

Тема проекта: Разработка МОС-гидридной технологии наногетероструктур и мощных непрерывных и импульсных полупроводниковых лазеров на их основе, излучающих в диапазоне длин волн 1400-1600 нм.

Наименование этапа №5: Разработка, изготовление и проведение экспериментальных исследований экспериментальных образцов лазерных наногетероструктур и мощных полупроводниковых лазеров.

В ходе выполнения проекта по Соглашению о предоставлении субсидии от 25 августа 2014 г. № 14.607.21.0048 с Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» на этапе №5 в период с 01.07.2016 по 31.12.2016 выполнены следующие работы:

1. Субсидия:

- разработан лабораторный технологический регламент изготовления экспериментальных образцов лазерных наногетероструктур для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм);
- изготовлены экспериментальные образцы лазерных наногетероструктур для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) методом МОС-гидридной эпитаксиальной технологии;
- проведены исследования экспериментальных образцов лазерных наногетероструктур для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) с целью проверки соответствия разработанных конструкторских и технологических решений требованиям ТЗ;
- разработаны лабораторные технологические регламенты изготовления экспериментальных образцов мощных непрерывных и импульсных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм);
- изготовлены экспериментальные образцы мощных непрерывных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм);
- проведены исследования экспериментальных образцов мощных непрерывных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) с целью проверки соответствия разработанных конструкторских и технологических решений требованиям ТЗ;
- изготовлены экспериментальные образцы мощных импульсных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм);
- проведены исследования экспериментальных образцов мощных импульсных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) с целью проверки соответствия разработанных конструкторских и технологических решений требованиям ТЗ;
- разработаны технические требования и предложения по разработке производства и эксплуатации продукции с учетом технологических возможностей и особенностей индустриального партнера – организации реального сектора экономики;

- разработан проект технического задания на проведение ОТР по теме: «Разработка опытно-промышленной технологии получения лазерных наногетероструктур для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) и мощных полупроводниковых лазеров на их основе».

2. Внебюджет:

- разработана постростовая технология нанесения металлических контактов р- и п-типа к активному элементу мощных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм);

- разработана методика исследований металлических контактов р- и п-типа к активному элементу мощных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм);

- изготовлены экспериментальные образцы металлических контактов р-типа к активному элементу мощных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм);

- проведены исследования экспериментальных образцов металлических контактов р-типа к активному элементу мощных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм);

- изготовлены экспериментальные образцы металлических контактов п-типа к активному элементу мощных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм);

- проведены исследования экспериментальных образцов металлических контактов п-типа к активному элементу мощных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм);

- проведен анализ и обобщение результатов работ по разработке лабораторного технологического регламента изготовления экспериментальных образцов мощных непрерывных и импульсных полупроводниковых лазеров на предмет включения разработанных постростовых технологических регламентов индустриальным партнером за внебюджетные средства.

В ходе выполнения этапа №5 были получены следующие результаты:

1. Разработан лабораторный технологический регламент изготовления экспериментальных образцов лазерных наногетероструктур для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм). Разработан дизайн 2 лазерных наногетероструктур для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм). Лазерная наногетероструктура для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) используемая для создания экспериментальных образцов мощных непрерывных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) представляет: ассиметричную лазерную наногетероструктуру с широким волноводом; п- и р-волноводы являются подлегированными Si и Mg соответственно; на границе р-волновод/р-эмиттер находится широкозонный барьер AlInAs. Лазерная наногетероструктура для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) используемая для создания экспериментальных образцов мощных импульсных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) представляет: симметричная лазерная

наногетероструктура со сверхузким волноводом; волноводы нелегированы; на границах волновод/эмиттер расположены широкозонные барьеры AlInAs.

2. Изготовлены экспериментальные образцы лазерных наногетероструктур для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) методом МОС-гидридной эпитаксиальной технологии в количестве 2 шт.

3. Проведены исследования экспериментальных образцов лазерных наногетероструктур для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) с целью проверки соответствия разработанных конструкторских и технологических решений требованиям ТЗ. Получены следующие результаты:

- экспериментальный образец лазерной наногетероструктуры для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) используемый для создания экспериментальных образцов мощных непрерывных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм): длина волны излучения 1524 нм, диаметр пластины 50,8 мм, внутренние оптические потери $2,75 \text{ см}^{-1}$;

- экспериментальный образец лазерной наногетероструктуры для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) используемый для создания экспериментальных образцов мощных импульсных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм): длина волны излучения 1571 нм, диаметр пластины 50,8 мм, внутренние оптические потери $3,96 \text{ см}^{-1}$.

Экспериментальные образцы лазерных наногетероструктур для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) полностью соответствуют ТЗ.

4. Разработаны лабораторные технологические регламенты изготовления экспериментальных образцов мощных непрерывных и импульсных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм). По рекомендации Индустриального партнера в качестве изолирующего диэлектрического покрытия использовался ZnSe толщиной 10000 \AA .

5. Изготовлены экспериментальные образцы мощных непрерывных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) в количестве 5 шт.

6. Проведены исследования экспериментальных образцов мощных непрерывных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) с целью проверки соответствия разработанных конструкторских и технологических решений требованиям ТЗ. Получены следующие результаты при температуре теплоотвода 20°C : длина волны излучения - 1549-1556 нм, пороговая плотность тока - $145-188 \text{ А/см}^2$, максимальная оптическая мощность в непрерывном режиме генерации - $3,07-3,59 \text{ Вт}$, апертура излучения - $98-100 \text{ мкм}$. Все экспериментальные образцы мощных непрерывных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) полностью соответствуют ТЗ.

7. Изготовлены экспериментальные образцы мощных импульсных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) в количестве 5 шт.

8. Проведены исследования экспериментальных образцов мощных импульсных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-

1600 нм) с целью проверки соответствия разработанных конструкторских и технологических решений требованиям ТЗ. Получены следующие результаты при температуре теплоотвода 20°C: длина волны излучения - 1568-1574 нм, пороговая плотность тока - 173-196 А/см³, максимальная оптическая мощность в импульсном режиме генерации – 15-16,5 Вт, длительность импульса – 67-69 нс, частота следования импульсов - 1,039-1,041 кГц, апертура излучения – 98-100 мкм. Все экспериментальные образцы мощных импульсных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) полностью соответствуют ТЗ.

9. Разработаны технические требования и предложения по разработке производства и эксплуатации продукции с учетом технологических возможностей и особенностей индустриального партнера – организации реального сектора экономики. Рекомендовано основное оборудование при разработке производства из имеющегося у Индустриального партнера.

10. Разработан проект технического задания на проведение ОТР по теме: «Разработка опытно-промышленной технологии получения лазерных наногетероструктур для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) и мощных полупроводниковых лазеров на их основе». Решено, что проект должен выполняться в течение 2 лет и состоять из 2 этапов.

11. Разработана постростовая технология нанесения металлических контактов р- (TiPt-Au) и п-типа (AuTe-Au) к активному элементу мощных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм).

12. Разработана методика исследований металлических контактов р- и п-типа к активному элементу мощных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм). Методика включает в себя измерение следующих параметров: длина волны излучения, напряжение отсечки, последовательное сопротивление, выходная оптическая мощность (для мелкой мезы – непрерывный режим генерации, для глубокой мезы – импульсный режим генерации).

13. Изготовлены экспериментальные образцы металлических контактов р-типа к активному элементу мощных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) в количестве 12 шт. (6 шт. с мелкой мезой и 6 шт. с глубокой мезой).

14. Проведены исследования экспериментальных образцов металлических контактов р-типа к активному элементу мощных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм). Исследования показали, что предпочтительней использовать в металлическом контакте TiPt-Au Ti толщиной 150 Å.

15. Изготовлены экспериментальные образцы металлических контактов п-типа к активному элементу мощных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) в количестве 12 шт. (6 шт. с мелкой мезой и 6 шт. с глубокой мезой).

16. Проведены исследования экспериментальных образцов металлических контактов п-типа к активному элементу мощных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм). Исследования показали,

что предпочтительней использовать в металлическом контакте AuGe-Au AuGe толщиной 2000 Å.

17. Проведен анализ и обобщение результатов работ по разработке лабораторного технологического регламента изготовления экспериментальных образцов мощных непрерывных и импульсных полупроводниковых лазеров на предмет включения разработанных постростовых технологических регламентов индустриальным партнером за внебюджетные средства. Анализ показал, что Получателем субсидии в лабораторные технологические регламенты изготовления экспериментальных образцов мощных непрерывных и импульсных полупроводниковых лазеров включены, разработанные Индустриальным партнером, постростовые технологические регламенты: сухое травление, нанесение просветляющих и высокоотражающих диэлектрических покрытий, нанесение изолирующего диэлектрического покрытия. Не внесен только постростовой технологический регламент по нанесению металлических контактов р- и n-типа, т.к. результаты исследований были получены позже чем Получатель субсидии разработал лабораторные технологические регламенты изготовления экспериментальных образцов мощных непрерывных и импульсных полупроводниковых лазеров. Регламенты Индустриального партнера включены с поправкой на технологическое оборудование Получателя субсидии.

На основании результатов работ проведенных на 5-ом этапе проекта были сделаны следующие выводы:

- экспериментальные образцы лазерных наногетероструктур для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) полностью соответствуют ТЗ;
- экспериментальные образцы мощных непрерывных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) полностью соответствуют ТЗ;
- экспериментальные образцы мощных импульсных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) полностью соответствуют ТЗ;

Основная цель проекта, заключающаяся в разработке технологических методов создания лазерных наногетероструктур для 1400-1600 нм диапазона длин волн в системе твердых растворов Al-In-Ga-As-P на подложке InP и полупроводниковых лазеров с мощностью излучения более 3 Вт на их основе, достигнута. Для достижения этой цели были решены следующие основные задачи: разработана МОС-гидридная технология получения лазерных наногетероструктур для создания мощных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм); получены экспериментальные образцы мощных полупроводниковых лазеров для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм), имеющие максимальную оптическую мощность в непрерывном более 3 Вт и в импульсном более 10 Вт режимах генерации.

Новизна полученных результатов состоит в том, что используемый комплексный подход, включающий полный цикл изготовления и характеристики, позволил получить мощные непрерывные и импульсные полупроводниковые лазеры для безопасного для глаз диапазона длин волн (1400-1600 нм) с характеристиками

сопоставимыми или превышающими мировые аналоги и не имеющими аналогов в России.

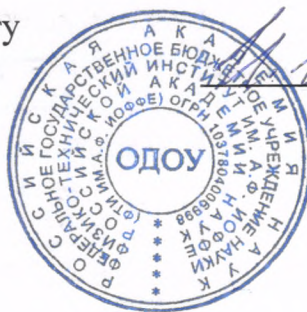
На данном этапе получены следующие РИД:

- патент на изобретение № 2601537 от 12 октября 2016 г. «Способ оценки качества гетероструктуры полупроводникового лазера», РФ;
- патентная заявка на изобретение № 2016149897 от 20 декабря 2016 г. «Гетероструктура мощного полупроводникового лазера спектрального диапазона 1400-1600 нм», РФ.

Коммерциализации результатов, полученных в рамках проекта ФТИ им. А.Ф. Иоффе, возможна в форме выполнения АО «НИИ «Полнос» им. М.Ф.Стельмаха» опытно-конструкторских работ, направленных на разработку комплекта рабочей конструкторской документации в объеме достаточном для постановки разработанных лазерных наногетероструктур для безопасного для глаз диапазона длин волн 1400-1600 нм и мощных полупроводниковых лазеров на их основе на производство. Потенциальными заинтересованными потребителями данной продукции в России при промышленных масштабах являются: ОАО «НПП Инжект» (г. Саратов), ООО «Эльфолум» (г. С.-Петербург), ЗАО «Полупроводниковые приборы» (г. С.-Петербург) и ЗАО «Лазерные системы» (г. С.-Петербург).

Проведенные в рамках этапа №5 работы согласно План-графику выполнены в полном объеме и все показатели ТЗ достигнуты.

Руководитель работ по проекту
Заведующий лабораторией



И.С. Тарасов
И.С. Тарасов