

На правах рукописи

Власов Александр Николаевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ СТАБИЛИЗАЦИИ
ЧАСТОТЫ He-Ne ЛАЗЕРОВ**

Специальность: 05.11.07 - оптические и оптико-электронные приборы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Санкт-Петербург - 2000

Работа выполнена в Балтийском Государственном Техническом
Университете (Военмехе) им. Д.Ф. Устинова

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
профессор В.Е. Привалов

Официальные оппоненты: В.А. Степанов, доктор физико-математических
наук, профессор

В.Т. Прокопенко, доктор технических
наук, профессор

Я.А. Фофанов, доктор физико-математических
наук

Ведущая организация: Физический институт им. Н.П. Лебедева РАН
г. Москва

Защита состоится « ____ » _____ 2000 г. в _____ часов
на заседании диссертационного совета ДР.....
при ЛИТМО
по адресу:

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛИТМО

Автореферат разослан « ____ » _____ 2000 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.т.н., профессор В.М. Красавцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие современных технологий в значительной степени определяется успехами в области создания частотно-стабилизированных He-Ne лазеров, использование которых обеспечивает наибольшую точность линейных и угловых измерений.

Частотно-стабилизированные He-Ne лазеры по сравнению с другими приборами аналогичного назначения (полупроводниковыми, CO₂-лазерами, аргоновыми и т.п.) имеют ряд преимуществ, среди которых можно отметить следующие:

- удобный спектральный диапазон излучений (видимый и ближний инфракрасный);
- небольшая потребляемая мощность;
- компактность конструкций;
- способность работать в широком диапазоне температур окружающей среды (от -50 до +50 °С).

Создание таких лазеров связано с решением двух фундаментальных проблем:

- формированием одночастотного излучения в рабочих модах излучения (одной или двух);
- стабилизацией частоты излучения в каждой из мод.

Решение первой проблемы связано с разработкой соответствующих конструкций излучателей, обладающих необходимыми параметрами для осуществления стабилизации частоты. Решение второй проблемы главным образом связано с разработкой эффективных методов и средств стабилизации частоты излучения, позволяющих снизить технические флуктуации частоты до необходимого для потребителей уровня.

Хотя к началу диссертационной работы было создано и исследовано довольно большое количество методов и средств стабилизации частоты излучения лазеров, системного подхода к этому вопросу не было. Кроме того, с учётом возмущающих факторов, воздействующих на измерительные системы, известный к началу диссертационной работы набор методов и средств стабилизации частоты не обеспечивал необходимый уровень стабильности в частотно-стабилизированных лазерах, поскольку не был известен ряд методов и средств, удовлетворяющий ряду требований потребителей, в частности таким, как возможность работы частотно-стабилизированных лазеров в жестких условиях эксплуатации. Необходимо также учитывать, что динамично развивающийся рынок постоянно предъявляет всё более высокие требования к разработчикам и производителям в части снижения себестоимости частотно-стабилизированных He-Ne лазеров.

Очевидно, что решение комплекса вопросов, связанных с разработкой новых и модернизацией существующих методов и средств стабилизации частоты излучения He-Ne лазеров относится к числу актуальных.

Цель настоящей работы состояла в восполнении неиспользованных к началу работы возможностей в части разработки новых методов и средств стабилизации частоты He-Ne лазеров и разработка системного подхода в создании частотно-стабилизированных лазеров, позволяющих разработчикам успешно проектировать, а потребителям - успешно эксплуатировать частотно-стабилизированные He-Ne лазеры.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих основных задач:

1. Разработка системного подхода к разработке методов и средств стабилизации частоты He-Ne лазеров.
2. Создание излучателей лазеров с управляемой частотой, обладающих минимальной шириной линии излучения, устойчивых к возмущающим внешним воздействиям, и систем АПЧ без поискового сигнала управляющих частотой лазера методом терморегулирования длины резонатора.
3. Разработка дополнительных методов и средств для обеспечения надёжной стабилизации частоты излучения лазеров с ячейками поглощения, позволяющих эффективно использовать конструкторские решения для лазеров с внутренними зеркалами и технику терморегулирования длины резонатора.
4. Определение допустимого уровня возмущающих воздействий, таких как вибрации, изменения температуры окружающей среды, конвекционные потоки, обратные отражения и нестабильности питающего напряжения.

Необходимо было также решить и ряд вспомогательных задач, таких как:

- улучшение параметров конструкции и характеристик излучателя лазера, состоящего из активного элемента и оптического резонатора, максимальное ослабление и экранирование внешних возмущающих воздействий;
- оптимизация параметров систем АПЧ, применение оптимальных систем, обладающих повышенной точностью привязки частоты излучения лазера к реперу;
- применение реперов с максимальной стабильностью нуля, снижение ширины дискриминационной кривой, повышение отношения сигнал/шум на выходе оптического дискриминатора;
- использование высокотехнологичных конструкторских решений,

позволяющих создавать частотно-стабилизированные лазеры с наименьшей себестоимостью.

Научная новизна выполненных исследований заключается в том, что в них впервые:

1. Разработана модель частотно-стабилизированного лазера, реализация которой обеспечивает наименьший уровень технических флуктуаций частоты излучения лазера в условиях одновременного воздействия возмущающих факторов на репер, оптическую длину резонатора при наличии шумов фотоприёмника оптического дискриминатора;
2. Получены соотношения, позволяющие рассчитать предельную нестабильность частоты излучения лазера в заданных условиях эксплуатации.
3. Найдено аналитическое выражение для оптимальной передаточной функции системы автоподстройки частоты лазера для каждого из используемых методов стабилизации.
4. Предложены, реализованы и экспериментально исследованы новые системы стабилизации частоты излучения лазеров с повышенной помехоустойчивостью и точностью регулирования.
5. Разработаны методы расчёта конструкций излучателей с внутренними зеркалами и систем автоподстройки лазеров нового поколения, стабилизированных методом терморегулирования длины резонатора.
6. Определены условия реализации метода терморегулирования длины резонатора в особо прецизионных лазерах с нелинейно поглощающими ячейками.

Научная новизна подтверждена рядом авторских свидетельств и патентов.

На защиту выносятся **следующие положения:**

1. Предельно достижимая стабильность частоты излучения лазеров с учётом технических флуктуаций в режиме стабилизации описывается теоретической моделью, учитывающей в качестве дестабилизирующих факторов флуктуации репера, длины резонатора и шумы фотоприемного устройства при условии оптимальности передаточной функции систем автоподстройки частоты для каждого конкретного значения дестабилизирующих факторов.
2. Регистрация флуктуаций частоты излучения лазера в виде набора значений нестабильностей частоты при различных временах усреднения задаёт взаимосвязь с коэффициентом разложения в ряд спектральной плотности флуктуаций частоты, которые в соответствии с теоретической моделью частотно-стабилизированного лазера однозначно определяют реализуемую оптимальную передаточную функцию системы стабилизации.
3. Введение преобразований изменений амплитуды и фазы сигнала ошибки в соответствующие изменения частоты опорного генератора системы АПЧ методом внесения реактивных составляющих повышает помехоустойчивость и точность стабилизации параметров лазера.
4. Основное влияние на кратковременную нестабильность частоты терморегулируемого лазера с внутренними зеркалами, используемого для прецизионных измерений, оказывают флуктуации тока разряда, шумы излучения и помехи на входе системы АПЧ, а основное влияние на долговременную нестабильность оказывают уходы репера в виде разбаланса мод.
5. Терморегулирование в особо прецизионных лазерах с нелинейно поглощающими ячейками требует использования дополнительных быстродействующих элементов подстройки частоты, например, на основе электромагнитного эффекта.

Практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов заключается в том, что они позволяют:

1. На этапе проектирования обоснованно выбрать требования к конструкции излучателя и систем автоподстройки частотно-стабилизированных лазеров.
2. Повысить стабильность и воспроизводимость частоты излучения лазеров.
3. Уменьшить габариты, массу, потребляемую мощность, повысить надёжность частотно-стабилизированных лазеров.
4. Решить проблему стабилизации частоты излучения лазера при воздействии дестабилизирующих факторов, соответствующих промышленным условиям эксплуатации;
5. Решить вопрос о выработке требований со стороны потребителей.

Практическая ценность результатов диссертационной работы подтверждается разработкой частотно-стабилизированных для прецизионных измерений, которые выпускаются с 1985 года по настоящее время на ряде предприятий России и Украины.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на IV Всесоюзной конференции по газовым лазерам, Рязань, 1974; на Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции “Применение ОКГ в приборостроении, машиностроении и медицинской технике”, Москва, 1976; на 1 Межотраслевой научно-технической конференции по газовым лазерам, Рязань, 1980; на Всесоюзной научно-технической конференции “Метрологическое обеспечение частотных и спектральных характеристик излучения лазеров.” Харьков, 1982; на II Межотраслевой научно-технической конференции по газовым лазерам,

Рязань, 1986; на семинаре Тихоокеанского океанологического института «Применение лазерных деформографов в сейсмоакустике», Владивосток, 1989; на пятом Петербургском семинаре-выставке "Лазеры для медицины и биологии", С.- Петербург, 1997; International Workshop on New Approaches to Hi-Tech Materials 97, Nondestructive Testing and Computer Simulations in Material Science and Engineering (NTDCS-97), St. Petersburg, Russia, 1997; International Workshop on New Approaches to Hi-Tech Materials 98. Nondestructive Testing and Computer Simulations in Material Science and Engineering (NTDCS-98), St. Petersburg, Russia, 1998; IX Conference on Laser Optics, St. Petersburg, Russia, 1998; на седьмом Петербургском семинаре-выставке "Лазеры для медицины и биологии", С.- Петербург, 1999; Third International Workshop on New Approaches to Hi-Tech: Nondestructive Testing and Computer Simulations in Material Science and Engineering (NTDCS-99), St. Petersburg, Russia, 1999.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 16 статьях, 23 авторских свидетельствах и патентах, 10 научно-технических отчётах и 12 тезисах докладов на конференциях.

Структура и объём работы. Работа состоит из Введения, пяти глав и Заключения. Она содержит 360 страниц, в том числе 245 страниц машинописного текста, 88 рисунков, 15 таблиц и список цитированной литературы из 217 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава первая. Данная глава является обзорной. В ней по имеющимся публикациям рассмотрены результаты разработок методов и средств стабилизации частоты излучения лазеров, способы измерения флуктуаций и сдвигов частоты.

Частота излучения лазера как и любого генератора является функцией времени и может быть рассмотрена в виде совокупности номинального значения, систематического изменения и статистических флуктуационных изменений. Систематическое изменение частоты связано с однонаправленными изменениями параметров, а статистические флуктуационные изменения - со случайными изменениями параметров лазера.

Основными характеристиками флуктуаций и сдвигов частоты лазеров являются нестабильности и погрешности воспроизведения частоты, определение которых регламентировано Государственными и отраслевыми стандартами. Измерение отклонений частоты производится обычно путём смешивания излучений двух и более лазеров на фотоприёмниках.

Уменьшение флуктуаций частоты излучения лазеров достигается путём введения стабилизации и улучшения её качества. Обобщенная схема частотно-стабилизированного лазера содержит активный элемент, размещенный в оптическом резонаторе, оптически связанный с ним оптический дискриминатор, в котором с помощью фотоприёмника отклонения частоты преобразуются в сигнал ошибки, выход фотоприёмника подключен ко входу системы автоподстройки частоты (АПЧ), выход которой связан с управляющим элементом оптического резонатора, подстраивающим частоту лазера в направлении к реперной

точке. Такая схема может быть дополнена системой пассивной стабилизации.

Описанные в литературе методы и средства стабилизации частоты классифицированы в данной главе на основе следующих существенных признаков: по режиму работы - различаются одночастотные и многомодовые лазеры; по типу оптических дискриминаторов - различаются лазеры с внутренними, внешними и смешанными дискриминаторами, последние включают в себя элементы как внешнего, так и внутреннего дискриминаторов. Введение классификации позволило более чётко проанализировать достоинства и недостатки каждого из конкретных методов и средств стабилизации.

Анализ результатов, содержащихся в литературных источниках, позволил выделить вопросы, возникающие при создании частотно-стабилизированных лазеров, в частности вопросы, связанные с повышением стабильности и воспроизводимости частоты. На основании этих вопросов были сформулированы задачи, решаемые в данной диссертационной работе.

Глава вторая. В этой главе представлена теория оптимального выбора параметров конструкций и составных частей частотно-стабилизированных He-Ne лазеров. В рамках этой теории построена модель частотно-стабилизированного лазера, найдены предельно достижимые значения стабильности и воспроизводимости частоты лазера в заданных условиях эксплуатации, синтезирована оптимальная передаточная функция лазерной системы, приведены обоснования выбора составных элементов частотно-стабилизированных лазеров.

Исходным пунктом построения модели частотно-стабилизированного лазера является установление взаимосвязи частотного

спектра сигнала ошибки на выходе оптического дискриминатора с флуктуациями частоты излучения лазера. Эта взаимосвязь в режиме стабилизации описывается соотношениями:

$$U_n = R'_n \cdot \Omega,$$

$$R'_n = \frac{U_{nmax}}{\beta_n},$$

$$\beta_n = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} R[\Omega_{nmax} + \Omega_M \psi(\omega_0 t)] \cdot \text{Sin}(n\omega_0 t) d\omega_0 t}{\left. \frac{\partial}{\partial \Omega} \int_{-\pi}^{\pi} R[\Omega + \Omega_M \psi(\omega_0 t)] \cdot \text{Sin}(n\omega_0 t) d\omega_0 t \right|_{\Omega=0}},$$

где U_n - амплитуда сигнала ошибки; n - номер рабочей гармоники системы автоподстройки (обычно $n=1$, или $n=3$); R'_n - коэффициент передачи оптического дискриминатора; U_{nmax} - максимальное значение сигнала ошибки; Ω - расстройка частоты излучения лазера; β_n - постоянный для заданного типа лазера коэффициент, имеющий размерность оптической частоты; $R[*]$ - дискриминационная кривая оптического дискриминатора; Ω_{nmax} - расстройка частоты излучения, соответствующая максимальному значению сигнала ошибки; Ω_M - амплитуда модуляции частоты излучения; $\psi(\omega_0 t)$ - модулирующая функция, например, $\psi(\omega_0 t) = \text{Sin}\omega_0 t$; ω_0 - частота модуляции; t - текущее время.

При стабилизации частоты с помощью систем АПЧ выделены следующие основные факторы, ограничивающие стабильность частоты излучения лазера: $\Omega_L(j\omega)$ - внешние воздействия на оптическую длину резонатора лазера; $\Omega_M(j\omega)$ - возмущения оптической длины резонатора лазера сигналом модуляции; $\Omega_P(j\omega)$ - шумы фотоприёмника и входных цепей системы АПЧ; $\Omega_R(j\omega)$ - флуктуации частоты репера. Каждое из воздействий приводит к соответствующему вкладу в результирующее

отклонение частоты излучения лазера $\Omega(j\omega)$, которое регистрируется в виде вариаций частоты излучения $\Delta\nu(j\omega)$, рис. 1.

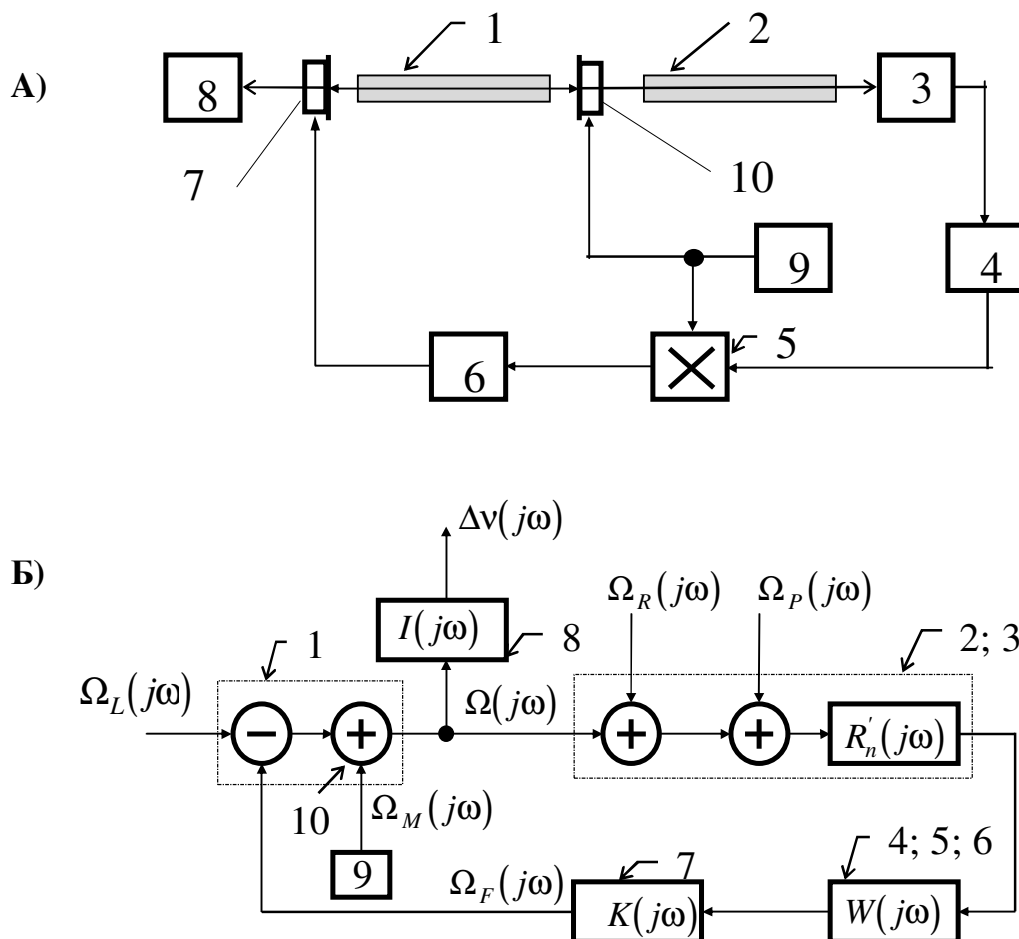


Рис. 1. Функциональная (А) и структурная (Б) схемы частотно-стабилизированного лазера:

1 - излучатель; 2 - оптический дискриминатор; 3 - фотоприёмник; 4 - узкополосный усилитель; 5 - синхронный детектор; 6 - усилитель постоянного тока; 7 - исполнительный элемент; 8 - устройство регистрации частоты излучения лазера; 9 - генератор опорного напряжения; 10 - модулирующий элемент.

Структурная схема на рис. 1 приведена в сопоставлении с типичной функциональной схемой частотно-стабилизированного лазера. Здесь $R'_n(j\omega)$ - передаточная функция репера; $W(j\omega)$ - передаточная функция системы АПЧ; $K(j\omega)$ - передаточная функция исполнительного устройства;

$I(j\omega)$ - передаточная функция устройства регистрации частоты.

Регистрируемая вариация частоты излучения в этом случае может быть записана в операторной форме $\Delta\nu(j\omega)$ и представлена соотношениями, которые составляют основу теоретической модели частотно-стабилизированного лазера:

$$\Delta\nu(j\omega) = I(j\omega) \times$$

$$\times \left\{ \Omega_L(j\omega)[1 - \Phi(j\omega)] - [\Omega_R(j\omega) + \Omega_P(j\omega)]\Phi(j\omega) + \Omega_M(j\omega) \right\},$$

$$\Phi(j\omega) = \frac{R'(j\omega)K(j\omega)W(j\omega)}{1 + R'(j\omega)K(j\omega)W(j\omega)},$$

где $\Phi(j\omega)$ - передаточная функция замкнутой лазерной системы.

Следствием вышеуказанных соотношений являются формулы для предельно достижимой в заданных условиях эксплуатации нестабильности частоты излучения - $\sigma(\tau)$ и оптимальной передаточной функции системы АПЧ - $W_0(j\omega)$:

$$\sigma(\tau) = \frac{U_N}{\nu_0 R' \sqrt{2F\tau}},$$

$$W_0(j\omega) = \frac{\sqrt{2\overline{\Omega_L^2} F / T}}{j\omega U_N K(j\omega)},$$

где U_N - напряжение шумов на входе системы АПЧ; F - полоса частот, которую занимают эти шумы; τ - время усреднения устройств регистрации; ν_0 - номинальная частота излучения; $\overline{\Omega_L^2}$ - средний квадрат отклонений частоты излучения в свободном режиме генерации; T - средний период этих отклонений.

Кроме того, указанные соотношения позволяют найти долговременную нестабильность и погрешность воспроизведения частоты излучения лазера. Эти параметры характеризуются сдвигами частоты

излучения $\overline{\Delta\nu}$, определяемыми с помощью формул:

$$\overline{\Delta\nu} = \overline{\Omega}_R + \overline{\Omega}_P,$$
$$\overline{\Omega}_P = \frac{\beta_n}{U_{nmax}} \sum_i U_i / \prod_{j=1}^i k_j,$$

где $\overline{\Omega}_R$ - систематический сдвиг частоты репера; $\overline{\Omega}_P$ - систематический сдвиг частоты лазера, вносимый системой АПЧ; U_i - паразитный сигнал на выходе i -го элемента системы АПЧ; k_j - коэффициент усиления j -го элемента системы АПЧ.

На основе проведенного анализа сформулированы требования к элементам конструкции и составным частям частотно-стабилизированных лазеров:

1. Активные элементы должны генерировать излучение без посторонних поперечных мод, иметь стабильную юстировку, жесткий оптический резонатор, повышенные точности наполнения и состава газовой смеси, должны отсутствовать страты и другие источники внутренние шумы, должны обеспечивать стабильность поляризации и возможность управления частотой излучения лазера с необходимой плавностью перестройки.
2. Высоковольтные источники питания должны обеспечивать жесткие требования к стабильности тока, пониженные уровни пульсаций на первой и высших гармониках частоты преобразования и на второй и высшей гармониках питающей сети, повышенные требования по электромагнитной совместимости с другими электронными системами.
3. Системы автоподстройки должны иметь оптимальную передаточную функцию и иметь элементы с минимальным дрейфом параметров.
4. Выбор исполнительных элементов должен обеспечивать необходимый диапазон и точность автоподстройки частоты излучения лазеров.

Глава третья посвящена разработке методов и средств стабилизации частоты излучения He-Ne лазеров с внутренними зеркалами, в которых в качестве репера используется линия усиления гелий-неоновой смеси. В данной разновидности лазеров в качестве основного используется метод терморегулирования длины оптического резонатора. Рассмотрены результаты разработок и исследований лазеров типа ЛГН-303, лазера с повышенной воспроизводимостью частоты для гравиметров, конструкций широкого применения со стабилизацией по уровню мощности, зеемановских лазеров, лазеров с фазоанизотропным элементом, многоволновых лазеров и терморегулируемого кольцевого лазера.

Для лазеров типа ЛГН-303 со стабилизацией методом терморегулирования по заданному соотношения интенсивностей ортогонально поляризованных мод экспериментально установлено, что газоразрядные He-Ne трубки с длиной резонатора порядка 24 см, рис. 2, работают в режиме генерации двух ортогонально поляризованных мод, причём с как с сохранением поляризаций в резонаторных модах, так и с перескоками поляризаций. Предпочтение отдавалось трубкам с сохранением поляризаций мод.

На основе теории, изложенной во 2-й главе, и экспериментальных данных вычислена ожидаемое значение нестабильности частоты излучения и найдена оптимальная передаточная функция системы АПЧ. Вычислены также параметры системы стабилизации: частота среза системы, определяющие её быстродействие, номиналы резисторов и конденсаторов в цепях обратной связи операционных усилителей системы АПЧ, постоянная времени медленнодействующего канала контура стабилизации. Это позволило спроектировать компактную и надёжную базовую конструкцию лазера для прецизионных измерений.

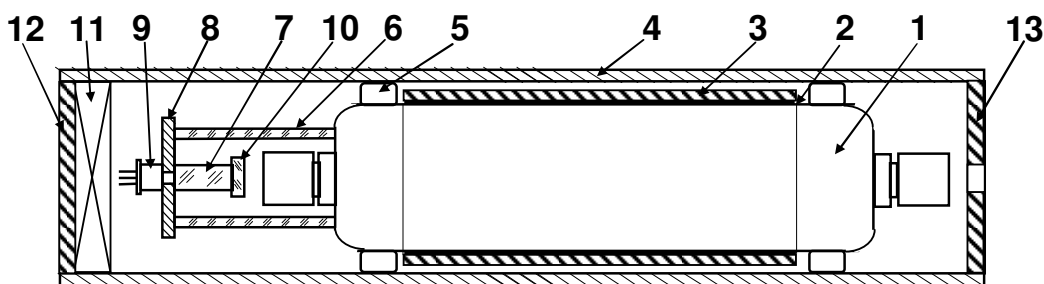


Рис. 2. Конструкция излучателя лазера ЛГН-303.

На боковую поверхность газоразрядной трубки 1 намотана бифилярная спираль 2. Для увеличения устойчивости к разъюстировке сверху наложена теплораспределительная рубашка 3 из трёх слоёв алюминиевой фольги и вся эта конструкция закреплена в пермалловом корпусе 4 с помощью заливки компаундом 5. К газоразрядной трубке 1 через стеклянную втулку 6 на основании 8 укреплен двулучепреломляющий кристалл 7 и фотодиод 9. Перед кристаллом 7 установлен фильтр красного излучения 10. На концах корпуса 4 установлены торцевые заглушки 12 и 13 на одной из которых закреплён блок балластных резисторов 11.

Показано экспериментально, что лазеры типа ЛГН-303 обладают относительной нестабильностью частоты излучения на уровне $2 \cdot 10^{-10}$ за 15 минут и $2 \cdot 10^{-9}$ за 8 часов работы, что близко к расчётным значениям. Диапазон отработки внешних температурных изменений для таких лазеров составляет ± 7 К, при максимальной подводимой мощности к нагревателю 4 Вт.

Проведено также исследование ширины линии излучения лазера ЛГН-303 при модуляции тока разряда трубки. Уширение линии излучения составило 50 кГц на каждый процент амплитуды модуляции тока. При этом на частотах модуляции меньших 5 Гц происходит резкое снижение девиации частоты излучения благодаря отработке возмущений системой АПЧ. Собственная ширина линии излучения лазера при нулевой внешней модуляции тока разряда не превышало 20 кГц, что намного уже ширины линии излучения лазеров с внешними зеркалами.

Теоретические и экспериментальные исследования долговременной

нестабильности и погрешности воспроизведения частоты излучения лазеров типа ЛГН-303 показали, что наиболее существенными факторами, приводящими к сдвигам частоты излучения, являются дрейфы параметров оптического дискриминатора и элементов системы АПЧ при изменении температуры окружающей среды. Поддержка температуры с точностью 1 К обеспечивает сдвиг не более 1 МГц, что соответствует относительному значению долговременной нестабильности порядка $2 \cdot 10^{-9}$.

Повышение долговременной стабильности и воспроизводимости частоты излучения достигается в лазерах с внутренними зеркалами с уменьшенной длиной оптического резонатора. Такие лазеры могут быть использованы для абсолютных гравиметров. Улучшение параметров достигается за счёт существенного увеличения крутизны оптического дискриминатора. На рис. 3 показан спектр излучения лазера с

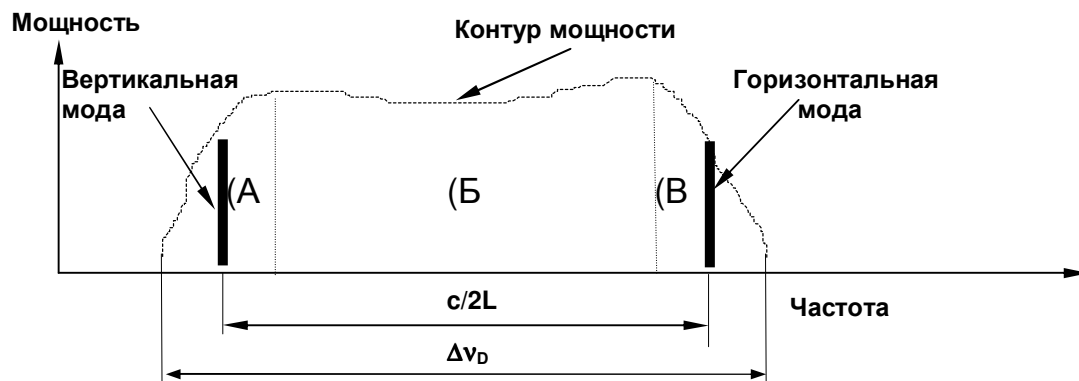


Рис. 3. Спектральные характеристики лазерной трубки с ультракоротким оптическим резонатором:

- (А) - область существования моды с вертикальной поляризацией;
- (Б) - область «перескоков» поляризации;
- (В) - область существования моды с горизонтальной поляризацией.

ультракоротким резонатором в свободном режиме генерации: частотное расстояние между соседними модами резонатора $c/2L=1300$ МГц, а ширина доплеровской линии $\Delta\nu_D = 1500$ МГц. В результате область существования двух поляризаций - очень узкая, порядка ± 50 кГц, что обеспечивает очень

высокую крутизну оптического дискриминатора. Дополнительным средством повышения воспроизводимости является использование двойного контура терморегулирования, благодаря чему обеспечивается стабилизация частоты при одной и той же температуре, задаваемой термодатчиком.

Метод терморегулирования длины резонатора применен также в зеемановских лазерах. Для этого был разработан специальный активный элемент, эскиз которого представлен на рис. 4.

В результате сдвиги частоты при $\Delta T \approx 3$ °С составляют примерно 0,5 МГц, что соответствует воспроизводимости частоты от включения к включению прибора на уровне $\sim 10^{-9}$.

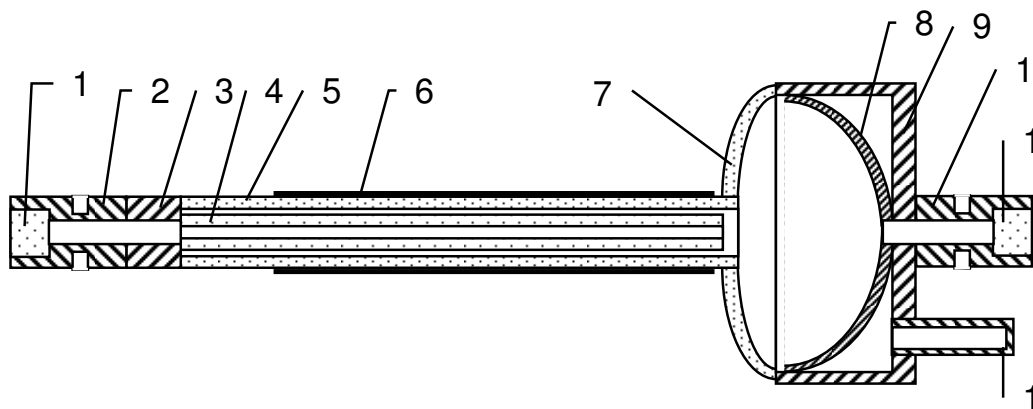


Рис. 4. Эскиз терморегулируемого активного элемента для зеемановского лазера:

1- выходное зеркало; 2 - юстировочный патрубок с перетяжкой из сверхпластичного материала 42НАВИ; 3 - коваровый патрубок; 4 - стеклянный капилляр; 5 - стеклянная оболочка; 6 - нагревательный элемент (резистивная плёнка; 7 - стеклянный конус; 8 - катод; 9 - торцевая коваровая чашка; 10 - юстировочный патрубок; 11 - плотное зеркало; 12 - технологический патрубок для откачки.

Для широкого применения в измерительных системах в диссертационной работе рассмотрены дополнительные варианты лазера с ультракоротким резонатором. Особенностью таких конструкций является максимально возможное упрощение техники стабилизации и технологии

изготовления частотно-стабилизированных лазеров, что позволяет существенно снизить себестоимость изготовления подобных лазеров при сохранении достаточно высоких показателей стабильности и воспроизводимости частоты излучения.

Созданный активный элемент пригоден для зеемановских лазеров как с продольным, так и поперечным магнитным полем.

Особое внимание в рассматриваемой главе уделено частотным методам привязки частоты в зеемановских лазерах, обеспечивающих высокие характеристики стабилизации при относительно простых конструкциях излучателей и систем АПЧ.

В качестве перспективных конструкций в диссертации рассмотрены методы терморегулирования в двухчастотных лазерах с фазоанизотропными элементами. При этом терморегулирование осуществляется не только для подстройки оптической частоты, но и для управления разностной частотой.

Рассмотренные в главе двухволновые лазеры удобны для использования в абсолютных линейных измерениях и отличаются использованием двойного контура терморегулирования с точкой начальной привязки, задаваемой температурой оптического резонатора. Это обеспечивает высокую воспроизводимость частоты излучения от включения к включению лазера.

В главе также рассмотрен кольцевой лазер с повышенной начальной частотной расстройкой. Повышение частоты расстройки достигается за счёт генерации встречных волн на соседних модах оптического резонатора. Стабилизация частоты такого лазера осуществляется методом терморегулирования длины резонатора.

Глава четвёртая посвящена разработке методов и средств стабилизации

частоты излучения компактных терморегулируемых He-Ne лазеров с ячейками поглощения.

В этой главе приведены результаты исследований промышленно выпускавшихся лазеров типа ЛГ-149-1, стабилизированных по внешней зеемановской ячейке, рассчитаны параметры системы стабилизации и получены экспериментальные данные по стабильности частоты, подтверждающие данные расчётов. Показано, что при воздействии возмущающих факторов в виде модуляции тока разряда активного элемента наблюдаются отклонения частоты, наибольшие всплески которых возникали при совпадении частоты возмущений с единичной и половинной частотой опорного генератора. На основе проведенных исследований созданы терморегулируемые излучатели с повышенной устойчивостью к возмущающим факторам.

Значительное внимание в рассматриваемой главе уделено лазерам, стабилизированным методом терморегулирования длины резонатора по пикам внутренней нелинейно поглощающей йодной ячейки. Рассмотрены особенности терморегулирования при узком резонансе. Показано, для осуществления метода терморегулирования при узких резонансах необходимо использование дополнительного быстродействующего исполнительного элемента. Сформулированы требования к дополнительному исполнительному элементу для лазера, стабилизированного методом терморегулирования по йодной ячейке: постоянная времени дополнительного исполнительного элемента должна быть не менее чем в три раза меньше характерного времени стабилизации τ_c , что соответствует требованию к собственной частоте f_c средства подстройки оптической частоты

$$f_c \geq \frac{3(d\nu/dt)}{2\pi\nu_0\sigma_c}.$$

Найдено, что при типичных значениях параметров $f_c \geq 2$ кГц.

Такое средство на основе электромагнитного эффекта было разработано автором. Оно показано на рис. 5 в составе терморегулируемого излучателя: это элементы 12÷16.

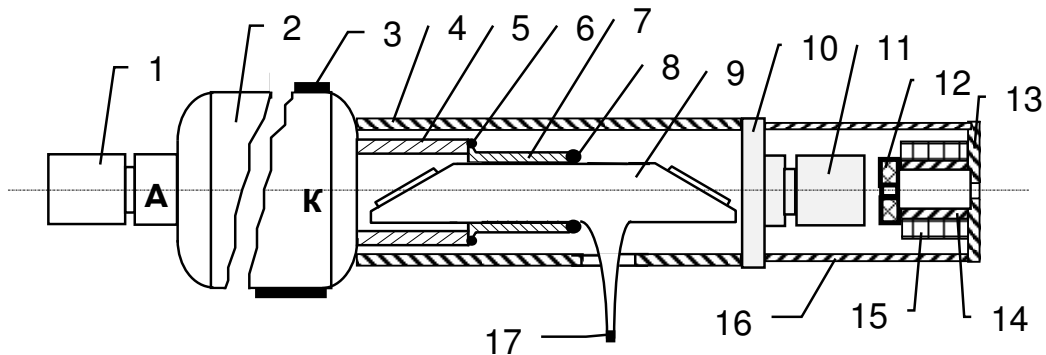


Рис. 5. Терморегулируемый излучатель с йодной ячейкой:

1 - анодный юстируемый патрубок с зеркалом оптического резонатора; 2 - баллон газоразрядной трубки - несущая часть оптического резонатора («А» -анод, «К» - катод); 3 - нагреватель; 4 - коваровая трубка; 5 - патрубок катодного торца; 6 - сварной шов; 7 - коваровый патрубок; 8 - стеклоцементный шов; 9 - J_2 -ячейка; 10 - коваровый диск; 11 - катодный юстируемый патрубок с зеркалом оптического резонатора; 12 - постоянный магнит; 13 - торцевой магнитопровод; 14 - внутренний цилиндрический магнитопровод; 15 - управляющая обмотка быстродействующего исполнительного элемента; 16 - внешний цилиндрический магнитопровод; 17 - охлаждаемый отросток ячейки с йодным конденсатом.

Для повышения контрастности пиков в главе рассмотрен линейный He-Ne/ J_2 -лазер, в котором возможен режим конкурирующих встречных волн по аналогии с кольцевым лазером, рис. 6. Он содержит активный элемент 1 и поглощающую ячейку 2, размещённые внутри оптического резонатора, состоящего из сферического зеркала 3 с пьезокорректором 4 и двух пластин 5 и 6, расположенных под углом φ относительно друг друга, и систему 7 стабилизации частоты.

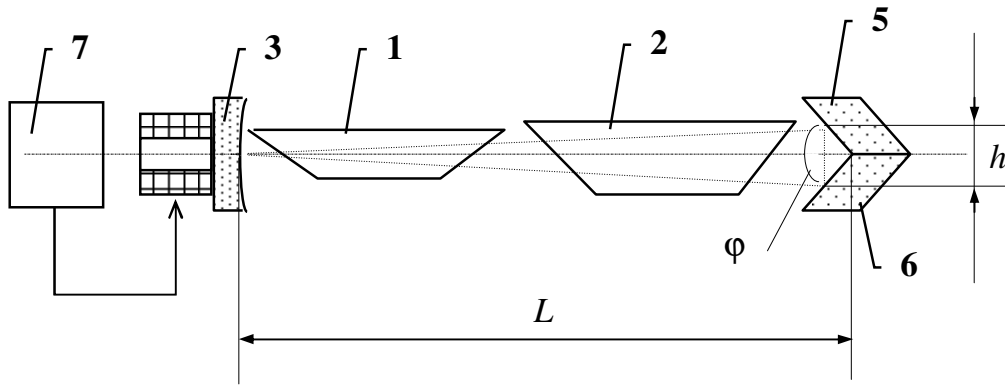


Рис. 6. Частотно-стабилизированный He-Ne/J₂ лазер со встречными бегущими волнами во внутренней ячейке поглощения.

Для разнесения пучков света в области пространства поглощающей ячейки между рабочими поверхностями пластин 5 и 6 выбирается угол φ , меньший $\pi/2$ радиан. Величина угла φ составляет

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \frac{h}{2L},$$

где h - расстояние между центрами рабочих поверхностей пластин; L - расстояние между отражателями. При типичных размерах $h=3 \cdot 10^{-3}$ м, $L=0,4$ м угол φ составляет 1,5632963 радиан или $89^{\circ}34'$.

Конструкции, а также методы и средства стабилизации частоты излучения терморегулируемых He-Ne/CH₄ лазеров аналогичны таковым для He-Ne/J₂ лазеров.

Особое внимание в главе уделено разработке систем автоподстройки частоты с повышенной помехоустойчивостью и точностью стабилизации, включая цифровые системы.

Повышение помехоустойчивости достигается посредством введения частотной модуляции в поисковый сигнал в зависимости от амплитуды и фазы сигнала ошибки, рис 7.

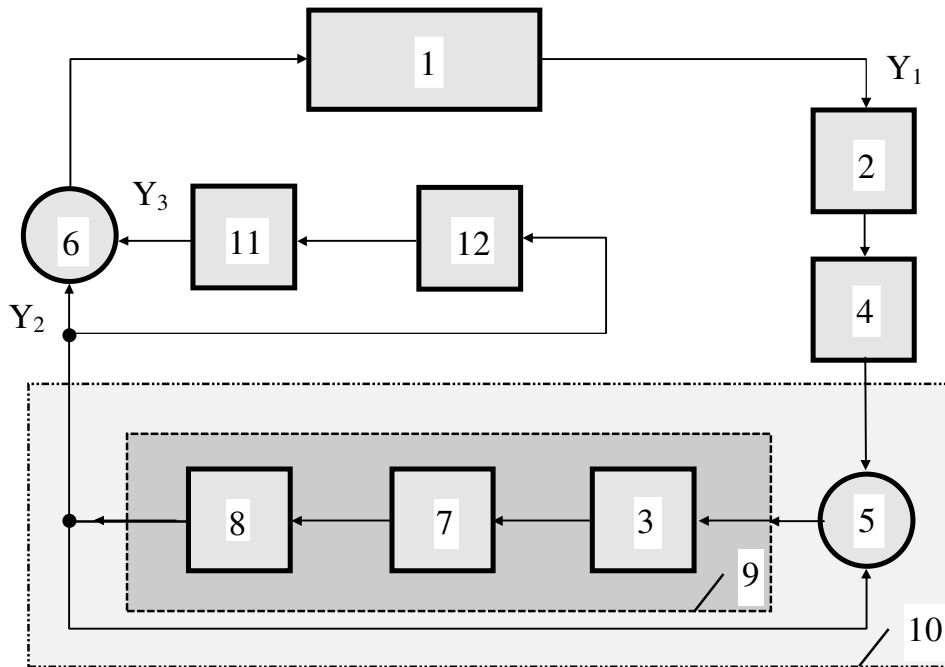


Рис. 7. Функциональная схема системы стабилизации частоты лазера с частотной модуляцией (ЧМ) поискового сигнала.

Эта система содержит: 1 - объект регулирования, представляющий собой излучатель с оптическим дискриминатором, 2 - фильтр, 3 - усилитель, 4 - фазосдвигающий блок, 5 - первый сумматор, 6 - второй сумматор, 7 - частото задающий блок, 8 - ограничитель амплитуды сигнала, 9 - функциональный преобразователь, 10 - генератор поискового сигнала, 11 - интегратор, 12 - частотный детектор.

Показано, что при $\Pi \ll \Omega_c$, где Π - полоса частото задающего блока, а Ω_c - частота среза системы АПЧ, помехоустойчивость рассматриваемой системы возрастает в $2\Omega_c/\Pi$ раз (примерно на один-два порядка).

На основе устройства, рис. 7, разработана цифровая система стабилизации, позволяющая увеличить точность регулирования и тем самым повысить долговременную стабильность и воспроизводимость частоты излучения лазеров.

В связи с тем, что стабильность тока разряда существенно влияет на характеристики лазера, в главе существенное внимание уделено прецизионным источникам питания. Рассмотрены однотоктные и двухтоктные схемы, приведены конкретные схемотехнические решения.

Глава пятая. Данная глава посвящена особенностям эксплуатации частотно-стабилизированных лазеров. В ней излагаются практические методы измерения стабильности и воспроизводимости частоты посредством оптического гетеродинирования трёх лазеров с представлением достаточно большого количества результатов исследований промышленных образцов частотно-стабилизированных He-Ne лазеров. Представлены также результаты измерения длины волны излучения лазеров типа ЛГН-303 методом метки нулевых биений с He-Ne/J₂ лазером «Стандарт-V».

Существенное внимание в главе уделено рассмотрению влияния внешних возмущающих факторов, таких как изменения температуры и давления окружающей среды, колебания питающего напряжения, воздействие вибраций, акустических колебаний и турбулентных потоков, а также обратные отражения. Установлено, что существуют определённые расстояния от резонатора лазера, при котором воздействие обратных отражений уменьшается.

На основе проведенного анализа определены допустимые уровни внешних возмущающих воздействий, допустимые при эксплуатации частотно-стабилизированных лазеров, обосновывается типичный набор параметров, записываемый в технические условия на частотно-стабилизированные лазеры.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Изложены научно обоснованные технические решения в области частотно-стабилизированных лазеров, внедрение которых вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса, в частности, позволило создать ряд частотно-стабилизированных He-Ne лазеров для прецизионных линейных и угловых измерений.
2. Создана теоретическая модель частотно-стабилизированных лазеров, в рамках которой установлена взаимосвязь частотного спектра сигнала на выходе оптического дискриминатора с флуктуациями частоты излучения в частотно-стабилизированных лазерах, найдены коэффициенты взаимосвязи для различного типа лазеров.
3. Получена передаточная функция оптимальной системы АПЧ, позволяющая создавать частотно-стабилизированные лазеры с наименьшими уровнями флуктуаций частоты излучения.
4. Определены предельно достижимые значения кратковременной нестабильности частоты излучения в частотно-стабилизированных лазерах, которые могут быть получены в заданных условиях эксплуатации при наличии внешних возмущающих факторах, таких как вибрации, акустические колебания, турбулентные потоки, обратные отражения.
5. Получены соотношения для сдвигов частоты, определяющих долговременную нестабильность и погрешность воспроизведения частоты излучения в стабилизированных лазерах, в том числе подробно проанализированы сдвиги, вносимые системами АПЧ; показаны пути повышения долговременной стабильности и воспроизводимости частоты излучения стабилизированных лазеров.

6. Выработаны требования к конструкции излучателей, оптических дискриминаторов и систем АПЧ, что позволяет осуществлять оптимальное проектирование частотно-стабилизированных лазеров.
7. Установлено, что в случае стационарности случайного процесса флуктуаций частоты излучения существует взаимная однозначность соответствия спектральной плотности $S(\omega)$ и дисперсии $D(\tau)$, получаемой при различных временах усреднения τ , что позволяет корректировать исходные данные для оптимизации систем АПЧ.
8. Предложены и опробованы методы частотной модуляции поискового сигнала в системах АПЧ, что позволяет создавать цифровые системы АПЧ и на один-два порядка повысить помехоустойчивость и точность привязки частоты в реперу в частотно-стабилизированных лазерах.
9. Разработан ряд лазеров с внутренними зеркалами, стабилизированных методом терморегулирования длины резонатора, в которых применены новые методы и средства стабилизации частоты.
10. Проведены теоретические и экспериментальные исследования флуктуаций и сдвигов частоты излучения лазеров, стабилизированных по ячейкам поглощения.
11. Проведены экспериментальные исследования характеристик различных частотно-стабилизированных He-Ne лазеров в реальных условиях эксплуатации при использовании их в научных исследованиях и промышленности
12. Разработаны конструкции лазеров с внутренними нелинейно поглощающими ячейками поглощения (He-Ne/J₂, He-Ne/CH₄), стабилизированные методом терморегулирования длины резонатора. Разработан универсальный подход к проектированию частотно-стабилизированных лазеров любых типов для любых условий эксплуатации.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. А. с. № 661504 с приоритетом от 4.03.1974 г. Система экстремального регулирования// А.Н. Власов.

2. А. с. № 649273 с приоритетом от 10.12.1976 г. Газоразрядная трубка газового лазера// А.Н. Власов, В.А. Перебякин, Г.Т. Тимошенко.

3. А. с. № 679064 с приоритетом от 16.02.1977 г. Устройство стабилизации частоты лазера// А.Н. Власов, В.В. Теселкин.

4. А. с. № 646734 с приоритетом от 4.01.1977 г. Газовый лазер// А.Н. Власов, В.А. Перебякин, Г.Т. Тимошенко.

5. А. с. № 719301 с приоритетом от 3.05.1978 г. Система экстремального регулирования// А.Н. Власов.

6. А. с. № 888069 с приоритетом от 10.03.1980 г. Система экстремального регулирования// А.Н. Власов.

7. А. с. № 888070 с приоритетом от 20.03.1980 г. Система экстремального регулирования// А.Н. Власов.

8. А. с. №893100 с приоритетом от 21.08.1981 г. Газоразрядная трубка газового лазера// А.Н. Власов, А.Я. Паюров, В.А. Перебякин, Г.Т. Тимошенко.

9. А. с. № 1251768 с приоритетом от 18.10.1983 г. Частотно-стабилизированный газовый лазер// А.Н. Власов, В.Е. Привалов.

10. А. с. № 1202476 с приоритетом от 25.04.1984 г. Устройство для стабилизации частоты лазера// С.П. Борисовский, А.Н. Власов, А.В. Козлов.

11. А. с. № 1396898 с приоритетом от 13.04.1984 г. Частотно-стабилизированный лазер// А.Н. Власов, В.А. Перебякин, В.Е. Привалов, Г.Т. Тимошенко.

12. А. с. № 1335099 с приоритетом от 22.04.1985 г. Двухчастотный газовый лазер// С.П. Борисовский, А.Н. Власов, С.Ю. Поляков, Г.Т. Тимошенко.

13. А. с. № 1327760 с приоритетом от 2.12.1985 г. Частотно-стабилизированный лазер// А.Н. Власов, К.С. Гайнутдинов, Г.Т. Тимошенко.

14. А. с. 1302971 с приоритетом от 8.12.1986 г. Газовый лазер// А.Н. Власов, В.А. Перебякин.

15. А. с. № 1403944 с приоритетом от 19.11.1986 г. Частотно-стабилизированный лазер// А.Н. Власов, В.А. Перебякин, Г.Т. Тимошенко.

16. А. с. № 1505134 с приоритетом от 16.06.1986 г. Фотоприёмное устройство// А.Н. Власов, Е.И. Чернов.

17. А. с. № 1477205 с приоритетом от 24.02.1986 г. Кольцевой газовый лазер// Д.П. Бельский, А.Н. Власов, В.Е. Привалов.

18. А. с. № 1445494 с приоритетом от 31.10.1986 г. Способ стабилизации частоты излучения двухмодового лазера// А.Н. Власов, В.П. Инденко, Г.Т. Тимошенко.

19. А. с. № 1324547 с приоритетом от 15.03.1987 г. He-Ne лазер// А.Н. Власов, В.Е. Привалов.

20. А. с. № 1560009 с приоритетом от 8.06.1987 г. Частотно-стабилизированный лазер// А.Н. Власов, П.С. Крылов, А.В. Миронов, В.Е. Привалов.

21. А. с. № 1535307 с приоритетом от 4.03.1988 г. Двухчастотный газовый лазер// А.Н. Власов, С.Ю. Поляков, Г.Т. Тимошенко, И.С. Чуляев, Е.Г. Чуляева.

22. А. с. № 1549436 с приоритетом от 8.11.1989 г. Двухмодовый стабилизированный лазер// А.Н. Власов, С.Ю. Поляков, Г.Т. Тимошенко, Ю.М. Яковлев.

23. Патент СССР № 1830231 с приоритетом от 28.03.1991 г. Устройство для получения высокотемпературной плазмы// А.Н. Власов.

24. Технический отчёт № 2/10-74. Рег. № 3357917, Рязань: НПО «Плазма», 1974 г. Повышение долговременной стабильности частоты серийно выпускаемого ОКГ ЛГ-159// С.П. Борисовский, А.Н. Власов, В.А. Верейкин, Р.В. Кострикова, Е.Г. Чуляева.

25. Технический отчёт № 38/10-75. Рег. № Ф01852, Рязань: НПО «Плазма», 1975 г. Создание одночастотного стабилизированного He-Ne лазера для использования в интерферометрических системах// С.П. Борисовский, А.Н. Власов, В.А. Верейкин, В.И. Новиков, В.В. Тесёлкин.

26. Технический отчёт № 80/110-76. Рег. № Ф04958, Рязань: НПО «Плазма», 1976 г. Модернизация прибора ЛГ-149 с целью повышения его долговечности до 3000 ч и сохраняемости до 2-х лет// С.П. Борисовский, А.Н. Власов, Р.П. Самсонова, Н.В. Рынина, Р.Е. Шустова, Е.Г. Чуляева.

27. Технический отчёт № 53/110-77. Рег. № Х03677, Рязань: НПО «Плазма», 1977 г. Разработка экспериментальных образцов лазеров с перестраиваемой частотой излучения на молекулярных газах высокого давления// А.Н. Власов, В.И. Новиков, А.Я. Паюров, В.А. Перебякин, Н.П. Суханова, В.Д. Туров.

28. Технический отчёт № 26/110-80. Рег. № Х06144, Рязань: НПО «Плазма», 1980 г. Исследование возможностей и принципов создания одночастотного и перестраиваемого лазера на СО// А.Н. Власов, В.И. Новиков, А.Я. Паюров, В.А. Пожарский, Н.П. Суханова.

29. Технический отчёт № 59/110-82. Рег. № Ф12495/0000468, Рязань: НПО «Плазма», 1982 г. Модернизация прибора ЛГ-149-1 с целью повышения стабильности его частоты// С.П. Борисовский, А.Н. Власов, В.А. Кокорев, Л.Я. Маковеева, М.Н. Мишустина, Н.Н. Павлова, В.С. Трусов, Е.Г. Чуляева.

30. Научно-технический отчёт о НИР № 45/210-83, Рязань: НПО «Плазма», 1983 г. Создание метода безопасной юстировки газовых лазеров// А.Н. Власов, В.В. Кюн, Ю.К. Маковеев.

31. Научно-технический отчёт № 37/110-84. Рег. № Ф20259/3002935, Рязань: НПО «Плазма», 1984 г. Разработка одночастотного лазера для многоцелевых лазерных информационных комплексов контроля кинематической точности оборудования и качества прецизионных деталей взамен лазеров ЛГ-77 и ЛГ-301// И.В. Агеева, А.Н. Власов, В.И. Гордеев, Л.В. Мишков, Н.П. Павлова, С.Ю. Поляков, Е.Г. Чуляева, Ю.М. Яковлев.

32. Технический отчёт № 3/110-86. Рег. № Ф29095/4005384, Рязань: НПО «Плазма», 1986 г. Разработка одночастотного стабилизированного лазера с повышенной надёжностью и уменьшенными массогабаритными показателями для измерительного оптико-механического оборудования// А.Н. Власов, Т.М. Емельянова, В.А. Перебякин, В.Г. Самородов, О.В. Тарасова, Г.Т. Тимошенко.

33. Научно-технический отчёт № 14/110-90. Рег. № Ф32303, Рязань: НПО «Плазма», 1990 г. Разработка частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера с мощностью излучения 3 мВт для интерферометрии// С.П. Борисовский, А.Н. Власов, Т.М. Емельянова, В.А. Касельский, С.М. Кузнецов, В.А. Перебякин, С.Ю. Поляков, В.Г. Самородов, О.В. Тарасова, Г.Т. Тимошенко.

34. Власов А.Н., Гримблатов В.М., Теселкин В.В. Анализ сигнала ошибки в системах стабилизации частоты газовых лазеров. – В кн.: Тезисы докладов и рекомендаций научно-технических конференций и семинаров по электронной технике. Газовые лазеры. Серия 4. Электроракуумные и газоразрядные приборы. Вып.1(25). – М.: Электроника, 1974, с.24.

35. Борисовский С.П., Власов А.Н., Верейкин В.А. и др. Стабильность и воспроизводимость частоты генерации промышленных

одночастотных лазеров. – В кн.: Всесоюзная межвузовская научно-техническая конференция “Применение ОКГ в приборостроении, машиностроении и медицинской технике” 24-27 февраля 1976 г. Тезисы докладов. – М.: МВССО, МГП НТО ПРИБОР ПРОМ, МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1976, с.148.

36. Борисовский С.П., Власов А.Н., Перебякин В.А. и др. Исследование воспроизводимости частоты одночастотного стабилизированного лазера ЛГ-149-1. – В кн.: Тезисы докладов и рекомендаций научно-технических конференций, совещаний и семинаров по электронной технике. Серия 2. “Лазерная техника и оптоэлектроника”. Выпуск 1 (147). Непрерывные газовые лазеры. (Материалы 1 Межотраслевой научно-технической конференции. Октябрь 1980 г.). – М.: ЦНИИ “Электроника”, 1980.

37. Власов А.Н., Перебякин В.А., Чуляева Е.Г. Определение корреляционной функции и спектральной плотности флуктуации частоты излучения лазера по ряду значений его нестабильности частоты. – В кн.: Тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции “Метрологическое обеспечение частотных и спектральных характеристик излучения лазеров.” – Харьков: ГК СССР по стандартам, Харьковское областное правление НТО Приборпром, НТО “Метрология”, 1982, с.38-39.

38. Борисовский С.П., Власов А.Н., Поляков С.Ю., Чуляева Е.Г., Яковлев Ю.М. Частотно-стабилизированные лазеры для интерференционных измерений. - В кн.: Тезисы докладов и конференций. Серия 11. Октябрь 1986 г. Москва: ЦНИИ «Электроника», 1986, с. 7.

39. Власов А.Н., Перебякин В.А., Тимошенко Г.Т., Яковлев Ю.М. Технические характеристики и эксплуатационные возможности стабилизированных He-Ne лазеров с внутренними зеркалами. - В кн.: Применение лазерных деформографов в сейсмоакустике./ Тезисы доклада

школы-семинара. Владивосток, 19-21 декабря 1989 г.// Академия наук СССР. Дальневосточное отделение. Тихоокеанский океанологический институт. Владивосток, 1989, с. 17-18.

40. Власов А.Н. Высоковольтный источник для гелий-неоновых лазеров и биологических исследований. - В кн.: Тезисы докладов пятого Петербургского семинара-выставки "Лазеры для медицины и биологии", Российский центр лазерной физики, Балтийский Государственный технический Университет, Научно-исследовательский центр "Репер", С.-Петербург, 1997 г.

41. Vlasov A.N. Single-Frequency He-Ne Laser for Linear Measurements. - *International Workshop on New Approaches to Hi-Tech Materials 97. Nondestructive Testing and Computer Simulations in Material Science and Engineering (NTDCS-97). Program, abstracts. 9-13 June 1997. St. Petersburg, Russia.*

42. Vlasov A.N. Stability and Reproducibility of Single-Frequency He-Ne Laser for Linear Measurements. - *International Workshop on New Approaches to Hi-Tech Materials 98. Nondestructive Testing and Computer Simulations in Material Science and Engineering (NTDCS-98). Preprints & Program, 8-12 June, A3 (1998), St. Petersburg, Russia.*

43. Vlasov A.N. Single-Frequency Stabilized He-Ne Lasers with Ultra-Short Optical Resonators. - *Technical program of IX Conference on Laser Optics, St. Petersburg, p. 59 (1998).*

44. Власов А.Н. Источник питания гелий-неонового лазера для прецизионной диагностической медицинской аппаратуры. - В кн.: Тезисы докладов седьмого Петербургского семинара-выставки "Лазеры для медицины и биологии", Российский центр лазерной физики, Балтийский Государственный технический Университет, Научно-исследовательский центр "Репер", С.-Петербург, 1999 г.

45. Vlasov A.N. Two wave frequency stabilized lasers. - *Third International Workshop on New Approaches to Hi-Tech: Nondestructive Testing and Computer Simulations in Material Science and Engineering (NTDCS-99). Preprints & Program, 7-11 June, A7. Published by SPAS, St. Petersburg, Russia (1999).*

46. Власов А.Н., Гримблатов В.М., Теселкин В.В. Исследование спектра сигнала на выходе оптического дискриминатора в системах стабилизации частоты генерации газовых лазеров. – Электронная техника. Серия 4. Электроракуумные и газоразрядные приборы, 1973, Вып.12, с.34-41.

47. Власов А.Н., Теселкин В.В. Анализ влияния флуктуаций репера и длины резонатора на нестабильность частоты газового лазера и требования к системам автоподстройки. – Квантовая электроника, 1976, т.3, №6, с. 1299-1306.

48. Борисовский С.П., Власов А.Н., Верейкин В.А. и др. Измерение стабильности и воспроизводимости частоты генерации газовых лазеров. – Измерительная техника, 1977, №8, с. 45-48.

49. Власов А.Н. Долговременная нестабильность и невоспроизводимость частоты газового лазера и требования к системам автоподстройки. – Квантовая электроника, 1978, т.5, №7, с. 1518-1524.

50. Власов А.Н., Теселкин В.В. Флуктуации частоты генерации He-Ne лазера, стабилизированного по линии поглощения метана. – Метрология, 1978, №2, с. 55-57.

51. Власов А.Н., Касельский В.А., Перебякин В.А., Поляков С.Ю. Стабилизация частоты излучателя с внутренними зеркалами ИЛГН-202. – Квантовая электроника, 1984, т.11, с. 709-714.

52. Власов А.Н., Крылов П.С., Привалов В.Е. Исследование влияния возмущений в активной среде на уширение линии излучения

стабилизированного He-Ne лазера с внутренними зеркалами. – Оптика и спектроскопия, 1985, т.58, вып.3, с.717-719.

53. Власов А.Н., Перебякин В.А., Поляков С.Ю., Привалов В.Е. Долговременная стабильность и воспроизводимость частоты He-Ne лазера с внутренними зеркалами. – Квантовая электроника, 1986, т.13, № 2, с. 320-325.

54. Власов А.Н., Перебякин В.А., Привалов В.Е. Стабилизированные гелий-неоновые лазеры с внутренними зеркалами. - Обзоры по электронной технике. Серия 11, выпуск 7 (1206), М., ЦНИИ «Электроника», 1986. - 50 с.

55. Власов А.Н. Исследование технических флуктуаций частоты в стабилизированных He-Ne лазерах и создание лазера для прецизионных измерений // Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Рязань: НПО «Плазма», 1986, 198 с.

56. Власов А.Н., Крылов П.С., Миронов А.В., Привалов В.Е. Получение узкой спектральной линии излучения (0,63 мкм) с минимальной погрешностью воспроизведения длины волны.// Оптика и спектроскопия, 1987, Т.62, вып 6, с. 1339-1341.

57. Власов А.Н. Исследование технических флуктуаций частоты в стабилизированных He-Ne лазерах и создание лазера для прецизионных измерений // Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. Ленинград: ЛЭТИ, 1987, 16 с.

58. Власов А.Н., Привалов В.Е., Чуляева Е.Г. Влияние модуляции тока разряда на нестабильность частоты стабилизированного гелий-неонового лазера с внешней ячейкой поглощения // Оптика и спектроскопия, 1994, Т.76, вып 4, с. 677-680.

59. Vlasov A.N. Single-Frequency He-Ne Laser for Linear Measurements, - *in International Workshop on New Approaches to Hi-Tech Materials:*

Nondestructive Testing and Computer Simulations in Material Science and Engineering, Alexander I. Melker, Editor, Proceeding of SPIE Vol. 3345, page 37-39 (1998).

60. Vlasov A.N. Stability and Reproducibility of Single-Frequency He-Ne Laser for Linear Measurements, - *in International Workshop on New Approaches to Hi-Tech Materials: Nondestructive Testing and Computer Simulations in Material Science and Engineering, Alexander I. Melker, Editor, Proceeding of SPIE Vol. 3687, page 23-25 (1999).*

61. Власов А.Н., Привалов В.Е. Воспроизводимость частоты терморегулируемого He-Ne лазера при различных критериях начального прогрева // Приборы и системы управления, 1999, № 10, с. 40-41.