

## Резюме проекта, выполняемого

в рамках ФЦП

### «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы»

по этапу № 3

Номер Соглашения Электронного бюджета: 075-15-2019-1431, Внутренний номер соглашения 14.616.21.0074

Тема: «Разработка и создание одночастотных квантово-каскадных лазеров для среднего инфракрасного диапазона»

Приоритетное направление: Индустрия наносистем (ИН)

Критическая технология: Нано-, био-, информационные, когнитивные технологии

Период выполнения: 11.01.2017 - 30.06.2020

Плановое финансирование проекта: 30.00 млн. руб.

Бюджетные средства 15.00 млн. руб.,

Внебюджетные средства 15.00 млн. руб.

Получатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Индустриальный партнер: Акционерное общество "ОКБ-Планета"

Иностранный партнер: Центр нанонауки и нанотехнологий

Ключевые слова: квантово-каскадные лазеры, излучение среднего инфракрасного диапазона, спектроскопия, газоанализ

## 1. Цель проекта

- 1) Разработка вариантов конструкций, базовой технологии синтеза методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) и технологии изготовления кристаллов одночастотных квантово-каскадных лазеров (ККЛ) средней инфракрасной области спектра для газоанализа и спектроскопии.
- 2) Целью настоящего проекта является создание лабораторных образцов одночастотных квантово-каскадных лазеров (ККЛ) для средней инфракрасной (ИК) области спектра на длинах волн  $5\pm 1$  мкм и  $9\pm 1,5$  мкм. Разрабатываемые лазеры перекрывают наиболее значимые окна прозрачности атмосферы в среднем ИК диапазоне и будут чрезвычайно востребованы в спектроскопии и газоанализе.

## 2. Основные результаты проекта

Результаты первого этапа:

Сделан обзор современного состояния дел по тематике настоящего проекта (научно-технической литературы и патентные исследования). Рассмотрены все наиболее широко применяемые подходы для создания квантово-каскадных лазеров для спектральных диапазонов  $5\pm 1$  мкм и  $9\pm 1,5$  мкм. Проведен выбор направления исследований, в том числе предварительные эксперименты по выращиванию гетероструктур квантово-каскадных лазеров, а также разработаны методы моделирования и проведено моделирование структур квантово-каскадных лазеров. На основе математического моделирования было показано, что в качестве активных областей для квантово-каскадных лазеров спектрального диапазона  $5\pm 1$  мкм наилучшим образом подходит использование конструкции на основе напряженной гетеропары в системе InGaAs, что понижает паразитный эффект выброса носителей заряда в континуум в сравнении со случаем использования механически-ненапряженной гетеропары. Для спектрального диапазона  $9\pm 1,5$  мкм выбрана схема с трёхфононным опустошением нижнего уровня, а активная область создается из каскадов на основе пары InGaAs/AlGaAs. моделирование ККЛ для спектрального диапазона. На основе математического моделирования и предварительных экспериментов была разработана эскизная конструкторская документация. По итогам исследований опубликованы 3 научные статьи индексируемые Web of Science и Scopus. Результаты доложены на двух научных конференциях.

За счёт средств иностранного партнера разработаны методы математического моделирования и проведено математическое моделирование волновода и активной области ККЛ с длиной волны генерации  $5\pm 1$  мкм и  $9\pm 1,5$  мкм. На основе проведённых расчётов получено послонное каскадов активной области ККЛ с длиной волны генерации  $5\pm 1$  мкм и  $9\pm 1,5$  мкм, а также рассчитаны толщины и составы волноводных обкладок для гетероструктур ККЛ. Полученные результаты использованы получателем субсидии при проведении работ по разработке ЭКД



гетероструктур ККЛ для спектральных диапазонов  $5\pm 1$  мкм и  $9\pm 1,5$  мкм. Проведены работы по разработке методов математического моделирования и проведено математическое моделирование резонатора ККЛ с распределенной обратной связью, необходимого для ККЛ с длиной волны генерации  $5\pm 1$  мкм и  $9\pm 1,5$  мкм. Показано существенное подавление боковых мод при применении распределенной обратной связи в квантово-каскадных лазерах.

В ходе выполнения работ на первом этапе применялись самое современное оборудование и методики соответствующие современным общемировым стандартам.

На первом этапе выполнены все запланированные работы, указанные в плане-графике проекта.

Результаты второго этапа:

Разработана технология молекулярно-пучковой эпитаксии по выращиванию гетероструктур квантовых каскадных лазеров для спектральных диапазонов  $5\pm 1$  мкм и  $9\pm 1,5$  мкм. На основе разработанной технологии создана лабораторная технологическая инструкция. В соответствии лабораторной технологической инструкцией и эскизной конструкторской документацией были изготовлены экспериментальные образцы гетероструктур квантовых каскадных лазеров для спектральных диапазонов  $9\pm 1,5$  мкм в количестве 3 шт. была разработана программа и методика испытаний гетероструктур квантовых каскадных лазеров для спектральных диапазонов  $5\pm 1$  мкм и  $9\pm 1,5$  мкм. В соответствии с программой и методикой были проведены испытания изготовленных образцов. Все образцы признаны прошедшими испытания. Были проведены предварительные эксперименты по исследованию квантовых каскадных лазеров спектрального диапазона  $9\pm 1,5$  мкм. Была получена лазерная генерация на четырехсклоотых образцах при комнатной температуре. Также были исследованы динамические характеристики квантовых каскадных лазеров и исследованы температурные зависимости пороговой плотности тока и дифференциальной квантовой эффективности вплоть до температуры  $+65$  градусов Цельсия. По итогам исследований опубликованы 6 научных статей индексируемых Web of Science и Scopus. Результаты доложены на трёх научных конференциях.

Иностранном партнёром в ходе выполнения работ по этапу были проведены исследования по формированию ККЛ с резонаторами с поверхностно-плазмонной распределенной обратной связью. Было изучено влияние скважности металлической решётки на энергетический хаос в фотоннокристаллической зоне. Показано, что использование такого подхода позволяет сформировать распределенную обратную связь в резонаторах ККЛ. Были сформированы резонаторы ККЛ с поверхностно-плазмонной распределенной обратной

связью и была разработана лабораторная технология формирования резонатора с распределенной обратной связью. Показано, что гетероструктурная решетка приводит к уменьшению потерь в волноводе и позволяет реализовать импульсный одномодовый режим работы поверхностно-плазмонных ККЛ

(при комнатной температуре и длине волны  $\sim 7,5$  мкм). С целью определения оптимального диапазона работы ККЛ, было проведено исследование их характеристик в зависимости от скважности решетки. Показано, что случае решетки бесконечной длины (металлический слой - Ag, полупроводник - InP) как решетки РОС 2-го порядка для излучающей структуры ККЛ  $4,6$  мкм – резонансная связь между двумя модами происходит в том случае, если постоянная распространения оптической моды структуры РОС-ККЛ совпадает с постоянной распространения плазмонного режима. Анализ потерь А и S мод при изменении высоты решетки (при скважности 39%) показал, что у А-моды потери только на поглощение, а у S – моды поверхностная эмиссия и потери на поглощение. Проведённые исследования показали, что поверхностно-плазмонные решетки подходят для создания кристаллов ККЛ. Разработана конструкция кристаллов ККЛ с длиной волны генерации  $5\pm 1$  мкм и  $9\pm 1,5$  мкм. Все работы иностранном партнёром выполнены на гетероструктурах ККЛ изготовленных получателем субсидии, что обеспечивает приемственность используемой постростовой технологии и возможность её внедрения в ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

В ходе выполнения работ на втором этапе применялись самое современное оборудование и методики соответствующие современным общемировым стандартам.

Результаты третьего этапа:

По результатам исследований проведённых на втором и третьих этапах была осуществлена корректировка эскизной конструкторской документации на гетероструктуры квантовых каскадных лазеров спектральных диапазонов  $5\pm 1$  мкм и  $9\pm 1,5$  мкм. В соответствии лабораторной технологической инструкцией и скорректированной эскизной конструкторской документацией были изготовлены экспериментальные образцы гетероструктур квантовых каскадных лазеров для спектрального диапазона  $5\pm 1$  мкм в количестве 3 шт. В соответствии с программой и методикой были проведены испытания изготовленных образцов. Все образцы признаны прошедшими испытания. Были проведены предварительные эксперименты по исследованию квантовых каскадных лазеров спектрального диапазона  $5\pm 1$  мкм. Проведены исследования по изготовлению лазеров из гетероструктур на основе скорректированной эскизной конструкторской документации. На полосковых лазерах спектрального диапазона  $9\pm 1,5$  мкм получена генерация частотных ребёнок с шириной спектра генерации более  $400$  нм. Также на данных структурах была получена одночастотная генерация при комнатной температуре при использовании составного U-образного резонатора. Были проведены динамические исследования со спектральным разрешением данного типа лазеров. Была показана спектральная перестройка линии генерации в процессе развития импульса накачки. Максимальное значение chirpa составило более  $0,1$  нм/нс. По итогам исследований опубликованы 2 научные статьи в изданиях индексируемых Web of Science и Scopus. Результаты доложены на двух научных конференциях.

Иностранном партнером проекта были изготовлены лабораторные образцы кристаллов ККЛ с длиной волны генерации  $5\pm 1$  мкм и  $9\pm 1,5$  мкм в количестве по 20 шт для каждого из диапазонов. Была разработана программа и методика исследований лабораторных образцов кристаллов ККЛ. Проведены исследовательские испытания лабораторных образцов кристаллов ККЛ в соответствии с разработанной программой и методикой. Все представленные на испытания лабораторные образцы кристаллов ККЛ с длиной волны генерации  $5\pm 1$  мкм и  $9\pm 1,5$  мкм успешно прошли испытания. Выходная мощность всех лабораторных образцов кристаллов ККЛ превысила  $10$  мВт, величина подавления боковых мод  $20$  дБ. Длина волны генерации лабораторных образцов кристаллов ККЛ соответствовала заявленному спектральному диапазону. Лабораторные образцы кристаллов ККЛ изготавливались из гетероструктур изготовленных получателем субсидии, таким образом технология изготовления гетероструктур ККЛ успешно прошла апробацию.

В ходе выполнения работ на первом этапе применялись самое современное оборудование и методики соответствующие современным общемировым стандартам.

На отчетном этапе выполнены все запланированные работы, указанные в плане-графике проекта.



### **3. Охраноспособные результаты интеллектуальной деятельности (РИД), полученные в рамках прикладного научного исследования и экспериментальной разработки**

Полезная модель патент №192784 от 01.10.2019 "Одночастотный квантово-каскадный лазер среднего инфракрасного диапазона", РФ

### **4. Назначение и область применения результатов проекта**

- 1) Разрабатываемые квантово-каскадные лазеры спектральных диапазонов  $5\pm 1$  мкм и  $9\pm 1.5$  мкм могут применяться во многих отраслях науки и техники таких как: для детектирования как одиночных линий поглощения, соответствующих определенным химическим соединениям, так и для детектирования широких линий поглощения (за счет наложения целого ряда узких линий поглощения), что необходимо в клинической медицине (например, для неинвазивного определения уровня глюкозы в крови и других применений).
- 2) Актуальность результатов обусловлена, в первую очередь, отсутствием отечественного производства квантовых каскадных лазеров (ККЛ). Закупка ККЛ среднего ИК диапазона за рубежом (за исключением опытных образцов) не представляется возможной в силу экспортных ограничений в США и Западной Европе.
- 3) Лазеры среднего инфракрасного диапазона необходимы для создания нового поколения систем лазерной дальнометрии, локации и связи, а также в оптической спектроскопии и в клинической медицине. Лазерная спектроскопия в среднем ИК диапазоне имеет принципиально важное значение для мониторинга окружающей среды и для решения задач обнаружения различных газообразных загрязняющих веществ, имеющих линии поглощения в этой области спектра. Средний ИК диапазон интересен тем, что включает несколько чрезвычайно важных окон прозрачности атмосферы. Оптическое излучение в этом диапазоне длин волн является невидимым и безопасным для человеческого глаза, что, с использованием окон прозрачности атмосферы, позволяет создавать высокоскоростные оптические линии связи в открытом пространстве (freespace optical communications), независимые от тумана, облаков, влажности и турбулентности атмосферы, без прокладки волоконно-оптических линий связи. Кроме перечисленных, ККЛ среднего ИК диапазона позволяют решать задачи дистанционного бесконтактного измерения температуры, регистрации продуктов горения и взрывов, а также целый ряд чрезвычайно важных специальных задач.

### **5. Эффекты от внедрения результатов проекта**

Внедрение результатов проекта позволит разработать отечественную технологию производства квантово-каскадных лазеров излучающих в среднем инфракрасном диапазоне. Одночастотные источники инфракрасного излучения на заданной длине волны генерации требуются для детектирования как одиночных линий поглощения, соответствующих определенным химическим соединениям, так и для детектирования широких линий поглощения (за счет наложения целого ряда узких линий поглощения), что необходимо в клинической медицине (например, для неинвазивного определения уровня глюкозы в крови и других применений). Воплощение в жизнь необходимых для этого технических решений осложняется отсутствием на сегодняшний день в России технологии создания ККЛ, имеющейся в распоряжении западных партнеров.

### **6. Формы и объемы коммерциализации результатов проекта**

- 1) В результате выполнения проекта разработано техническое задание на Опытно-конструкторскую разработку и разработано технико-экономическое обоснование. Возможными исполнителями которого, помимо исполнителя проекта (ФТИ им.А.Ф.Иоффе) и промышленного партнера ОАО «ОКБ-Планета»), могут выступить ООО «Коннектор Оптик» (располагающее необходимой технологией полупроводниковых многослойных наногетероструктур) и ОАО «Полнос», (обладающее необходимым оборудованием и научно-техническим заделом для постростовой обработки и создания кристаллов полупроводниковых лазеров). Ключевыми потребителями могут выступить ОАО «НПП «Салот», ОАО «НПП «Инжект» и др.
- 2) В ходе выполнения ПНИЭР разработаны одночастотные ККЛ среднего ИК диапазона. Целевой рынок для продукта проекта, является сравнительно большим и продолжает расти. Исследование компании BCC Research (<http://www.bccresearch.com>) доказывает, что глобальный рынок квантово-каскадных лазеров составил 5,6 миллиарда долларов в США в 2015 году, уже в 6,1 миллиарда долларов в 2016 году и прогнозируется, что достигнет более чем 9 миллиардов к 2021 году (Global Markets for Quantum Cascade Lasers <https://www.bccresearch.com/market-research/photonics/quantum-cascadelasermarkets-report-pho026a.html>)

### **7. Наличие соисполнителей**

Общество с ограниченной ответственностью "Коннектор Оптик" - 2017, 2018, 2019 год

