

**«Разработка импульсных твердотельных генераторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн на основе многослойных гетероструктур GaAs/AlGaAs.»** Научный руководитель доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН С.А. Никитов. ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы». Соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0141 от 23 октября 2015 г с учётом дополнительного соглашения № 1 от 29 августа 2017 г.

## **Этап № 2 с 1 января 2016 г. по 31 декабря 2016 г.**

Теоретические исследования.

Получателем субсидии были выполнены следующие работы:

1. Разработка математической модели статических вольтамперных характеристик многоямной гетероструктуры с туннельно-непрозрачными барьерами.
2. Разработка математической модели в рамках малосигнального частотного анализа и расчет комплексных дифференциальных сопротивлений и предельных частот генерации реализуемых в многослойных гетероструктурах GaAs/AlGaAs.
3. Разработка программы для ЭВМ математического моделирования электронной зонной структуры аперiodических цепочек квантовых ям.
4. Разработка принципов функционирования импульсного твердотельного генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs.
5. Разработка базовой конструкции импульсного твердотельного генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs
6. Разработка лабораторного технологического регламента изготовления импульсного твердотельного генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs (работа выполнена при участии соисполнителя).
7. Разработка методики квазиоптического электромагнитного согласования излучающего элемента импульсного твердотельного генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн с приёмником излучения.
8. Разработка эскизной конструкторской (ЭКД) и эскизной технологической (ЭТД) документации на экспериментальный образец импульсного твердотельного генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs.
9. Разработка программы и методик экспериментальных исследований (ПМЭИ) импульсного твердотельного генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs.

Индустриальным партнёром были выполнены следующие работы:

1. Разработка ЭКД на корпус и посадочную плату для экспериментального образца импульсного твердотельного генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs.
2. Изготовление макетного образца корпуса и платы.
3. Участие в мероприятиях, направленных на освещение и популяризацию результатов проекта.

При этом были получены следующие результаты:

Математическая модель статических вольтамперных характеристик многослойной гетероструктуры с туннельно-непрозрачными барьерами, позволяет делать оценки основных физических параметров и характеристик генерирующей структуры с заданной геометрией слоёв.

Математической модели в рамках малосигнального частотного анализа послужила основой для проведённого расчёта комплексных дифференциальных сопротивлений и предельных частот генерации реализуемых в многослойных гетероструктурах GaAs/AlGaAs. Полученные данные предназначены для использования при расчётах параметров электромагнитного согласования генерирующей структуры и частотно-селективных электродинамических элементов.

На основе разработанной программы для ЭВМ математического моделирования электронной зонной структуры аperiodических цепочек квантовых ям были сделаны оценки вклада квантового туннелирования в электронный транспорт в используемой многослойной гетероструктуре, а также локализованных электронных состояний вблизи потенциальных барьеров.

С использованием разработанных математических инструментов и моделей были разработаны принципы функционирования импульсного твердотельного генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs. При этом была установлена связь геометрии, используемой многослойной гетероструктуры с электрофизическими и высокочастотными характеристиками генерирующего элемента. На основании сделанных оценок была проведена оптимизация геометрии для достижения заданных параметров генерации.

Была разработана базовая конструкция импульсного твердотельного генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs. Конструкция предусматривает оптимальное расположение генерирующих структур в пределах микросхемы генератора и присоединённых к ним элементов микрополосковых электродинамических систем, обеспечивающих частотную селекцию и согласование с открытым пространством.

Был разработан лабораторный технологический регламент изготовления импульсного твердотельного генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs, обеспечивающий изготовление всех полупроводниковых элементов генератора с заданной геометрией, металлической соединительной системы, предназначенной для обеспечения заданного тока смещения через генерирующий элемент, а также микрополосковых элементов электродинамической структуры.

Была разработана методика квазиоптического электромагнитного согласования излучающего элемента импульсного твердотельного генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн с приёмником излучения, обеспечивающая экстракцию электромагнитного излучения из области генерирующего элемента и передачу излучения к приёмнику с минимальными потерями. Система включает в себя микрополосковую антенну, гиперполусферическую линзу из кремния и систему эллипсоидных зеркал.

Была разработана эскизная конструкторская (ЭКД) и эскизная технологическая (ЭТД) документация на экспериментальный образец импульсного твердотельного

генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs. Документация содержит:

— спецификацию на экспериментальный образец импульсного твердотельного генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs;

— схему электрическую, принципиальную экспериментального образца импульсного твердотельного генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs;

— топологический чертеж экспериментального образца импульсного твердотельного генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs.

Была разработана программа и методики экспериментальных исследований (ПМЭИ) импульсного твердотельного генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs. Программа предназначена для проведения испытаний изготовленного образца изделия с целью экспериментального измерения его параметров и характеристик. В документе содержится также подробное описание используемых измерительных методик.

Была разработана эскизная конструкторская документация на корпус и посадочную плату для экспериментального образца импульсного твердотельного генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs. Конструкция корпуса предусматривает определённый характер электродинамического окружения генерирующего элемента и тепловой режим. Конструкция посадочной платы обеспечивает подачу импульсного тока смещения на генератор.

Были изготовлены макетные образцы корпуса и посадочной платы для экспериментального образца импульсного твердотельного генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs. В связи с тем, что отсутствуют для большинства материалов справочные значения величины диэлектрической проницаемости в интервале частот 100 ГГц- 1000 ГГц, потребовались дополнительные измерения значений диэлектрической проницаемости диэлектрических материалов корпуса. Изготовленные изделия были подвергнуты испытаниям с использованием эквивалента генератора в виде резистора. Испытания подтвердили работоспособность посадочной платы и реализацию заданных условий теплового режима для генератора в корпусе.

Был проведён научный семинар на тему «Полупроводниковые генераторы субтерагерцового и терагерцового диапазонов частот с участием студентов Саратовского национального исследовательского государственного университета.

Таким образом, задачи, поставленные на данном этапе НИР, выполнены в полном объёме. Полученные результаты будут использованы на следующем заключительном этапе ПНИЭР для разработки конструкции твердотельного генератора электромагнитного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн на основе многослойных гетероструктур GaAs/AlGaAs и экспериментального исследования его характеристик. Кроме того, разработанные математические инструменты и модели, позволяющие описывать многослойные гетероструктуры с произвольным соотношением энергетических высот отдельных гетеробарьеров, с учётом локализованных состояний вблизи барьеров имеют и самостоятельное значение, поскольку создают основу для исследования перспективных полупроводниковых приборов. Комиссия Минобрнауки

России признала обязательства по Соглашению на отчетном этапе исполненными надлежащим образом.