

На правах рукописи



**ТАРАСОВ АЛЕКСАНДР ЕВГЕНЬЕВИЧ**

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПЛЕКС,  
ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ  
ТОРЦЕВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ**

Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и  
комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена на кафедре физики им. В.А. Фабриканта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (г. Москва).

**Научный руководитель:**

**Близнюк Владимир Васильевич**, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», доцент кафедры физики им. В.А. Фабриканта

**Официальные оппоненты:**

**Богатов Александр Петрович**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, главный научный сотрудник (г. Москва).

**Пихтин Никита Александрович**, кандидат физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, и. о. руководителя Центра физики наногетероструктур (г. Санкт-Петербург).

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (г. Владимир).

Защита состоится “06” апреля 2021 года в 15.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.08 на базе ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета [www.etu.ru](http://www.etu.ru) в разделе «Подготовки кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах»

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан “04” февраля 2021 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.238.08,  
кандидат технических наук



Е. А. Смирнов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** В результате бурного развития полупроводниковой квантовой электроники в настоящее время более 80% лазерных источников излучения являются инжекционными лазерами. Среди инжекционных лазеров значительное место занимают одномодовые торцевые лазерные диоды непрерывного режима генерации (далее – ОЛД). Для защиты от механических воздействий и стабилизации условий эксплуатации ОЛД с драйвером размещают внутри лазерного модуля (далее – ЛМ) – замкнутой оболочки с выходным окном. Срок службы ЛМ определяется ресурсом ОЛД. Поэтому при проектировании оптико-электронных систем и приборов с ЛМ особое внимание уделяется прогнозированию срока службы лазерных диодов.

Усовершенствование технологии изготовления ОЛД позволило увеличить их срок службы до нескольких десятков тысяч часов. При этом первые признаки деградации проявляются не ранее, чем через две-три тысячи часов наработки. Это исключает возможность прогнозирования срока службы ОЛД, а значит и ЛМ, в реальном масштабе времени. Поэтому для определения надежности ЛМ в настоящее время используются испытания по ускоренному старению ОЛД при повышенных значениях температуры окружающей среды и тока накачки.

Время испытаний разделяется на несколько равных временных интервалов. В течение каждого из них осуществляются продолжительное высокотемпературное воздействие на ОЛД с последующим быстрым принудительным охлаждением до комнатной температуры и измерения энергетических, пространственно-энергетических и спектральных характеристик ОЛД. По результатам измерений определяют динамику деградации ЛМ и прогнозируют срок их службы.

В условиях серийного производства ЛМ их диагностика должна проводиться за как можно меньшее время. В настоящее время с целью решения этой задачи действует программа разработки многофункциональных средств измерений характеристик и параметров сильно расходящегося лазерного излучения. В рамках этой программы в ФГУП «ВНИИОФИ» создана единая измерительная система, основой которой является интегрирующая сфера (далее – ИС). Система позволяет проводить за несколько минут комплексную диагностику излучения ЛМ в свободное пространство при нормальных условиях эксплуатации. Однако это не решает основной проблемы испытаний ЛМ по ускоренному старению – расходованию значительной части ресурса лазера.

Данная работа посвящена разработке оптико-электронного комплекса (далее – ОЭК) для прогнозирования срока службы ОЛД по спектральному распределению мощности его излучения в начальной стадии эксплуатации, то есть без непродуктивного использования ресурса лазера, что и определяет актуальность данной работы.

**Цель и задачи работы.** Целью данной работы была разработка ОЭК, обеспечивающего прогнозирование срока службы ОЛД практически без расходовании его ресурса.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

- Разработать методику быстрого определения режима работы торцевых лазерных диодов (далее – ЛД) по диаграммам направленности их излучения в свободное пространство в плоскости, параллельной  $p$ - $n$ -переходу (далее – горизонтальной плоскости), и в плоскости, перпендикулярной ей (далее – вертикальной плоскости).

- Разработать методику прогнозирования срока службы лазерных модулей с ОЛД по форме линии, огибающей его спектр излучения.

- Разработать алгоритм определения тока накачки ОЛД, оптимального с точки зрения увеличения их срока службы и обеспечения приемлемого уровня мощности излучения.

- Определить структуру ОЭК, обеспечивающего прогнозирование срока службы ОЛД за время, не превышающее 50 часов с начала его диагностики.

- Создать рабочий макет ОЭК для измерений модовой структуры и спектральной характеристики ОЛД в начальной стадии его эксплуатации.

- Используя результаты этих измерений, спрогнозировать срок службы ОЛД.

### **Научная новизна работы**

1. Разработана методика контроля режима генерации торцевого лазерного диода, основанная на сравнении натурно измеренных и расчетных диаграмм направленности излучения, отличающаяся тем, что для ее реализации достаточно использовать три значения полярных углов, связанных простыми соотношениями со значениями абсцисс точек перегиба гауссовой кривой.

2. Разработана методика прогнозирования срока службы ОЛД, основанная на анализе функции  $f_{emp} \left( \frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \right)$ , описывающей форму огибающей его спектр излучения, отличающаяся тем, что для ее реализации достаточно сравнить анализируемую функцию и гауссову функцию  $f_G \left( \frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \right)$  в частотном диапазоне  $\Delta \nu$ , определяемом из условия  $f_{emp} \left( \frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \right) \geq 0,5$ , где  $\nu_0$  – центральная частота этого диапазона.

3. Впервые введен параметр  $A_{нач.}$ , характеризующий степень отклонения функции  $f_{emp} \left( \frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \right)$  от функции Гаусса в пределах ширины линии, огибающей спектр излучения, использование которого позволяет прогнозировать срок службы ОЛД.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается:

1. В разработке алгоритма прогнозирования срока службы ОЛД по форме линии  $f_{emp} \left( \frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \right)$ , огибающей его спектр излучения.

2. В установлении в начальной стадии эксплуатации лазера эмпирической зависимости его срока службы от значения параметра  $A_{нач.}$ , характеризующего степень отклонения функции  $f_{emp} \left( \frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \right)$  от функции Гаусса в пределах ширины линии, огибающей спектр излучения.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанный ОЭЖ может быть использован в условиях серийного производства для прогнозирования срока службы ЛМ при предельно малом расходе их ресурса.

### **Методология и методы исследования**

Для решения поставленных в диссертационной работе научных задач исследовались параметры и характеристики входящих в состав ОЭЖ фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения с использованием стандартных методик их поверки. Методика измерений диаграммы направленности лазерного излучения основывалась на представлении функции, описывающей диаграмму направленности излучения ЛД, в явном виде и расположении приемных площадок фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения в центральной, средней и периферийной области пучка излучения ЛД. В качестве спектральной характеристики использовалась форма линии, огибающей спектр излучения.

### **Положения, выносимые на защиту:**

#### **Положение 1**

Для подтверждения факта генерации торцевого лазерного диода на фундаментальной моде достаточно сравнить значения углового распределения плотности мощности одномодового излучения и функции, описывающей натурно измеренную диаграмму направленности ЛД, при трех значениях полярного угла, связанных простыми соотношениями с абсциссами точек перегиба гауссовой кривой.

#### **Положение 2**

Для прогнозирования срока службы одномодового торцевого лазерного диода непрерывного режима генерации необходимо и достаточно измерить форму линии  $f_{emp} \left( \frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \right)$ , огибающей спектр излучения лазера в начальной стадии его эксплуатации, рассчитать интегральный параметр  $A_{нач}$ , характеризующий степень отклонения функции  $f_{emp} \left( \frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \right)$  от нормированной функции Гаусса в пределах ширины линии, и воспользоваться эмпирической зависимостью ресурса ЛД от значения этого параметра.

#### **Положение 3**

Разработанный оптико-электронный комплекс обеспечивает прогнозирование срока службы любого одномодового торцевого лазерного диода непрерывного режима генерации, изготовленного в том же технологическом цикле, что и контрольная партия приборов, за время, не превышающее 50 часов с начала исследования лазера.

### **Степень достоверности и апробация полученных результатов**

**Достоверность результатов работы** обеспечивается корректностью постановки задач и использованных приближений, выбором и применением апробированных методов теоретического анализа, компьютерного моделирования, анализа и обработки экспериментальных результатов; согласованностью результатов компьютерного моделирования с результатами натуральных экспериментов, полученных с использованием разработанного ОЭЖ.

Получено хорошее совпадение результатов расчетных и экспериментальных исследований диаграмм направленности излучения и срока службы семидесяти ОЛД с мощностью непрерывного излучения от 5 мВт до 40 мВт и длиной волны 650 нм, изготовленных фирмой «ФТИ-Оптроник» (г. Санкт-Петербург).

### **Апробация работы**

Материалы диссертации были доложены на:

- XXIII Международной конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте – 2015» (Новороссийск, 2015 г.);
- 46-м международном научно-методическом семинаре «Флуктуационные и деградационные процессы в полупроводниковых приборах» (Москва, 2015 г.);
- Международном академическом форуме АМО-SPITSE-NESEFF (Смоленск, 2016г.);
- XII и XIII международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков – 2017» и «Оптические методы исследования потоков – 2019» (Москва);
- Всероссийских школах-семинарах «Физика и применение микроволн имени А.П. Сухорукова «Волны-2017», «Волны -2018», «Волны -2019» (Москва);
- X и XI международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 18» (СПб, 2018) и «Фундаментальные проблемы оптики – 19» (СПб, 2019);
- XIII международных чтений по квантовой оптике (IWQO-2019) (Владимир, 2019).

### **Публикации**

Основные положения диссертации опубликованы в 21 печатной работе. Из них 4 статьи в журналах, входящих в базу цитирования Scopus, 4 – в российских журналах из перечня ВАК по специальности, 3 статьи в российских научных реферируемых журналах и 10 статей в сборниках материалов научно-технических конференций и семинаров.

### **Личный вклад автора**

Вклад автора заключается в выполнении основного объема исследований. Основные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Во всех работах, выполненных в соавторстве, автор непосредственно участвовал в постановке задач и реализации их решений. Экспериментальные результаты, вошедшие в работу, получены совместно с соавторами работ, опубликованных по теме диссертации.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка используемых источников из 158 наименований, 6 приложений. Общий объем диссертации составляет 185 страниц, включая 26 иллюстраций и 13 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснован выбор научного направления и актуальность работы. Определены цель и основные задачи диссертации. Сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен аналитический обзор разработанных ранее методик прогнозирования срока службы ОЛД, а также методик и средств измерений энергетических, пространственно-энергетических и спектральных характеристик и параметров излучения торцевых лазерных диодов.

Обзор публикаций, посвященных разработанным ранее методикам прогнозирования срока службы ОЛД, а также методикам и средствам измерений основных характеристик и параметров излучения торцевых лазерных диодов, показал, что:

- Использование классических методик прогнозирования срока службы ОЛД, основанных на измерениях временных зависимостей их энергетических характеристик, приводит к неэффективному расходованию значительной части ресурса лазеров.

- Методики прогнозирования срока службы ЛД, основанные на измерениях их пространственно-энергетических параметров (диаграммы направленности и модовой структуры излучения), не только приводят к непродуктивному расходованию значительной части ресурса лазеров, но и исключают возможность их диагностики после установки в измерительную систему.

- В настоящее время нет методик прогнозирования срока службы ОЛД, основанных **на количественном анализе** их спектральных характеристик.

- Известны только две стандартизованные методики диагностики сильно расходящегося излучения ОЛД в свободное пространство: метод измерений средней мощности с использованием ИС (ГОСТ Р ИСО 11554-2008) и метод определения угла расходимости излучения (ГОСТ 25917-83).

- Остальные стандартизованные методы диагностики лазерного излучения применимы только для направленного излучения, распространяющегося в параксиальной области.

- Практическое применение рассмотренных нестандартизованных методик определения коэффициента распространения лазерного пучка  $M^2$  связано с трудоемкими измерениями поля излучения в ближней зоне, требующими использования прецизионных приборов и сложной обработки результатов измерений.

Из обзора научных публикаций, посвященных прогнозированию срока службы ЛД по результатам измерений основных параметров и характеристик излучения лазера, следует, что наиболее полный объем информации, необходимой для прогнозирования, можно получить путем комплексного измерения диаграммы направленности излучения и спектральной характеристики лазера.

**Во второй главе** представлены методики определения режима генерации торцевого лазерного диода на фундаментальной моде, основанные на численном анализе его диаграммы направленности и формы линии, огибающей спектр излучения, а также приведен алгоритм использования результатов этого анализа для прогнозирования срока службы ОЛД.

Методика определения режима генерации на фундаментальной моде основана на сравнении в вертикальной и горизонтальной плоскости функций  $f_{emp}^{\perp}(\theta)$  и  $f_{emp}^{\parallel}(\theta)$ , описывающих экспериментально измеренные диаграммы направленности

излучения ЛД, с аналитическими функциями  $f^\perp(\theta)$  и  $f^\parallel(\theta)$ , описывающими поле излучения лазера в дальней зоне:

$$f^\perp(\theta) = G^2(\theta^\perp) \exp\left(-\frac{\ln[2G^2(\theta_{1/2}^\perp)]}{\sin^2\theta_{1/2}^\perp} \sin^2\theta^\perp\right), \quad (1a)$$

$$f^\parallel(\theta) = G^2(\theta^\parallel) \exp\left(-\frac{\ln[2G^2(\theta_{1/2}^\parallel)]}{\sin^2\theta_{1/2}^\parallel} \sin^2\theta^\parallel\right), \quad (1б)$$

где  $G^2(\theta^\perp)$ ,  $G^2(\theta^\parallel)$  – квадраты углового фактора Гюйгенса;  $\theta_{1/2}^\perp$  и  $\theta_{1/2}^\parallel$  – половина угла расходимости излучения на уровне 0,5 от максимального значения (далее – угол расходимости).

Функции  $f^\perp(\theta)$  и  $f^\parallel(\theta)$  найдены путем Фурье-преобразования функций  $F^\perp(x)$  и  $F^\parallel(y)$ , характеризующих распределение интенсивности излучения на выходном зеркале в вертикальной и горизонтальной плоскости. При этом использован тот известный факт, что диаграмма направленности излучения с расходимостью, определяемой дифракционным пределом, формируется, когда распределение интенсивности излучения лазера в ближней зоне описывается гауссовой функцией.

Из (1a) и (1б) видно, что в случае одномодовой генерации лазерного диода функции  $f^\perp(\theta)$  и  $f^\parallel(\theta)$  можно представить как произведение квадрата углового фактора Гюйгенса  $G^2(\theta)$  и функции  $\varphi_g(z) = \exp(-Az^2)$ , описывающей гауссову кривую. Таким образом, для установления факта генерации торцевого лазерного диода на фундаментальной моде необходимо и достаточно убедиться в том, что разность натурно измеренных функций  $f_{emp}^\perp(\theta)$  и  $f_{emp}^\parallel(\theta)$  и расчетных функций  $G^2(\theta^\perp)\varphi_g(z^\perp)$  и  $G^2(\theta^\parallel)\varphi_g(z^\parallel)$  не превышает погрешности измерений диаграммы направленности при любых значениях полярного угла  $\theta$ .

Показано, что для определения одномодового режима генерации ЛД можно ограничиться тремя значениями полярного угла  $\theta$ :  $\theta_p$ ,  $\theta_{1/e}$  и  $\theta_{1/e^2}$ , которые связаны простыми соотношениями со значениями абсцисс точек перегиба  $z_p$  кривой  $\varphi_g(z)$ :  $z_p = \pm \sin \theta_p$ ,  $z_{1/e} = \pm \sin \theta_{1/e} = z_p \sqrt{2}$ ;  $z_{1/e^2} = \pm \sin \theta_{1/e^2} = 2 z_p$ . При выбранных значениях полярного угла обеспечивался анализ диаграммы направленности излучения в центральной, средней и периферийной области лазерного пучка, а функция  $\varphi_g(z)$  принимала удобные для расчетов значения:  $\varphi_g(z_p) = \exp(-1/2)$ ,  $\varphi_g(z_{1/e}) = \exp(-1)$ ,  $\varphi_g(z_{1/e^2}) = \exp(-2)$ .

Для каждого экземпляра ЛД определялся диапазон значений тока накачки, при которых формировался гауссов профиль пучка. Та часть диапазона, которая перекрывалась с пологой частью ВАХ и линейной частью ВТАХ, принималась за рабочий диапазон тока накачки ЛМ  $\Delta I_{\text{нак.раб}}$ . Именно в этом диапазоне осуществлялся поиск оптимального значения тока накачки ЛМ  $I_{\text{нак.опт}}$ .

Методика поиска базировалась на численном анализе формы линии  $f_{emp}\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)$ , огибающей спектр излучения ОЛД, на начальном этапе их эксплуатации (при наработке, не превышающей 200 часов), и учете результатов



измерений временных зависимостей энергетических, пространственно-энергетических и спектральных характеристик, полученных в ходе ускоренных испытаний контрольной партии лазерных диодов.

Анализ проводился в пределах ширины  $\Delta\nu$  линии, описываемой функцией  $f_{emp}\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)$ , путем сравнения этой функции с нормированной гауссовой функцией:

$$f_G\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right) = \exp\left[-4 \cdot \ln 2 \cdot \left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)^2\right]. \quad (2)$$

Значение центральной частоты  $\nu_0$  рассчитывалось по формуле  $\nu_0 = \frac{1}{2}(\nu_{1/2\max} + \nu_{1/2\min})$ . Границы частотного диапазона  $\Delta\nu$   $\nu_{1/2\max}$  и  $\nu_{1/2\min}$  определялись из условия:  $f_{emp}(\nu_{1/2\min}) = f_{emp}(\nu_{1/2\max}) = f_G(\nu_{1/2\min}) = f_G(\nu_{1/2\max}) = 0,5$ .

Мерой отличия функции  $f_{emp}\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)$  от  $f_G\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)$  служил введенный в данной работе интегральный параметр  $A$ :

$$A = 1 - \int_{\nu_{1/2\min}}^{\nu_{1/2\max}} \frac{\left| \frac{f_{emp}\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)}{f_G\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)} - 1 \right| d\nu}{\Delta\nu}. \quad (3)$$

Из (3) видно, что значение параметра  $A$  стремится к единице, когда функция  $f_{emp}\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)$  хорошо аппроксимируется гауссовой функцией.

Как показали проведенные в настоящей работе исследования, в процессе эксплуатации параметр  $A$  монотонно убывает, что эквивалентно все большему различию функций  $f_{emp}\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)$  и  $f_G\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)$ . Временную зависимость параметра  $A$  можно объяснить деградацией гетероструктуры ОЛД. Однако практическое использование зависимости  $A(t)$  для прогнозирования срока службы ЛМ связано с долговременными измерениями и, как следствие, с непродуктивным расходом значительной части ресурса лазера.

Поэтому особое внимание было уделено поиску зависимости срока службы ОЛД от значения параметра  $A$  в начальной стадии эксплуатации (далее –  $A_{нач.}$ ).

Основной этап прогнозирования срока службы ОЛД из партии приборов, изготовленной в едином технологическом цикле, начинался с выделения из нее контрольной партии лазеров. В данной работе исследовались две партии торцевых ЛД по 100 экземпляров в каждой. Они были частями партий ЛД из нескольких сотен излучающих элементов лазеров, изготовленных в едином технологическом цикле. Каждая контрольная партия состояла из 25 экземпляров ЛМ, что, по мнению автора данной работы, обеспечивало репрезентативную выборку.

В рабочем диапазоне тока накачки ЛД  $\Delta I_{нак.раб}$  измерялись зависимости  $A_{нач.}$  и мощности излучения  $P$  от  $I_{нак.}$ . Ток накачки ЛД, при котором параметр  $A_{нач.}$  еще сохраняет максимальное значение при мощности излучения  $P$  наиболее близкой к указанной в паспорте, был принят за оптимальный ток накачки  $I_{нак.опт.}$ .

На начальном этапе эксплуатации (при времени наработки  $t_{нар.}$  до 200 часов) при оптимальном токе накачки определялся параметр  $A_{нач.i}$   $i$ -го ЛД. Далее в режиме

ускоренных испытаний на старение определялись ресурсы всех ЛД из обеих контрольных партий. Критерием выработки ресурса служило уменьшение мощности излучения ЛД на 20% по сравнению с начальным значением. Так как в реальном масштабе времени такая ситуация наблюдалась, как правило, минимум через 5000 часов, интервал времени, через который измерялась мощность излучения, был выбран равным 1000 часам. Этому интервалу соответствовало 190 часов ускоренных испытаний на старение в реальном масштабе времени. По мере приближения мощности излучения к уровню 0,8 от ее начального значения этот интервал уменьшался до 50 часов (9,5 часов ускоренных испытаний).

Время наработки  $\tau_i$   $i$ -го ОЛД определялось в соответствии со сформулированным выше критерием. Этот параметр определялся для всех ОЛД из контрольной партии приборов. Далее в каждой контрольной партии выделялся тот  $k$ -й ОЛД, который имел наибольшее время наработки  $\tau_k = \tau_{\max}$ . Для обобщения результатов измерений времени наработки  $\tau_i$  всех ЛМ из определенной партии лазеров вводился параметр  $T_i$ , характеризующий качество  $i$ -го ОЛД:  $T_i = \frac{\tau_i}{\tau_{\max}} = \frac{\tau_i}{\tau_k}$ .

Путем установления зависимости параметра  $T_i$  каждого ЛМ из обеих контрольных партий от параметра  $A_{\text{нач.}i}$  находилась функция  $u$ , связывающая  $\tau_i$ ,  $\tau_{\max}$  и  $A_{\text{нач.}i}$ :

$$T_i = \frac{\tau_i}{\tau_{\max}} = u(A_{\text{нач.}i}). \quad (4)$$

В общем случае вид функции  $u(A_{\text{нач.}})$  может изменяться от партии к партии ЛМ, и поэтому прогнозирование срока службы  $\tau_i$  конкретного, не входящего в контрольную партию экземпляра лазерного диода путем измерений его параметра  $A_{\text{нач.}i}$  было возможно только для приборов, изготовленных в едином технологическом цикле.

В результате обработки массива чисел  $A_{\text{нач.}i}$  и  $\tau_i$ , полученного в ходе экспериментального определения времени наработки  $\tau_i$  всех ОЛД, устанавливалась зависимость  $T(A_{\text{нач.}})$ . Путем подстановки в нее конкретного значения  $A_{\text{нач.}i}$  находилось  $T_{\text{расч.}i}$ . По формуле (4) находилось расчетное значение срока службы  $\tau_{\text{расч.}i}$  любого лазера из партии приборов, изготовленных в едином технологическом цикле. Отличие экспериментального значения  $\tau_i$  и расчетного  $\tau_{\text{расч.}i}$  определялось по формуле:

$$\delta\tau_i = \frac{|\tau_i - \tau_{\text{расч.}i}|}{\tau_i}. \quad (5)$$

Прогнозирование срока службы лазера, не входящего в контрольную партию, осуществлялось следующим образом. Сначала измерялась форма линии  $f_{\text{exp}}\left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu}\right)$ , огибающей спектр излучения некоторого  $j$ -го ЛД. Затем по формуле (3) рассчитывался параметр  $A_{\text{нач.}j}$ . Расчетное значение параметра  $A_{\text{нач.}j}$  подставлялось в найденную зависимость  $T(A_{\text{нач.}})$  и таким образом определялся параметр  $T_j$ . Путем подстановки значения параметра  $T_j$  в (4) рассчитывался прогнозируемый срок службы  $j$ -го ЛД  $\tau_j$ . Для ЛД, не входящих в контрольные партии, проводились ускоренные испытания на старение и определялся их ресурс  $\tau_{\text{эсп.}j}$ . С учетом того, что экспериментально определяемые сроки службы находились с шагом 50 часов, они могли отличаться от расчетных значений.

Отличие расчетного значения  $\tau_j$  и экспериментального  $\tau_{\text{эксп.}j}$  определялось по формуле:

$$\delta\tau_j = \frac{|\tau_j - \tau_{\text{эксп.}j}|}{\tau_j}. \quad (6)$$

**В третьей главе** рассмотрены основные функциональные блоки оптико-электронного комплекса, обеспечивающего прогнозирование срока службы ЛД в течение первых двухсот часов эксплуатации.

Конструкция ОЭК состояла из четырех функциональных блоков. Три из них предназначались для натуральных измерений энергетических и спектральных параметров, а также пространственно-энергетических характеристик излучения ЛД, а четвертый – для обработки оцифрованных результатов этих измерений.

В первый блок – блок входного контроля, входили три испытательных стенда – стенды *A*, *B* и *C*, а также климатическая камера СМ-30/100-80 ТХ.

На стенде *A* отбраковывались ЛМ со скрытыми дефектами. Стенд состоял из четырех базовых и одной вспомогательной панели с размерами каждой 280x280 мм. Обеспечивалась возможность поочередного соединения базовой панели со вспомогательной. На каждой базовой панели можно было размещать до 25 ЛМ, а на вспомогательной панели – до 25 фотодиодов.

В качестве контролируемого параметра использовалась мощность излучения ЛМ при неизменном токе накачки. Она измерялась при комнатной температуре дважды: при первом включении и после 38 часов пребывания в климатической камере при температуре 50°C, превышающей комнатную температуру на 30 градусов. Согласно уравнению связи Аррениуса, степень деградации ЛД при указанной температуре была такой же, как и при наработке 200 часов при нормальных условиях эксплуатации.

Для проведения при комнатной температуре одновременных измерений мощности излучения всех ЛД коллимированное излучение каждого лазера направлялось на расположенный перед ним калиброванный фотодиод. Для калибровки фотодиодов использовался планарный термоэлектрический первичный измерительный преобразователь прибора ИМО-4.

Браковались и снимались с базовых панелей те экземпляры ЛМ, у которых мощность излучения после испытаний в климатической камере уменьшалась более чем на 10%. Базовые панели с оставшимися на них ЛМ поочередно соединялись со вспомогательной панелью, которая представляла собой основной узел стенда *B*.

На этом стенде с использованием классических методик при нормальных условиях измерялись ВАХ и ВтАХ ЛМ. После измерений коллиматоры снимались со всех лазерных модулей, которые поочередно помещались на стенд *C*. Испытательный стенд *C* предназначался для измерений диаграмм направленности сильно расходящегося лазерного излучения в вертикальной и горизонтальной плоскости. Стенд состоял из узла контроля стабильности мощности и оси диаграммы направленности излучения ЛД, узла позиционирования ЛД и узла сканирования его пучка излучения.

Измерения осуществлялись путем поворота ЛД вокруг оси, расположенной в плоскости его выходного зеркала и проходящей через центр пятна излучения на

зеркале параллельно и перпендикулярно плоскости  $p$ - $n$ -перехода соответственно. При повороте ЛД ось пучка излучения перемещалась в строго определенной (горизонтальной или вертикальной) плоскости, что обеспечивалось установкой поверхности плиты, на которой монтировался ОЭК, в горизонтальное положение с использованием пары водяных уровней и предварительной юстировкой оптической схемы. В результате предварительной юстировки оптической схемы стенда С определялось положение приборной оси ОЭК как прямой, параллельной поверхности плиты, проходящей через центр пятна излучения на выходном зеркале ЛД и центр диафрагмы центрального фотодиода.

Во втором функциональном блоке ОЭК проводились спектральные измерения. Перед их проведением на лазерные модули устанавливались коллиматоры, снятые ранее для измерений ДН.

Поступающее на полностью открытую входную щель монохроматора МДР-23 коллимированное излучение ЛД раскладывалось в спектр. Скорость поворота решетки регулировалась блоком развертки спектра в широком диапазоне значений. Это позволило получать общую картину спектра излучения в широком диапазоне длин волн – 20 нм, или подробную, но в более узком диапазоне длин волн – 8 нм.

За выходной щелью монохроматора размещался фотодиод, регистрирующий уровень мощности излучения ЛД, прошедшего через монохроматор. Аналоговые сигналы с выхода фотодиода поступали на плату NI USB-6008 и далее на вход блока АОЦС. В блоке проводился количественный анализ полученных спектральных характеристик. При разных токах накачки определялась форма линии, огибающей спектр излучения ОЛД.

Затем по методике, изложенной во второй главе, в пределах ширины этой линии рассчитывался интегральный параметр  $A_{нач}$ . ЛМ с наработкой до 200 часов, а затем находилось оптимальное значение тока накачки.

При падении начальной мощности излучения на 20% на выходе звена обработки временной зависимости мощности излучения ЛД формировался сигнал, по которому определялись его ресурс  $\tau$  и параметр  $\tau_{max}$ . Далее на вход АОЦС подавался сигнал в виде массива чисел, характеризующего зависимость срока службы ЛД от значений параметра  $A_{нач}$ . Обработка этого сигнала позволила рассчитать прогнозируемый срок службы каждого ЛД.

Подытоживая рассмотрение конструктивных блоков ОЭК, можно заключить, что они полностью обеспечивали последовательное проведение операций, необходимых для прогнозирования срока службы ЛД на начальном этапе их эксплуатации: отбраковку по мощности; определение рабочего диапазона тока накачки; измерение диаграммы направленности и огибающей спектр излучения, а также расчет параметра  $A_{нач}$ ; нахождение эмпирической функции  $u(A_{нач,i})$  и ее использование для расчета срока службы лазера  $\tau$ .

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований ВАХ, ВтАХ и диаграмм направленности ЛД, а также спектральных характеристик ОЛД. Оценена погрешность ОЭК при определении режима генерации лазерного диода на фундаментальной моде. Приведены результаты прогнозирования срока службы двух партий ЛД моделей KLM 650-5-5 и KLM 650-40-5.

Использование стандартной методики определения диапазона линейности ВТАХ и порогового тока  $I_{пор.}$  позволило установить, что диапазон токов накачки, соответствующий пологой части ВАХ, находится в границах диапазона токов линейной части ВТАХ. Из чего следовало, что рабочий диапазон токов накачки всех ЛМ из контрольных партий определяется пологой частью их ВАХ. Нижняя токовая граница пологой части ВАХ ЛМ из первой контрольной партии приборов варьировалась от 25,3 до 26,1 мА, а из второй партии – от 81,0 до 82,5 мА. Значения верхней границы  $I_{нак\max}$ , определенные при напряжении питания на входе модуля  $U_{\max} = 5$  В, изменялись от 26,2 до 26,9 мА для ЛМ из первой партии, и от 82,6 до 86,10 мА для ЛМ из второй партии.

В найденных рабочих диапазонах тока накачки на стенде С были исследованы ДН ЛД всех ЛМ из контрольных партий. Натурно измеренные диаграммы направленности излучения ЛД в вертикальной и горизонтальной плоскости изображены на рисунке 1.

Сравнение значений функций, описывающих диаграммы направленности излучения ЛД в ортогональных плоскостях, показало, что они, как правило, отличаются не более чем на 4,3 % от расчетных значений этих функций.

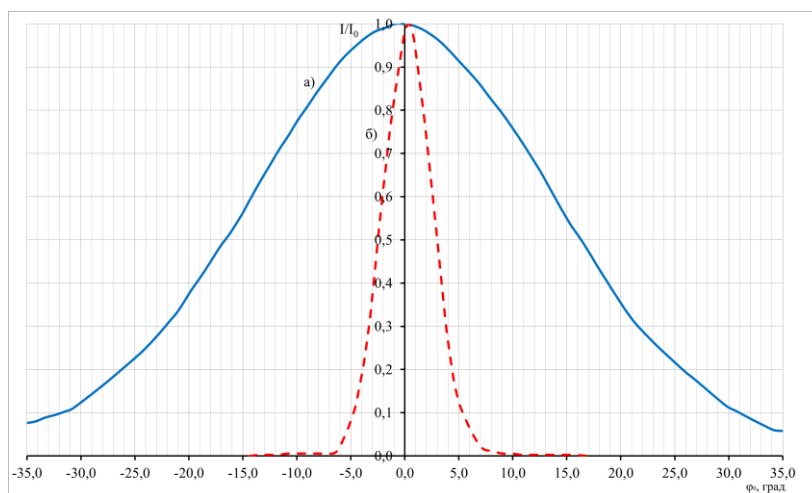


Рисунок 1. Натурно измеренные диаграммы направленности излучения ЛД в начале эксплуатации в плоскости: а) вертикальной; б) горизонтальной

Оценена погрешность ОЭЖ в части определения модовой структуры излучения, для чего была использована следующая формула:

$$\Delta_{отн.дн} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \theta_i^2}, \quad (7)$$

где  $\theta_i$  –  $i$ -ая неисключенная систематическая погрешность (далее – НСП);  $k$  – количество НСП.

К наиболее существенным НСП при этих измерениях относились следующие:

$\theta_1$  – обусловленная зависимостью значений функций  $f_{emp}^{\perp}(\theta)$  и  $f_{emp}^{\parallel}(\theta)$  от точности измерений полярных углов  $\theta$ ;

$\theta_2$  – обусловленная смещением оси диаграммы направленности излучения ЛД от приборной оси ОЭЖ;

$\theta_3$  – обусловленная определением границ пологой части ВАХ ЛМ.

В результате тщательного анализа каждой НСП установлено, что  $\theta_1 = 3,5\%$ ;  $\theta_2 = 2,7\%$ ;  $\theta_3 = 1,0\%$ .

Таким образом, было определено, что  $\Delta_{отн.дн} = 4,5\%$ . Все ЛД, у которых отклонение экспериментального значения от расчетного были меньше чем  $\Delta_{отн.дн}$ , являлись одномодовыми. Установлено, что в первой контрольной партии приборов было 22 одномодовых лазера, а во второй – 23.

Измерена форма линии  $f_{emp}\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)$ , огибающей спектр излучения всех ОЛД, входящих в обе контрольные партии приборов. При этом наблюдалась сильная токовая зависимость спектральной характеристики ОЛД  $f_{emp}\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)$ . Для наглядного представления этой зависимости на рисунке 2 сплошными линиями обозначена кривая  $f_{emp}\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)$  при разных токах накачки, а точечными линиями – нормированная гауссова функция (2).

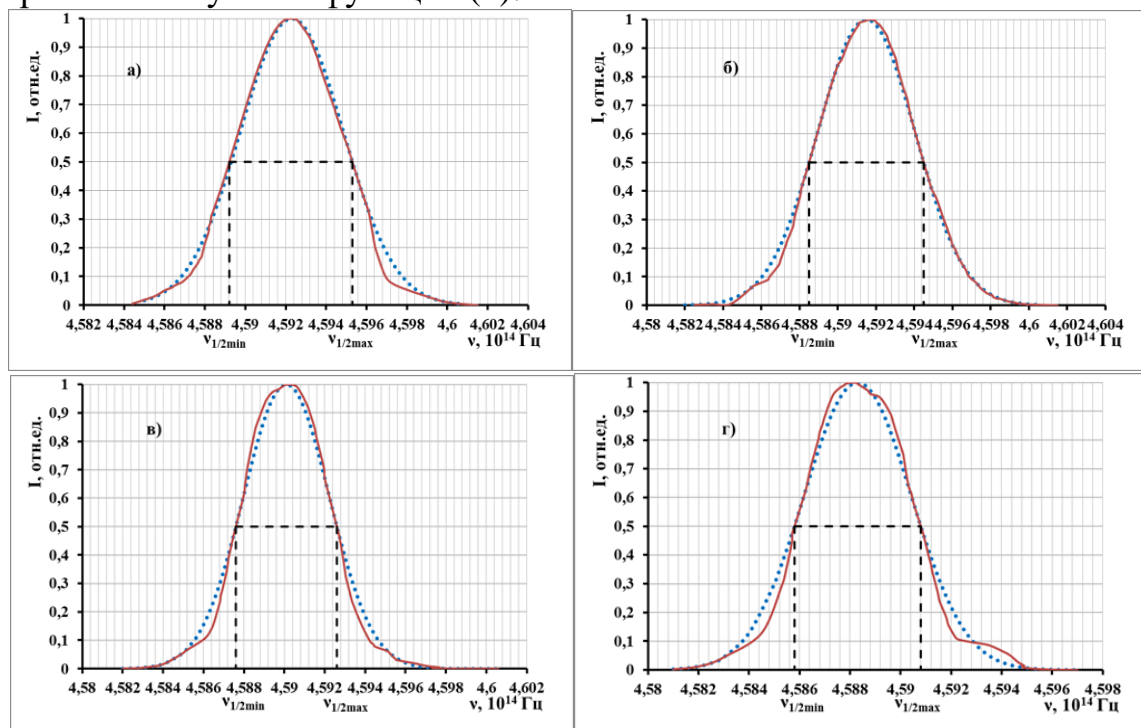


Рисунок 2. Спектральные характеристики и значения параметра  $A_{нач}$  ЛМ2П при токах накачки: а) 25,6 мА ( $A_{нач} = 0,962$ ); б) 26,1 мА ( $A_{нач} = 0,966$ ); в) 26,4 мА ( $A_{нач} = 0,935$ ); г) 26,5 мА ( $A_{нач} = 0,921$ )

У ЛМ из первой партии приборов наибольшие значения параметра  $A_{нач}$  варьировались от 0,937 до 0,966, а из второй партии – от 0,905 до 0,938.

Параметр  $\tau_{max}$  найден в ходе ускоренных испытаний ЛМ с наибольшими значениями  $A_{нач}$  0,966 и 0,938 соответственно для лазеров из первой и второй партии. Значение  $\tau_{max}$  для первой партии оказалось равным 5500 часам, а для лазеров из второй партии – 5300 часам. Установлено, что  $\tau_{max}$  – максимальный срок службы, который имеет ОЛД с наибольшим  $A_{нач}$  из всех приборов, входящих в рассматриваемую партию.

Оптимальные значения тока на входе ЛМ из обеих партий варьировались: в первой партии от 25,7 до 26,7 мА, а во второй партии – от 84,1 до 85,5 мА.

Для прогнозирования по (4) срока службы ОЛД, входящих в контрольную партию, установлена зависимость  $T_i$  от  $A_{нач.i}$ .

Совместный анализ массивов значений  $T_i$  и  $A_{нач.i}$  позволил найти в общем виде функциональную зависимость параметра  $T$  от  $A_{нач}$ :

$$T = (A_{нач.})^m. \quad (8)$$

Методом итераций для ОЛД из обеих контрольных партий приборов определено, что  $m = \frac{1}{3}$ . Таким образом, была получена эмпирическая формула:

$$T = (A_{нач.})^{1/3}. \quad (9)$$

Зависимости  $T(A_{нач})$  и  $\tau(A_{нач})$  представлены на рисунке 3.

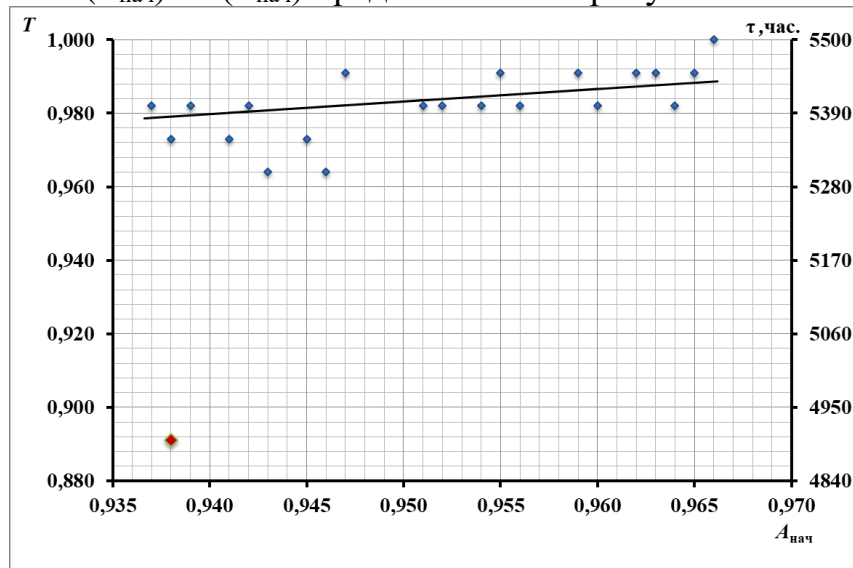


Рисунок 3. Зависимости  $T(A_{нач})$  и  $\tau(A_{нач})$  ОЛД из первой контрольной партии ( $\tau_{max} = 5500$  часов): сплошная линия – расчетная функция  $T = \sqrt[3]{A_{нач}}$ ; точки – результаты эксперимента

Для проверки корректности обобщения зависимости (9) на ОЛД, не входивших в контрольные партии приборов, были проведены ускоренные испытания на старение десяти случайно выбранных из каждой партии лазеров с известными значениями параметра  $A_{нач.j}$ . Испытания показали, что значения натурно измеренных таким образом параметров  $\tau_j$  и параметров, рассчитанных по формулам (3) – (9), отличались не более чем на 3,7%.

Указанное отличие сравнивалось с погрешностью той части ОЭЖ, которая использовалась для определения интегрального параметра  $A_{нач}$ . Погрешность рассчитывалась по формуле:

$$\Delta_{отн.ип} = \sqrt{\sum_{l=1}^2 \theta_l^2}, \quad (10)$$

где  $\theta_l$  –  $l$ -ая НСП части ОЭЖ, предназначенной для определения интегрального параметра  $A_{нач}$ .

$\theta_{l=1}$  – НСП, обусловленная определением границ частотного диапазона, в пределах которого осуществлялось сравнение функции  $f_{emp} \left( \frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \right)$  с нормированной гауссовой функцией;

$\theta_{l=2}$  – НСП, обусловленная определением оптимального значения тока накачки ЛМ.

В результате тщательного анализа каждой НСП установлено, что  $\theta_{l=1} = 3,4\%$ ;  $\theta_{l=2} = 3,4\%$ . Путем подстановки в (10) приведенных значений НСП было определено, что  $\Delta_{\text{отн.ип}} = 4,8\%$ . Эта величина принята за погрешность ОЭК при определении параметра  $A_{\text{нач}}$ .

Установлено, что максимальное отклонение экспериментальных значений срока службы ОЛД от прогнозируемых не превышает погрешность измерений интегрального параметра  $A_{\text{нач}}$ . Из этого следует, что зависимость (9) может быть использована для определения срока службы всех ОЛД, изготовленных в едином технологическом цикле.

Было проведено несколько сотен измерений спектральных характеристик всех ОЛД при разных токах накачки. Установлено, что при определении срока службы ОЛД из партии приборов, изготовленных групповым методом в одном и том же технологическом цикле, имеет место заметная разность значений срока службы, определенного экспериментально и прогнозируемого по разработанной методике. Однако, за исключением одного лазера из первой партии и трех лазеров из второй партии, эти различия не превышают погрешность измерений, что подтверждает корректность использования соотношения (9) для прогнозирования срока службы ОЛД. Что касается этих четырех лазеров, то их реальная наработка оказалась намного меньше прогнозируемого значения. При этом необходимо отметить, что они составляют всего лишь 5,7% от количества исследованных лазеров.

У остальных ста тридцати лазеров в рабочем диапазоне значений тока накачки  $\Delta I_{\text{нак.раб}}$  были измерены формы линий  $f_{\text{emp}}\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)$  и рассчитаны значения  $A_{\text{нач},j}$ . Тем самым была полностью завершена подготовка к прогнозированию их срока службы.

Подробный анализ конструкции ОЭК позволил оценить его погрешность  $\Delta_{\text{отн.ОЭК}}$  на уровне 6,6%. Эта величина была получена расчетным путем с использованием формулы:

$$\Delta_{\text{отн.ОЭК}} = \sqrt{(\Delta_{\text{отн.дн}})^2 + (\Delta_{\text{отн.ип}})^2}. \quad (11)$$

**В заключении** кратко сформулированы основные результаты и выводы данной работы:

1. Разработанная методика количественного анализа диаграмм направленности излучения ЛД в свободное пространство при комнатной температуре в рабочем диапазоне значений тока накачки обеспечивает быстрое (не более чем через первые 200 часов наработки) определение режима его генерации на фундаментальной моде.

2. Разработана методика прогнозирования срока службы ОЛД на начальном этапе его эксплуатации, базирующаяся на количественном анализе формы линии  $f_{\text{emp}}\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)$ , огибающей спектр излучения лазерного диода.



3. Количественный анализ формы линии  $f_{emp} \left( \frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \right)$  в пределах ширины этой линии позволяет в начальной стадии эксплуатации ОЛД определить параметр  $A_{нач}$  конкретного лазера, характеризующий степень отклонения функции  $f_{emp} \left( \frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \right)$  от нормированной функции Гаусса.

4. Экспериментально установлено, что большему значению параметра  $A_{нач}$  соответствует больший срок службы ОЛД. С учетом этого факта наибольшее значение тока накачки, при котором параметр  $A_{нач}$  еще сохраняет максимальное значение, а мощность излучения наиболее близка к указанной в паспорте, принято за оптимальное  $I_{нак.опт.}$ .

5. Найдена эмпирическая формула, связывающая срок службы лазерного диода  $\tau$  с параметром  $A_{нач}$ .

6. Определена структура и создан макет ОЭЖ, обеспечивающий при комнатной температуре необходимые и достаточные для прогнозирования срока службы ЛД измерения их диаграмм направленности и спектральных характеристик при разных токах накачки.

7. Подробный анализ конструкции ОЭЖ позволил оценить его погрешность – 6,6%.

8. Для 94% исследованных лазеров их натурно измеренные и прогнозируемые сроки службы отличаются в пределах погрешности ОЭЖ.

9. ОЭЖ, базирующийся на разработанных в рамках настоящей работы методиках определения режима генерации ЛД и количественного анализа его спектральной характеристики, обеспечивает прогнозирование срока службы любого ОЛД из партии приборов, изготовленных в едином технологическом цикле, за время, не превышающее пятидесяти часов с начала диагностики лазера.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи, опубликованные в зарубежных изданиях, входящих в систему цитирования Scopus

1. **Tarasov, A. E.** Determining the refractive index of a laser diode waveguide from the measured radiation pattern / A. E. Tarasov, V. V. Bliznyuk, O. I. Koval [and etc.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. Allerton Press Inc. (United States). – 2018. – V. 82. – N. 1. – P. 6–8.

2. **Tarasov, A. E.** Estimating the operational lifespan of transverse single-mode laser diodes from their spectral characteristics / A. E. Tarasov, V. V. Bliznyuk, O. I. Koval [and etc.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. Allerton Press Inc. (United States). – V. 82. – N. 11. – 2018. – P. 1367 – 1370.

3. **Tarasov, A. E.** Predicting the service life of high-power laser diodes, based on their radiation spectrum at the initial stage of operation / A. E. Tarasov, V. V. Bliznyuk, O. I. Koval [and etc.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. Allerton Press Inc. (United States). – V. 84. – N. 2. – 2020. – P. 173–176.

4. **Tarasov, A. E.** Analyzing the spectral characteristics of laser diodes to optimize their pumping / A. E. Tarasov, V. V. Bliznyuk, K. P. Galstyan [and etc.] //

Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. Allerton Press Inc. (United States). – V. 84. – N. 2. – 2020. – P. 27–29.

**Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК**

5. **Тарасов, А. Е.** О возможности использования планарного первичного измерительного преобразователя средней мощности лазерного излучения в широкоапертурных координатно-чувствительных лазерных ваттметрах / А. Е. Тарасов, В. В. Близнюк, А. А. Тинаев // Метрология. – 2011. – № 1. – С. 7-17.

6. **Тарасов, А.Е.** Методика количественного анализа диаграммы направленности излучения лазерного диода на фундаментальной моде / А. Е. Тарасов, В. В. Близнюк, Н. В. Березовская [и др.] // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики: Серия «Естественные и технические науки». – Москва: ООО «Научные технологии», 2016. – № 7. – С. 45-50.

7. **Тарасов, А. Е.** Оптико-электронный комплекс для измерений основных параметров излучения лазерного диода в свободное пространство / А. Е. Тарасов, В. В. Близнюк, Н. В. Березовская, В. А. Паршин // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». М.: ООО «Научные технологии», №8, 2016. – С. 29 – 33.

8. **Тарасов, А. Е.** Определение режима генерации лазерного диода на фундаментальной моде / А. Е. Тарасов, В. В. Близнюк, Н. В. Березовская, В. А. Паршин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19. – № 3. – С. 55-58.

**Статьи, опубликованные в других изданиях и материалах конференций**

9. **Тарасов, А. Е.** Оптико-электронный комплекс для диагностики излучения лазерных диодов, используемых в фотодинамической терапии / А. Е. Тарасов, В. В. Близнюк, Н. В. Березовская [и др.] // Труды XXIII Международной Конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте – 2015» г. – Новороссийск: Издательство РИО ГМУ им. Адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2015. – С. 79 – 80.

10. **Тарасов, А. Е.** Экспериментальное исследование филаментации в мощных полупроводниковых лазерах / А. Е. Тарасов, В. В. Близнюк, О. И. Коваль [и др.] // Сборник докладов 46-го международного научно-методического семинара «Флуктуационные и деградиационные процессы в полупроводниковых приборах: Материалы докладов научно-методического семинара (Москва, 26 ноября 2015г.)» – Москва: МНТОРЭС им. А.С. Попова, НИУ «МЭИ», 2016. – С. 50-55.

11. **Tarasov, A.** Non-standardized measurement methods and measuring instruments for parameters and characteristics of laser diodes radiation and their standardization prospects / A. Tarasov., V. Bliznyuk, N. Berezovskaya, V. Parshin // Proceedings of the International Academic Forum AMO – SPITSE – NESEFF. – Smolensk: Publishing “Universum”, 2016. – P. 85–86.

12. **Тарасов, А. Е.** Особенности температурной зависимости спектральной характеристики диодного лазера с удвоителем частоты генерации / А. Е. Тарасов, В. В. Близнюк, О. И. Коваль [и др.] // Ученые записки физического факультета Московского университета: электронный журнал - Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», 2017. – № 6. – С. 1760701-1 - 1760701-4.

13. **Тарасов, А. Е.** Измерительная установка для проведения экспресс-анализа модовой структуры излучения лазерного диода // Оптические методы исследования потоков: Труды XIV Межд. науч.-технич. конференции. – Москва: Издательство Перо. – 2017. – С. 364 – 367.

14. **Тарасов, А. Е.** О возможности исследования процесса деградации лазерных диодов путем измерения показателя преломления волновода / А. Е. Тарасов, В. В. Близнюк // Cloud of Science: электронный журнал - Москва: Негосударственное образовательное учреждение высшего образования Московский технологический институт. – 2017. – Т. 4. – № 2. – 2017. – С. 274-281.

15. **Тарасов, А. Е.** Оценка времени наработки поперечно-одномодовых лазерных диодов по их спектральным характеристикам / А. Е. Тарасов, В. В. Близнюк, В. А. Паршин [и др.] // Сборник трудов XVI Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова («Волны-2018»). Москва. 27 мая - 1 июня 2018. – Москва: Издательство МГУ, 2018. – С.14-15.

16. **Тарасов, А. Е.** Методика экспресс-анализа диаграммы направленности лазерных диодов / А. Е. Тарасов, В. В. Близнюк, О. И. Коваль [и др.] // Сборник трудов X Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2018». Санкт-Петербург. 15-19 октября 2018 / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2018. – С. 32-33.

17. **Тарасов, А. Е.** Особенности спектра мощных лазерных диодов при медленной деградации / А.Е. Тарасов, В.В. Близнюк, В.А. Паршин [и др.] // Ученые записки физического факультета Московского университета: электронный журнал - Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», 2018. № 6. С. 1860501–1 - 1860501– 4.

18. **Тарасов, А. Е.** Оптимизация режима питания лазерных модулей, встроенных в прецизионные измерительные системы / А. Е. Тарасов, В. В. Близнюк, К. П. Галстян [и др.] // Оптические методы исследования потоков: Труды XV Международной научно-технической конференции, 24-28 июня 2019. Москва: Издательство «Перо», 2019. - С. 36 - 41.

19. **Тарасов, А. Е.** Экспресс диагностика состояния гетероструктуры лазерных диодов, используемых в лазерных измерительных системах с замкнутым циклом работы / А. Е. Тарасов, В. В. Близнюк, В. С. Григорьев [и др.] // Оптические методы исследования потоков: Труды XV Международной научно-технической конференции, 24-28 июня 2019. – Москва: Издательство «Перо», 2019. – С. 42-49.

20. **Tarasov, A.** Optoelectronic complex for express laser diodes lifetime prediction / A. Tarasov., V. Bliznyuk, A. Dolgov [and etc.] // EPJ Web of Conferences, 220, 02002-1–02002-2, 2019, IWQO-2019.

21. **Tarasov, A.** Spectral-spatial structure of the high-power laser diodes radiation during their operation / A. Tarasov., V. Bliznyuk, O. Koval [and etc.] // EPJ Web of Conferences, 220, , 02016, 2019, IWQO-2019.