параллель и имеют общие контакты истока и стока (схема электрической цепи массива полевых транзисторов показывается на рисунке 2.37).

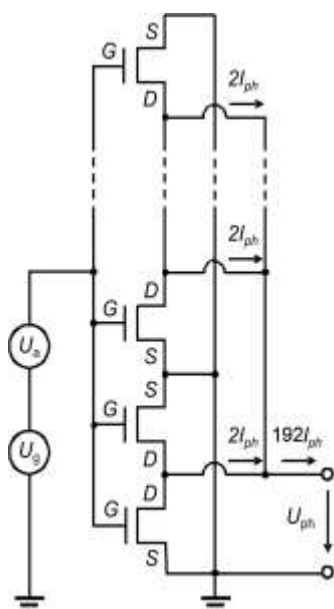


Рисунок 2.37 – Схема электрической цепи массива детекторов из полевых транзисторов (U_a – индуцированное фотонапряжение от падающей терагерцовой волны между контактами истока и затвора в каждом индивидуальном транзисторе и во всем массиве)

Постоянный фототок измерялся между шинами истока и стока массива при температуре жидкого азота (77 К) и при комнатной температуре (300 К) для нулевого постоянного тока смещения стока. Схема измерений показана на рисунке 2.38.

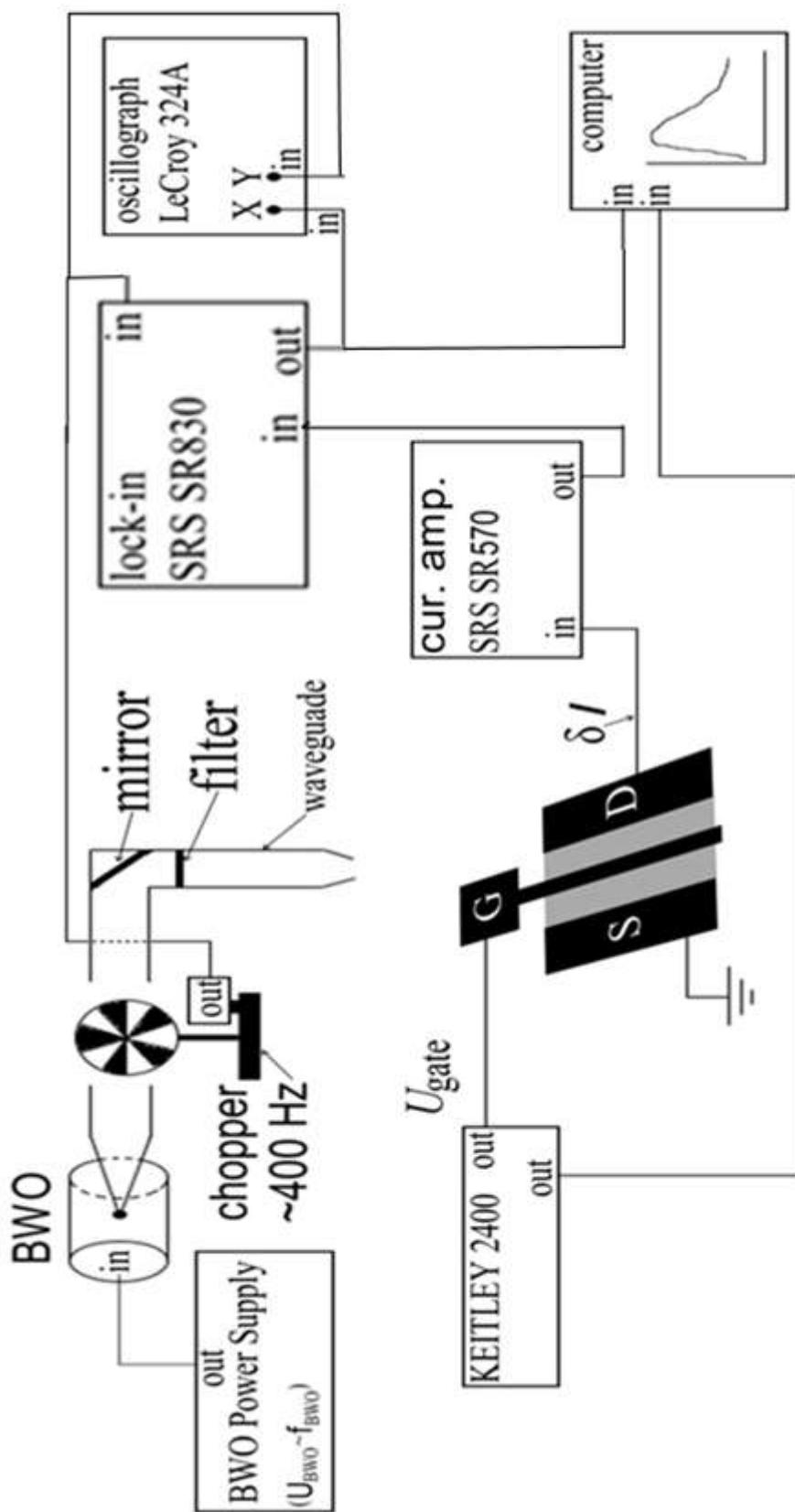


Рисунок 2.38 – Схема измерений массива параллельно соединенных транзисторов НЕМТ

Развертка напряжения на затворе и снятие отклика на излучение осуществлялась под управлением компьютера. Терагерцовый фотоотклик после усиления визуализировался на осциллографе вместе с опорным сигналом от механического модулятора (рисунок 2.39).

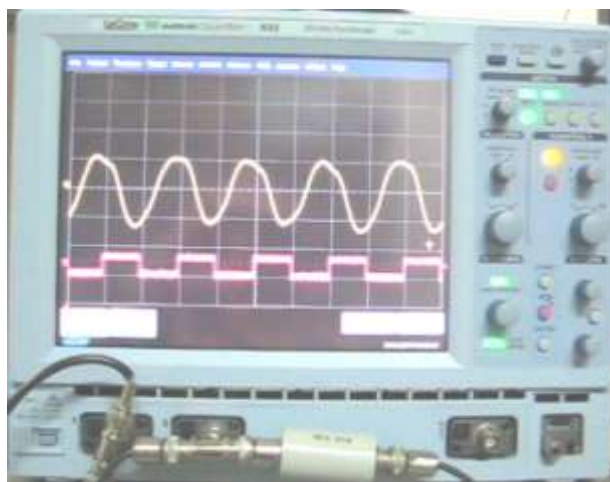


Рисунок 2.39 – Вид экрана осциллографа (внизу экрана – опорный сигнал, сверху экрана – сигнал с исследуемого детектора)

Из рисунка 2.39 видно, что сигнал с детектора не повторяет форму меандра, это связано с тем, используется механический прерыватель потока ТГц от ЛОВ (и поток излучения не прерывается/возобновляется резко, это происходит постепенно), и поэтому более правильная форма опорного сигнала это последовательность трапеций, а не прямоугольников.

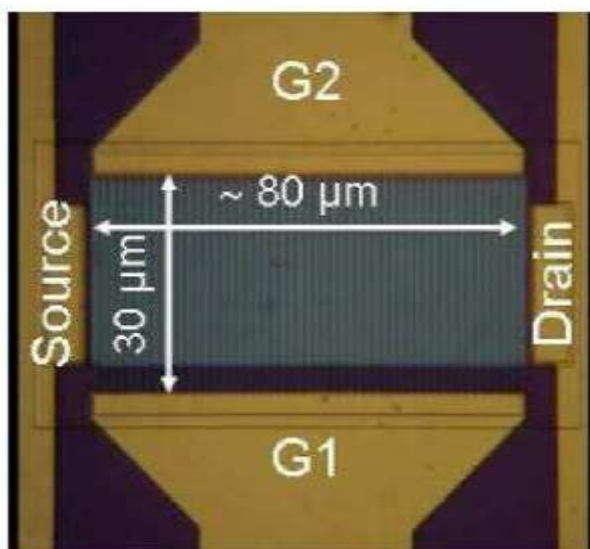
2.5 Зависимость ТГц отклика от поляризации излучения

При измерениях данных детекторов считается, что поляризация падающего излучения линейная и перпендикулярна металлическим полоскам, образующим контактную металлизацию над активным слоем транзисторной структуры. В конструкции лампы обратной волны предусмотрено выходное отверстие, которое имеет вид щели и является поляризатором. Поэтому выходящее излучение из лампы является в хорошем приближении линейно поляризованным (на самом деле излучение эллиптически поляризовано с соотношением полуосей эллипса порядка соотношению сторон в выходной

щели лампы). Прежде чем упасть на образец излучение проходит через волновод, который представляет собой круглую (диаметр 2 см) и длинную (более 1 м) трубу. При прохождении излучения в таком волноводе происходит смещение поляризации и уже на образец падает не линейно поляризованное излучение.

Активные области исследуемых образцов представляли собой по сути решетки, которые одновременно являлись поляризаторами, после прохождения, которых излучение становится линейно поляризованным с вектором напряженности электрического поля перпендикулярным металлическим полоскам решеток. Излучение с такой поляризацией вызывает возбуждение плазменных колебаний под затвором транзистора. Однако внешняя металлизация (относительно решетки лежащей на активном слое) может стать некой антенной, которая ловит проекцию вектора поля вдоль решетки и вызывает разность потенциалов между контактами транзистора, которая будет приносить свой вклад в ТГц отклик. Ниже приведены рисунки 2.40 и 2.41 вида сверху транзисторных структур и график зависимости ТГц отклика в зависимости от угла поляризации (угол между направлением вектора электрического поля в линейно поляризованном падающем излучении и направлением сток-исток), которые взяты из работ [9] и [71].

а)



б)

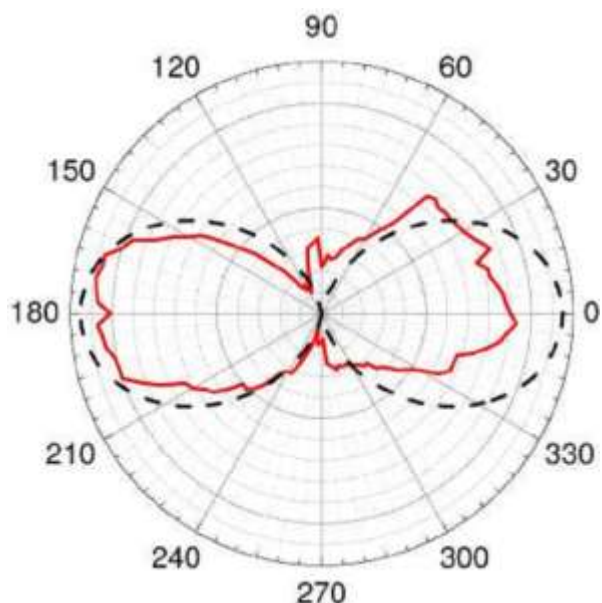
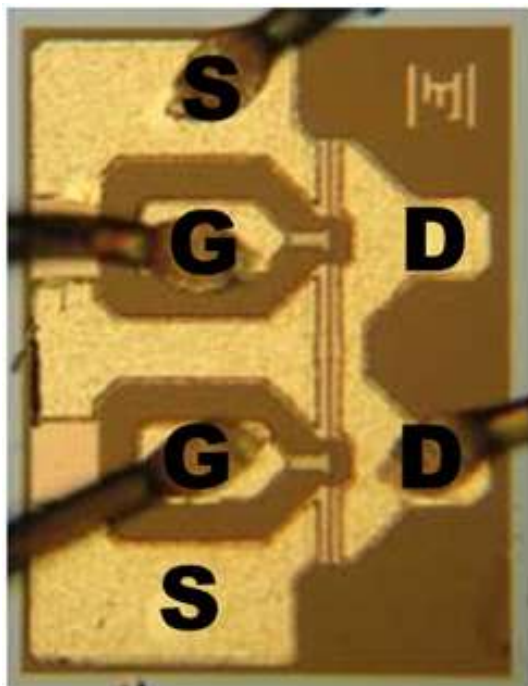


Рисунок 2.40 – а) Вид сверху транзисторной структуры из [71]: материальная система InGaP/InGaAs/GaAs с концентрацией двумерных электронов $2.5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$, подвижность $7000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, параметры сдвоенной решетки: длина затворов G1 100 нм, длина затворов G2 300 нм, ширина щелей между соседними затворами 100 нм; б) ТГц отклик в зависимости от азимутального угла между вектором электрического поля падающей нормально ТГц волны и направлением сток-исток (сплошная линия), и кривая косинуса азимутального угла в квадрате (пунктирная линия)

Из рисунка 2.40б видно, что максимальный отклик достигается при поляризации перпендикулярной металлическим полоскам решетке. Максимальное значение получается приблизительно на 180 градусах. Диаграмма направленности по уровню 0.7 от максимума составляет величину около 70 градусов.

а)



б)

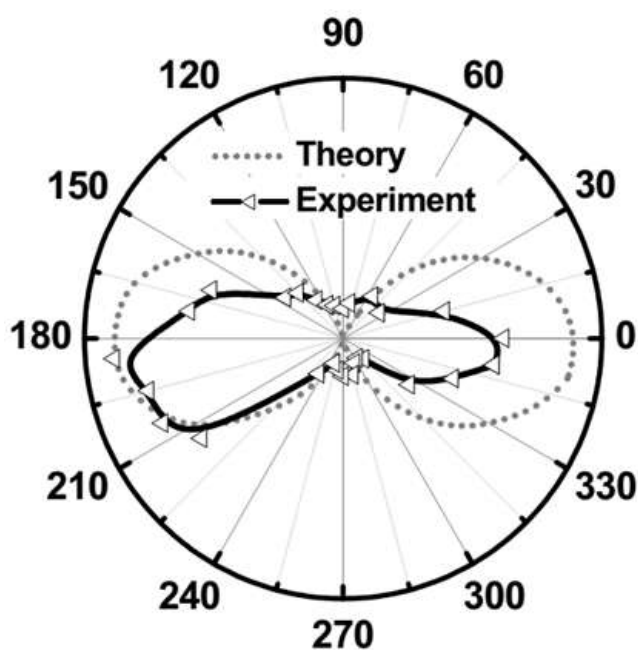


Рисунок 2.41 – а) Вид сверху транзисторной структуры из [9]: материальная система AlGaAs/GaAs с длиной затвора 150 нм и ширина 280 мкм; б) ТГц отклик в зависимости от азимутального угла между вектором электрического поля падающей нормально ТГц волны и направлением сток-исток (сплошная линия с пустыми треугольниками) и теоретическая кривая косинуса азимутального угла в квадрате (точечная линия)

Из рисунка 2.41б видно, что максимальный отклик достигается при поляризации перпендикулярной металлической полоске затвора, несмотря на соотношение площади контактной металлизации к площади затвора. Максимальное значение получается приблизительно на 180 градусах (за отклонение диаграммы направленности отвечают контактные провода [9]). Диаграмма направленности по уровню 0.7 от максимума составляет величину около 50 градусов.

Поскольку транзисторные структуры на 2.40а и 2.41б являются симметричные, то необходимо было пропускать ток смещения через канал для

получения не нулевого ТГц отклика. С этим связана асимметричность по максимальному значению диаграмм 2.40б и 2.41б по отношению к направлениям 0 градусов и 180 градусов.

Как видно из диаграмм в целом зависимость соответствует теоретической $\cos^2 \varphi$, где φ – азимутальный угол. Из этого следует, что для ТГц отклика решающее значение имеет проекция вектора электрического поля на направление сток-исток и при этом ТГц отклик пропорционален мощности ТГц излучения, которое в свою очередь квадратично по полю, значит, ТГц отклик сток-исток пропорционален $\cos^2 \varphi$. Образцы детекторов на рисунках 2.40а и 2.41а имеют, в том числе развитую контактную металлизацию как по направлению сток-исток, так в перпендикулярном направлении. Тем не менее, если поляризация параллельна металлической полоске затвора, то ТГц отклик имеет минимальное значение. Следовательно, из теоретических соображений и из экспериментальных зависимостей можно сделать вывод, что поляризация параллельная ширине затворного контакта не влияет на ТГц отклик.

При оценке чувствительности исследуемых в настоящей работе детекторов считалось, что на них падает линейно поляризованное излучение поперек металлизации затвора. Значит с учетом того, что при прохождении волновода ТГц излучение поляризуется (то есть часть ТГц мощности не дает вклада в ТГц отклик детектора), оценки, проведенные в диссертации, при прочих равных (рассматривается зависимость только от поляризации), дают оценку чувствительности снизу.

2.6 Выводы по главе

Разработаны конструкции и маршруты изготовления образцов по технологическому процессу совместимому с изготовлением полевого транзистора с высокой подвижностью электронов. Изготовленные образцы, представляют собой транзисторные структуры на основе псевдоморфной наногетероструктуры AlGaAs/InGaAs с периодической верхней металлизацией

с периодом на один-два порядка меньшим длины волны детектируемого терагерцового излучения. Транзисторная структура с узкощелевым периодическим решеточным затвором с периодом 3 мкм, шириной щели 0.3 мкм и площадью $2 \times 2 \text{ мм}^2$ изготовлена для исследования резонансного детектирования. Массивы параллельно и последовательно соединенных полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов периодом 17.8 мкм и несимметричным Т-образным затвором с длинной ножки затвора 0.23 мкм изготовлены для исследования нерезонансного детектирования. В массиве с параллельным соединением транзисторов насчитывается 192 элементарных ячейки, в массиве с последовательно соединенными транзисторами имеется 4 элементарных ячейки. Несимметричный Т-образный затвор получается смещением ножки затвора к истоку.

Приведены схемы и методики измерения статических и фотоэлектрических величин для получения детекторных характеристик транзисторных структур. Описывается технологический процесс подготовки к измерениям. Рассматривает влияние смещения поляризации в экспериментальной установке на выходные характеристики детекторов.

3 Терагерцовый фотоотклик транзисторной структуры с узкощелевым короткопериодным решеточным затвором

В этой главе приводятся результаты исследований резонансного терагерцового детектора на основе транзисторной структуры с узкощелевым решеточным затвором на основе AlGaAs/InGaAs/GaAs. Явление плазмонной терагерцовой фотопроводимости структуры GaAs/InGaAs/AlGaAs полевого транзистора с узкощелевым решеточным затвором исследуется экспериментально и полученные результаты сравниваются с данными теоретических расчетов. Чувствительность такого терагерцового детектора превышает ранее сообщаемую чувствительность аналогичного детектора с более широкими щелями решеточного затвора на два порядка величины, что обусловлено усилением связи между входящим терагерцовым излучением и плазмонными колебаниями в структуре транзистора. NEP уменьшается соответствующим образом на 3 порядка величины. Анализ показывает, что рекордные величины достигаются за счет значительного усиления ближнего поля в узких щелях в решеточном затворе. В разделе 3.1 описаны полученные экспериментальные зависимости: статические характеристики и плазмонный резонансный отклик детектора на падающее терагерцовое излучение. В разделе 3.2 проводится аналитический разбор особенностей детектирования терагерцового излучения изготовленным образцом. В разделе 3.3 сформулированы полученные результаты.

3.1 Экспериментальные результаты исследований терагерцового отклика транзисторной структуры с узкощелевым короткопериодным решеточным затвором

Все измерения были выполнены при температуре жидкого гелия $T=4.2$ К. Пороговое затворное напряжение обеднения канала, получаемое из интерполяции переходной характеристики структуры полевого транзистора с

решеточным затвором (рисунок 3.1) к точке нулевого тока стока, $I_d=0$, составляет около $U_{th} = -1$ В.

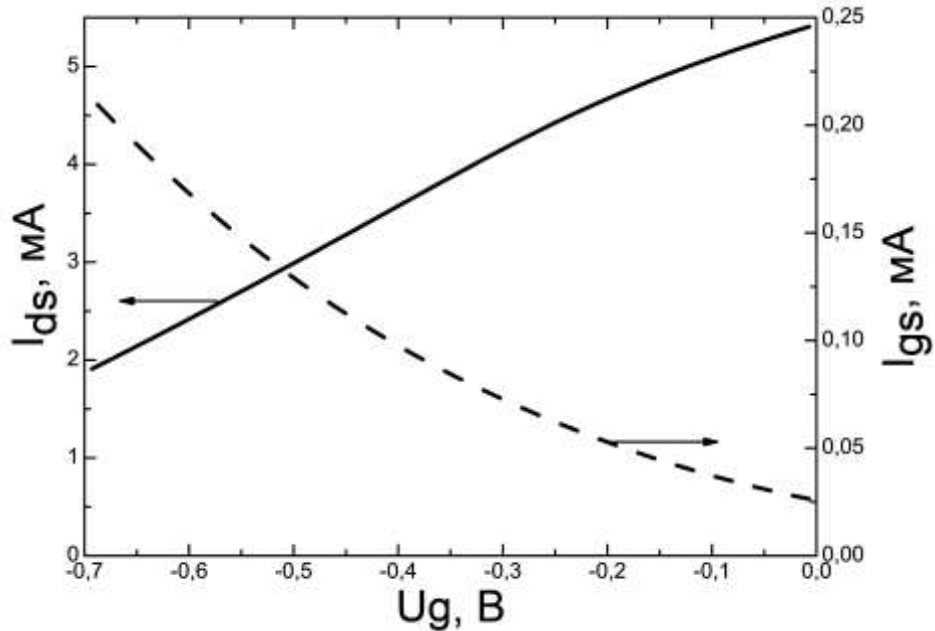


Рисунок 3.1 – Переходная характеристика и ток утечки полевого транзистора на основе наногетероструктуры GaAs/InGaAs/AlGaAs с узкощелевым решеточным затвором при температуре $T=4.2$ К и напряжении сток-исток $U_d=1$ В.

Рисунок 3.2 показывает вольтамперную характеристику, которая демонстрирует насыщение тока стока в канале структуры с узкощелевым решеточным затвором транзистора при напряжениях сток-исток U_d больше 0.8 В.

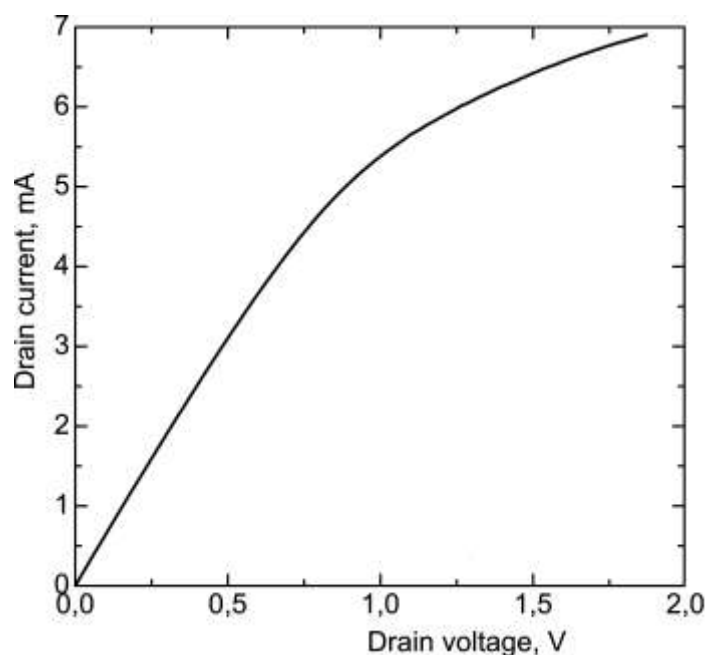


Рисунок 3.2 – Вольтамперная характеристика исследуемой GaAs/InGaAs/AlGaAs транзисторной структуры с узкощелевым решеточным затвором при температуре $T=4.2$ К для нулевого затворного напряжения $U_g=0$.

Терагерцовое облучение образца изменяет темновое сопротивление канала ρ_0 на величину фотосопротивления $\delta\rho$. Фиксированный ток смещения $I_d=I_0$ пропусклся между истоком и стоком при заземленном контакте истока (пропусклся ток $I_0=0.5$ мА, значение которого много меньше, чем ток насыщения). Затворное напряжение, U_g , прикладывалось между контактами решеточного затвора и истока. Изменение падения напряжения, δU_d , вдоль канала структуры, вызываемое терагерцовым облучением образца, измерялось как функция напряжения на решеточном затворе стандартной методикой синхронного детектирования. В режиме фиксированного тока смещения стока, фотоотклик сток-исток пропорционален терагерцовому фотосопротивлению $\delta\rho$: $\delta U_d=I_0(\delta\rho)$.

Рисунок 3.3 показывает фотоотклик сток-исток как функцию 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 (что

соответствуют более малым значениям U_{sup}) в соответствии с уравнением (1.8). Деля пиковое значение фотоотклика сток-исток, $\delta U_d \approx 4$ мкВ, на падающую на детектор терагерцовую мощность, получаем вольт-ваттную чувствительность $R_V = 280$ мВ/Вт, которая оказывается на два порядка величины больше, чем сообщалось ранее для транзисторной структуры со скважностью решеточного затвора 0.5 [26]. Такое гигантское усиление чувствительности объясняется значительным усилением связи между падающим терагерцовым излучением и плазменными колебаниями в транзисторной структуре с узкощелевым решеточным затвором.

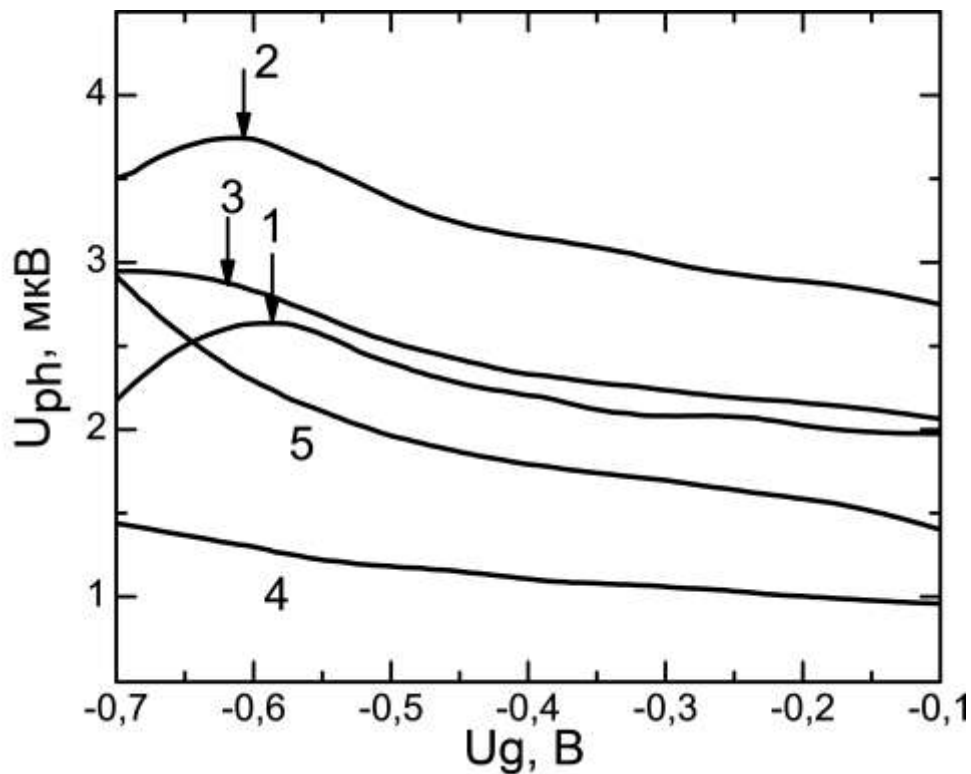


Рисунок 3.3 – Фотоотклик сток-исток исследуемого детектора при температуре $T=4.2$ К как функция затворного напряжения на различных частотах: 697 ГГц (кривая 1), 688 ГГц (кривая 2), 682 ГГц (кривая 3), 659 ГГц (кривая 4) и 593 ГГц (кривая 5), измеренные со временем интегрирования сигнала 1 с при каждом значении затворного напряжения

Теоретическое моделирование взаимодействия между падающим терагерцовым излучением и плазмонами в исследуемой структуре было выполнено В.В. Поповым и Д.В. Фатеевым с использованием самосогласованного электродинамического подхода [77]. Профиль периодически модулированной равновесной двумерной плотности электронов в канале вычислялся как функция затворного напряжения, U_g , в рамках самосогласованного электростатического метода [102]. Единственным подгоночным параметром, используемым при численном моделировании, являлось значение подвижности электронов в канале транзисторной структуры, которое составляло $30\,000\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ для наилучшего совпадения теоретических результатов с экспериментальными данными. Рисунок 3.4 показывает вычисленное поглощение терагерцового излучения в исследуемой транзисторной структуре с узкощелевым решеточным затвором как функция напряжения для пяти терагерцовых частот, используемых при измерениях терагерцовой фотопроводимости.

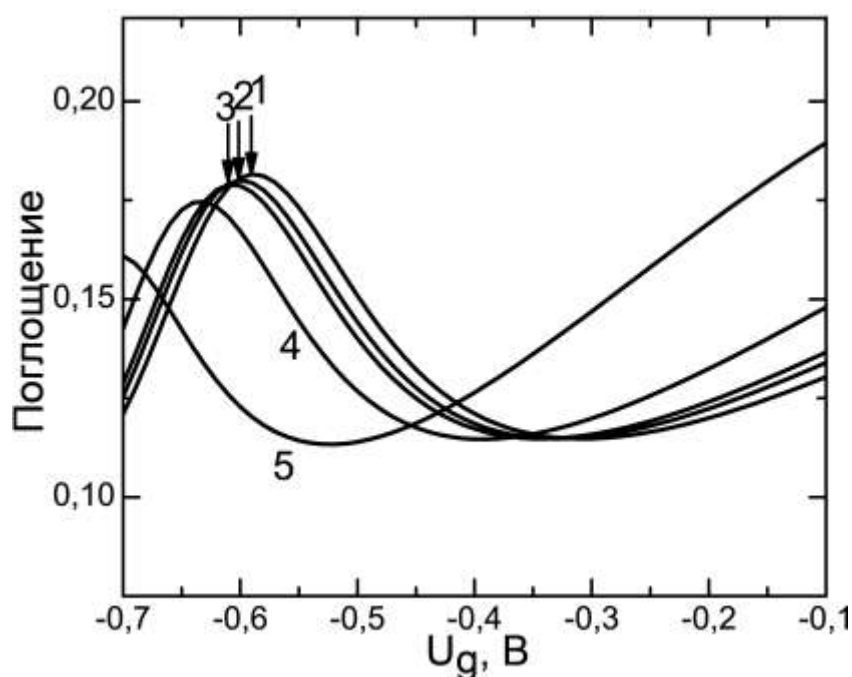


Рисунок 3.4 – Вычисленное поглощение терагерцового излучения в исследуемом детекторе как функция затворного напряжения для тех же самых субтерагерцовых частот, что и на рисунке 3.3 (стрелки показывают положение плазмонных резонансов)

На рисунке 3.5 показаны экспериментальные кривые фотоотклика (рисунок 3.3), отнесенные к максимальному значению фотонапряжения для каждой частоты, падающего излучения. В таком формате представления четко демонстрируются резонансы, и прослеживается их появление с повышением частоты. Пики поглощения на рисунке 3.4 соответствуют возбуждению второй плазмонной моды (с волновым вектором плазмона $k_2 = 4\pi/L$) в исследуемой структуре. Резонансное поглощение достигает значения 0.2, что является близким к максимальному теоретическому значению 0.22, согласно формуле (1.25). Это свидетельствует о сильной связи между падающим терагерцовым излучением и плазменными колебаниями в канале транзисторной структуры с узкощелевым решеточным затвором.

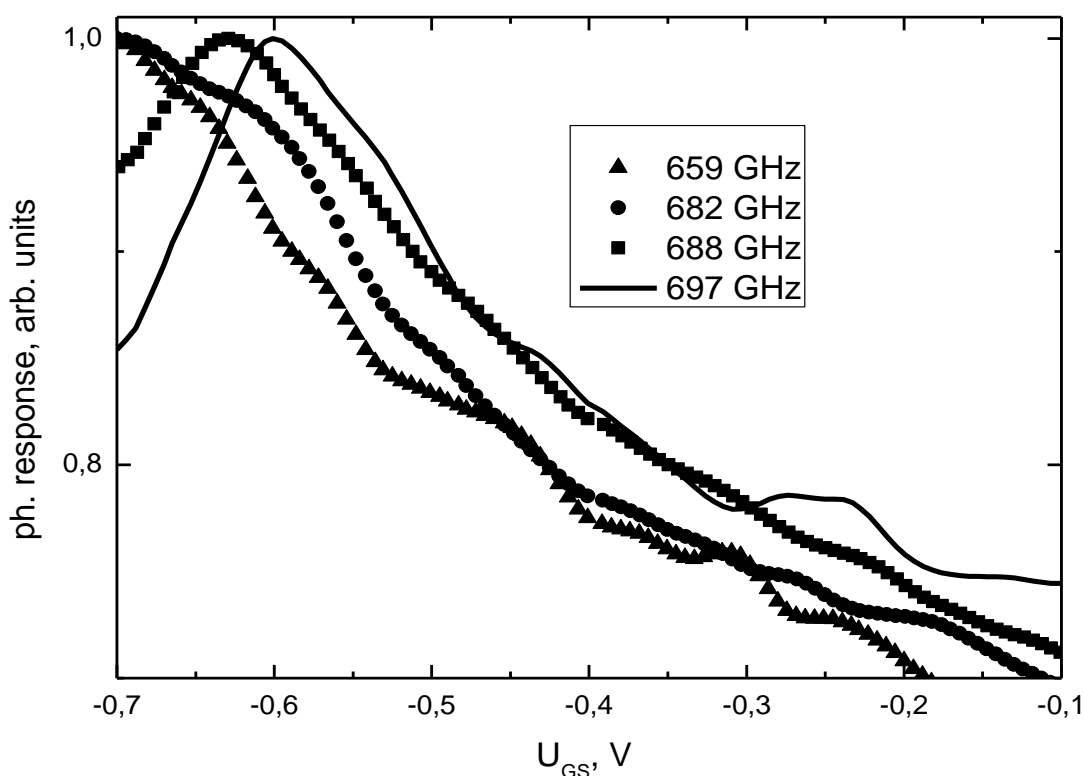


Рисунок 3.5 – Экспериментальные зависимости фотоотклика отнесенные к максимальному значению фотонапряжения для каждой частоты

Положение и форма линий резонансов поглощения в рисунке 3.5 хорошо соответствуют положению и форме линий соответствующих пиков фотоотклика на рисунке 3.4. Поэтому, можно идентифицировать наблюдаемые пики терагерцового фотоотклика с плазмонным откликом канала исследуемой транзисторной структуры. Пики резонансов слабо выражены на кривых 4 и 5 на рисунках 3.3 и 3.5, поскольку они сливаются с более сильным нерезонансным откликом при значениях затворного напряжения близких к пороговому напряжению обеднения канала [46].

Измеренное значение чувствительности позволяет оценить эквивалентную мощность шума детектора. Эквивалентная мощность шума (NEP) определяется как [103]

$$NEP = \frac{N}{R_V}, \quad (3.1)$$

где N - общий шум детектора в $B/\sqrt{Гц}$;

R_V - чувствительность детектора в В/Вт.

Общий шум определяется по формуле [103]

$$N = (N_J^2 + N_S^2 + N_{G-R}^2)^{1/2}, \quad (3.2)$$

где N_J - тепловой (Джонсона-Найквиста) шум;

N_S - дробовой шум;

N_{G-R} - генерационно-рекомбинационный шум.

Тепловой шум вычисляется по формуле

$$N_J = (4k_B T \rho_0)^{1/2} \quad (3.3)$$

где T - температура детектора;

k_B - константа Больцмана;

ρ_0 – темновое сопротивление канала.

Дробовой шум вычисляется по формуле

$$N_S = \rho_0 (2FeI_0)^{1/2}, \quad (3.4)$$

где F - фактор Фано [104], учитывающий неидеальность реальных шумовых процессов, который обычно порядка единицы в структурах с квантовыми ямами;

e - заряд носителей (в данном случае это электроны);

I_0 - темновой ток.

Генерационно-рекомбинационный шум при низкой частотной модуляции входного излучения (400 Гц) может быть оценен как [103]

$$N_{G-R} = 2I_0 \rho_0 (\tau/n_0)^{1/2}, \quad (3.5)$$

где n_0 - суммарное число свободных электронов в канале исследуемой транзисторной структуры;

τ - времени жизни электрона в зоне проводимости.

Темновое сопротивление детектора, оцененное из линейной части темновой вольтамперной характеристики (рисунок 3.2), составляет около $\rho_0=180$ Ом. Для низких температур ($T<20$ К), тепловой шум гораздо слабее, чем дробовой шум при $I_0=0.5$ мА. Генерационно-рекомбинационный шум также мал из-за большой электронной плотности ($n_0=3\times 10^{12}$ см⁻²) в канале исследуемой структуры при $\tau<10^{-8}$ с [105]. Следовательно при $R_V=0.28$ В/Вт это значение эквивалентной мощности шума значительно лучше, чем соответствующие значение $NEP=6\times 10^{-6}$ Вт/ \sqrt{Hz} , приведенное в работе [6] для плазмонного терагерцового детектора на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs с соотношением периода к ширине щели равным 2.

3.2 Анализ исследований терагерцового отклика транзисторной структуры с узкощелевым короткопериодным решеточным затвором

В этом исследовании было продемонстрировано, что резонансный плазмонный терагерцовый отклик детектирования может значительно усиливаться в транзисторной структуре с узкощелевым решеточным затвором, что обусловлено сильной связью между падающим терагерцовым излучением и плазмонными колебаниями. Эти результаты открывают возможности для значительного улучшения свойств плазмонных терагерцовых детекторов на основе транзисторных структур с решеточными затворами. Хотя получаемые значения чувствительности и эквивалентной мощности шума плазмонных детекторов из транзисторных структур со щелевым решеточным затвором все еще хуже, чем у хороших некогерентных детекторов, дальнейшая оптимизация устройства с учетом возможности электронной перестройки терагерцового плазмонного детектора с решеточным затвором может позволить перейти к практическим применениям таких устройств.

В таблице 1 обобщены сравнительные данные по исследованиям известных ТГц плазмонных детекторов на основе транзисторных структур с решеточным затвором из арсенид галлиевых наногетероструктур.

Таблица 3.1 – Сравнительные данные исследований 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 ^{0.5}
[6]	2	170	25	0.1	0.89	6000
[57]	2	500	20	0.1	<1	-
[A3]	10	3	4	0.5	280	8.2

Из этой таблицы видно, что увеличение соотношения периода к ширине щели существенно увеличивает чувствительность детектора. Перспективы дальнейших исследований и разработок подобных детекторов связаны с конструкцией детектора (оптимизация металлизации затвора под материальные параметры гетероструктуры, внедрение асимметрии в элементы затвора, использование узких щелей в решетках). Исследования показали, что внедрение в конструкцию детектора потенциального барьера [64, 67], утонение подложки [66], внесение асимметрии [74] улучшают детекторные характеристики устройства на порядки.

3.3 Результаты исследований терагерцового отклика транзисторной структуры с узкощелевым короткопериодным решеточным затвором

Экспериментально получен отклик резонансного детектора на терагерцовое излучение в диапазоне частот 0.4-0.7 ТГц. Пики фотоотклика идентифицированы как резонансные возбуждения второй плазмонной моды в двумерном электронном канале под затворным электродом. Максимальная чувствительность детектора составила 0.28 В/Вт. Оценка эквивалентной

мощности шума детектора дает $8 \times 10^{-9} \text{ Вт/Гц}^{0.5}$. За счет узких щелей решеточного затвора (соотношением периода к ширине щели равно 10) можно добиться более эффективного возбуждения плазмонных резонансов и значительного увеличения чувствительности детектора (на 2 порядка величины по сравнению с использованием решеточного затвора с отношением периода к ширине щели равным 2).

Применение узкощелевого решеточного затвора большой площади позволяет отказаться от использования специальных антенных элементов связи детектора с терагерцовым излучением, поскольку сам узкощелевой решеточный затвор является эффективным элементом связи между падающим терагерцовым излучением и плазменными колебаниями в двумерном электронном газе в канале транзисторной структуры.

Результаты исследования могут быть использованы для дальнейшего совершенствования плазмонных терагерцовых детекторов на основе транзисторных структур с решеточным затвором большой площади. Исследуемый детектор может быть изготовлен в едином технологическом цикле изготовления интегральных схем по технологии совместимой с изготовлением обычных коммерческих полевых транзисторов.

4 Фотоотклик плотноупакованного массива параллельно соединенных полевых транзисторов на терагерцовое излучение

В этой главе приводятся результаты исследований терагерцового фотоотклика плотноупакованного массива параллельно соединенных полевых транзисторов на основе наногетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs. Приводятся результаты экспериментальных исследований терагерцового нерезонансного детектирования таким детектором. Такой терагерцовый детектор демонстрирует высокую чувствительность без использования дополнительных антенных элементов, поскольку короткопериодная решетка, формируемая металлическими контактами плотно упакованных транзисторов в этом массиве, служит в качестве эффективной антенны, связывающей терагерцовое излучение с каждым транзистором в массиве. Асимметричное положение затвора в каждом полевом транзисторе в этом массиве обеспечивает сильный фотовольтаический отклик. Пункт 4.1 представляет описание полученных в диссертации экспериментальных зависимостей: статические характеристики и нерезонансный отклик детектора на падающее терагерцовое излучение. В пункте 4.2 приводится обсуждение полученных результатов. Выводы по результатам исследований приводятся в пункте 4.3.

4.1 Исследование терагерцового отклика плотноупакованного массива параллельно соединенных полевых транзисторов

Зависимость измеряемого фототока от затворного напряжения, U_g , на частоте 0.587 ТГц показана на рисунке 4.1 для двух значений температуры $T=77$ и $T=300$ К, а также зависимость проводимости канала транзисторной структуры от затворного напряжения.

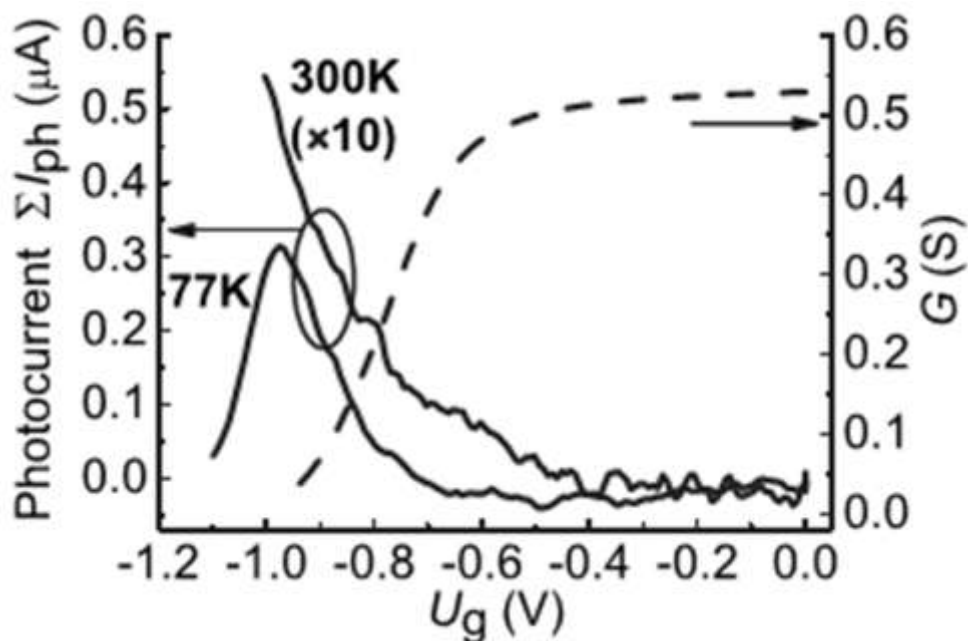


Рисунок 4.1 – Фототок при различных температурах (сплошная линия) и проводимость исток-сток (пунктирная линия) массива полевых транзисторов как функции затворного напряжения

Различные полевые транзисторы в этом 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 в параллель, измеряемый фототок I_{ph} является суммой фототоков генерируемых в каждом полевом транзисторе (рисунок 2.37). Относя измеряемый фототок к мощности терагерцового излучения, падающей на всю площадь массива полевых транзисторов $3.6 \times 0.075 \text{ мм}^2$, мы можем оценить фототоковую чувствительность массива полевых транзисторов как 0.3 А/Вт при $T=77 \text{ К}$ и 0.05 А/Вт при $T=300 \text{ К}$ для $U_g = -1 \text{ В}$. Проводимость массива параллельно соединенных транзисторов при $U_g = -1 \text{ В}$ равна $G=0.01 \text{ См}$ (при $T=300 \text{ К}$). Это дает фотовольтаическую чувствительность массива всего как 5 В/Вт при $T=300 \text{ К}$, которое соответствует фотовольтаической чувствительности 960 В/Вт на каждый транзистор (которая

определяется как отношение между фотонапряжением генерируемым каждым транзистором и терагерцовой мощностью падающей на площадь одного транзистора).

4.2 Анализ исследований терагерцового отклика плотноупакованного массива параллельно соединенных полевых транзисторов

На частоте измерений имеем $\omega\tau \approx 0.7$ при $T=300$ К и $\omega\tau \approx 3.5$ при $T=77$ К, так что режим резонансного детектирования может реализоваться при температуре кипения жидкого азота. Из рисунка 4.1 видно, что фотоотклик сильно увеличивается, когда полевые транзисторы близки к режиму отсечки канала (при $U_g \approx -1$ В), что является характерным признаком режима нерезонансного детектирования [1, 46]. При температуре 77 К нет пиков характерных для режима резонансного детектирования (рисунки 3.3 и 3.5), следовательно при обеих температурах реализуется режим нерезонансного детектирования.

Так как ножка Т-образного затвора сдвинута к контакту истока в каждом полевом транзисторе, то постоянное напряжение, U_{THz} , индуцируемое терагерцовым излучением на металлических контактах, прикладывается главным образом между контактами затвора и истока в каждом полевом транзисторе (рисунок 4.2) из-за того что емкость сток-затвор, C_d , эффективно шунтирует ввод ТГц напряжения.

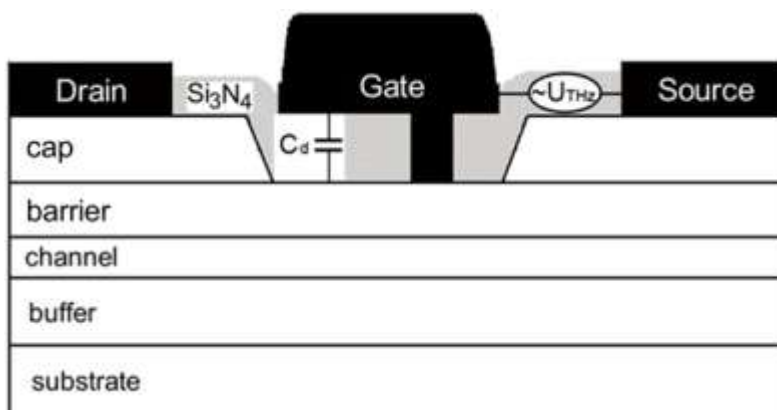


Рисунок 4.2 – Схематический разрез единичного полевого транзистора

Эквивалентная схема транзистора в разрезе ТГц выпрямления показана на рисунке 4.3.

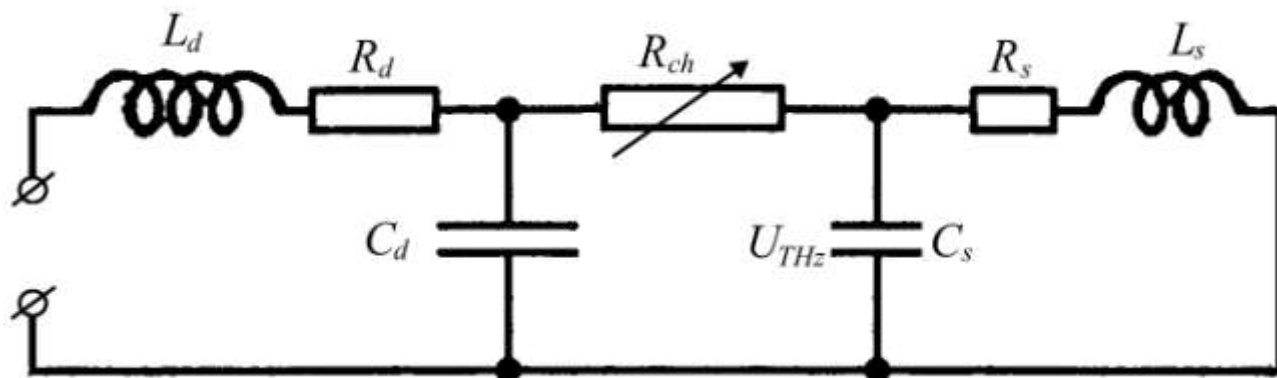


Рисунок 4.3 – Эквивалентная схема единичного транзистора/детектора

Из рисунка 4.3 следует, что помимо различающихся емкостей стока и истока ($C_d > C_s$), различается и ток зарядки этих емкостей. Ток, который заряжает емкость сток-затвор, меньше из-за того что сопротивления участков под шляпками затвора различаются ($R_d > R_s$) и соответствующие индуктивности ($L_d > L_s$)

Отклик цепочки детектирующих полевых транзисторов, соединенных последовательно, прямо пропорционален числу полевых транзисторов в цепочке с чувствительностью всей цепочки, независящей от числа полевых транзисторов соединенных в ней [13]. Поэтому, следует ожидать, что одномерный массив идентичных полевых транзисторов, соединенных последовательно (вместо их параллельного соединения как в исследуемом одномерном массиве полевых транзисторов) может демонстрировать фотовольтаическую чувствительность до 1 кВ/Вт при комнатной температуре без постоянного смещения.

Значит, плотно упорядоченный одномерный массив полевых транзисторов может использоваться как терагерцовый детектор с высокой чувствительностью без использования дополнительных антенных элементов. Короткопериодная решетка металлических контактных пальцев полевого

транзистора служит в качестве эффективной антенны, связывающей падающее терагерцовое излучение с каждым полевым транзистором. Асимметричное расположение ножки затвора в каждом полевым транзисторе обеспечивает приложение наводимого терагерцового напряжения антенной из пальцев полевого транзистора между затворными и истоковыми контактами в каждом полевым транзисторе, что делает возможным получения сильного фотовольтаического отклика. Массив полевых транзисторов может демонстрировать сильный фототоковый или фотовольтаический отклик в зависимости от параллельного или последовательного электрического соединения полевых транзисторов в массиве. Полученные результаты могут быть использованы для улучшения характеристик плазмонных терагерцовых детекторов.

Стоит отметить, что короткопериодная металлическая решетка (с периодом гораздо короче, чем длина волны терагерцового излучения) является широкополосной антенной, поскольку амплитуда ближнего поля такой антенны связываемой с каналами полевого транзистора является независимой от частоты падающей терагерцовой волны [56].

4.3 Выводы по главе 4

Экспериментально получен фотовольтаический отклик нерезонансного детектора на терагерцовое излучение при помощи лампы обратной волны на частотах диапазона 0.4-0.7 ТГц при температурах 300 и 77 К. Фототок возникает за счет того, что постоянное напряжение, наводимое подающим терагерцовым излучением, преимущественно прикладывается между истоком и затвором. Вольт-ваттная чувствительность каждого единичного транзистора в массиве достигает 1 кВ/Вт.

5 Фотоотклик цепочки полевых транзисторов на терагерцовое излучение

В этом разделе приводятся результаты исследований фотоотклика на терагерцовое излучение цепочки плотноупакованных полевых транзисторов на основе наногетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs. Плотнупакованная цепочка InGaAs полевых транзисторов с асимметричным Т-образным затвором в каждом транзисторе демонстрирует сильным терагерцовый фотовольтаический отклик без использования дополнительных антенных элементов. Была получена чувствительность свыше 1000 В/Вт и почти 2000 В/Вт соответственно для несмещенных и смещенных током стока транзисторов в цепочке с эквивалентной мощностью шума ниже 10^{-11} Вт/Гц^{0.5} в несмещенном режиме работы детектора. В пункте 5.1 описывается экспериментальные результаты исследований. Пункт 5.2 представляет анализ экспериментальных результатов. В пункте 5.3 приводятся выводы по результатам исследований.

5.1 Исследование терагерцового отклика плотноупакованного массива последовательно соединенных полевых транзисторов

В разделе 4 было приведены результаты исследований ТГц фотоотклика массива идентичных ПТ, которые все соединялись параллельно. В таком массиве, ТГц фототок генерированный в каждом ПТ комбинировался в суммарный ТГц фототок, измеряемый между внешними контактами массива с чувствительность 50 мА/Вт при комнатной температуре. ТГц фотоотклик делался возможным путем изготовления асимметричного Т-образного затворного контакта в каждом ПТ в массиве. Фотовольтаическая чувствительность, определенная в предыдущем разделе, составляет около 1 кВ/Вт на каждый ПТ в массиве. Однако, прямая экспериментальная проверка такой огромной фотовольтаической чувствительности индивидуального ПТ в массиве не проводилась. Следовательно, было неясно сможет ли массив схожих

ПТ, соединенных последовательно, продемонстрировать такую большую чувствительность по напряжению.

В данном разделе приводятся исследования ТГц фотовольтаического отклик плотноупакованной цепочки из 4 ПТ, которые соединены последовательно. Общий вид структуры образца в латеральном и вертикальном сечениях показан на рисунке 5.1.

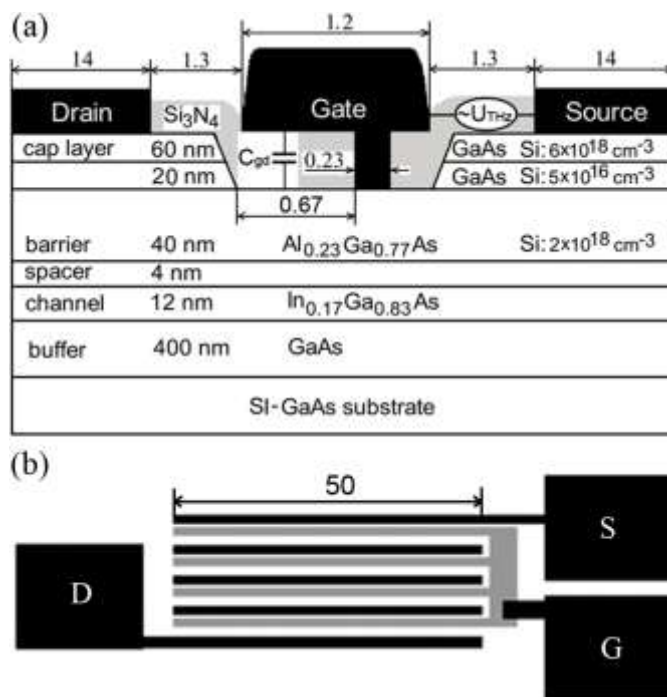


Рисунок 5.1 – (а) Схематический вид индивидуального ПТ в массиве. Все латеральные размеры даются в микронах. (б) Вид сверху контактной разводки цепочки ПТ с общим затворным контактом (G) и боковых контактов истока (S) и стока (D).

На рисунках 5.2 и 5.3 приведены соответственно вольтамперная (I - V) характеристика и переходная характеристика цепочки ПТ. Напряжение отсечки канала, полученное из интерполяции линейной части переходной характеристики падающей до нулевого тока стока на рисунке 5.3, равняется около $U_{th} = -0.9$ В.

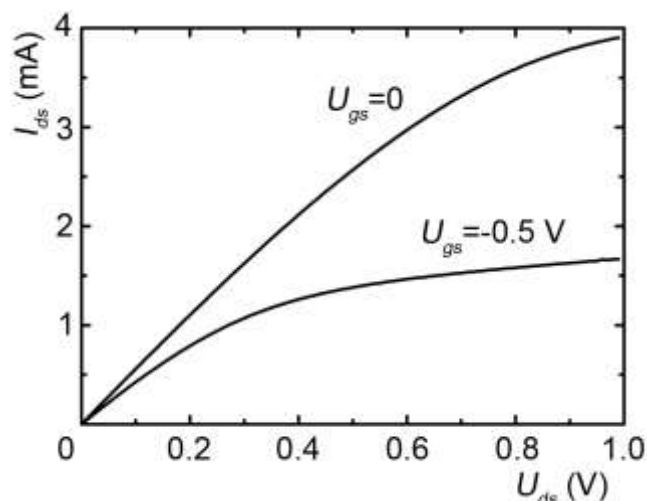


Рисунок 5.2 – Статические вольтамперные характеристики цепочки ПТ для двух различных значений затворного напряжения

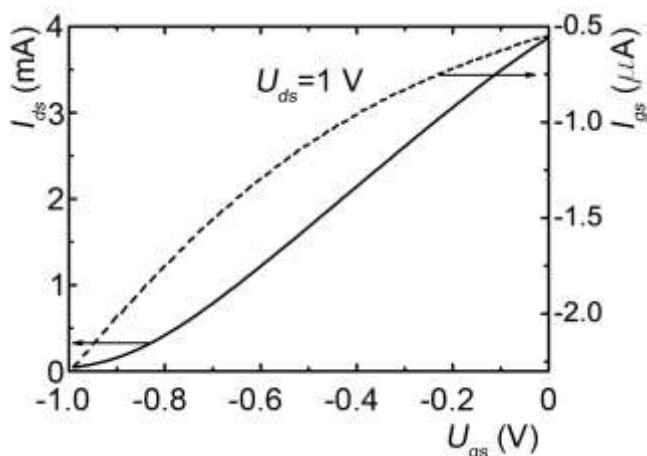


Рисунок 5.3 – Переходная характеристика и ток утечки цепочки ПТ для напряжения сток-исток $U_{ds} = 1$ В

Измерения проводились на фиксированной частоте 615 ГГц. ТГц мощность, падающая на площадь образца 50×90 мкм², может быть оценена как 15 нВт. Электрическое поле падающей ТГц волны было поляризовано поперек полосок затворов ПТ. ТГц фотонапряжение U_{ph} измерялось как изменение падения напряжения через огромное нагрузочное сопротивление $R_L = 300$ кОм, соединяемое 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 5.4 представлены зависимости ТГц фотонапряжения U_{ph} от затворного напряжения для различных значений постоянного тока смещения стока в цепочке ПТ.

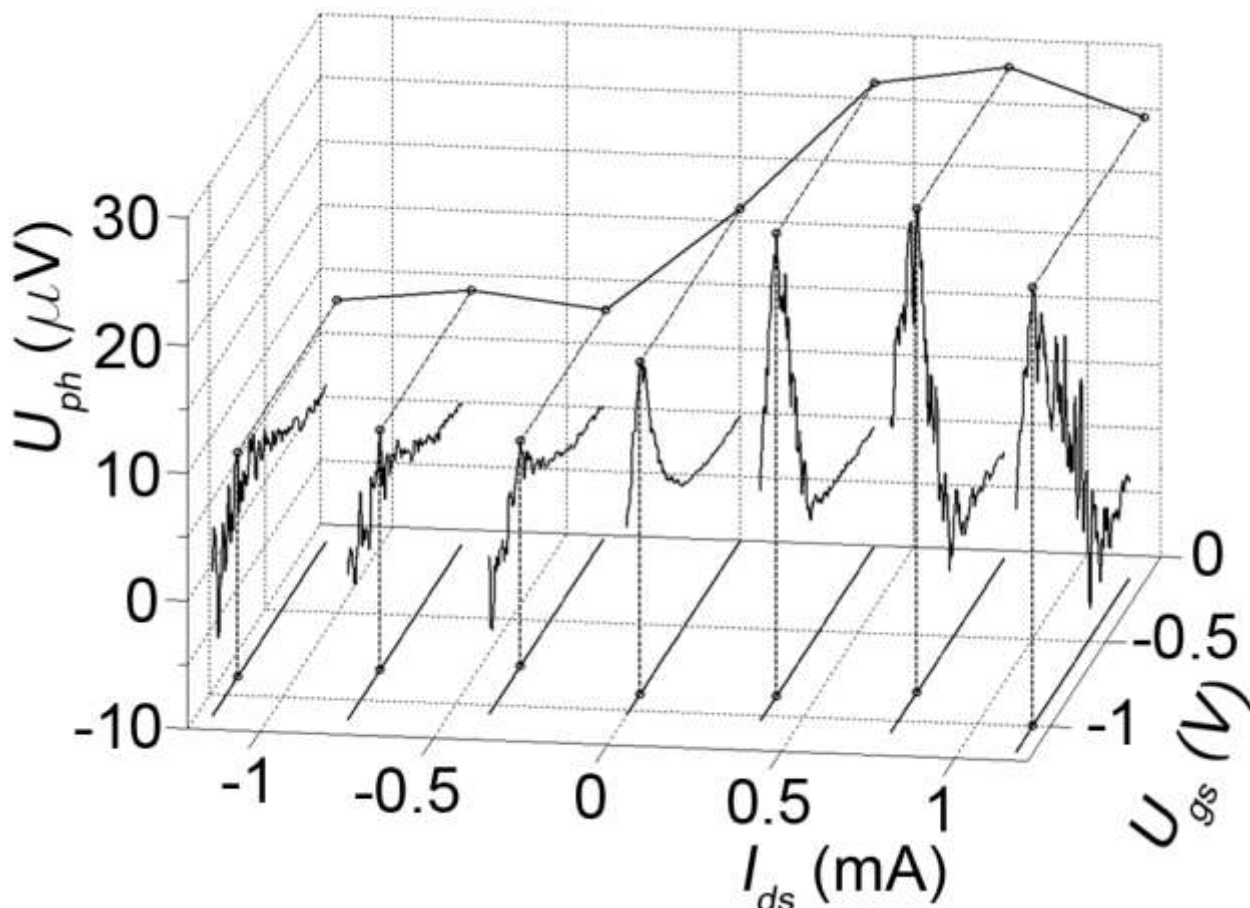


Рисунок 5.4 – Фотонапряжение U_{ph} как функция затворного напряжения и тока смещения стока. Проекция кривых фотонапряжения на плоскости $(I_{ds} - U_{gs})$ и $(U_{ph} - U_{gs})$.

Без постоянного тока смещения стока, шумы детектора полностью определяются тепловыми шумами. Поэтому эквивалентная шумовая мощность (NEP) детектора может быть рассчитана как $NEP = \sqrt{4k_B T r_{S-D}} / R_V$, где k_B – константа Больцмана, T – рабочая температура, и r_{D-S} – сопротивление сток-исток цепочки ПТ, которое было определено из переходной характеристики,

показанной на рисунке 5.3. Минимальное значение NEP 8×10^{-12} Вт/Гц^{0.5} достигается при затворном напряжении $U_{gs} = -0.86$ В (рисунок 5.5).

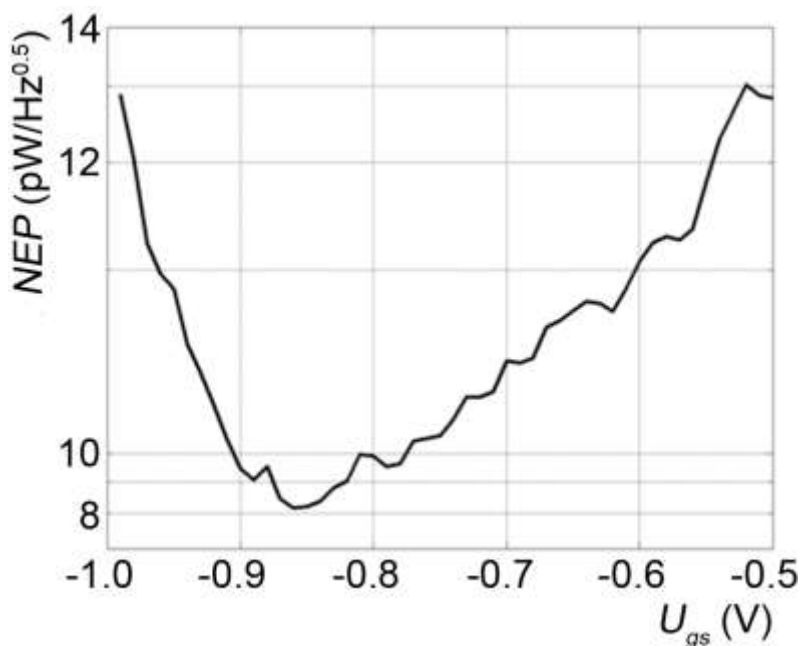


Рисунок 5.5 – NEP детектора на основе цепочки ПТ в зависимости от затворного напряжения.

5.2 Анализ исследований терагерцового отклика плотноупакованного массива последовательно соединенных полевых транзисторов

Фотонапряжение (рисунок 5.4) достигает максимума вблизи напряжения отсечки канала ПТ $U_{gs} \approx U_{th} = -0.9$ В. Фотонапряжение резко уменьшается для отрицательного постоянного тока смещения стока (направленного от истока к стоку на рисунке 5.1). Однако, максимальное значение фотонапряжение растет с увеличением положительного тока смещения стока, проявляя насыщение с дальнейшим падением при $I_{ds} \approx 1$ мА. Эти результаты могут быть интерпретированы следующим образом. Поскольку добротность плазменных колебаний в канале ПТ составляет $\omega\tau \approx 0.8$ на рабочей частоте $\omega/2\pi = 615$ ГГц, реализуется режим нерезонансное ТГц детектирование [9] в цепочке ПТ при комнатной температуре. Скорость плазмона $s = \sqrt{e(U_{gs} - U_{th})/m}$, где e и m

являются соответственно зарядом электрона ($e > 0$) и его эффективной массой, является довольно маленькой вблизи обеднения канала ПТ, так что длина распространения плазмона $L_0 = s\sqrt{\tau/\omega}$ становится короче чем длина затвора $L_g = 230$ нм в каждом ПТ из цепочки [9]. Следовательно, нерезонансное плазмонное детектирование в режиме длинного канала [9] имеет место в цепочке ПТ. Из-за асимметричной формы Т-образного затвора в каждом ПТ цепочки, суб-ТГц излучение подается в затворную часть канала каждого ПТ преимущественно с его истокового конца (рисунок 5.1а), потому что стоковый конец канала затворной части канала эффективно шунтируется для ТГц излучения из-за большой емкости C_{gd} между большим краем шляпки Т-образного затвора и необедненным каналом (показано схематически на рисунке 5.1а). Как известно [12], положительный/отрицательный постоянный ток смещения стока усиливает/подавляет отклик, что ясно видно на рисунке 5.4. Однако, отклик фотонапряжения насыщается и падает, когда значение положительного постоянного тока смещения стока приближается к соответствующему значению электронной скорости насыщения в канале ПТ [12], что происходит при $I_{ds} \approx 1$ мА в нашем образце (рисунок 5.4).

Поскольку сопротивление нагрузки R_L много больше, чем сопротивление цепочки ПТ (которое ниже 6.5 кОм даже при напряжении отсечки канала ПТ), то измеряемой величиной является фотонапряжение в цепочке ПТ, которое регистрируется как падение напряжения на сопротивлении нагрузки. Чувствительность по напряжению ТГц детектора на основе цепочки ПТ можно оценить как $R_V = U_{ph}/P_{in}$, где $P_{in} = 15$ нВт - ТГц мощность, падающая на площадь цепочки ПТ, что дает $R_V \approx 1.1$ кВ/Вт для $I_{ds} = 0$. Так как чувствительность по напряжению не зависит от числа ПТ соединены последовательно (поскольку общий отклик фотонапряжения растет пропорционально числу ПТ в цепочке) [13], чувствительность по напряжению на каждый ПТ в цепочке равняется также 1.1 кВ/Вт. Измеренное значение чувствительности по напряжению довольно хорошо совпадает со значением вычисленным из чувствительности по току массива ПТ соединенных

параллельно [A2]. Несмотря на то, что плотноупакованная цепочка 4 ПТ с суммарной длиной 90 мкм короче, чем половина длины волны ТГц излучения (244 мкм на частоте работы 615 ГГц), ее металлизация обеспечивает сильное связывание с падающим ТГц излучением. Этот факт делает плотноупакованную цепочку нескольких ПТ перспективным ТГц детектором для использования в качестве пикселей в матричном фотоприемном устройстве ТГц систем видеоизображения потому что, в этом случае, можно избавиться от дополнительных антенных элементов в каждом пикселе.

Хотя чувствительность растет с увеличением положительного постоянного тока смещения стока (рисунок 5.4) приблизительно в два раза, в несмещенном режиме работы детектора является более предпочтительным в плане шумовых характеристик и потребления энергии детектором. В работе [13] был исследован ТГц отклик фотонапряжения электромагнитно развязанных ПТ соединенных последовательно внешними проводами. Отметим, что это значение чувствительности по напряжению, полученное в этой статье в несмещенном режиме детектирования, превышает на порядок величины значение чувствительности, полученное в режиме смещения в работе [13], в то время как NEP на порядок величины меньше чем, NEP оцененное в работе [13] для нулевого тока смещения стока. Эти преимущества предложенного в работе суб-ТГц детектора на основе плотноупакованных ПТ являются следствием его следующих характерных особенностей: (I) асимметричная форма Т-образного затворного контакта в каждом ПТ, радикально усиливающая фотовольтаический отклик даже в несмещенном режиме работы детектора, (II) различные ПТ электромагнитно связаны вследствие плотной упаковки, что обеспечивает эффективную связь падающего ТГц излучения с электронами в канале без использования дополнительной антенны, и (III) изготовление цепочки ПТ на одной микросхеме позволяет избежать использования внешних проводов для соединения различных ПТ в цепочку.

5.3 Выводы по главе 5

Показано, что цепочка исследованных ПТ проявляет сильный ТГц фотовольтаический отклик из-за асимметричной формы Т-образного затвора в каждом ПТ в цепочке. Получена чувствительность по напряжению свыше 1 кВ/Вт в несмещенном режиме работы детектора. Эквивалентная шумовая мощность детектора является ниже 10^{-11} Вт/Гц^{0.5}. Плотная упаковка только четырех ПТ с суммарной длиной меньше чем, половина длины волны суб-ТГц излучения, обеспечивает сильную связь падающего ТГц излучения с подзатворной электронной плазмой без использования дополнительной антенны. Это делает плотное соединение нескольких ПТ перспективным кандидатом для использования в качестве неохлаждаемого ТГц детектора для различных приложений.

Заключение

В заключение сформулируем основные результаты настоящей работы:

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 $2 \times 2 \text{ мкм}^2$ 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.

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} Вт/Гц^{0.5} 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.

5. 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.

Перечень публикаций автора по теме диссертации

- A1. 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 ЖТФ. - 2010. – Т. 36. - Вып. 8. – С. 39-47.
- A2. 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.
- A3. Yermolaev D.M., Marem'yanin 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 Electronic. – 2013. – V. 86. - P. 64-67.
- A4. Popov V.V., Yermolaev D.M., Maremyanin K.V., Zemlyakov V.E., Maleev N.A., Gavrilenko V.I., Besspalov 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.
- A5. 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
- A6. Yermolaev D.M., Marem'yanin 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.
- A7. 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 большой площади // 14-й международный симпозиум «Нанофизика и нанoeлектроника». Тезисы докладов - Нижний Новгород, 2010. - С. 463-464.

- A8. Marem'yanin K.V., Ermolaev D.M., Fateev D.V., Morozov S.V., Maleev N.A., Zemlyakov V.E., Gavrilenko V.I., Popov V.V., Shapoval S.Yu. Investigation of Terahertz Response in Wide-Aperture Transistor Structure with a Slit-Grid Gate // 34th European Workshop On Compound Semiconductor Devices And Integrated Circuits WOCSDICE. – Darmstadt, Germany, 2010. - P. 83-84.
- A9. Попов В.В., Ермолаев Д.М., Маремьянин К.В., Малеев Н.А., Земляков В.Е., Гавриленко В.И., Шаповал С.Ю. Детектор терагерцового излучения на основе одномерного антенного массива полевых транзисторов // 15-й международный симпозиум «Нанофизика и нанoeлектроника». Тезисы докладов - Нижний Новгород, 2011. - С. 476-477.
- A10. Ермолаев Д.М., Шаповал С.Ю., Земляков В.Е., Маремьянин К.В., Морозов С.В., Гавриленко В.И., Фатеев Д.В., Попов В.В., Малеев Н.А. Детектирование терагерцового излучения массивом полевых p-HEMT транзисторов на основе InGaAs/GaAs // 4-я Всероссийская конференция молодых ученых "Микро-, нанотехнологии и их применение". Тезисы докладов - Черноголовка, 2010. – С. 39
- A11. Ермолаев Д.М., Маремьянин К.В., Попов В.В., Малеев Н.А., Земляков В.Е., Гавриленко В.И., Шаповал С.Ю. Экспериментальное исследование детектирования терагерцового излучения транзисторной структурой с последовательным соединением областей с двумерных и трехмерных распределений электронного газа на основе GaAs/InGaAs // 5-я Всероссийская конференция молодых ученых "Микро-, нанотехнологии и их применение". Тезисы докладов - Черноголовка, 2012. – С. 79.

- A12. Ермолаев Д.М., Маремьянин К.В., Фатеев Д.В., Попов В.В., Малеев Н.А., Земляков В.Е., Гавриленко В.И., Шаповал С.Ю., Сизов Ф.Ф. Высокоэффективный плазмонный детектор терагерцового излучения на основе транзисторной структуры GaAs/InGaAs с решеточным затвором // 17-й международный симпозиум «Нанопфизика и наноэлектроника». Тезисы докладов - Нижний Новгород, 2013. – С. 449-450.
- A13. Yermolaev D. M., Marem'yanin K. M., Maleev N. A., Zemlyakov V. E., Gavrilenko V. I., Popov V. V. and Shapoval S. Yu. Terahertz Detector with Series Connection of Asymmetric Gated Transistors // 2nd Russia-Japan-USA Symposium on the Fundamentals and Applied Problems of Terahertz Devices and Technologies (RJUS-2013). – Moscow, 2013. – P. 9.
- A14. Yermolaev D. M., Popov V. V., Marem'yanin K. M., V. E., Gavrilenko, Maleev N. A., Ustinov V. M., Zemlyakov V. I., Bepalov, Yegorkin V. I. and Shapoval S. Yu. Detection of terahertz radiation by InGaAg field-effect structures with tightly concatenated metallization // 3rd Russia-Japan-USA Symposium on the Fundamentals and Applied Problems of Terahertz Devices and Technologies (RJUS-2014). – USA, Buffalo, 2014. – P. 3-5.
- A15. Шаповал С.Ю., Ермолаев Д.М., Ковальчук А.В., Ганиев А.С. Расширение параметров электронных систем за счет применения плазменных процессов // Всероссийская конференция «Физика низкотемпературной плазмы ФНТП-2011». Тезисы докладов - Петрозаводск, 2011. - С. 5-10.
- A16. Yermolaev D.M., Popov V.V., Maremyanin K.V., Gavrilenko V.I., Maleev N.A., Ustinov V.M., Zemlyakov V.E., Bepalov V.A., Yegorkin V.I., Khmyrova I. and Shapoval S.Yu. Detection of terahertz radiation by tightly concatenated InGaAs field-effect transistors integrated on a single chip // 38th European Workshop On Compound Semiconductor Devices And Integrated Circuits WOCSDICE. – Greece, Delphi, 2014. - P. 5-6.
- A17. Ермолаев Д. М., Попов В.В., Маремьянин К. В., Гавриленко В. И., Земляков В. Е., Беспалов В. А., Егоркин В. И., Малеев Н. А., Устинов В. М., Шаповал С. Ю. / «Детектирование терагерцового

излучения цепочкой полевых транзисторов, интегрированных на основе гетероструктуры AlGaAs/InGaAs» // 18-й симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника». – Нижний Новгород, 2014. – С. 449-450.

Автор искренне признателен своим научным руководителям Шаповалу Сергею Юрьевичу и Попову Вячеславу Валентиновичу за терпение, содействие и всестороннюю поддержку на всех этапах настоящей работы. Хочу также поблагодарить Н. Малеева, В. Землякова, К. Маремьянина и В.И. Гавриленко за совместное плодотворное сотрудничество.

Список цитируемой литературы

1. Dyakonov M. and Shur M. Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 1996. – V. 43. – P. 380-387.
2. Муравьев В.М., Кукушкин И.В., Смет Ю., фон Клитцинг К. Миллиметровое/субмиллиметровое смешивание на основе нелинейного плазмонного отклика двумерных электронных систем // *Письма в ЖЭТФ*. – 2009. – Т. 90. – В. 3. – С. 216-221.
3. Dyakonov M.I. and Shur M.S. Shallow water analogy for a ballistic field effect transistor: New mechanism of plasma wave generation by dc current // *Physical Review Letters*. – 1993. – V. 71. – P. 2465.
4. El Fatimy A., Teppe F., Dyakonova N., Knap W., Seliuta D., Valusis G., Shchepetov A., Roelens Y., Bollaert S., Cappy A. and Romyantsev S. Resonant and voltage-tunable terahertz detection in InGaAs/InP nanometer transistors // *Applied Physics Letters*. – 2006. – V. 89. – P. 131926.
5. Tauk R., Teppe F., Boubanga S., Coquillat D., Knap W., Meziani Y.M., Gallon C., Boeuf F., Skotnicki T., Fenouillet-Berager C., Maude D.K., Romyantsev S. and Shur M.S. Plasma wave detection of terahertz radiation by silicon field effects transistors: Responsivity and noise equivalent power // *Applied Physics Letters*. – 2006. – V. 89. – P. 253511.
6. 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.
7. 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.

8. Lisauskas A., Pfeiffer U., Ojefors E., Bolivar P.H., Glaab D. and Roskos H.G. Rational design of high-responsivity detectors of terahertz radiation based on distributed self-mixing in silicon field-effect transistors // *Journal of Applied Physics*. – 2009. – V.105. – P. 114511.
9. Knap W., Dyakonov M., Coquillat D., Teppe F., Dyakonova N., Lusakowski J., Karpierz K., Sakowicz M., Valusis G., Seliuta D., Kasalynas I., El Fatimy A., Meziani Y.M., Otsuji T. Field effect transistors for terahertz detection: physics and first imaging applications // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2009. – V. 30. – P. 1319-1337.
10. Knap W., Romyantsev S., Vitiello M.S., Coquillat D, Blin S., Dyakonova N., Shur M., Teppe F., Tredicucci A., and Nagatsuma T. Nanometer size field effect transistors for terahertz detectors // *Nanotechnology*. – 2013. – V. 24. – N. 21. – P. 214002.
11. Schuster F., Coquillat D., Videlier H., Sakowicz M., Teppe F., Dussopt L., Giffard B., Skotnicki T., and Knap W. Broadband terahertz imaging with highly sensitive silicon CMOS detectors // *Optics Express*. – 2011. – V. 19. – I. 8. – P. 7827-7832.
12. Veksler D., Teppe F., Dmitriev A.P., Kachrovskii V.Yu., Knap W., and Shur M.S. Detection of terahertz radiation in gated two-dimensional structures governed by dc current // *Physical Review B*. – 2006. – V. 73. – P. 125328.
13. 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.
14. Smye S.W., Chamberlain J.M., Fitzgerald A.J., Berry E. *The interaction between terahertz radiation and biological tissue* // *Physics in Medicine and Biology*. – 2001. – V. 46. – N. 9. – P. R101.
15. Rogalski A. and Sizov F. Terahertz detectors and focal plane arrays // *Opto-Electronics Review*. – 2011. – V. 19. – I. 3. – P. 346-404.

16. Chan W.L., Deibel J., Mittleman D.M. Imaging with terahertz radiation // *Reports on Progress in Physics*. – 2007. – V. 70. – N. 8. – P. 1325-1379.
17. Kleine-Ostmann T., Nagatsuma T. A review on terahertz communications research // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2011. – V. 32. – I. 2. – P. 143-171.
18. Siegel P.H. Terahertz technology // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2002. – V. 50. – I. 3. – P. 910-928.
19. Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology // *Nature Photonics*. – 2007. – V. 1. – P. 97-105.
20. Crowe T.W., Mattauch R.J., Roser H.P., Bishop W.L., Peatman W.C.B., Liu X. GaAs Schottky diodes for THz mixing application // *Proceedings of the IEEE*. – 1992. – V. 80. – I. 11. – P. 1827-1841.
21. Wengler M.J. Submillimeter-wave detection with superconducting tunnel diodes // *Proceedings of the IEEE*. – 1992. – V. 80. – I. 11. – P. 1810-1826.
22. Gershenzon E. M., Goltsman G. N., Gogidze I. G., Gousev Yu. P., Elantiev A. I., Karasik B. S., Semenov A. D. Millimeter and sub-millimeter range mixer based on electronic heating of superconducting film in the resistive state // *Sov. Phys. Supercond*. – 1990. – V. 3. – P. 1582.
23. Yang J.X., Agahi F., Dai D., Musante C.F., Grammer W., Kei M.L., Yngvesson K.S. Wide-bandwidth electron bolometric mixers: a 2DEG prototype and potential for low-noise THz receivers // *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. – 1993. – V. 41(4). – P. 581-589.
24. Yang J.X., Li J., Musante C.F., Yngvesson K. S. Microwave mixing and noise in the two-dimensional electron gas medium at low temperatures // *Applied Physics Letters*. – 1995. – V. 66. – P. 1983.
25. Морозов Д.В., Смирнов К.В., Смирнова А.В. Ляхов В.А. Гольцман Г.Н. Миллиметровый/субмиллиметровый смеситель на основе разогрева двумерного электронного газа в гетероструктуре AlGaAs/GaAs с фононным каналом охлаждения // *Физика и техника полупроводников*. – 2005. – Т. 39. – В. 9. – С. 1117-1121.

26. Lee M., Pfeiffer L.N., West K.W. Ballistic cooling in a wideband two-dimensional electron gas bolometric mixer // *Applied Physics Letters*. – 2002. – V. 81. – P. 1243.
27. Rasenblatt S., Lin H., Sazonova V., Tiwari S., McEuen P.L. Mixing at 50GHz using a single-walled carbon nanotube transistor // *Applied Physics Letters*. – 2005. – V. 87. – I. 15. – P. 153111.
28. Bullard W.R. Discussion // *IEEE Transaction on Communications*. – 2002. – V. 50. – I. 3. – P. 852-853.
29. Sheen D.M., McMakin D.L., Hall T.E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection // *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*. – 2001. – V. 49. – I. 9. – P. 1581-1592.
30. Meziani Y.M., Garciya-Garciya E., Velazquez-Perez J.E., Coquillat D., Dyakonova N., Knap W., Grigelionis I., Fobelets K. Terehertz imaging using strained-Si MODFETs as sensors // *Solid-State Electronics*. – 2013. – V. 83. – P. 113-117.
31. Lai r., barsky M., Huang T., Sholley M., Wang H., Kok Y.L., Streit D.C., Block T., Liu P.H., Gaier T., Samoska L. An InP HEMT MMIC LNA with 7.2-dB gain at 190 GHz // *IEEE Microwave and Circuit Wave Letters*. – 1998. – V. 8. – I. 11. – P. 393-395.
32. Yu D., Lee K., Kim B., Ontiveros D., Vargason K., Kuo J.M., Kao Y.C. Ultra high-speed InP-InGaAs SHBTs with f_{max} of 478 GHz // *IEEE Electron Device Letters*. – 2003. – V. 24. – I. 6. – P. 384-386.
33. Hafez W., Lai J.-W., Feng M. Submicron InP-InGaAs single heterojunction bipolar transistors with f_T of 377 GHz // *IEEE Electron Device Letters*. – 2003. – V. 24. – I. 5. – P. 292-294.
34. Yamashita Y., Endoh A., Shinohara K., Higashiwaki M., Hikosaka K., Mimura T., Hiyamizu S., Matsui T. Ultra-short 25-nm-gate lattice-matched InAlAs/InGaAs HEMTs within the range of 400 GHz cutoff frequency // *IEEE Electron Device Letters*. – 2001. – V. 22. – I. 8. – P. 367-369.

35. Chou Y.C., Leung D., Lai R., Grundbacher R., Barsky M., Kan Q., Tsai R., Wojtowicz M., Eng D., Tran L., Block T., Liu P.H., Nishimoto M., Oki A. Reliability investigation of 0.07- μm InGaAs-InAlAs-InP HEMT MMICs with pseudomorphic $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ channel // *IEEE Electron Device Letters*. – 2003. – V. 24. – I. 6. – P. 378-380.
36. Mei X.B., Yoshida W., Deal W.R., Liu P.H., Lee J., Uyeda J., Dang L., Wang J., Liu W., Li D., Barsky M., Kim Y.M., Lange M., Chin T.P., Radisic V., Gaier T., Fung A., Samoska L., Lai R. 35-nm InP HEMT SMMIC amplifier with 4.4-dB at 308 GHz // *IEEE Electron Device Letters*. – 2007. – V. 28. – I. 6. – P. 470-472.
37. Campbell C.F., Balistreri A., Kao M., Dumka D.C. Hitt J. GaN takes the lead // *IEEE Microwave Magazine*. – 2012. – V. 13. – I. 6. – P. 44-53.
38. Jiang Yu-S., Tsai J.-H., Wang H. A W-band medium power amplifier in 90 nm CMOS // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2008. – V. 18. – I. 12. – P. 818-820.
39. Edwards T. MMICs: state of the industry in 2013 and future prospects // *Market focus: Monolithic microwave integrated circuits*. – 2013. – V. 7. – I. 9. – P. 94-97.
40. Knap W., Lusakowski J., Parenty T., Bollaert S., Capy A., Popov V.V., and Shur M.S. Terahertz emission by plasma waves in 60 nm gate high electron mobility transistors // *Applied Physics Letters*. – 2004. – V. 84. – P. 2331.
41. Dyakonova N., Teppe F., Lusakowski J., Knap W., Levinshtein M., Dmitriev A.P., Shur M.S., Bollaert S., and Capy A. Magnetic field effect on the terahertz emission from nanometer InGaAs/AlInAs high electron mobility transistors // *Journal of Applied Physics*. – 2005. – V. 97. – P. 114313.
42. Knap W., Teppe F., Dyakonova N., Coquillat D., and Lusakowski J. Plasma wave oscillations in nanometer field effect transistors for terahertz detection and emission // *Journal of Physics: Condensed Matter*. -2008. – V. 20. – I. 38. – P. 384205.
43. Lu J.-Q., Shur M.S., Hesler J.L., Sun L., and Weikle R. Terahertz detector utilizing two-dimensional electronic fluid // *IEEE Electron Device Letters*. – 1998. – V. 19. – I. 10. – P. 373-375.

44. Lu J.-Q. and Shur M.S. Terahertz detection by high-electron-mobility transistor: Enhancement by drain bias // *Applied Physics Letters*. – 2001. – V. 78. – P. 2587.
45. Knap W., Deng Y., Romyantsev S., and Shur M.S. Resonant detection of subterahertz and terahertz radiation by plasma waves in submicron field-effect transistors // *Applied Physics Letters*. – 2002. – V. 81. – P. 4637.
46. Knap W., Khcharovskii V., Deng Y., Romyantsev S., Lu J.-Q., Gaska R., Shur M.S., Simin G., Hu X., Asif Khan M., Saylor C.A., and Brunel L.C. Nonresonant detection of terahertz radiation in field effect transistors // *Journal of Applied Physics*. – 2002. – V. 91. – P. 9346.
47. Knap W., Deng Y., Romyantsev S., Lu J.-Q., Shur M.S., Saylor C.A., and Brunel L.C. Resonant detection of subterahertz radiation by plasma waves in a submicron field-effect transistor // *Applied Physics Letters*. – 2002. – V. 80. – N. 18. – P. 3433-3435.
48. Антонов А.В., Гавриленко В.И., Маремьянин К.В., Морозов С.В., Тeppe F., Кnap W. Резонансное детектирование терагерцового излучения в субмикронных полевых транзисторах GaAs/AlGaAs с двумерным электронным газом // *Физика и техника полупроводников*. – 2009. – Т. 43. – Вып. 4. – С. 552-555.
49. El Fatimy A., Boubanga-Tombet S., Teppe F., Knap W., Veksler D.B., Romyantsev S., Shur M.S., Pala N., Gaska R., Fareed Q., Hu X., Seliuta D., Valusis G., Gaquiere C., Theron D., Cappy A. Terahertz detection by GaN/AlGaN transistors // *Electronics Letters*. – 2006. – V. 42. – I. 23. – P. 1342-1344.
50. Sizov F. THz radiation sensors // *Opto-electronics Review*. – 2010. – V. 18. – N. 1. – P. 10-36.
51. Dyer G.C., Aizin G.R., Reno J.L., Shaner E.A. and Allen S.J. Novel tunable millimeter-wave grating-gated plasmonic detectors // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2010. – V. 17. – I. 1. – P. 85-91.
52. Sizov F., Rogalski A. THz detectors // *Progress in Quantum Electronics*. – 2010. – V. 34. – I. 5. – P. 278-347.
53. *Mittleman D. Sensing with Terahertz Radiation*. Berlin: Springer, 2003.

54. *Shur M.S.* Introduction to Electronic Devices. New York: Wiley, 1996.
55. *Chaplik A.V.* Energy spectrum and electron scattering processes in inversion layers // Soviet Physics JETP. – 1971. – V. 33. – N. 5. – P. 997-1000.
56. *Theis T. H.* Plasmons in inversion layers // Surface Science. – 1980. – V. 98. – P. 515.
57. *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.
58. *O.R. Matov, O.V. Polishuk, and V.V. Popov.* Two-dimensional plasmons in a semiconductor-dielectric structure with metal grating: rigorous theory // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 1993. – V. 14. – № 7. – P. 1455-1470.
59. *Popov V.V., Polischuk O.V., Teperik T.V., Peralta X.G., Allen S.J., Horing N.J.M., Wanke M.C.* Absorption of terahertz radiation by plasmon modes in a grid-gated double-quantum-well field-effect transistor // Journal of Applied Physics. – 2003. – V. 94. – P. 3556.
60. *Popov V.V., Polischuk O.V., and Shur M.S.* Resonant excitation of plasma oscillations in a partially gated two-dimensional electron layer // Journal of Applied Physics. – 2005. – V. 98. – P. 033510.
61. *Popov V.V., Tsymbalov G.M., Fateev D.V., Shur M.S.* Cooperative absorption of terahertz radiation by plasmon modes in an array of field-effect transistors with two-dimensional electron channel // Applied Physics Letters. – 2006. – V. 89. – P. 123504.
62. *Muravev V.M., Fortunatov A.A., Dremin A.A., and Kukushkin I.V.* Experimental investigation of plasma excitations in asymmetric stripes of two-dimensional electrons // JETP Letters. – 2010. – V. 92. – P. 466-469.
63. *Muravev V.M. and Kukushkin I.V.* Plasmonic detector/spectrometer of subterahertz radiation based on two-dimensional electron system with embedded defect // Applied Physics Letters. – 2012. – V. 100. – P. 082102.

64. Lee M., Wanke M. C., and Reno J. L. Millimeter wave mixing using plasmon and bolometric response in a double-quantum-well field-effect transistor // *Applied Physics Letters*. – 2005. – V. 86. – 033501.
65. Shaner E.A., Mark Lee, Wanke M.C., Grine A.D., Reno J.L., Allen S.J. / «Tunable THz detector based on a grating gated field-effect transistor» // *Proc. of SPIE 6120, Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics V.* – San Jose, USA, 2006. – P. 612006.
66. Shaner E.A., Wanke M.C., Grine A.D., Lyo S.K., Reno J.L., and Allen S.J. Enhanced responsivity in membrane isolated split-grating-gate plasmonic terahertz detectors // *Applied Physics Letters*. – 2007. – V. 90. – P. 181127.
67. Dyer G.C., Crossno J.D., Aizin G.R., Shaner E.A., Wanke M.C., Reno J.L., and Allen S.J. A plasmon terahertz detector with a monolithic hot electron bolometer // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2009. – V. 21. – N. 19. – P. 195803.
68. Aizin G.R., Popov V.V., and Polischuk O.V. Plasmon enhanced electron drag and terahertz photoconductance in a grating-gated field-effect transistor with two-dimensional electron channel // *Applied Physics Letters*. – 2006. – V. 89. – P. 143512.
69. Aizin G.R., Fateev D.V., Tsymbalov G.M., and Popov V.V. Terahertz plasmon photoresponse in a density modulated two-dimensional electron channel of a GaAs/AlGaAs field-effect transistor // *Applied Physics Letters*. – 2007. – V. 91. – P. 163507.
70. Muravjov A.V., Veksler D.B., Popov V.V., Polischuk O.V., Pala N., Hu X., Gaska R., Saxena H., Peale R.E., and Shur M.S. Temperature dependence of plasmonic terahertz absorption in grating-gate gallium-nitride transistor structures // *Applied Physics Letters*. – 2010. – V. 96. – P. 042105.
71. Coquillat D., Nadar S., Teppe F., Dyakonova N., Boubanga-Tombet S., Knap W., Nishimura T., Meziani Y. M., Otsuji T., Popov V. V., and Tsymbalov G. M. Room temperature detection of sub-terahertz radiation in double-grating-gate transistors // *Optics Express*. – 2010. – V. 18. – I. 6. – P. 6024-6032.

72. Popov V.V., Fateev D.V., Polischuk O.V., and Shur M.S. Enhances electromagnetic coupling between terahertz radiation and plasmons in a grating-gate transistor structure on membrane substrate // *Optics Express*. – 2010. – V. 18. – I. 16. – P. 16771-16776.
73. Nogajeski K., Lusakowski J., Knap W., Popov V.V., Teppe F., Rumyantsev S.L., and Shur M.S. Localized and collective magnetoplasmon excitations in AlGaIn/GaN-based grating-gate terahertz modulators // *Applied Physics Letters*. – 2011. – V. 99. – P. 213501.
74. Popov V.V., Fateev D. V., Otsuji T., Meziani Y. M., Coquillat D., and Knap W. Plasmonic terahertz detection by a double-grating-gate field-effect transistor structure with an asymmetric unit cell // *Applied Physics Letters*. – 2011. – V. 99. – P. 243504.
75. Popov V. V., Polischuk O. V., Knap W., and Fatimy A. Broadening of the plasmon resonance due to plasmon-plasmon intermode scattering in terahertz high-electron-mobility transistors // *Applied Physics Letters*. – 2008. – V. 93. – P. 263503.
76. Popov V.V., Tsymbalov G.M., Fateev D.V., Shur M.S. High-order Plasmon resonances in GaN-based field-effect-transistor arrays // *International Journal of High Speed Electronics and Systems*. – 2007. – V. 17. – I. 3. – P. 557-566.
77. 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.
78. Drexler C., Dyakonova N., Olbrich P., Schafberger M., Karpierz K., Mityagin Yu., Lifshits M.B., Teppe F., Klimenko O., Meziani Y.M., Knap W., and Ganichev S.D. Helicity sensitive terahertz radiation detection by field effect transistors // *Journal of Applied Physics*. – 2012. – V. 111. – P. 124504.
79. Popov V.V. Suppression of intermode Plasmon scattering due to total internal reflection of oblique plasmons in a multichannel high-electron-mobility transistor // *Applied Physics Letters*. – 2008. – V. 98. – № 083501.
80. Askerov B.M. Electron transport phenomena in semiconductor. World scientific, 1994.

81. Klimenko O.A., Knap W., Iniguez B., Coquillat D., Mityagin Yu.A., Teppe F., Dyakonova N., Videlier H., But D., Lime F., Marczewski J., and Kucharski K. Temperature enhancement of terahertz responsivity of plasma field effect transistors // *Journal of Applied Physics*. – 2012. – V. 112. – P. 014506.
82. Martino J.A., Simoen E., and Claeys C. A new method for determining the front and back interface-trap densities of accumulation-mode soi mosfets at 77 k // *Solid-state electronics*. – 1995. – V. 38. – I. 10. – P. 1799-1803.
83. Dyer G.C., Vinh N.Q., Allen S.J., Aizin G.R., Mikalopas J., Reno J.L., and Shaner E.A. A terahertz plasmon cavity detector // *Applied Physics Letters*. – 2010. – V. 97. – P. 193507.
84. Dyer G.C., Preu S., Aizin G.R., Mikalopas J., Grine A.D., Reno J.L., Hensley J.M., Vinh N.Q., Gossard A.C., Sherwin M.S., Allen S.J., and Shaner E.A. Enhanced performance of resonant sub-terahertz detection in a plasmonic cavity // *Applied Physics Letters*. – 2012. – V. 100. – P. 083506.
85. Öjefors E., Pfeiffer U., Lisauskas A., and Roskos H.G. A 0.65 THz focal-plane array in a quarter-micron CMOS process technology // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. – 2009. – V. 44. – I. 7. – P. 1968-1976.
86. Popov V.V. Plasmon excitation and plasmonic detection of terahertz radiation in the grating-gate field-effect-transistor structures // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2011. – V. 32. – I. 10. – P. 1178-1191.
87. Popov V.V. Terahertz rectification by periodic two-dimensional electron plasma // *Applied Physics Letters*. – 2013. – V. 102. – P. 253504.
88. Kachorovskii V. Yu., Romyantsev S. L., Knap W. and Shur M. Performance limits for field effect transistors as terahertz detectors // *Applied Physics Letters*. – 2013. – V. 102. – P. 223505.
89. Харкевич А.А. Основы радиотехники, ФИЗМАТЛИТ, 2007.
90. Öjefors E., Lisauskas A., Glaab D., Roskos H.G., and Pfeiffer U. Terahertz imaging detectors in CMOS technology // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2009. – V. 30. – I. 12. – P. 1269-1280.

91. Sun J.D., Sun Y.F., Wu D.W., Cai Y., Qin H., and Zhang B.S. High-responsivity, low-noise, room-temperature, self-mixing terahertz detector realized using floating antennas on a GaN-based field-effect transistor // *Applied Physics Letters*. – 2012. – V. 100. – P. 013506.
92. Sizov F., Petriakov V., Zabudsky V., Krasilnikov D., Smoliy M., and Dvoretzki S. Millimeter-wave hybrid un-cooled narrow-gap hot-carrier and Schottky diodes direct detectors // *Applied Physics Letters*. – 2012. – V. 101. – P. 082108.
93. Vitiello M.S., Viti L., Romeo L., Ercolani D., Scalari G., Faist J., Beltram F., Sorba L., and Tredicucci A. Semiconductor nanowires for highly sensitive, room-temperature detection of terahertz quantum cascade laser emission // *Applied Physics Letters*. – 2012. – V. 100. – P. 241101.
94. Preu S., Kim S., Verma R., Burke P.G., Shervin M.S., and Gossard A.C. An improved model for non-resonant terahertz detection in field-effect transistors // *Journal of Applied Physics*. – 2012. – V. 111. – P. 024502.
95. Ezdi K., Heinen B., Jordens C., Vieweg N., Krumbolz N., Wilk R., Mikulics M., Koch M. A hybrid time-domain model for pulsed terahertz dipole antennas // *Journal of the European Optical Society*. – 2009. – V. 4. – P. 09001.
96. Liu P., Cai W., Wang L., Zhang X., and Xu J. Tunable terahertz optical antennas based on graphene ring structures // *Applied Physics Letters*. – 2012. – V. 100. – P. 153111.
97. [Scheuring A.](#), [Türer I.](#), [Ribièrè-Tharaud N.](#), [Dégardin A.F.](#), [Kreisler A.J.](#) Modeling of broadband antennas for room temperature terahertz detectors // *Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics*. – 2010. – V. 9. – P. 277-286.
98. Lisauskas A., Boppel S., Matukas J., Palenskis V., Minkevichius L., Valusis G., Haring-Bolivar P., Roskos H.G. Terahertz responsivity and low-frequency noise in biased silicon field-effect transistors // *Applied Physics Letters*. – 2013. – V. 102. – P. 153505.
99. Ali-Ahmad W.Y., Rebeiz G.M., Dave H., and Chin G. 802 GHz integrated horn antennas imaging array // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. – 1991. – V. 12. – N. 5. – P. 481-486.

100. Popov V.V., Tsymbalov G.M., Shur M.S., Knap W. Resonant terahertz response of a slot diode with a two-dimensional electron channel // *Физика и техника полупроводников*. – 2005. – Т. 39. – Вып. 1. – С. 157-161.
101. Матов О.Р., Мешков О.Ф., Полищук О.В., Попов В.В. Теория электромагнитного излучения двумерных магнитоплазменных и циклотронных колебаний в полупроводниковой гетероструктуре с периодическим экраном // *Журнал Экспериментальной и теоретической физики*. – 1996. – Т. 109. – С. 876-883.
102. Морозов Ю.А., Попов В.В. Распределение плотности двумерного электронного газа в полупроводниковой гетероструктуре с периодическим затворным электродом // *Письма в Журнал технической физики*. – 1999. – Т. 25. – Вып. 1. – С. 37-41.
103. Van Der Ziel A. *Noise in Measurements*, Wiley, N.-Y., 1976.
104. Blanter Ya.M., Buttiker M. Shot noise in mesoscopic conductors // *Physics Reports*. – 2000. – V. 336. – I. 1-2. – P. 1-166.
105. Hsu C.-C., Lin J.-H., Chen Y.-S., Lin Y.-H., Kuo H.-C., Wang S.-C., Hsieh W.-F., Tansu N., and Mawst L.J. Ultrafast carrier dynamic of InGaAsN and InGaAs single quantum wells // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2008. – V. 41. – N.8 – P. 085107.