

## Резюме проекта, выполняемого

в рамках ФЦП

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

по этапу № 4

Номер Соглашения о предоставлении субсидии: 14.607.21.0101

Тема: «Квантоворазмерные полупроводниковые наногетероструктуры со сверхшироким спектром усиления и лазеры ближнего ИК-диапазона с расширенным волноводом на их основе для создания перестраиваемого источника лазерного излучения в диапазоне от красного до синего цвета»

Приоритетное направление: Индустрия наносистем (ИН)

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

Период выполнения: 28.11.2014 - 30.12.2016

Плановое финансирование проекта: 26.80 млн. руб.

Бюджетные средства 14.50 млн. руб.,

Внебюджетные средства 12.30 млн. руб.

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

Индустриальный партнер: Общество с ограниченной ответственностью "Химприбор-СПб"

Ключевые слова: квантовые точки, полупроводниковые лазеры, широкие спектры генерации, широкие спектры усиления, оптический волновод, нелинейный кристалл, генерация второй гармоники

### 1. Цель проекта

- 1) Разработка базовой технологии синтеза методом молекулярно-пучковой эпитаксии полупроводниковых квантоворазмерных нанонаногетероструктур со сверхшироким спектром усиления и технологии изготовления кристаллов лазеров ближнего ИК-диапазона с расширенным волноводом на их основе для создания перестраиваемого компактного источника лазерного излучения в диапазоне от красного до синего цвета.
- 2) Разработка перестраиваемого лазерного источника излучения видимого диапазона от красного до синего цвета с характеристиками, соответствующими мировому уровню, с целью импортозамещения и обеспечения внутренних потребителей компактными источниками лазерного излучения с уникальным набором спектральных, мощностных и пространственных характеристик

### 2. Основные результаты проекта

Результаты первого этапа:

Сделан обзор современного состояния дел по тематике настоящего проекта (научно-технической литературы и патентные исследования). Показано, что наиболее эффективным способом получения перестраиваемых лазерных источников является использование удвоения частоты излучения инфракрасных полупроводниковых лазеров в волноводных периодически поляризованных нелинейных кристаллах, а существующие проблемы актуальны и обладают научной новизной. Проведен выбор направления исследований и осуществлены предварительные теоретические исследования. Показано, что в качестве активных областей для получения сверхширокого спектра усиления наилучшим образом подходят наногетероструктуры с квантовыми точками. Впервые разработана теоретическая модель для адекватного описания формирования активной области на основе полупроводниковых квантоворазмерных наногетероструктур для формирования сверхширокого спектра усиления. Выявлена взаимосвязь между спектром спонтанного излучения и усиления, что значительно облегчает анализ спектров усиления на основе легко измеряемых спектров спонтанного излучения. Проведено моделирование конструкции активной области лазера на основе многослойных полупроводниковых гетероструктур включающей в себя квантовые ямы и квантовые точки. Проведены исследования по оптимизации конструкции квантоворазмерных полупроводниковых наногетероструктур со сверхшироким спектром и определены направления дальнейших исследований усиления для достижения совокупности заявленных технических характеристик. Разработана теоретическая модель для расчета профиля волновода и периодической поляризации нелинейного кристалла для эффективной генерации второй гармоники в широком спектральном диапазоне.

Разработана теоретическая модель для расчета зависимости эффективности генерации второй гармоники от интенсивности накачки и длины нелинейного кристалла. Проведены исследования по оптимизации конструкции волноводов в нелинейных кристаллах и конструкции кристаллов полупроводниковых лазеров с расширенным волноводом, излучающих в спектральном диапазоне 950-1300 нм, определены направления дальнейших исследований, для достижения совокупности заявленных технических характеристик. Полученные в ходе выполнения этапа результаты предварительных исследований позволяют утверждать о достижимости заявленных технических характеристик. В ходе выполнения работ на отчетном 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 теоретическая модель и проведен численный расчет различных конструкций полупроводниковых лазеров с расширенным волноводом и активной областью на основе полупроводниковых квантоворазмерных наногетероструктур, излучающих в спектральном диапазоне 950-1300 нм, обеспечивающих одновременный контроль пространственного модового состава и управление спектром генерируемого излучения в том числе: разработана теоретическая модель лазерного волновода, позволяющая провести оптимизацию с точки зрения получения минимальной расходимости лазерного пучка и получения максимального фактора оптического ограничения (Гамма-фактора), проанализированы параметры волновода для лазеров со сверхшироким спектром излучения, выявлено, что волноводы такого типа требуют оптимизации для уравнивания факторов оптического ограничения слоёв активной области, излучающих на разных длинах волн, предложен и проверен на численной модели метод чередования слоёв разных групп квантовых точек, позволяющий уменьшить разницу в гамма-факторах для различных групп до величины менее 8%. Проведены исследования динамических характеристик полупроводниковых лазеров на основе квантовых точек при накачке мощными токовыми импульсами свыше 10 порогов. Проведено исследование по отработке технологических режимов синтеза методом молекулярно-пучковой эпитаксии наногетероструктур со сверхшироким спектром усиления. Показано, что при последовательном заращивании InAs квантовых точек тонкими слоями AlAs и InAlAs происходит увеличение высоты точек и длинноволновый сдвиг линии фотолюминесценции, а также увеличивается энергетический зазор между уровнями электронов и дырок в квантовых точках. Это позволяет увеличить диапазон спектров излучения и усиления таких структур в сторону больших длин волн. Исследованы оптимальные технологические режимы и допустимые параметры, позволяющие реализовать длинноволновый сдвиг спектра фотолюминесценции и спектра усиления. Для образцов с квантовыми точками InAs/InAlAs исследовано влияние количества InAs осаждаемого в режиме Странского-Крастанова для формирования начальных InAs островков на сдвиг максимума линии излучения в сторону больших длин волн. Продемонстрирована возможность формирования многослойных (30 рядов КТ) массивов квантовых точек. Поверхностная плотности массива КТ составила  $4 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Исследованы структурные свойства образцов со складированными квантовыми ямами InGaAs/GaAs и с компенсирующими слоями GaAsP. Показана возможность создания гибридной активной среды квантовые точки-квантовые ямы InGaAs/GaAs (КТ-КЯ) с излучением на длине волны  $\sim 1060 \text{ нм}$ , обладающей более высокой плотностью состояний по сравнению с массивами квантовых точек и меньшим уровнем упругих напряжений по сравнению с квантовыми ямами. Рассмотрена модель заполнения бимодального массива КТ носителями заряда, описывающая наблюдаемые явления. Исследовано влияние легирования на оптические свойства квантовых точек InAs/GaAs. Разработана эскизная конструкторская документация многомодового волновода на основе ниобата лития, обеспечивающего необходимый диапазон перестройки эффективного удвоения частоты от красного до синего цвета за счет согласования мод различных порядков. Разработана эскизная конструкторская документация (ЭКД) волноводов на основе нелинейных кристаллов ниобата лития, обеспечивающих необходимый диапазон перестройки эффективного удвоения частоты от красного до синего цвета за счет согласования мод различных порядков, со следующими характеристиками: каналы шириной 4 мкм, длиной 20 мм, сечение волноводов  $4 \times 4 \text{ мкм}$ , периоды поляризации доменной структуры – 0.006515, 0.00665. Скачки показателя преломления волновода 0.010, 0.025, 0,100. На основе разработанной ЭКД, методом протонно-ионного обмена, на нелинейных кристаллах ниобата лития были изготовлены лабораторные образцы канальных волноводов длиной 20 мм, отличавшихся друг от друга скачком показателя преломления, а также периодами поляризации доменной структуры. Скачки показателя преломления волновода 0.010, 0.025, 0,100. Проведено исследование полученных волноводов.

Результаты третьего этапа:

Проведены дополнительные патентные исследования. Разработана лабораторно-технологическая инструкция изготовления методом молекулярно-пучковой эпитаксии квантоворазмерных полупроводниковых наногетероструктур со сверхшироким спектром усиления. Изготовлены лабораторные образцы квантоворазмерных полупроводниковых наногетероструктур со сверхшироким спектром усиления. Разработаны программы и методики испытаний лабораторных образцов квантоворазмерных полупроводниковых наногетероструктур со сверхшироким спектром усиления. Проведены испытания лабораторных образцов квантоворазмерных полупроводниковых наногетероструктур со сверхшироким спектром усиления. Разработаны программы и методики испытаний лабораторных образцов кристаллов полупроводниковых лазеров с расширенным волноводом и активной областью на основе квантоворазмерных наногетероструктур, излучающих в диапазоне 950-1300 нм. Разработана, изготовлена и оптимизирована оптическая схема для эффективного ввода излучения полупроводниковых лазеров в волновод нелинейного кристалла для повышения эффективности удвоения частоты при нелинейно-оптическом преобразовании. Изготовлены и исследованы тестовые образцы массивов квантовых точек, излучающих в диапазоне 1180-1300 нм и входящих в состав комбинированной активной области квантоворазмерных полупроводниковых наногетероструктур со сверхшироким спектром усиления. Исследованы возможности оценки плотности массивов квантовых точек в тестовых структурах на основе метода фотолюминесценции. Предложена конструкция нового полупроводникового метаматериала для генерации второй гармоники. На основании проведенных исследований подана патентная заявка №2015153900 от 16.12.2015 г.

Полученные в ходе выполнения этапа результаты предварительных исследований позволяют утверждать о достижимости заявленных технических характеристик.

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

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

Результаты четвертого этапа:

Разработана ЭКД на кристаллы полупроводниковых лазеров с расширенным волноводом и активной областью на основе полупроводниковых квантоворазмерных наногетероструктур, излучающих в спектральном диапазоне 950-1300 нм.

Разработана ЛТИ изготовления кристаллов полупроводниковых лазеров с расширенным волноводом и активной областью на основе квантоворазмерных наногетероструктур, излучающих в спектральном диапазоне 950 – 1300 нм. Изготовлены лабораторные образцы кристаллов полупроводниковых лазеров с расширенным волноводом и активной областью на основе квантоворазмерных наногетероструктур, излучающих в спектральном диапазоне 950 – 1300 нм. Проведены испытания лабораторных образцов кристаллов полупроводниковых лазеров с расширенным волноводом и активной областью на основе квантоворазмерных наногетероструктур, излучающих в спектральном диапазоне 950 – 1300 нм. Испытанные образцы соответствуют пункту 4.3.1 ТЗ соглашения. Разработана ЛТИ изготовления лазерного источника видимого излучения с диапазоном перестройки от красного до синего цвета, соответствующего пункту 4.3.3, обеспечивающего диапазон перестройки менее 175 нм (от 475 до 650 нм). Создан лабораторного образца лазерного источника видимого света с диапазоном перестройки от красного до синего цвета. Проведены аредварительные исследования его характеристик. Показана возможность получения суммарных гармоник. Разработана, изготовлена и оптимизирована спектрально-селективная схема обратной связи для перестройки длины волны излучения кристаллов полупроводниковых лазеров с расширенным волноводом и активной областью на основе квантоворазмерных полупроводниковых наногетероструктур для повышения эффективности удвоения частоты при нелинейно-оптическом преобразовании. Результаты исследований представлены на 2-х международных конференциях.

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

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

В ходе выполнения работ на отчетном 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**

изобретение заявка №2015153900 от 16.12.2015 г.

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

- 1) Полупроводниковые квантоворазмерные нанонаногетероструктуры со сверхшироким спектром усиления и технология изготовления кристаллов лазеров ближнего ИК-диапазона с расширенным волноводом на их основе предназначены для создания перестраиваемого компактного источника лазерного излучения в диапазоне от красного до синего цвета. Область применения таких источников излучения простирается от биофотоники и биомедицины до проекционного лазерного телевидения;
- 2) Наиболее перспективным направлением внедрения является применение перестраиваемых видимых лазерных источников во флуоресцентной микроскопии, где для возбуждения люминофоров в настоящее время используется одновременно несколько газовых и твердотельных лазеров, что делает флуоресцентные микроскопы весьма громоздкими и дорогими приборами.
- 3) Замена нескольких лазеров на один компактный и эффективный источник лазерного излучения может оказать огромное влияние на развитие флуоресцентной микроскопии в целом. Кроме того, полученные результаты могут быть использованы для постановки промышленной технологии изготовления полупроводниковых лазеров различного типа на отечественных промышленных предприятиях.

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

Внедрение результатов ПНИЭР позволит заменить громоздкие и неэффективные газовые и твердотельные лазеры на компактный и эффективный перестраиваемый источник лазерного излучения видимого диапазона, что снизит стоимость конечного продукта и систем на его основе и позволит создать конкурентоспособный высокотехнологический продукт.

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

- 1) В результате выполнения проекта будет разработано техническое задание на Опытно-конструкторскую разработку и разработано технико-экономическое обоснование. Возможными исполнителями которого, помимо исполнителя проекта (ФТИ им.А.Ф.Иоффе) и индустриального партнера (ООО «Химприбор»), могут выступить ООО «КоннекторОптикс» (располагающее необходимой технологией полупроводниковых многослойных наногетероструктур) и ОАО «ОКБ-Планета» (обладающее необходимым оборудованием и научно-техническим заделом для постростовой обработки и создания кристаллов полупроводниковых лазеров). Ключевыми потребителями могут выступить ОАО «Полос», ОАО «НПП «Салют», ОАО «НПП «Инжент» и др.
- 2) В ходе выполнения ПНИЭР будут разработаны перестраиваемы полупроводниковые лазеры ближнего ИК диапазона со сверхшироким спектром усиления и лазерные источники видимого излучения на их основе с диапазоном перестройки от красного до синего цвета. Целевой рынок для продукта проекта, перестраиваемого лазерного источника, является сравнительно большим и продолжает расти. Исследование компании BCC Research (<http://www.bccresearch.com>) доказывает, что

глобальный рынок микроскопии составил \$2.1 миллиарда в 2012 году, при этом доля оптической микроскопии составляет примерно 25%. Согласно Международному Исследованию в области здравоохранения (2011, Opportunities in Global Medical Devices and Diagnostics [http:// www.lifescienceintelligence.com/market-reports-page.php?id=HRI-255](http://www.lifescienceintelligence.com/market-reports-page.php?id=HRI-255)), среднегодовой рост (CAGR) всех сегментов оптической микроскопии составит более 5%.

## 7. Наличие соисполнителей

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», 4 этап, 2016 г.

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

Заместитель директора по научной работе  
*(должность)*



*(подпись)*

Лебедев С.В.  
*(фамилия, имя, отчество)*

Руководитель работ по проекту  
ведущий научный сотрудник  
*(должность)*



*(подпись)*

Соколовский Г.С.  
*(фамилия, имя, отчество)*