

На правах рукописи



ВОРОБЬЕВ ПАВЕЛ ГЕННАДЬЕВИЧ

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СТАБИЛИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК
ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2013

Диссертация выполнена в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук
Чуляева Елена Георгиевна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Мамонтов Евгений Васильевич

кандидат физико-математических наук
Саблин Виктор Александрович

Ведущая организация: Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ» г. Москва

Защита состоится «24» декабря 2013 года в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 при ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Автореферат разослан «22» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.211.03, д-р физ.-мат. наук, профессор



Чиркин М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Лазерные прецизионные измерительные системы (точность измерений до одного нанометра) делятся на два основных класса. Первый класс – лазерные интерферометрические устройства, предназначенные для точного автоматического измерения пространственных перемещений объектов в режиме реального времени. Такие системы находят широкое применение в точном машиностроении и электронной технике, авиа- и судостроении, в инженерной геодезии и геофизике. Повышенная точность позиционирования рабочего инструмента требуется, в частности, при разработке прецизионных устройств в компьютерной технике, в микро- и нанoeлектронике, в прецизионной сейсмометрии. Второй класс – лазерные голографические интерферометрические установки. Принцип действия этих систем основан на регистрации голограммы исследуемого объекта и дальнейшем ее изучении. В настоящее время голографическая интерферометрия уже стала неотъемлемым и надежным инструментом не только в научных исследованиях. Уникальные возможности этого метода используются для контроля качества изделий в турбиностроении, при производстве автомобильных шин, при проектировании плотин, несущих конструкций мостов и зданий, для корректировки процесса роста кристаллов и во многих других случаях. Благодаря уникальным возможностям метода стал доступен для оптических измерений и широкий класс диффузно отражающих объектов. К этому же классу относится и спекл-интерферометрия, которая развивалась во многом под влиянием идей и методологии голографической интерферометрии.

Новое определение метра, принятое в 1983 году, связывает единицу длины с единицей времени и частоты через фундаментальную константу скорость света, значение которой принято по международному соглашению. С введением этого определения появилась возможность реализации единого эталона времени, частоты и длины. С этой целью во ВНИИМ была создана эталонная установка на основе интерферометра Фабри – Перо для измерения отношения длин волн (частот) He-Ne/CH₄ лазера ($\lambda = 3,39$ нм), входящего в состав государственного первичного эталона времени и частоты (ВНИИФТРИ, Москва), и He-Ne/I₂ лазера ($\lambda = 0,63$ нм), входящего в состав Государственного первичного эталона единицы длины. С момента внедрения нового определения метра гелий-неоновый лазер (He-Ne) является предпочтительным для использования в интерферометрических измерительных системах. В первом классе интерферометрических систем используются частотно-стабилизированные He-Ne лазеры,

пространственный период излучения которых служит удобной мерой для контроля размеров материальных тел. Во втором классе интерферометрических систем используются He-Ne лазеры повышенной мощности (более 70 мВт), позволяющие получать голограммы высокой яркости и четкости.

С каждым годом предъявляются все более жесткие требования к времени готовности, точности и скорости измерений таких систем, что, в первую очередь, определяется характеристиками используемых в них лазеров.

Цель диссертационной работы: создание методов и средств стабилизации характеристик серийно-выпускаемых He-Ne лазеров, используемых в прецизионных лазерных измерительных системах.

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

- исследовать совместное влияние поперечного и продольного магнитных полей на разностную частоту при перестройке оптического резонатора;
- провести анализ существующих конструкций He-Ne лазеров с целью разработки и применения новых средств и методов стабилизации параметров лазерного излучения;
- найти конструктивно-технологические методы подавления конкуренции длин волн 0,63 мкм и 3,39 мкм в He-Ne лазерах повышенной мощности более 70 мВт;
- исследовать и разработать оптические схемы и конструкции излучателей на их основе;
- определить влияние тепловых режимов излучателя лазера на его работу в процессе стабилизации оптической частоты излучения;
- разработать цифровую систему стабилизации оптической частоты по опорному значению разностной частоты, не имеющему частотных флуктуаций реперной точки.

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

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем.

1. Установлено соотношение, позволяющее описать зависимость разностной частоты от перестройки оптического резонатора при совместном воздействии на активную среду активного элемента с внутренними зеркалами продольного и поперечного магнитных полей.

2. Предложен и впервые реализован способ стабилизации оптической частоты в промышленных лазерах, основанный на принципе стабилизации разностной частоты по ее опорному значению, не имеющему частотных флуктуаций.

3. Установлена нелинейная зависимость между выделяемой излучателем лазера тепловой энергией и временем его прогрева, необходимого для достижения заданной скорости перестройки оптического резонатора.

4. Разработан алгоритм расчета параметров цифровой системы стабилизации, основанный на анализе экспериментальных измерений параметров лазерного излучения, позволяющий сократить время настройки системы управления более чем в 10 раз.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Зависимость разностной частоты гелий-неоновых лазеров с внутренними зеркалами при перестройке оптического резонатора по контуру усиления в области максимально возможного зеемановского расщепления в продольном магнитном поле имеет монотонный характер при воздействии на активную среду поперечного магнитного поля, индукция которого составляет не менее $1/20$ величины индукции продольного поля.

2. Использование монотонного участка зависимости разностной частоты от расстройки оптического резонатора в качестве дискриминационной кривой обеспечивает однозначность определения знака ошибки рассогласования и увеличение стабильности оптической частоты в серийно выпускаемых зеемановских лазерах не менее чем в 5 раз.

3. Методами численного моделирования установлено, что устойчивая стабилизация разностной частоты по ее опорному значению для уровня установившейся ошибки не более 64 кГц достигается при минимальной разрядности цифровой системы управления 16 бит.

Практическая значимость

1. Теоретически обоснован факт изменения формы кривой зависимости разностной частоты от расстройки оптического резонатора при совместном влиянии на активную среду продольного и поперечного магнитных полей в активном элементе с внутренними зеркалами;

2. Разработана универсальная цифровая система автоподстройки оптической частоты, которая может быть использована в конструкциях лазеров, стабилизированных как по опорному значению разностной частоты, так и по интенсивности мощности.

3. Разработано программное обеспечение для устройства стабилизации параметров излучения.

4. Разработан частотно-стабилизированный He-Ne лазер для измерительных систем, обладающий техническими характеристиками, превосходящими отечественные аналоги по ряду параметров, а именно: мощность излучения повысилась в 1,5 раза, диапазон разностных частот увеличился с 4 до 5 МГц, стабильность разностной частоты повысилась не менее чем в 10 раз, стабильность оптической частоты увеличилась не менее чем в 5 раз.

5. Разработана конструкция выходного окна активного элемента, которая позволяет подавить конкуренцию длин волн 0,63 мкм и 3,39 мкм и достичь нестационарности мощности не хуже $\pm 1\%$ в He-Ne лазерах мощностью более 70 мВт.

Новизна конструкторских и технологических решений подтверждена патентами на полезные модели [13, 14, 15].

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 НИИ ГРП «Плазма», г. Рязань, при модернизации He-Ne лазеров повышенной мощности типа ЛГН-220 (SF, М); при проведении НИОКР «Дем» (ЛГН-212-2М) и НИОКР «Дактиль-М» (ЛГН-303М), посвященных разработке и модернизации частотно-стабилизированных He-Ne лазеров, предназначенных для замены устаревших моделей приборов, импортозамещения и для применения в новейших лазерных информационных комплексах многопараметрического контроля кинематики станков, прецизионных оптико-механических измерительных системах, научных исследованиях. Также результаты диссертационной работы были использованы при создании лабораторных работ по курсу «Формирование и обработка оптических сигналов» в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Апробация работы

Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, обсуждались: на 19-й международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация», Санкт-Петербург, 2009; II международной научной конференции

«Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития» Харьков – Кацивели, 2009; 22-й международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация», Санкт-Петербург, 2012; Международном научном семинаре (Россия - КНР), Рязань, 2012; 23-й международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация», Санкт-Петербург, 2013; Международной научно-практической конференции «Инновации в науке, производстве и образовании», Рязань, 2013.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ, из них 3 статьи в журналах из списка ВАК РФ, 4 статьи в периодических не рецензируемых изданиях, 5 работ в сборниках научных трудов российских и международных научно-технических конференций, получено 3 патента РФ на полезные модели.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 77 наименований. Работа изложена на 137 страницах машинописного текста, содержит 57 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведен обзор, в котором рассмотрены виды и принципы работы лазерных интерферометрических измерительных систем, схемы их построения в зависимости от типа применяемых лазеров и отмечены причины использования He-Ne лазеров в таких системах. Показано влияние характеристик лазерного излучения на скорость и точность интерферометрических измерений. Проанализированы основные методы активной стабилизации характеристик лазерного излучения, выявлены их основные достоинства и недостатки. Рассмотрены тенденции перехода от аналоговых к цифровым системам управления в связи с интенсивным развитием микропроцессорной техники. Рассмотрены основные модели He-Ne лазеров, применяемые в интерферометрии. Выделены работы, посвященные стабилизации частоты лазерного излучения и перспективным методам стабилизации двухчастотных лазеров. На

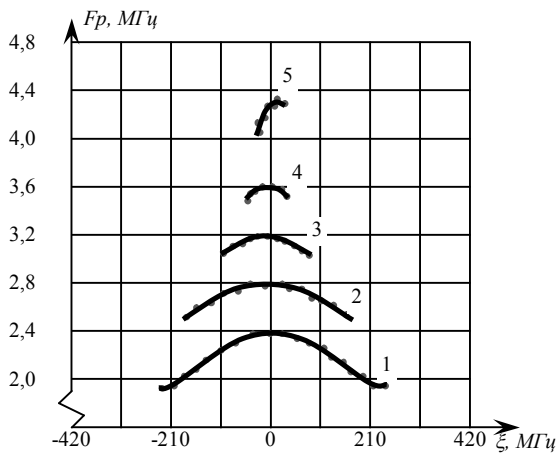


Рисунок 1 – Экспериментальная зависимость разностной частоты от расстройки оптического резонатора при индукции продольного поля: 1 – 20 мТл; 2 – 23 мТл; 3 – 27 мТл; 4 – 30 мТл; 5 – 34 мТл

при магнитной индукции продольного магнитного поля более 32 мТл кривая зависимости разностной частоты от расстройки резонатора меняет свой вид с

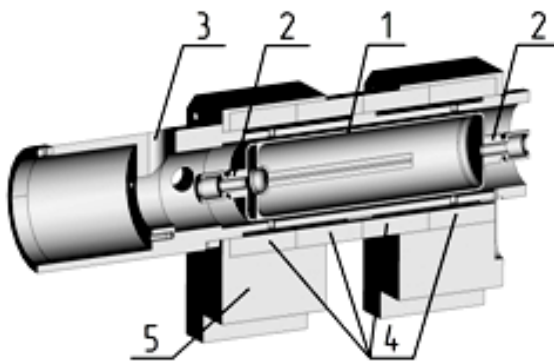


Рисунок 2 – Конструкция излучателя зеемановского He-Ne лазера:

1 – активный элемент, 2 - юстировочные узлы, 3 – корпус излучателя

юстировочных узлов, выполненных из магнитомягкого сплава, возникает поперечная компонента индукции магнитного поля, которая составляет не менее 5 % (1/20 часть) от величины индукции продольного поля.

основе проведенного анализа сформулированы цель диссертационной работы и основные задачи исследований.

Во второй главе проведены теоретические и экспериментальные исследования [3, 10] зависимости разностной частоты от расстройки резонатора (рисунок 1) активных элементов с внутренними зеркалами длиной 125 мм и диаметром капилляра 0,8 мм. Исследования проводились при различных значениях индукции продольного магнитного поля магнитной системы излучателя (рис. 2) зеемановского He-Ne лазера с целью повышения номинала разностной частоты излучения в таких приборах. Экспериментально установлено, что

при магнитной индукции продольного магнитного поля более 32 мТл кривая зависимости разностной частоты от расстройки резонатора меняет свой вид с симметричного (рис. 1, кривые 1, 2, 3, 4) на несимметричный (рис. 1, кривая 5). Ряд исследований показывает, что при воздействии поперечного магнитного поля величиной не менее 1,5 мТл на активный элемент наблюдается несимметричная зависимость разностной частоты от расстройки резонатора, однако при этом номинал разностной частоты достигает не более 1 МГц.

В данной работе показано (рис. 3), что из-за краевых эффектов, возникающих в магнитной системе, и намагничивания

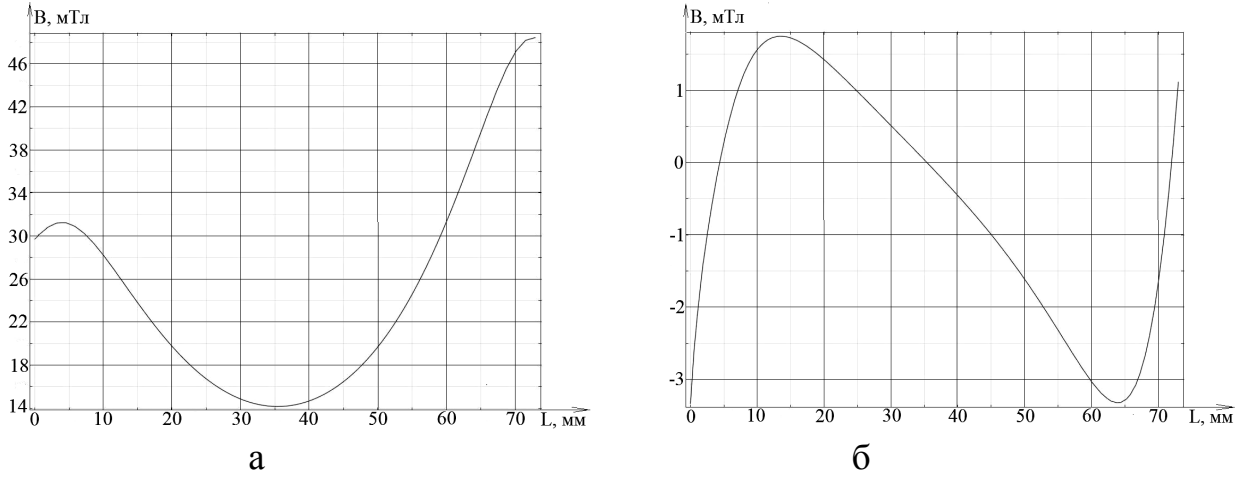


Рисунок 3 – Распределение индукции магнитного поля в магнитной системе вдоль оси капилляра активного элемента: а – продольная составляющая поля, б – поперечная составляющая поля

Соотношение индукции полей определялось по их максимальным абсолютным значениям. Совместное влияние на активную среду продольной и поперечной компонент магнитного поля в излучателе и приводит к тому, что при магнитной индукции продольного магнитного поля более 32 мТл происходит изменение формы кривой зависимости разностной частоты от расстройки резонатора. На основе классических теорий по формированию разностной частоты в продольном и поперечном магнитных полях в данной работе предложено соотношение, позволяющее описать зависимость разностной частоты от расстройки оптического резонатора при совместном влиянии на активный элемент эеэмановского лазера поперечного и продольного магнитных полей, и имеющее вид:

$$F(\xi, H) = 0.28 \frac{fc}{2\pi L} \left[\exp \left(- \left(\frac{\xi + \nu(H_{\parallel})}{0.6\Delta\nu_D} \right)^2 \right) \sin \left(\frac{\xi + \nu(H_{\parallel})}{0.3\Delta\nu_D} \right) - \exp \left(- \left(\frac{\xi - \nu(H_{\parallel})}{0.6\Delta\nu_D} \right)^2 \right) \sin \left(\frac{\xi - \nu(H_{\parallel})}{0.3\Delta\nu_D} \right) \right] +$$

$$+ \frac{8\pi N \left(\frac{q_e^2}{m_e} \right) (\xi + \nu(H_{\perp}))}{(4\nu(H_{\perp})^2 + \gamma^2)} - \frac{8\pi N \left(\frac{q_e^2}{m_e} \right) (\xi - \nu(H_{\perp}))}{(4\nu(H_{\perp})^2 + \gamma^2)}, \quad (1)$$

где f – относительные потери резонатора, измеренные на уровне половинной интенсивности, c – скорость света, L – длина оптического резонатора, ξ – расстройка оптической частоты, $\Delta\nu_D$ – полуширина доплеровского контура, $H_{\parallel}$ – напряженность продольного магнитного поля, $H_{\perp}$ – напряженность поперечного магнитного поля.

Кроме активных элементов с внутренними зеркалами в данной главе про-

ведено исследование He-Ne лазеров с внешним резонатором мощностью более 70 мВт. Основной проблемой таких лазеров является нестабильность мощности лазерного излучения, так как в них не используются специальные средства активной стабилизации [5]. Работы ряда исследователей показывают, что из-за возникающей конкуренции длин волн 0,63 мкм и 3,39 мкм нестабильность мощности излучения достигает 10 %, что является ограничивающим фактором использования таких лазеров. В данной работе для подавления конкуренции длин волн 0,63 мкм и 3,39 мкм предложено одно из выходных окон активного элемента выполнять в виде диспергирующей призмы из стекла ЛК-4 [1, 13]. Кроме того, что само стекло ЛК-4 частично подавляет излучение на длине волны 3,39 мкм, призма, устанавливаемая под углом Брюстера, имеет клин, угол которого составляет 3 градуса, позволяющий разнести в пространстве излучение конкурирующих длин волн. Такое решение позволило уменьшить нестабильность мощности излучения серийно выпускаемого He-Ne лазера повышенной мощности не менее чем в 2 раза. Как показали расчеты [4, 6] и экспериментальные измерения, изменение угла наклона одной из граней призмы не более чем на 3 градуса приводит к уменьшению выходной мощности излучения не более чем на 1 %, что является допустимым.

В третьей главе на основе комплексного анализа конструкций исследуемых частотно-стабилизированных He-Ne лазеров [2] осуществлен поиск новых конструктивно-технологических решений, направленных на создание новых приборов с более высокими эксплуатационными характеристиками. В выпускаемых на сегодняшний день частотно-стабилизированных лазерах ЛГН-212-1М и ЛГН-303 используется аналоговая система стабилизации оптической частоты по равенству интенсивностей ортогонально поляризованных мод. Стабилизация оптической частоты осуществляется методом термостабилизации длины оптического резонатора, где в качестве управляющего элемента выступает медная бифилярная спираль, наматываемая на внешнюю оболочку активного элемента. Расчеты показали, что для обеспечения относительной нестабильности оптической частоты не хуже $\Delta\nu/\nu = 1 \cdot 10^{-9}$ допустимое изменение температуры корпуса активного элемента составляет $\Delta T_{don} = 0,0002$ °С. Такой маленький допуск к изменению температуры корпуса активного элемента и выдвигаемое на сегодняшний день требование к времени готовности лазеров (не более 10 минут) привели в данной работе к более детальному исследованию тепловых режимов излучателей и поиску новых технических решений, направленных на уменьшение времени готовности отечественных частотно-стабилизированных лазеров [8].

Тепловой режим излучателей стабилизированных лазеров играет чрезвычайно важную роль в процессе стабилизации частоты. Недостаточный прогрев конструкции излучателя или ее перегрев приводят в режиме стабилизации к дрейфу оптической частоты и перекосу пределов регулирования системы стабилизации. Индикатором достаточности прогрева служит температура оболочки активного элемента, достигаемая при его самопрогреве от газового разряда. При этом рабочая температура активного элемента в режиме стабилизации должна быть выше не менее чем на 5°C температуры самопрогрева.

Конструкция активных элементов и требования к используемым материалам излучателей лазеров ЛГН-303 и ЛГН-212-1М не позволяют снизить их массу и удельную теплоемкость, поэтому в данной работе предложено на время прогрева увеличить подводимую к системе тепловую мощность. Для определения необходимой дополнительной тепловой мощности и оптимального расположения элементов дополнительного нагрева в конструкциях исследуемых излучателей в данной главе проведены теоретические расчеты времени установления термодинамического равновесия системы в зависимости от подводимой тепловой мощности и теплофизических характеристик конструкций излучателей. Далее проведено моделирование тепловых процессов излучателей, что позволило определить место расположения дополнительных нагревательных элементов в конструкции. На основе проведенных теоретических расчетов и результатов моделирования осуществлено экспериментальное исследование тепловых режимов излучателей с дополнительными элементами прогрева. Результаты исследований показали, что использование в конструкциях излучателей дополнительных нагревательных элементов снижает время предварительного прогрева и время выхода на режим термодинамического равновесия в 2 раза. Дальнейшее уменьшение времени прогрева ограничивается требованием максимальной потребляемой мощности лазера от источника питания.

Преимуществами метода стабилизации по равенству интенсивностей ортогонально поляризованных мод являются: отсутствие уширения линии излучения, достаточная стабильность частоты, простота исполнения. Вместе с тем остается нерешенной проблема снижения чувствительности подобных лазеров к нестабильности оси диаграммы направленности, интерференционным эффектам в оптических элементах, входящих в тракт системы автоподстройки частоты (АПЧ), и к обратным отражениям [2]. Кроме того, возникла проблема стабилизации оптической частоты активных элементов, имеющих повышенную разностную частоту более 4 МГц, используемых в конструкции частотно-стабилизированного зеемановского лазера типа ЛГН-212-1М и аналогичных

приборах. Проблема состоит в том, что все активные элементы с повышенной разностной частотой имеют несимметричную зависимость разностной частоты от расстройки резонатора, а время существования разностной частоты при рабочей температуре активного элемента составляет 2 – 3 с, что при использовании прежних методов стабилизации приводит к периодическому исчезновению разностной частоты. В данной работе предложено стабилизировать оптическую частоту таких активных элементов по опорному значению разностной частоты. Для этих целей разработана и исследована цифровая система стабилизации разностной частоты по ее опорному значению, осуществляющая управление основной подогревной спиралью в режимах прогрева и стабилизации [7].



Рисунок 4 – Разработанный частотно-стабилизированный зеемановский He-Ne лазер

На основе предложенных в диссертации научно-технических решений разработана новая конструкция (рис. 4) зеемановского частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера. Функциональная схема лазера представлена на рисунке 5. Отличительной особенностью данной конструкции лазера является то, что стабилизация оптической частоты осуществляется по опорному значению разностной частоты. Это позволило упростить оптическую схему прибора и объединить все ее оптические компоненты

в одном корпусе излучателя. Такое решение устраняет влияние нестабильности оси диаграммы направленности на стабильность оптической частоты излучения.

Кроме того, этот метод стабилизации снижает чувствительность прибора к обратным отражениям. В данной работе показано, что использование системой стабилизации зависимости разностной частоты от расстройки оптического резонатора в качестве дискриминационной кривой повышает стабильность разностной частоты не менее чем в 10 раз, а стабильность оптической частоты не менее чем в 5 раз. Для работы системы стабилизации с выхода активного элемента отводится часть мощности излучения, которая составляет 4 – 8 % от суммарной мощности (в лазере ЛГН-212-1М эта величина составляет 20 %). Основным недостатком данного метода стабилизации является то, что любые изменения разностной частоты, вызванные изменением магнитного поля магнитной системы, компенсируются терморегулировкой длины оптического резонатора, что приводит к перестройке оптической частоты излучения.

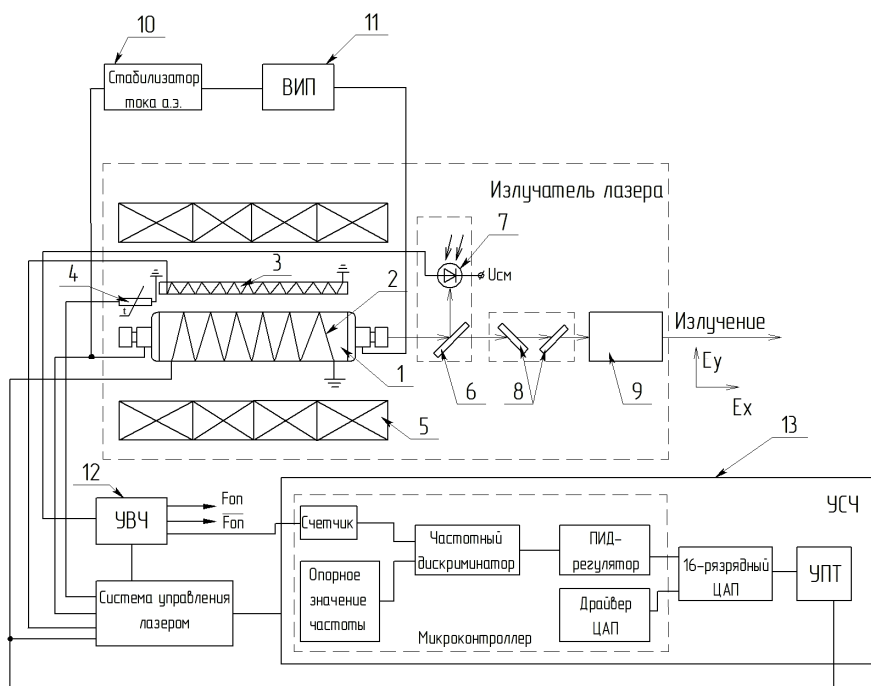


Рисунок 5 – Функциональная схема конструкции зеемановского частотно-стабилизированного He-Ne лазера:

1 – активный элемент, 2 – управляющая длиной активного элемента спираль, 3 – дополнительный нагревательный элемент, 4 – терморезистор, 5 – магнитная система, 6 – кварцевая пластина, 7 – фотоприемник, 8 – фазовые пластины, 9 – коллиматор, 10 – стабилизатор тока активного элемента, 11 – высоковольтный источник питания, 12 – усилитель высокой частоты (УВЧ), 13 – устройство стабилизации частоты УСЧ

Условия, в которых работают зеемановские лазеры, учитывают их чувствительность к изменению магнитных полей, поэтому на стабильность оптической частоты в процессе работы лазера будут оказывать влияние только изменение магнитного поля, связанное со старением магнитов, и уход характеристик излучения от номинального значения из-за старения активного элемента. Применение в цифровой системе управления программируемого контроллера позволяет использовать различные алгоритмы вычисления дрейфов разностной частоты и автоматически вводить поправки для ее опорного значения в процессе стабилизации.

Измерение разностной частоты микроконтроллером устройства УСЧ осуществляется методом подсчета количества импульсов, поступающих на асинхронный счетчик контроллера за определенное время. Для обеспечения точности измерения разностной частоты не хуже ± 100 Гц время измерения частоты составляет 0,01 с. С учетом того, что время, затрачиваемое микроконтроллером на вычисление сигнала управления нагревательной спиралью, составляет 0,002 с при тактовой частоте контроллера 32 МГц, суммарное время,

затрачиваемое на измерение разностной частоты и вычисление сигнала управления спиралью, равно 0,012 с. В соответствии с этим частота выборки регулируемой величины (разностной частоты) равна 83,3 Гц. Экспериментальные исследования показали, что при точности измерения разностной частоты ± 100 Гц и частоте выборки 83,3 Гц не возникает модуляции оптической частоты.

Как любое устройство автоматического управления, разработанное устройство стабилизации частоты также требует настройки для работы с конкретным активным элементом. Для целей оптимальной настройки системы стабилизации в данной работе разработана методика численного расчета необходимых параметров системы (коэффициента усиления, постоянных времени интегрирования и дифференцирования), основанная на обработке экспериментальных измерений разностной частоты и строящихся переходных характеристик системы. Кроме того, численное моделирование, основанное на разработанной методике расчета, позволило установить, что для устойчивой стабилизации разностной частоты по ее опорному значению минимальная разрядность цифровой системы управления должна быть не менее 16 бит, что обеспечивает минимальный шаг дискретизации управляющего напряжения спирали $U_{\text{Нагр max}}/2^{16}$. Увеличение шага дискретизации управляющего напряжения при частоте выборки входного сигнала 83,3 Гц приводит к чрезмерному перерегулированию (изменению длины оптического резонатора), что вызывает исчезновение разностной частоты. На рисунке 6 показаны результаты построения переходных характеристик системы управления с разными коэффициентами усиления при заданном опорном значении частоты 3,5 МГц. При переходной характеристике (а) коэффициент усиления в системе в 10 раз больше, чем при наличии характеристики (б).

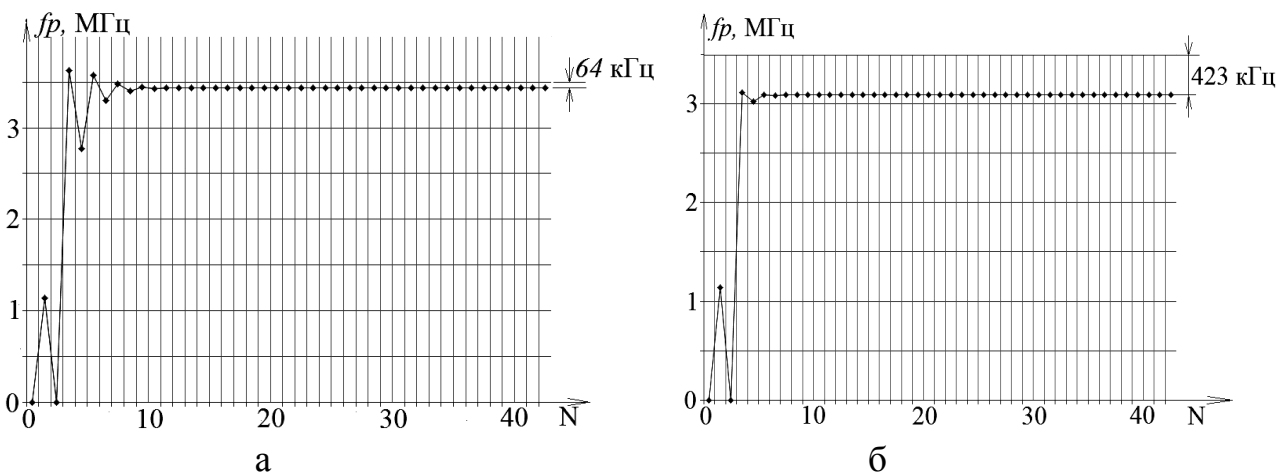


Рисунок 6 – Переходные характеристики автоматической цифровой системы стабилизации (N – номер выборки)

При большем коэффициенте усиления системы управления возрастает величина перерегулирования переходного процесса, но уменьшается уровень установившейся ошибки регулирования, что необходимо учитывать при настройке системы для работы с конкретным активным элементом.

В четвертой главе проведено экспериментальное исследование наиболее важных характеристик разработанного двухчастотного зеемановского He-Ne лазера [14], а также лазера повышенной мощности с выходным окном активного элемента в виде дисперсионной призмы. Для проверки работоспособности всех систем частотно-стабилизированного лазера в комплексе осуществлено измерение относительной нестабильности оптической частоты за 4 часа непрерывной работы лазера при нормальных условиях эксплуатации таких приборов. Измерения проводились методом сличения оптической частоты исследуемого лазера с оптической частотой опорного лазера [9, 11], стабилизированного по насыщенному поглощению в йоде. Полученная относительная нестабильность оптической частоты составила $1,1 \cdot 10^{-9}$ при нестабильности разностной частоты ± 2 кГц, что удовлетворяет на сегодняшний день требованиям, предъявляемым к таким лазерам. Кроме того, в данной главе показано, что новая оптическая схема излучателя исключила влияние нестабильности относительной диаграммы направленности на стабильность оптической частоты излучения.

Измерение нестабильности мощности He-Ne лазера с выходным окном активного элемента в виде призмы показало, что данное решение обеспечивает снижение нестабильности мощности не менее чем в 2 раза.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведено исследование совместного влияния поперечного и продольного магнитных полей на разностную частоту при перестройке оптического резонатора, что позволило получить теоретическую модель изменения разностной частоты от расстройки резонатора с учетом влияния поперечной и продольной составляющих магнитного поля в магнитной системе, выполненной из кольцевых магнитов с размещенным внутри нее активным элементом с внутренними зеркалами.

2. Модернизирован метод стабилизации разностной частоты по ее опорному значению, не имеющему частотных флуктуаций, что позволяет улучшить качество управления заданным параметром.

3. На основании анализа существующих конструкций He-Ne лазеров разработаны оптическая схема и конструкция излучателя на ее основе для реализации метода стабилизации разностной частоты.

4. Разработана цифровая система стабилизации оптической частоты по опорному значению разностной частоты, которая также может быть использована для стабилизации лазеров по другим параметрам, например по опорному значению интенсивности мощности излучения.

5. Разработана методика расчета параметров цифровой системы управления на основе анализа экспериментальных измерений характеристик излучателя.

6. На основании исследования тепловых режимов излучателей частотно-стабилизированных лазеров предложен и реализован способ уменьшения времени прогрева промышленных лазеров на основе использования дополнительного нагревательного элемента в конструкции излучателя.

7. Разработан и внедрен в производство стабилизированный зеемановский лазер с повышенной до 5 МГц разностной частотой, с увеличенной, по сравнению с аналогом в 1,5 раза, мощностью излучения и в 5 раз стабильностью оптической частоты.

8. Разработаны способ подавления конкуренции длин волн и методика расчета угла при вершине диспергирующей призмы, что позволило увеличить стабильность мощности промышленного гелий-неонового лазера повышенной мощности более чем в 2 раза.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в научных журналах, входящих в перечень ВАК

РФ:

1. Воробьев П. Г., Кондрахин А. А., Мочалина А. А., Чуляева Е. Г. Диспергирующая призма как селектор длин волн в He-Ne лазере // Вестник РГРТУ. № 3. Вып. 33. 2010. С. 69-72.

2. Воробьев П. Г., Чуляева Е. Г. Частотно-стабилизированные лазеры для точных измерений // Вестник РГРТУ. № 1. Вып. 39. Часть 2. 2012. С. 26 – 33.

3. Воробьев П. Г., Чуляева Е. Г. Влияние магнитного поля на разностную частоту двухчастотного стабилизированного He-Ne лазера // Вестник РГРТУ. № 2. Вып. 44. 2013. С. 82 – 86.

Работы, опубликованные в журналах и сборниках научных трудов не входящих в перечень ВАК РФ:

4. Воробьев П. Г., Керносов М. Ю., Кондрахин А. А., Чуляева Е. Г. Расчет параметров оптического резонатора мощного гелий-неонового лазера // Электроника: межвуз. сб. науч. тр. Рязань. 2009. С. 93–98.

5. Воробьев П. Г., Кондрахин А. А. Стабилизация мощности в He-Ne лазерах с внешними зеркалами // Вестник СПбО АИН. Вып. № 6. 2009. С. 41-48.

6. Воробьев П. Г., Керносов М. Ю., Кондрахин А. А., Чуляева Е. Г. Параметры генерации мощного гелий-неонового лазера // Сборник научных трудов II международной научной конференции «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития». Харьков – Казивели. 2009. С. 19-22.

7. Воробьев П. Г., Кондрахин А. А., Мельничук Г. В., Чуляева Е. Г. Методы цифрового управления параметрами частотно-стабилизированных He-Ne лазеров // Сборник докладов 22-й международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация». Том 1. Издательство политехнического университета. СПб. 2012. С. 181 – 195.

8. Воробьев П. Г., Кондрахин А. А., Мельничук Г. В., Улитенко А. И., Чуляева Е. Г. Исследование тепловых режимов частотно-стабилизированных He-Ne лазеров // Фотоника. Вып. № 4. 2012. С. 40 - 48.

9. Воробьев П. Г., Керносов М. Ю., Кондрахин А. А., Мельничук Г. В., Чуляева Е. Г. Методы измерения параметров частотно-стабилизированных лазеров // Сб. науч. тр. Международный научный семинар (Россия - КНР). Рязань. 2012. С. 166 - 170.

10. Воробьев П. Г., Тумаков Н. Ю., Кондрахин А. А., Мельничук Г. В., Чуляева Е. Г. Исследование влияния магнитного поля на формирование разностной частоты в зеемановских лазерах // Сб. науч. тр. 23-й международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация». Издательство политехнического университета. СПб. 2013. С. 90-102.

11. Воробьев П. Г., Керносов М. Ю., Кондрахин А. А., Мельничук Г. В., Чуляева Е. Г. Методы измерения параметров частотно-стабилизированных лазеров // Фотоника. Вып. № 3. 2013. С. 36 – 39.

12. Воробьев П. Г., Керносов М. Ю., Кондрахин А. А., Мельничук Г. В., Чуляева Е. Г. Малогабаритный высококогерентный He-Ne лазер для прецизионных изме-

рений // Сб. тр. международной научно-практической конференции «Инновации в науке, производстве и образовании». Рязань. 2013. С. 109-111.

13. He-Ne лазер. Воробьев П.Г. и др. Патент РФ на полезную модель № 94769, кл. H01S 3/00. Приоритет от 8.02.2010, опубл. 27.05.2010.

14. Частотно-стабилизированный газовый лазер. Воробьев П.Г. и др. Патент РФ на полезную модель № 112521. Приоритет от 15 июля 2011 г., опубл. 10.01.2012.

15. Активный элемент двухчастотного He-Ne лазера. Воробьев П.Г. и др. Патент РФ на полезную модель № 116701. Приоритет от 29 декабря 2011 г., опубл. 27.05.2012

ВОРОБЬЕВ ПАВЕЛ ГЕННАДЬЕВИЧ

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СТАБИЛИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК
ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 20.11.2013. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.