

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

Номер проекта: № П2508 от 20 ноября 2009 г.

Тема: «Разработка и создание полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур с квантовыми ямами на подложках GaAs, излучающих в диапазоне длин волн 1200 – 1600 нм»

Приоритетное направление: индустрия наносистем и материалов

Критические технологии: технологии создания электронной компонентной базы

Период выполнения: 20 ноября 2009 г. – 31 июля 2011 г.

Плановое финансирование:

Бюджетные средства – 3,0 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; компенсирующие слои; сильнонапряженные квантовые ямы; буферные слои; искусственные подложки; МОС-гидридная эпитаксия

**1. Цель исследования:** Целью данной работы является разработка технологических и конструкторских подходов для создания длинноволновых лазеров на подложках GaAs, излучающих в диапазоне длин волн 1200-1600 нм, которые могут стать альтернативой лазерам полученным на подложках InP.

### **1.1. Наименование разрабатываемой научной продукции**

Определены технологические параметры и дизайн метаморфного буферного слоя InGaAs (искусственная подложка) обеспечивающие плотность прорастающих дислокаций на поверхности буферного слоя меньше  $10^6 \text{ см}^{-2}$ .

Изготовлены и экспериментально исследованы гетероструктуры с сильно напряженной квантовой ямой InGaAs, выращенные на искусственной подложке.

Изготовлены и экспериментально исследованы лазерные диода с сильнонапряженной квантовой ямой InGaAs, полученные из гетероструктур выращенных на искусственной подложке.

### **2. Характеристика выполненных на этапе работ по созданию продукции.**

1) Были экспериментально определены технологические параметры и дизайн искусственной подложки InGaAs. Было установлено, что наилучшие результаты по плотности прорастающих дислокаций дает линейно-градиентный буферный слой  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (начальный состав  $x = 0.1$ , конечный состав  $x = 0.4$ ) толщиной 1 мкм с тремя 50 Å вставками GaAs, выращенный при температуре 450°C. В таком буферном слое удалось достичь плотности прорастающих дислокаций  $7 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ .

2) Подобраны технологические режимы и параметры гетероструктуры, выращенной на искусственной подложке, которые обеспечивали бы максимальную длину волны излучения.

3) Исследованы характеристики лазерных диодов с сильнонапряженной квантовой ямой InGaAs, выращенных на искусственной подложке. С лазеров с апертурой 20 мкм была получена в непрерывном режиме генерации максимальная выходная мощность 11 мВт. Длина волны излучения лазерного диода составила 1470 нм.

4) Проведен анализ результатов по результатам всего проекта. Установлено, что лазерные диоды в диапазоне длин волн 1150-1250 нм, выращенные на подложке GaAs, являются конкурентоспособными с аналогичными лазерами, полученными на подложках InP и обладают более высокими мощностными характеристиками. Лазеры более длинноволнового диапазона на подложке GaAs можно получить только при использовании искусственных подложек. Однако лазеры, полученные на искусственных подложках обладают параметрами более низкими, чем их аналоги на подложках InP. Это связано с тем, что плотность прорастающих дислокаций на поверхности искусственной подложки меньше  $10^6 \text{ см}^{-2}$  является не достаточной для создания эффективного лазерного диода. Для получения эффективного лазера необходимо искать пути дальнейшего снижения плотности прорастающих дислокаций до значений аналогичных как для подложек GaAs и InP выпускаемых промышленностью.

5) По результатам исследований в рамках проекта опубликовано 3 статьи.

Все проведенные работы и полученные результаты соответствуют требованиям, указанным в ТЗ.

2.2. Проведенные исследования позволили оценить влияние технологических параметров и дизайна искусственной подложки на плотность прорастающих дислокаций. Это позволило создать искусственную подложку с плотностью прорастающих дислокаций меньше  $10^6 \text{ см}^{-2}$ . Полученные данные являются новым вкладом в создание искусственных подложек, т.к. в литературе известны в только данные для искусственных подложек, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии, а в нашем случае использовалась МОС-гидридная эпитаксия. Подобраны технологические режимы и параметры лазерной гетероструктуры, обеспечивающие максимальную длину волны излучения. Данные исследования позволили продвинуться на подложках GaAs при использовании искусственной подложки в длинноволновую область излучения до 1470 нм при использовании гетероструктуры с квантовой ямой. В рамках всего проекта представлены различные подходы для продвижения в длинноволновую область в лазерах на подложках GaAs. Показано влияние технологических режимов и ограничения для этих подходов. Показано, что лазерные диоды в диапазоне 1100-1240 нм являются конкурентоспособными с лазерами на подложках InP. Для диапазона более 1240 нм они обладают более низкими характеристиками по сравнению с лазерами на подложках InP. Определены причины такого результата.

2.3. Для экспериментальных исследований была разработана технология эпитаксиального выращивания на установке МОС-гидридной эпитаксии "Emcore GS 3100" искусственной подложки с плотностью прорастающих дислокаций меньше  $10^6 \text{ см}^{-2}$  и получения на ней гетероструктур с сильнонапряженной квантовой ямой.

В ходе исследований было установлено, что для данной технологической установки при использовании в качестве источников триэтилгаллия ( $\text{Ga}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ ), триметилалюминия ( $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ ), триметилиндия ( $\text{In}(\text{CH}_3)_3$ ) и арсина ( $\text{AsH}_3$ ) температура эпитаксии, которая позволяет получить искусственную подложку с плотностью прорастающих дислокаций меньше  $10^6 \text{ см}^{-2}$ , составляет  $450^\circ\text{C}$ , а для получения лазерной гетероструктуры с высокими кристаллическим совершенством и квантовым выходом, составляет  $625^\circ\text{C}$ .

Фотолюминесцентные исследования показали, что использование лазерной гетероструктуры на искусственной подложке позволяет сдвинуться в длинноволновую область до 1440 нм.

За все время проведения проекта были разработаны так же технологии получения лазерных гетероструктур с максимальной длиной волны излучения с сильнонапряженной квантовой ямой и с сильнонапряженной квантовой ямой помещенной в компенсирующие слои, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии.

2.4. На основании проведенных исследований в рамках проекта были выращены лазерные гетероструктуры и из них изготовлены лазерные диоды. Были получены следующие результаты:

- за счет подбора технологических режимов удалось получить лазерные диоды с сильнонапряженной квантовой ямой InGaAs излучающие на длине волны 1190 нм. Данные лазерные диоды имели внутренние оптические потери равные  $0.71 \text{ см}^{-1}$  и максимальную оптическую мощность в непрерывном режиме генерации 5.5 Вт на одно зеркало.

- за счет подбора компенсирующих слоев GaAsP вблизи квантовой ямы InGaAs удалось получить лазерные диоды с длиной волны 1240 нм. Данные лазерные диоды имели внутренние оптические потери равные  $1.1 \text{ см}^{-1}$  и максимальную оптическую мощность в непрерывном режиме генерации 5 Вт.

- за счет подбора технологических режимов и дизайна искусственной подложки на ней удалось получить лазерный диод с сильнонапряженной квантовой ямой InGaAs с длиной волны излучения 1470 нм. Данные лазерные диоды имели внутренние оптические потери равные  $25.9 \text{ см}^{-1}$  и максимальную оптическую мощность в непрерывном режиме генерации 11 мВт на одно выходное зеркало.

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

Создание объектов интеллектуальной собственности не планировалось.

**4. Области и масштабы использования полученных результатов**

3.1. Разрабатываемые гетероструктуры с сильно напряженной активной областью должны обеспечить создание опытных образцов научно технической продукции в виде полупроводниковых лазеров, излучающих в диапазоне длин волн 1200 – 1600 нм.

В последнее время повышенный интерес проявляется к лазерным диодам, излучающим в диапазоне длин волн 1200 – 1600 нм. Этот диапазон представляет интерес для волоконно-оптических линий связи. На сегодняшний день для этих целей в основном используются лазеры на основе гетероструктур на подложках InP. Однако, такие лазеры имеют относительно низкую выходную мощность и низкую температурную стабильность. Альтернативой таким лазерам считаются лазеры на основе гетероструктур с квантовыми ямами на подложках GaAs. Преимуществами таких лазеров является то, что в них можно создать более глубокую квантовую яму относительно волновода, чем для лазеров на подложках InP. Это должно позволить уменьшить процессы термического выброса носителей из квантовой ямы в волновод и увеличить температурную стабильность таких лазеров. Также недостатком лазеров на подложках InP являются сильные процессы оже-рекомбинации, которые приводят к снижению мощностных характеристик таких лазеров. В лазерах же на подложках GaAs влияние этих процессов может быть сильно уменьшено за счет использования сильнонапряженной квантовой ямы. Таким образом, предполагается, что переход от лазеров на подложках InP к лазерам на подложках GaAs позволит создать мощные полупроводниковые лазеры на диапазон длин волн 1200-1600 нм с улучшенными пороговыми характеристиками, значениями максимальной оптической излучающей мощности и дифференциальной эффективности по сравнению с лазерами на основе гетероструктур на InP подложках и реализовать неохлаждаемые полосковые лазеры с распределенной обратной связью.

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.

3.2. Проведенные в рамках проекта экспериментальные исследования и теоретические расчеты в комплексе позволили лучше понять принципы и подходы для получения длинноволновых лазеров на подложке GaAs. Эти же принципы могут быть перенесены и на другие материальные системы с целью увеличения длины волны излучения. Так же полученные лазерные диоды (длина волны излучения 1150-1250 нм) могут быть использованы в реальном секторе экономики как источники накачки для висмутовых волоконных лазеров, которые используются в различных областях.

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

На сегодняшний день повышенный интерес проявляется к исследованию и разработке нового семейства висмутовых волоконных лазеров позволяющих получить генерацию в диапазоне 1150 – 1500 нм [20]. Разработка и получение таких лазеров находит широкое применение в волоконно-оптической связи, медицине, спектроскопии. Перспективным является создание сверхширокополосных волоконных усилителей с полосой усиления более 100 нм. Вторая гармоника уже разработанных висмутовых лазеров с длиной волны генерации в области 1160-1180 нм перспективна в медицине - офтальмологии и дерматологии (580 нм), и в астрономии в качестве "искусственной лазерной звезды" (589 нм) [21]. Для применения таких лазеров требуется разработка эффективных источников накачки. Таким источниками накачки могут быть мощные полупроводниковые лазерные диоды, излучающие в спектральном диапазоне 1150-1250 нм.

В рамках данного проекта были исследованы и получены на подложках GaAs лазерные диоды излучающие в диапазоне 1100-1240 нм, которые имели высокие выходные оптические

мощности и высокую температурную стабильность. Данные лазеры обладают лучшими характеристиками, чем их аналоги на подложках InP. Кроме того, понимание проблем и подходы к их решению, разработанные в рамках проекта для создания длинноволновых лазеров на подложках GaAs могут быть перенесены на другие материальные системы.

Таким образом, полученные лазерные диоды могут быть использованы в реальном секторе экономики как источники накачки для висмутовых волоконных лазеров, которые используются в различных областях. Кроме того использование разработок примененных в данном проекте может облегчить решение аналогичных задач для других материальных систем, что уменьшит затраты на разработку и исследования.

Результаты, полученные в НИР, могут быть использованы при разработке научно-образовательных курсов для подготовки специалистов в области оптоэлектроники.

Результаты литературного обзора могут быть использованы для отражения проблем для получения длинноволновых лазерных диодов и современных подходов используемых для их решения.

Методики расчетов, приведенные в приложениях к отчетам по 1 и 2 этапам, дают возможность прогнозирования свойств и подбора оптимальных параметров лазерной гетероструктуры и лазеров на их основе. Это расширит знания специалистов, которые могут быть использованы на практике и сократят издержки при разработке приборов.

Экспериментальные результаты подтверждают, что теоретические расчеты хорошо отражают свойства реальных приборов. Это говорит о возможности использования теоретических расчетов при разработке лазерных диодов на заданную длину волны с максимальными характеристиками.

Результаты, полученные в результате проекта, могут быть использованы в программах для обучения студентов соответствующих специальностей.

## 6. Выводы

Выполненные работы показали возможность создания методом МOC-гидридной эпитаксии метаморфного буферного слоя InGaAs на подложках GaAs с плотностью прорастающих дислокаций меньше  $10^6 \text{ см}^{-2}$ . На данном метаморфном буфере была выращена лазерная гетероструктура с сильнонапряженной квантовой ямой. Были изготовлены лазерные диоды, излучающие на длине волны 1470 нм. Полученные лазеры имели внутренние оптические потери равные  $25.9 \text{ см}^{-1}$  и максимальную оптическую мощность в непрерывном режиме генерации 11 мВт на зеркало. Низкое значение выходной мощности обусловлено тем, что плотность прорастающих дислокаций все равно остается высокой для получения эффективного излучающего прибора. Для создания эффективного лазерного диода необходимо понизить плотность прорастающих дислокаций до значений соответствующих подложкам GaAs или InP выпускаемых для промышленных нужд.

Проведенные в ходе всего проекта экспериментальные исследования и теоретические расчеты в комплексе позволили лучше понять принципы и подходы для получения длинноволновых лазеров на подложке GaAs. Эти же принципы могут быть перенесены и на другие материальные системы с целью увеличения длины волны излучения.

В рамках данного проекта были исследованы и получены на подложках GaAs лазерные диоды, излучающие в диапазоне 1100-1240 нм, которые имели высокие выходные оптические мощности и высокую температурную стабильность. Данные лазеры обладают лучшими характеристиками, чем их аналоги на подложках InP.

Достигнутые результаты удовлетворяют ТЗ.

Руководитель работ по проекту  
к.ф.-м.н., с.н.с.



  
Н.А. Пихтин