

На правах рукописи



ЗОРКИН ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОГАБАРИТНОГО
СТАБИЛИЗИРОВАННОГО НЕ-НЕ ЛАЗЕРА ПОВЫШЕННОЙ
КОГЕРЕНТНОСТИ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2018

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Научный

руководитель: Чуляева Елена Георгиевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии электронной компонентной базы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань

Официальные

оппоненты: Привалов Вадим Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Экспериментальная физика» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

Степанов Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Общая и теоретическая физика и МПФ» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина», г. Рязань

Ведущая

организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), г. Москва

Защита состоится «02» апреля 2019 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 при ФГБОУ ВО «РГРТУ» по адресу: 390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «РГРТУ»: <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, к.ф.-м.н, доцент



Литвинов В.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На сегодняшний день одними из самых передовых измерительных систем являются лазерные интерферометрические устройства. Точность измерения подобных устройств достигает долей нанометра, а спектр их применения в производственных и научно – исследовательских задачах невероятно широк. Примером интерферометрических устройств могут служить:

А) интерферометры перемещений, предназначенные для измерения расстояний, проходимых движущимися объектами, для позиционирования станин станков и калибровки контрольно-измерительных машин;

Б) лазерные деформографы – устройства, работа которых направлена на регистрацию гравитационных волн, изучение геодинамических и геофизических процессов, исследование степени воздействия гидросферных и атмосферных процессов на уровень микродеформаций земной коры;

В) лазерные виброметры, позволяющие проводить бесконтактное измерение воздействующих на объекты вибраций без влияния на их резонансные свойства.

Источником когерентного излучения в названных устройствах является одночастотный стабилизированный *He-Ne* лазер. Современными производителями предлагается разнообразный выбор моделей стабилизированных лазеров промышленного назначения. Стабилизация таких лазеров, в большинстве своем, осуществляется методом поддержания равенства интенсивностей взаимно-ортогональных компонентов лазерного излучения, либо сравнения интенсивности излучения с искусственно сформированным опорным сигналом. Мощность предлагаемых устройств лежит в пределах 0.7 – 1.5 мВт при относительной нестабильности оптической частоты порядка 10^{-8} отн. ед. Конструкция, как правило, представлена в виде двух сопрягаемых блоков – излучателя, длиной приблизительно 250 – 300 мм, и системы питания.

Однако современные тенденции развития и оптимизации производства сформировали новые требования к измерительным системам в части их миниатюризации и уменьшении времени выхода на рабочий режим, что внесло серьезные ограничения на применение известных моделей стабилизированных лазеров.

Кроме того, анализ известных государственных и отраслевых стандартов, а также материалов, опубликованных в открытой печати, показал отсутствие методов и устройств для измерения длины временной когерентности с точностью измерения лучше, чем $\pm 25\%$.

Целью диссертационной работы является: создание нового прибора для изучения физических явлений и процессов – стабилизированного *He-Ne* лазера, обладающего уменьшенными габаритами при сохранении основных рабочих характеристик и повышенной выходной мощностью на единицу длины активной среды. А также разработка новых методов и научной аппаратуры для измерения характеристик лазерного излучения.

Достижение поставленной цели требует решения следующих **задач:**

1) проанализировать существующие методы стабилизации параметров лазерного излучения с целью выбора оптимального для решения поставленной задачи;

2) исследовать конструктивно-технологические пути увеличения выходной мощности *He-Ne* активных элементов без увеличения расстояния между зеркалами резонатора и диаметра разрядного капилляра;

3) изучить влияние магнитного поля на форму зависимостей интенсивности ортогональных компонентов лазерного излучения от расстройки резонатора;

4) определить влияние тепловых режимов малогабаритного излучателя лазера на его работу в процессе стабилизации параметров лазерного излучения;

5) проанализировать известные конструкции одночастотных стабилизированных *He-Ne* лазеров с целью их модификации путем устранения количества функциональных узлов без снижения эффективности;

6) разработать и исследовать устройство стабилизации параметров лазерного излучения;

7) разработать и исследовать экспериментальную установку для измерения длины временной когерентности, обеспечивающую погрешность измерения меньшую, чем у существующих методов при упрощении схемы измерения и сокращении времени проведения исследования;

Научные исследования, определившие содержание работы, проводились в соответствии с планами научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ АО «Плазма».

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1) установлена взаимосвязь ширины зависимости интенсивности лазерного излучения двухчастотного *He-Ne* активного элемента с внутренними зеркалами от расстройки оптического резонатора и дей-

ствующей на активную среду комбинации скрещенных магнитных полей;

2) разработано и реализовано устройство стабилизации частоты и мощности лазерного излучения, работа которого основана на контроле длины оптического резонатора с помощью двух управляющих элементов: нагревательной спирали и модуля принудительного воздушного охлаждения;

3) разработана экспериментальная установка для измерения длины временной когерентности, основанная на использовании интерферометра Майкельсона с модулированной длиной опорного плеча. Показано, что относительная погрешность измерений с помощью предложенной установки составляет величину не более чем $\pm 10\%$.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту

1) Наложение комбинации продольного и поперечного магнитного поля, величиной 3.2 – 24 мТл, на часть активной среды в пределах 0.1 – 0.3 длины разрядного промежутка активного элемента с внутренними зеркалами приводит к смещению точки разрыва кривой перестройки с максимума усиления, что обеспечивает устойчивую стабилизацию ввиду исключения перестройки на соседнюю кривую.

2) Использование двух элементов управления длиной резонатора: нагревательной спирали и модуля принудительного воздушного охлаждения, приводит к снижению температуры динамического равновесия малогабаритного излучателя до величины 60 – 70 °С, снижению времени выхода на рабочий режим не менее чем в 2 раза и устойчивой стабилизации лазера.

3) Измерение длины временной когерентности с помощью экспериментальной установки, работа которой основана на модуляции длины опорного плеча в интерферометре Майкельсона позволяет снизить погрешность измерения не менее чем в 2 раза.

Практическая значимость

1) разработана конструкция малогабаритного излучателя, обеспечивающая повышение выходной мощности на единицу длины активной среды при отсутствии точки разрыва кривой усиления в максимуме интенсивности;

2) разработано устройство стабилизации частоты и мощности лазерного излучения с двумя элементами управления: нагревательной спиралью и модулем принудительного воздушного охлаждения;

3) разработан малогабаритный одночастотный стабилизированный *He-Ne* лазер, предназначенный для использования в качестве когерентного источника оптического излучения для компактных прецизионных измерительных систем. Выходная мощность лазерного излуче-

ния составляет 0.95 мВт, нестабильность мощности лазерного излучения 0.66%, относительная нестабильность оптической частоты лазерного излучения $9.9 \cdot 10^{-9}$ отн. ед.. Габариты разработанного устройства составили 179х54(79 с креплением) х57.5(61.5 с креплением), что соответствует размерам нестабилизированных моделей *He-Ne* лазеров;

4) разработана экспериментальная установка для измерения длины временной когерентности, позволяющая производить измерения с относительной погрешностью, не больше, чем $\pm 10\%$;

Новизна конструкторских и технологических решений подтверждена патентами на полезные модели.

Личный вклад автора

Диссертация написана по материалам исследований, выполненных лично автором при его непосредственном участии или под его руководством. Автором выполнены исследования, определившие защищаемые положения и результаты.

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы АО «Плазма» г. Рязань при изготовлении *He-Ne* лазеров повышенной мощности типа ЛГН-220 (SF, M); при проведении ОКР «Дар» (ЛГН-305), ОКР «Арамис» (ЛГН-302) и ОКР «Дендрарий-2» (ЛГН-220), посвященных разработке и модернизации частотно-стабилизированных *He-Ne* лазеров, а также в ООО «ОПТО-ТЛ» при модификации малогабаритных интерферометров OptoTL-60 и OptoTL-250.

Апробация работы

Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, обсуждались на: 24-й международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация» 2014. XXV международной научной конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте» 2017. II МНТК и МНМК «СТНО-2018». XXVI международной научной конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте» 2018.

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 15 печатных работ, из них 4 статьи опубликованы в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, определенных ВАК Минобрнауки РФ. 6 работ опубликованы в сборниках трудов международных конференций и форумов. Получено 3 патента РФ на полезные модели. 1 работа опубликована в межвузовском сборнике научных трудов. Опубликовано 1 учебное пособие.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 94 наименований. Работа изложена на 149 страницах машинописного текста, содержит 82 рисунка.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, изложены основные решаемые задачи, показана научная новизна и практическая ценность работы, приведены основные научные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе проводится обзор существующих лазерных интерферометрических комплексов, их оптических схем и конструктивных особенностей. Приведена зависимость точности и границ применения описанных устройств от характеристик когерентного оптического излучения. Подробно рассматривается ключевое для интерферометрических измерений понятие когерентности оптического излучения и его физические особенности. В обзоре приводятся характеристики всех современных серийно выпускаемых стабилизированных *He-Ne* лазеров промышленного назначения и проводится их сравнительный анализ. Рассмотрены известные методы активной стабилизации частоты и мощности *He-Ne* лазеров [14], анализируются их сильные и слабые стороны, а также приводятся основные конструктивные исполнения стабилизированных моделей ключевых мировых производителей, выявляются их особенности и возможность применения для решаемых в диссертации задач. В первой главе рассмотрены актуальные на сегодняшний день методы измерения характеристик излучения стабилизированных *He-Ne* лазеров [3, 15]. На основе проведенного анализа сформулированы цель диссертационной работы и основные задачи исследований.

Во второй главе анализируются характеристики и конструктивные особенности серийно выпускаемых активных элементов *He-Ne* лазеров с внутренними зеркалами и обосновывается выбор активного элемента длиной 135 мм в качестве основы для разработанного лазера. Показано, что совокупность выходной мощности и спектрального состава данного активного элемента являются оптимальными для решения поставленных задач. Проанализированы типы стабилизации частоты и мощности лазерного излучения и выбран наиболее оптимальный тип стабилизации – стабилизация мощности лазерного излучения путем ее сравнения с искусственно заданным опорным сигналом. Данный

метод позволяет обеспечивать близкую к максимальной выходную мощность лазерного излучения для активного элемента данного типа при сохранении одночастотного спектрального состава. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования продемонстрировали следующие ограничения использования активного элемента длиной 135 мм:

1) максимум выходной мощности соответствует минимально допустимому уровню для использования в интерферометрических измерительных комплексах;

2) активные элементы длиной менее 200 мм обладают точкой разрыва в максимуме зависимости интенсивности излучения от расстройки резонатора, что приводит к периодическим выходам лазера из режима стабилизации,

3) в зависимости интенсивности излучения от расстройки резонатора присутствуют области хаотичного вращения поляризации;

В диссертационной работе предлагается несколько методов преодоления описанных ограничений:

1) Анализ причин снижения выходной мощности активных элементов выявил наличие осажденных на поверхность “глухого” зеркала частиц кремния, гафния, титана и прочих технологических веществ и примесей, попадающих внутрь колбы активного элемента в процессе изготовления. Осаждение названных частиц происходит вследствие их увлечения потоком газа при возникновении газового разряда.

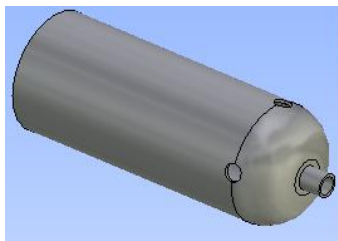


Рисунок 1 – катод активного элемента с внутренними зеркалами

В конструкцию катода вносятся четыре отверстия (Рисунок 1) [5]. При этом диаметр отверстий должен обеспечивать выполнение следующего соотношения:

$$1 \leq \frac{d_{\text{отв}}}{d_{\text{кат}}} \leq 4. \quad (1)$$

Модификация катодного электрода активного элемента He-Ne лазера с внутренними зеркалами позволяет перераспределить и рассеять поток увлекаемых на зеркало загрязняющих частиц, что привело к росту максимальной выходной мощности на 22 - 49%.

2) Дальнейшее повышение выходной мощности и изменение амплитудно-частотных характеристик активного элемента предлагается осуществлять с помощью приложения к активной среде магнитного поля. Воздействие магнитного поля, ориентированного перпендику-

2) Дальнейшее повышение выходной мощности и изменение амплитудно-частотных характеристик активного элемента предлагается осуществлять с помощью приложения к активной среде магнитного поля. Воздействие магнитного поля, ориентированного перпендику-

лярно разрядному промежутку активного элемента и сонаправленного с вектором фазовой анизотропии оптического резонатора, приводит к перераспределению интенсивностей ортогональных компонентов лазерного излучения. Интенсивность компонента, вектор поляризации которого совпадает с направлением магнитного поля, вначале возрастает, а после достижения определенного уровня – падает. Интенсивность компонента, вектор поляризации которого перпендикулярен направлению магнитного поля, ведет себя антисимметрично первому случаю.

Совокупность теоретических и экспериментальных исследований выявили следующую особенность взаимодействия активной среды $\text{He} - \text{Ne}$ лазера с магнитным полем: при наложении на активную среду комбинации продольного (вектор магнитной индукции сонаправлен с осью симметрии активного элемента) и поперечного магнитного поля в соотношении 4:6 в области величин напряженности магнитного поля до 6366 А/м (80 Э) приводит к перераспределению ширины зависимости интенсивности излучения от расстройки резонатора для ортогональных компонентов на величину порядка 40% (Рисунок 2) [6, 11, 13].

Данный эффект позволяет смещать точку разрыва с максимума кривой усиления и расширять рабочую область одного из компонентов лазерного излучения, что приводит к устранению периодических выходов лазера из режима стабилизации вследствие дрейфа точки стабилизации в сторону максимума усиления.

Описанное явление обусловлено неравенством показателей преломления ортогональных компонентов под влиянием магнитного поля.

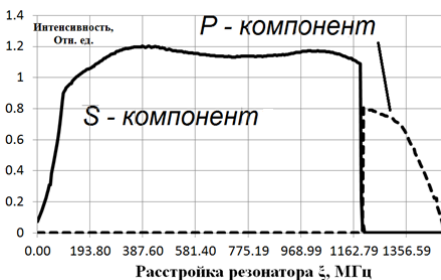


Рисунок 2 - зависимость интенсивности излучения от расстройки резонатора. Величина результирующей магнитной индукции $B = 6.2$ мТл

Соответственно, выражение, описывающее поведение ортогональных компонентов в скрещенном магнитном поле, будет иметь следующий вид, представленный в соотношениях (2 - 4).

Воздействие магнитных полей в диапазоне величин напряженности магнитного поля до 6366 А/м (80 Э) при приложении их к части активной среды не вызывает нарушения линейности поляризации ор-

тогональных компонентов вследствие явления, при котором происходит поддержание частью активной среды без магнитного поля поляризации, обусловленной типом перехода. Кроме того, при заданных условиях не наблюдается наличие разностной частоты [12], что обеспечивает возможность одночастотного спектрального состава.

$$I(\xi) = \frac{\frac{1}{a} e^{-\left(\frac{2\xi \pm X_{\perp}}{Ku}\right)^2} \cdot e^{-\left(\frac{b\xi}{1 \pm s \cdot X_{\parallel}}\right)^2} \cdot \frac{G^2}{G^2 + (\xi - X_{\parallel} + 640)^2}}{B}; \quad (2)$$

$$B = \left(1 + \frac{G^2}{G^2 + (\xi - X_{\parallel} - 320)^2}\right) \left(1 + \frac{G^2}{G^2 + (\xi - X_{\parallel} + 320)^2}\right) - \\ - \left(1 + \frac{G^2}{G^2 + (\xi - X_{\parallel} - 320)^2} + \frac{G^2}{G^2 + (\xi - X_{\parallel} - 640)^2}\right) \cdot \\ \cdot \left(1 + \frac{G^2}{G^2 + (\xi - X_{\parallel} + 320)^2} + \frac{G^2}{G^2 + (\xi - X_{\parallel} - 640)^2}\right); \quad (3)$$

$$X_{\perp, \parallel} = g \cdot \mu \cdot H_{\perp, \parallel}; \quad (4)$$

где I – интенсивность; ξ – расстройка оптического резонатора; G – Лоренцова ширина линии; Ku – полуширина Доплеровского контура; a, b, s – поправочные коэффициенты; μ – магнетон Бора; g – фактор Ландэ; $H_{\perp, \parallel}$ – напряженность продольной и поперечной составляющей магнитного поля.

Величина магнитного поля и его распределение исследовались с помощью измерителя магнитной индукции Ш1-8 и программы для моделирования магнитных полей *FEMM 4.2*.

Третья глава посвящена созданию нового стабилизированного *He-Ne* лазера, обладающего компактными размерами. По причине того, что управление длиной оптического резонатора лазеров такого типа осуществляется путем термокомпенсации, влияние температурных режимов на работоспособность прибора невероятно велико. Поддержание нестабильности оптической частоты на необходимом уровне требует высокой точности поддержания температуры. Помимо этого, неправильный выбор температурного режима приводит к дрейфу параметров лазера и, как следствие, возможности его выхода из режима стабилизации. Более того, температурный режим оказывает непосредственное влияние на минимально возможное время готовности прибора (в современных моделях составляет 10 – 15 минут).

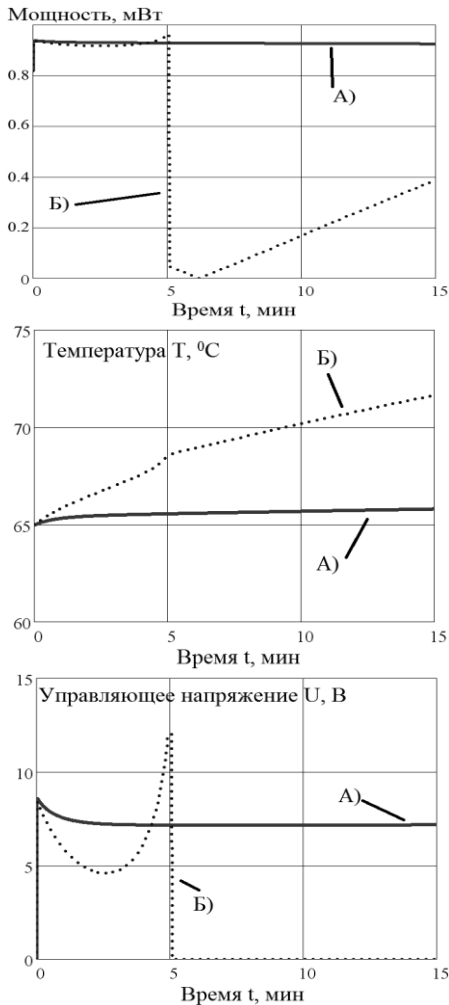


Рисунок 3 – Результаты моделирования работы лазера

лазера.

В результате использования модуля охлаждения температура принудительного прогрева снизились до величины 60 – 70°C.

Исследования показали, что температура, до которой нагревается излучатель разработанного прибора при температуре окружающей среды 25°C лишь за счет подачи электрической энергии накачки (самопрогрев), составляет 80°C. А с учетом дополнительной максимальной тепловой энергии, подаваемой с помощью нагревателя (принудительный прогрев), составляет 115°C. Время установления динамического равновесия данной системы составляет 80 минут [8, 9].

Вышеописанный температурный режим является неприемлемым, так как приведет к выходу лазера из режима стабилизации в течение 10 – 60 минут по причине температурного дрейфа. Возникшую проблему предлагается решить с помощью введения дополнительного элемента управления длиной резонатора в виде модуля принудительного воздушного охлаждения. Модуль охлаждения представляет собой вентилятор, расположенный рядом с излучателем

В настоящей диссертационной работе, на основании экспериментов, посвященных исследованию спектральных характеристик и тепловых режимов работы *He-Ne* лазеров, предложен расчетный метод, позволяющий прогнозировать поведение лазера в режиме стабилизации частоты и мощности [1]. Используя предложенный метод, становится возможным проведение предварительной настройки лазеров, стабилизированных по принципу термокомпенсации длины оптического резонатора, что ускоряет изготовление прибора, а также позволяет анализировать потенциальные модификации лазера без их непосредственной реализации.

На рисунке 3 представлены полученные с помощью предлагаемого метода зависимости выходной мощности, управляющего напряжения и температуры излучателя лазера в режиме стабилизации от времени для случая с использованием модуля принудительного воздушного охлаждения и без него. Исходные параметры, а именно, форма зависимости интенсивности излучения от расстройки резонатора, масса, теплоемкость, коэффициенты конвективной теплоотдачи, сопротивление нагревательного элемента, расход воздуха модуля охлаждения, питающие напряжения и т.п., соответствуют характеристикам разработанного лазера. Случаю А) соответствует одновременное участие нагревательной спирали и модуля принудительного воздушного охлаждения в процессе стабилизации лазера. Случаю Б) соответствует использование только нагревательной спирали.

Как видно из Рисунка 3, попытки стабилизации без дополнительного охлаждающего элемента управления приводят к выходу лазера из режима стабилизации по истечении короткого промежутка времени от момента “захвата”, что обусловлено неконтролируемым температурным дрейфом. Наличие дополнительного элемента управления, напротив, обеспечивает стабильную работу прибора.

Краткая блок-схема разработанного метода представлена на Рисунке 4.

На основании проведенных исследований предложена конструкция нового малогабаритного одночастотного стабилизированного *He-Ne* лазера, функциональная схема которого приведена на Рисунке 5 [7].

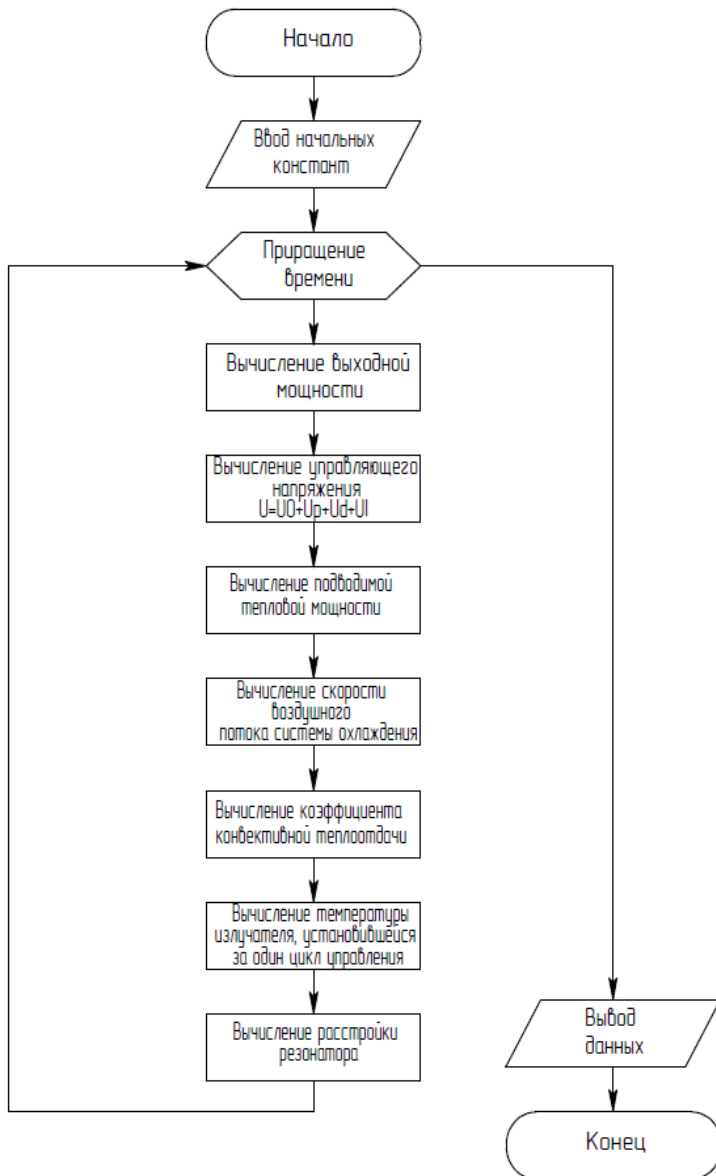


Рисунок 4 – Блок схема алгоритма работы лазера

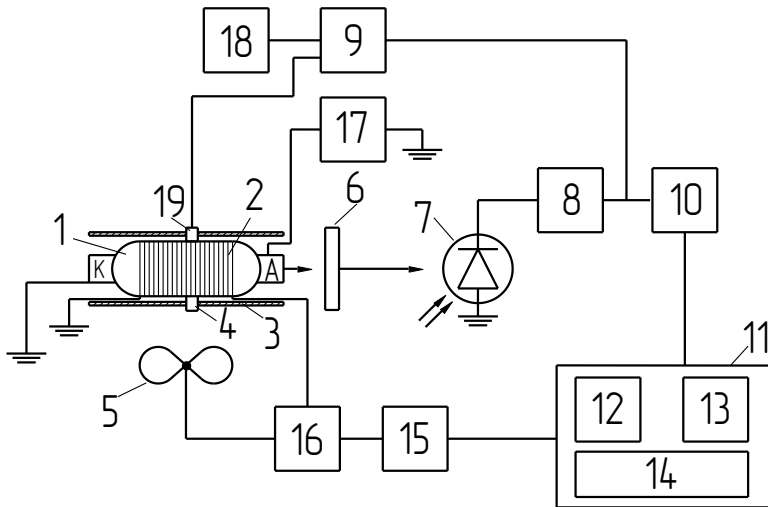


Рисунок 5 – Конструкция разработанного лазера

1 – Активный элемент длиной $L = 135\text{мм}$; 2 – Нагревательный элемент; 3 – Корпус излучателя; 4 – Магнитная система; 5 – Систем принудительного воздушного охлаждения; 6 – Поляризационная пленка; 7 – Фотодиод; 8 – Усилитель сигнала фотоприемника; 9 – Система измерения разницы температур; 10 – Аналогово-цифровой преобразователь; 11 – Микроконтроллер; 12 – Блок ПИД-регулирования; 13 – Блок управления переходом режимов работы; 14 – Блок измерения опорного уровня; 15 – Цифро-аналоговый преобразователь; 16 – Усилитель мощности управляющего сигнала; 17 – Высоковольтный блок питания; 18, 19 – Термосопротивление.

Главным элементом разработанной конструкции является активный элемент 1 длиной $L = 135\text{ мм}$, катод которого выполнен в виде полого цилиндра с отверстиями. На боковую поверхность активного элемента намотан нагреватель в виде медной бифилярной спирали, с сопротивлением 17 Ом. Активный элемент помещен в алюминиевый корпус 3. Питание активного элемента осуществляется с помощью высоковольтного источника питания 17. На активный элемент через отверстие в корпусе излучателя прикреплена магнитная система в виде перманентного NdFeB магнита, обеспечивающего воздействие на часть активной среды комбинации продольного и поперечного магнитного поля с величиной суммарной магнитной индукции порядка 6.2 мТл. Магнитная система обеспечивает изменение формы контура пере-

стройки и повышение максимальной выходной мощности лазерного излучения. Напротив излучателя расположена система принудительного воздушного охлаждения в виде вентилятора *FSY40S12M*. Излучение со стороны глухого зеркала попадает на фотоприемник 7 через поляризационный светофильтр 6, ориентированный таким образом, чтобы на фотоприемник 7 поступала только одна частотная составляющая лазерного излучения. Сигнал фотоприемника усиливается с помощью устройства усиления. На активном элементе 1 располагается терморезистор 19. Терморезистор 18 расположен на плате устройства управления таким образом, чтобы на него оказывалось минимальное температурное влияние со стороны тепловых элементов. Терморезистор 19 показывает температуру излучателя. Терморезистор 18 показывает температуру окружающей среды. Терморезисторы 18 и 19 подключены к устройству сигнализации разницы температур 9. Сигналы с усилителя 8 и устройства сигнализации 9 поступают через АЦП 10 на микроконтроллер *LPC1769FBD* 11. В контроллере 11 реализован блок-алгоритм управления временем начального прогрева 13, который переключает систему из режима прогрева в режим стабилизации на основании баланса сигналов с 9. Блок-алгоритм анализа опоры 14 активируется после команды с 13, вычисляет в течение 3 минут максимальную мощность излучения и формирует опорный сигнал. Далее приступает к работе блок – ПИД-алгоритм 12, формирующий управляющее напряжение. Управляющее цифровое напряжение преобразуется в аналоговое с помощью цифро-аналогового преобразователя 15. Управляющий сигнал усиливается по мощности с помощью усилителя 16. Управляющий усиленный сигнал попадает на нагревательный элемент 2 и противофазно попадает на систему принудительного воздушного охлаждения 5.

Отличительной особенностью данной конструкции является отсутствие поляризационной оптики на выходе излучателя, компактность и простота исполнения, что позволило стабилизировать лазер с малыми габаритами в приемлемом рабочем диапазоне температур (60 – 70 °С) в одночастотном режиме.

В четвертой главе настоящей диссертационной работы проводятся теоретические и экспериментальные исследования ключевых характеристик лазерного излучения разработанного малогабаритного стабилизированного лазера повышенной когерентности, а также предлагаются новые методики для их измерения.

Измерение относительной нестабильности оптической частоты проводилось методом вычисления среднеквадратического отклонения сигнала биений поверяемого лазера и лазера-эталона. Эталон пред-

ставляет собой лазер, стабилизированный по насыщенному поглощению в йоде [15]. Измеренная величина относительной нестабильности оптической частоты разработанного лазера за четыре часа непрерывной работы составила $9.9 \cdot 10^{-9}$ отн. ед.

Измерение относительной нестабильности мощности проводится методом 3.2, описанным в ГОСТ 25786-83, путем прямого измерения нестабильности напряжения. Преобразование фотосигнала в напряжение осуществляется термостатированным фотодиодом ФД-7, включенным во входную цепь операционного усилителя с калиброванным коэффициентом усиления. Регистрация напряжения производится с помощью цифрового мультиметра APPA-207 с шагом дискретизации измеряемого сигнала, равной 0.5 секунд. Для записи и хранения регистрируемых данных, мультиметр подключается к персональному компьютеру [3]. Величина нестабильности мощности лазерного излучения за четыре часа непрерывной работы составила 0.66%.

Измерение средней мощности лазерного излучения проводилось по ГОСТ 25786-83 измерителем мощности на расстоянии 0.15 ± 0.05 м от торца лазера. Величина средней мощности составила $P = 0.95$ мВт.

В главе показано, что дополнительный анализ экспериментальных данных, полученных в ходе проведения измерения относительной нестабильности частоты и мощности с помощью построения автокорреляционной функции и дисперсии Аллана, позволяет выявлять присутствие нестационарных случайных процессов в лазерном излучении и разделять их по типам фликкер-шум, интерференционный шум и т.п.. Это дает возможность выявить причины их возникновения и впоследствии устранить их [4,10].

В диссертационной работе предлагается следующий метод и экспериментальная установка измерения длины временной когерентности [2].

Излучение лазера вводится в интерферометр Майкельсона. Длина одного из его плеч модулируется переменным синусообразным сигналом, что приводит к возникновению интерференционной картины, интенсивность которой изменяется во временной области по следующему закону:

$$I(\Delta) \sim 4\Delta f \left(1 + \frac{\sin\left(2\pi\Delta f \cdot \frac{\Delta + d\sin(2\pi\xi t)}{c}\right) \cdot \cos\left(2\pi f \cdot \frac{\Delta + d\sin(2\pi\xi t)}{c}\right)}{2\pi\Delta f \cdot \frac{\Delta + d\sin(2\pi\xi t)}{c}} \right), (5)$$

где d – максимальное изменение длины опорного плеча, м; ξ – частота модуляции, Гц; Δf – полуширина спектральной линии, Гц; Δ – оптическая разность хода, м; c – скорость света, м/с; t – время, с.

Зависимость интенсивности интерференционной картины от времени позволяет регистрировать ее с помощью фотоприемника и осциллографа без необходимости использования микрометрической щели, видеокамер и сложных алгоритмов обработки изображений.

Видность интерференционной картины может быть рассчитана путем замера максимальной и минимальной интенсивности зарегистрированного сигнала.

Изменяя оптическую разность хода путем изменения длины немодулированного плеча интерферометра и вычисляя величину видности для каждого значения Δ , можно определить длину временной когерентности.

За длину временной когерентности принимают значение Δ , при котором видность снижается до уровня 0.5 от максимального значения.

Погрешность измерения предлагаемого метода составляет величину $\pm 10\%$.



Рисунок 6 – Разработанный малогабаритный стабилизированный *He-Ne* лазер повышенной когерентности

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- 1) предложена конструкция катодного электрода активного элемента с внутренними зеркалами, приводящая к повышению выходной мощности лазерного излучения;
- 2) исследовано влияние комбинации продольного и поперечного магнитного поля, приложенного к части активной среды активного элемента с внутренними зеркалами *He-Ne* лазера, на зависимость интенсивности излучения от расстройки оптического резонатора;
- 3) разработана оптическая схема и конструкция малогабаритного излучателя лазера, пригодная для стабилизации частоты и мощности лазерного излучения методом сравнения мощности с опорным сигналом;
- 4) разработано устройство стабилизации частоты и мощности лазерного излучения с двумя элементами управления: нагревательной спиралью и модулем принудительного воздушного охлаждения;
- 5) разработан метод предварительной оценки характеристик лазера в режиме стабилизации;
- 6) разработан и внедрен в производство малогабаритный стабилизированный *He-Ne* лазер повышенной когерентности со следующими характеристиками:

- а. нестабильность оптической частоты за 4 часа непрерывной работы: $9.9 \cdot 10^{-9}$ отн. ед;
 - б. нестабильность мощности лазерного излучения за 4 часа непрерывной работы: 0.66 %;
 - с. выходная средняя мощность лазерного излучения: 0.95 мВт;
 - д. спектральный состав: одночастотный;
 - е. время готовности: 10 минут;
 - ф. длина временной когерентности составила величину не менее: 3м;
 - г. поляризация: линейная, не менее 100:1;
 - h. габариты: 179х54(79 с креплением)х57.5(61.5 с креплением).
- 7) разработана экспериментальная установка для измерения длины временной когерентности, с погрешностью измерений в два раза меньшей, чем предлагаемой ОСТ11 - 397. 803 – 80.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ

1. Зоркин В.С., Воробьев П.Г., Чуляева Е.Г., Кондрахин А.А., Мельничук Г.В. Исследование цифровой системы стабилизации частоты зеемановских He - Ne лазеров // Вестник РГРТУ. № 2. Вып. 52. Часть 2. 2015. С.174 - 179.
2. Зоркин В.С., Чуляева Е.Г., Кондрахин А.А., Мельничук Г.В., Керносов М.Ю., Гомозкова Е.Ю. Исследование метода измерения длины временной когерентности // Вестник РГРТУ. № 2. Вып. 56. 2016. С.163 - 169.
3. Зоркин В.С., Керносов М.Ю., Кондрахин А.А., Мельничук Г.В., Гомозкова Е.Ю. Стабилизированные лазеры и их характеристики // Вестник РГРТУ. № 1. Вып. 51. 2015. С.146 - 152.
4. Зоркин В.С., Бодров А.И., Чуляева Е.Г., Паюров А.Я., Кюн В.В. Определение гармонических составляющих шума на фоне других видов шума лазерного излучения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2017. Т. 10. № 4. С. 82–91.

Патенты РФ на полезную модель

5. Активный элемент гелий-неонового лазера. Зоркин В.С. и др. Патент РФ на полезную модель №167162, кл. H01S 3/038. Приоритет от 11.07.2016, опубл. 27.12.2016.
6. Малогабаритный излучатель гелий-неонового лазера. Зоркин В.С. и др. Патент РФ на полезную модель № 183838, кл. H01S 3/03; H01S 3/104. Приоритет от 01.11.2017, опубл. 05.10.2018.

7. Одночастотный стабилизированный газовый лазер. Зоркин В.С. и др. Патент РФ на полезную модель № 184534, кл. H01S 3/041; H01S 3/134. Приоритет от 10.01.2018, опубл. 30.10.2018.

В сборниках трудов международных конференций и форумов

8. Зоркин В. С., Воробьев П.Г., Кондрахин А.А., Мельничук Г.В., Тумаков Н.Ю. Методы снижения времени начального прогрева зеемановского лазера. Сборник докладов 24-й международной конференции Лазеры. Измерения. Информация. 2014. Том 2. С.44-51.

9. Зоркин В. С., Воробьев П.Г., Кондрахин А.А., Мельничук Г.В., Тумаков Н.Ю. Методы снижения времени начального прогрева зеемановского лазера // 24-ая международная конференция Лазеры. Измерения. Информация. Тез. Докл.. 2014.

10. Зоркин В.С., Бодров А.И., Чуляева Е.Г., Паюров А.Я., Кюн В.В. Определение гармонических составляющих шума на фоне других видов шума лазерного излучения // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте: труды XXV междунар. научн. конф. Новороссийск: ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова; под ред. проф. В.Е. Привалова, 2017. С. 14-15.

11. Зоркин В.С., Чуляева Е.Г., Степура А.В. Исследование влияния магнитных полей на двухчастотный активный элемент He – Ne лазера: сборник трудов II МНТК и МНМК «СТНО-2018» Том 2. – Рязань: РГРТУ, 2018. С. 54-59.

12. Зоркин В.С., Давыдов С.А. Установка измерения разностной частоты в зеемановских активных элементах: сборник трудов II МНТК и МНМК «СТНО-2018» Том 1. – Рязань: РГРТУ, 2018. С. 104-108.

13. Зоркин В.С., Власов А.Н., Бодров А.И., Чуляева Е.Г.. Способы управления формой амплитудно – частотной характеристики He – Ne лазера с целью стабилизации его параметров // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте: труды XXIV междунар. научн. конф. Новороссийск: ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова; под ред. проф. В.Е. Привалова, 2018. С. 14-15.

Прочие публикации

14. Зоркин В.С., Чуляева Е.Г., Давыдов С.А. Методы стабилизации частоты He – Ne лазеров (обзор) // методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: межвузовский сборник научных трудов. Рязань. 2018. С. 112-119.

15. Зоркин В.С., Чуляева Е.Г., Гуров В.С., Гомозкова Е.Ю., Огнев Б.И., Паюров А.Я., Кондрахин А.А. Информационные лазерные технологии в промышленности и системах связи: Учебное пособие, РГРТУ, Рязань, 2016. С. 92.

ЗОРКИН Владимир Сергеевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОГАБАРИТНОГО
СТАБИЛИЗИРОВАННОГО НЕ- НЕ ЛАЗЕРА ПОВЫШЕННОЙ
КОГЕРЕНТНОСТИ**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 29.01.19. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ.л.1.0.

Тираж 100 экз.

ФГБОУ ВО «РГРТУ».

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.