

Резюме проекта (НИР), выполняемого в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 г.г.»

Номер проекта: № П2319 от 16 ноября 2009 г.

Тема: «Исследование фундаментальных и технологических причин, ограничивающих максимальную выходную оптическую мощность полупроводниковых лазеров, излучающих в спектральном диапазоне 900-1200нм».

Приоритетное направление: индустрия наносистем и материалов

Критические технологии: технологии создания электронной компонентной базы

Период выполнения: 16 ноября 2009 г. – 10 августа 2011 г.

Плановое финансирование:

Бюджетные средства – 4,5 млн.руб.

Внебюджетные средства – 0 млн. руб.

Исполнитель: Учреждение Российской академии наук Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.Петербург 194021, Политехническая ул., д.26

Ключевые слова: лазерные гетероструктуры, температурная стабильность лазерных характеристик, делокализация носителей заряда, МОС-гидридная эпитаксия, внутренние оптические потери

1. Цель исследования: Исследование фундаментальных и технологических причин, ограничивающих максимальную выходную оптическую мощность полупроводниковых лазеров, излучающих в спектральном диапазоне 900-1200нм.

1.1. Наименование разрабатываемой научной продукции

Экспериментальные образцы лазерных гетероструктур для мощных полупроводниковых лазеров, выращенные методом МОС – гидридной эпитаксии на установке “EMCORE GS/ 3100” на подложках GaAs, излучающие в диапазоне длин волн 900-1200нм.

Основные конструктивно-технологические параметры, влияющие на максимальную выходную оптическую мощность полупроводниковых лазеров.

Методики управления конструктивно-технологическими параметрами, позволяющие расширить диапазон оптической мощности излучения полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур на подложках GaAs.

2. Характеристика выполненных на этапе работ по созданию продукции.

2.1. Были достигнуты следующие научные результаты:

- Была изготовлена и исследована серия лабораторных образцов мощных полупроводниковых лазеров с различным составом твердого раствора волноводного слоя лазерной гетероструктуры раздельного ограничения.

- Были определены зависимости мощностных характеристик полупроводниковых лазеров от состава твердого раствора волноводного слоя лазерной гетероструктуры.

- Были определено влияние скорости захвата носителей заряда на зависимости следующих характеристик лазера от плотности тока накачки: выходной оптической мощности (W_{AX}), внутренней квантовой эффективности стимулированного излучения, тока стимулированной рекомбинации в КЯ и концентрации носителей заряда в слое оптического ограничения.

- Была определена зависимость внутренних оптических потерь в мощных полупроводниковых лазерах от температуры и состава твердого раствора волноводного слоя.

- Были определены методики оптимизации лазерной гетероструктуры по конструктивно-технологическим параметрам температурной стабильности ($T_0 \geq 180K$, $T_1 \geq 400K$) и мощностных характеристик полупроводниковых лазеров (сохранение линейности W_{AX} при непрерывной мощности излучения не менее 10 Вт).

2.2. Была изготовлена и исследована серия лабораторных образцов мощных полупроводниковых лазеров с различным составом твердого раствора волноводного слоя лазерной гетероструктуры раздельного ограничения.

Были определены зависимости мощностных характеристик полупроводниковых лазеров от состава твердого раствора волноводного слоя лазерной гетероструктуры. Исследовано влияние состава

волноводного слоя и количества сильно напряженных квантовых ям $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.35$) в качестве активной области асимметричной лазерной гетероструктуры раздельного ограничения с расширенным волноводом на основные лазерные характеристики. Показано, что с увеличением глубины активной области лазерной гетероструктуры при фиксированном составе твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ наблюдалось улучшение таких характеристик как пороговый ток, температурная чувствительность пороговой плотности тока, стимулированный квантовый выход и дифференциальная квантовая эффективность линейность ватт-амперной характеристики возростала.

2.3. Было определено влияние скорости захвата носителей заряда на зависимости следующих характеристик лазера от плотности тока накачки: выходной оптической мощности (ВтАХ), внутренней квантовой эффективности стимулированного излучения, тока стимулированной рекомбинации в КЯ и концентрации носителей заряда в слое оптического ограничения. Показано, что в зависимости от параметров КЯ и вариантов накачки гетероструктуры, вероятность захвата носителей в КЯ меняется в широких пределах. Максимальная скорость захвата обеспечивается соотношением толщины и энергетической глубины квантовой ямы активной области. Поляризационное взаимодействие максимально для малых волновых векторов фонона. Поэтому коэффициент захвата имеет максимум, если в КЯ есть уровень размерного квантования, отстоящий от уровня энергии налетающего электрона (т.е. фактически от границы сплошного спектра) на энергию $\hbar\omega_0$ ($\hbar\omega_0$ - энергия оптического фонона с нулевым импульсом).

2.4. Была определена зависимость внутренних оптических потерь в мощных полупроводниковых лазерах от температуры и состава твердого раствора волноводного слоя. Экспериментально установлено, что в диапазоне температур 20-140°C величина стимулированного квантового выхода остается неизменной. Показано, что температурная делокализация носителей заряда ведет к росту концентрации носителей заряда в волноводных слоях лазерной гетероструктуры. Суммарный рост внутренних оптических потерь на рассеяние на свободных носителях заряда в слоях активной области и волноводных слоях лазерной гетероструктуры ведет к снижению дифференциальной квантовой эффективности и к насыщению ватт-амперной характеристики полупроводниковых лазеров в непрерывном режиме генерации. Снижение концентрации носителей заряда в активной области лазерной структуры при повышенной температуре ведет к снижению доли внутренних оптически потерь в активной области лазерной структуры. Как следствие снижаются суммарные внутренние потери, ватт-амперная характеристика не насыщается и выходная оптическая мощность увеличивается.

2.5. Были определены методики оптимизации лазерной гетероструктуры по конструктивно-технологическим параметрам температурной стабильности ($T_0 \geq 180\text{K}$, $T_1 \geq 400\text{K}$) и мощностных характеристик полупроводниковых лазеров (сохранение линейности ВтАХ при непрерывной мощности излучения не менее 10 Вт). Было установлено, что для полупроводникового лазера существует набор конструктивно-технологических требований для создания активного элемента (постростовые технологии). Конструктивные приемы, без применения которых нельзя достоверно установить фундаментальные причины ограничения излучаемой оптической мощности. В активном элементе должен быть исключен срыв генерации моды Фабри-Перо замкнутой кольцевой модой. Конструкция полоскового лазера должна обеспечивать ограничение области протекания тока под полосковым контактом без увеличения области свечения с ростом тока накачки. Конструкция должна исключать расширение диаграммы направленности излучения с ростом тока накачки как в плоскости параллельной, так и перпендикулярной эпитаксиальным слоям лазерной структуры. Конструкция должна обеспечивать низкое значение последовательного сопротивления и теплового сопротивления после монтажа активного элемента на теплоотвод.

2.6. На основании полученных экспериментальных данных были изготовлены лазерные гетероструктуры с различной энергетической глубиной квантовых ям в активной области. Были исследованы излучательные характеристики и их температурные зависимости полупроводниковых лазеров на основе асимметричных гетероструктур раздельного ограничения. Продемонстрировано увеличение температурной стабильности ($T_0 \geq 180\text{K}$, $T_1 \geq 400\text{K}$) и мощностных характеристик полу-

проводниковых лазеров (сохранение линейности ВТАХ при непрерывной мощности излучения не менее 10 Вт).

2.7. Результаты исследований опубликованы в двух статьях в журналах ВАК.

3. Охраноспособные результаты интеллектуальной деятельности (РИД), полученные в рамках исследования, разработки.

Создание объектов интеллектуальной собственности не планировалось.

4. Области и масштабы использования полученных результатов

Предлагаемый в проекте продукт разрабатывается для использования в навигационных системах и аэродромных атмосферных лидарах, автомобильных системах парковки и автопилотирования, охранных системах замкнутого объема, аппаратуре измерения дистанции для механической обработки и в строительстве, а так же в технологических системах обработки, сварки, резки и испарения материалов.

В случае успешного выполнения Государственного контракта и создании научно-технической продукции, у исполнителя будут все необходимые экспериментально подтвержденные составляющие для постановки опытно конструкторской работы и организации производства. В том числе: результаты научно-технических исследований и опытные образцы научно технической продукции в виде мощных полупроводниковых лазеров.

Одним из социальных эффектов от внедрения создаваемого инновационного товара является обеспечение безопасности взлета и посадки в условиях ограниченной видимости.

Создаваемый инновационный продукт улучшает потребительские свойства существующей продукции. В результате применения предполагаемого инновационного продукта создаются принципиально новые товары и технологии, а так же улучшаются потребительские свойства уже существующих.

5. Рекомендации по возможности использования результатов НИР в реальном секторе экономики и при разработке научно образовательных курсов.

1. Предлагаемый в проекте продукт разрабатывается для использования в навигационных системах и аэродромных атмосферных лидарах, автомобильных системах парковки и автопилотирования, охранных системах замкнутого объема, аппаратуре измерения дистанции для механической обработки и в строительстве, а так же в технологических системах обработки, сварки, резки и испарения материалов.

В случае успешного выполнения Государственного контракта и создании научно-технической продукции, у исполнителя будут все необходимые экспериментально подтвержденные составляющие для постановки опытно конструкторской работы и организации производства. В том числе: результаты научно-технических исследований и опытные образцы научно технической продукции в виде мощных полупроводниковых лазеров.

Разрабатываемые методы изменения конструктивно-технологических параметров лазерных гетероструктур должны обеспечить создание лазерных асимметричных гетероструктур отдельного ограничения с оптимизированной толщиной и энергетической глубиной активной области и опытных образцов научно технической продукции в виде полупроводниковых лазеров излучающих в диапазоне длин волн 900-1200 нм.

Общественная потребность в разрабатываемом продукте выражается в использовании мощных полупроводниковых источников излучения в аэродромных атмосферных лидарах, в технологических системах испарения материалов и системах специального назначения. Аэродромные атмосферные лидары разработаны для гражданских и военных аэродромов. Особенно сильное развитие такой оптоэлектронной аппаратуры связано с разработкой больших беспилотных летательных аппаратов. Другой, готовой к применению создаваемого инновационного товара, технологией, является бурно развивающаяся технология производства нанопорошков. Потребности в нанопорошках достигают в настоящее время десятков килограммов в год. Основным элементом такой технологической установки является мощный импульсный полупроводниковый лазер, испаряющий мишень в воздушной атмосфере.

Создаваемый инновационный продукт улучшает потребительские свойства существующей продукции. В результате применения предполагаемого инновационного продукта создаются принципиально новые товары и технологии, а так же улучшаются потребительские свойства уже существующих.

В настоящее время в Российской Федерации существует несколько промышленных предприятий готовых к внедрению полученных при проведении НИР результатов в производство: НИИ «Полюс», НПК «Инжект» и НПК «Снежинск». Названные предприятия располагают ростовой базой, позволяющей производить лазерные структуры, разрабатываемые в настоящем проекте, и постростовой базой для производства активных элементов полупроводниковых лазеров. Определенные конструктивные и технологические изменения, вносимые в многослойную полупроводниковую эпитаксиальную наносистему с целью увеличения температурной стабильности лазеров, представляют интеллектуальный результат, готовый к применению в производстве мощных полупроводниковых лазеров. Температурная стабильность лазерных характеристик является основой для повышения линейности ватт-амперной характеристики и оптической мощности излучения. Все предприятия проявляют интерес к разрабатываемому продукту. Поскольку линейность ватт-амперной характеристики расширяет возможности применения полупроводниковых источников излучения в производимых оптоэлектронных системах и открывает возможности для новых разработок.

2. Разработанные конструктивно-технологические подходы к конструированию асимметричных лазерных гетероструктур отдельного ограничения с расширенным волноводом использованы в научно образовательном курсе «Полупроводниковые лазеры» кафедры «Лазерные системы» Балтийского Государственного технического университета «ВОЕНМЕХ». В университете читается курс «Полупроводниковые лазеры», подразделом которого является раздел: «Мощные полупроводниковые лазеры». Основой этого подраздела является концепция мощных полупроводниковых лазеров. Концепция мощных полупроводниковых лазеров состоит из постулатов и конструктивно – технологических правил необходимых для создания мощных полупроводниковых лазеров. Таких как: снижение внутренних оптических потерь, сохранение высоких значений внутренней дифференциальной квантовой эффективности в полупроводниковых лазерах с большой длиной резонатора Фабри-Перо.

Полученные в настоящем проекте научные результаты по определению фундаментальных причин ограничения максимально достижимой мощности в полупроводниковых лазерах составят и обогатят подраздел читаемого курса Мощные полупроводниковые лазеры. Температурная делокализация носителей заряда как причина, ограничивающая максимальную мощность полупроводникового лазера *в непрерывном режиме генерации* и приводящая к насыщению ватт-амперной характеристики является фундаментальной физической причиной приводящей к росту внутренних оптических потерь и снижению оптической мощности. Скорость захвата носителей заряда в квантово-размерную активную область полупроводникового лазера как причина ограничивающая максимальную мощность полупроводникового лазера в импульсном режиме генерации является фундаментальной физической причиной приводящей к росту внутренних оптических потерь и снижению оптической мощности. Введение в курс перечисленных научных результатов придает ему законченный вид.

Таким образом, полученные в ходе выполнения проекта результаты имеют все основания для использования в реальном секторе экономики и научно-образовательных курсов.

6. Выводы

В результате выполнения ГК-П2319 разработаны конструктивно-технологические подходы к конструированию асимметричных лазерных гетероструктур отдельного ограничения с расширенным волноводом излучающих в диапазоне длин волн 900-1200 нм повышающие выходную оптическую мощность и температурную стабильность.

Разработаны и изготовлены полупроводниковые лазеры на основе лазерных асимметричных структур раздельного ограничения с различной толщиной и глубиной активной области. Выполнены исследования спектральных и ватт-амперных характеристик.

Установлено, что увеличение толщины и глубины активной области лазерной структуры обеспечивает повышение температурной стабильности пороговой плотности тока, дифференциальной квантовой эффективности.

Показано, что скорость захвата носителей заряда из объёмной области (волноводной области) в двумерную область (КЯ) определяет внутреннюю дифференциальную квантовую эффективность и сублинейность ватт-амперной характеристики лазера. Увеличение скорости захвата носителей заряда в квантовую яму активной области снижает сублинейность ватт-амперной характеристики и увеличивает внутреннюю дифференциальную квантовую эффективность лазера.

Показано, что температурная делокализация носителей заряда ведет к росту концентрации носителей заряда в волноводных слоях лазерной гетероструктуры и как следствие ведет к увеличению внутренних оптических потерь в мощных полупроводниковых лазерах и насыщению ватт-амперной характеристики.

Разработанные конструктивно-технологические подходы к конструированию асимметричных лазерных гетероструктур раздельного ограничения с расширенным волноводом будут использованы для постановки опытно конструкторской работы и организации производства полупроводниковых лазеров с повышенной оптической мощностью и температурной стабильностью излучающие в диапазоне длин волн 900-1200 нм.

Разработанные конструктивно-технологические подходы к конструированию асимметричных лазерных гетероструктур раздельного ограничения с расширенным волноводом использованы в научно образовательном курсе «Полупроводниковые лазеры» кафедры «Лазерные системы» БГТУ «ВОЕНМЕХ».

Достигнутые результаты удовлетворяют требованиям Госконтракта от 16 ноября 2009 г. № П2319.

Руководитель работ по проекту
д.ф.-м.н., профессор




И. С. Тарасов