

На правах рукописи

РГБ ОА

- 7 ФЕВ 2000

КУЗНЕЦОВ Андрей Петрович

**ВНУТРИЛАЗЕРНЫЙ ПРИЕМ ОПТИЧЕСКОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ И РАЗРАБОТКА ДВУХКАНАЛЬНОГО  
ЛАЗЕРНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА НА ЕГО ОСНОВЕ**

01.04.21 – лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва 2000

Работа выполнена в Московском государственном инженерно-физическом институте (техническом университете)

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, с.н.с. Козин Г.И.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Киселев М.И.  
доктор физико-математических наук, с.н.с. Чистяков А.А.,

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

Защита состоится «1» марта 2000 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета К053.03.08 в МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31, тел. 323-91-67, 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан «27» 01 2000 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.ф.-м.н., с.н.с.



Корнилов С.Т.

Подписано в печать 20.01.2000 г. Тираж 100 экз. Заказ 29

Типография МИФИ, Каширское шоссе, 31

B 343.41,03  
B 343.4,03

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Лазеры, обладая высокой спектральной интенсивностью, исключительно высокой монохроматичностью и направленностью излучения, вот уже более 30 лет являются основным инструментом в разнообразных оптических информационных, измерительных и диагностических приложениях. Лазеры используются для прецизионного контроля перемещений, в интерферометрии, дальнометрии и локации, в оптических линиях связи и для оптической обработки информации. Использование лазеров в спектроскопии и газоанализе позволило достичь чувствительности и спектрального разрешения, не доступных традиционным методам. При использовании для измерений показателя преломления, вызванного изменениями свойств среды, лазерные интерферометры служат эффективным инструментом в различных химических и физических исследованиях, в качестве средств контроля за состоянием среды в разнообразных технологических процессах. Ярким примером такого рода измерений является применение лазерных интерферометрических методов для диагностики плазмы.

Достоинствами лазерных методов измерения и диагностики являются: бесконтактность, дистанционность, высокая чувствительность и точность измерений. Пространственное разрешение измерений может быть доведено до величины порядка длины волны зондирующего излучения.

В большинстве задач дистанционных лазерных измерений и диагностики существует проблема приема и демодуляции слабого излучения при его распространении в поглощающих средах или после отражения от удаленных искусственных или естественных объектов. В этих условиях чувствительность и точность измерений определяется характеристиками используемой фотоприемной системы. В лазерных измерительных системах традиционно используют три основных метода:

- Метод прямой фоторегистрации;
- Гетеродинный прием. Принимаемый оптический сигнал смешивается с сигналом местного генератора (гетеродина), отличающимся по частоте, и возникающие биения усиливаются и демодулируются радиотехническими методами;
- Гомодинный прием. Принимаемый оптический сигнал смешивается с излучением местного гетеродина с той же частотой и фазой.

В гетеродинных приемниках чувствительность ограничивается шумами мощности и нестабильностью частоты генерации лазера-

гетеродина. В большинстве случаев чувствительность гетеродинного приема выше, чем при прямой фоторегистрации, и только в особых условиях при использовании фотоприемников с высоким внутренним усилением или при использовании предварительного усиления в оптических квантовых усилителях (ОКУ) они одного порядка. Наряду с высокой чувствительностью гетеродинный метод обладает большой информативностью по сравнению с прямой фоторегистрацией, так как позволяет помимо амплитудной, регистрировать также частотную и фазовую модуляцию излучения.

Весьма перспективным методом регистрации слабого оптического излучения является метод внутрिलाзерного приема. В этом случае информация содержится в изменении параметров генерации лазера при попадании в его резонатор регистрируемого излучения. Внутрिलाзерный прием обладает всеми достоинствами традиционного лазерного гетеродинирования, но обеспечивает существенно более высокую чувствительность. (При том же уровне шумов, определяемых в обоих случаях, шумами мощности и частоты лазера, величина регистрируемого сигнала при внутрिलाзерном приеме выше вследствие ряда факторов, которые будут рассмотрены далее.) Кроме того, внутрिलाзерный прием обладает качественным отличием: воздействие внешнего излучения изменяет как мощность, так и частоту генерации лазера и, поэтому, кроме традиционного канала регистрации по изменению мощности, существует второй канал регистрации - по изменению частоты генерации. Как известно, точность частотных измерений гораздо выше амплитудных. Использование двух каналов регистрации позволяет измерять одновременно две величины, например, перемещение отражателя и коэффициент отражения от его поверхности. Внутрिलाзерный прием отраженного излучения может проводиться либо самим лазером-излучателем, либо другим однотипным лазером, что обеспечивает богатые функциональные возможности измерений и диагностики. На этой основе могут быть разработаны новые измерительные методики, обеспечивающие высокую чувствительность, точность, быстрое действие, большой динамический диапазон измерений и новые функциональные возможности. Широкие возможности использования метода внутрिलाзерной регистрации в различных диагностических и измерительных методиках [1\*-5\*] и показанные им высокие эксплуатационные характеристики [6\*-9\*] подтверждают актуальность детального изучения этого метода и разработки на его основе новых дистанционных измерительных методик.

## Цель и задачи диссертационной работы.

Целями диссертационной работы являются:

1. Разработка метода внутрिलाзерного приема оптического излучения с помощью одномодовых и двухмодовых лазеров и изучение их характеристик с целью повышения чувствительности приема.
2. Разработка двухканального лазерного интерферометра на основе внутрिलाзерного приема отраженного излучения.

В соответствии с поставленными целями в диссертации решаются следующие задачи:

1. Теоретическое и экспериментальное исследование характеристик одномодовых лазеров с различной инерционностью активных сред при инжекции внешнего излучения.
2. Теоретическое и экспериментальное исследование характеристик двухмодовых лазеров с различным характером поляризаций излучения генерирующих мод при инжекции внешнего излучения.
3. Теоретическое и экспериментальное исследование характеристик и закономерностей распространения излучения с нарушенной пространственной когерентностью.
4. Повышение чувствительности внутрिलाзерного приема частично когерентного излучения при использовании широкоапертурных приемопередающих телескопических систем.
5. Исследование характеристик двухмодового лазера-приемника при перекрестном воздействии отраженного излучения на генерируемые моды.
6. Разработка двухканального лазерного интерферометра и исследование его рабочих характеристик.
7. Применение разработанного интерферометра при исследовании динамики показателя преломления плазмы эрозийного капиллярного разряда в воздухе.

Научная новизна результатов, полученных в диссертации, состоит в следующем:

1. Показано, что лазер в качестве приемника оптического излучения является двухканальным активным гетеродинным приемником, включающим в себя функцию квадратичного детектирования сиг-

нала. Информативными сигналами служат изменения мощности и частоты генерации лазера-приемника.

2. Показано, что увеличение чувствительности внутрилазерного приема по сравнению с обычным лазерным гетеродином определяется: накоплением поля отраженной волны в резонаторе лазера-приемника, и автодинным усилением сигнала, величина которого возрастает при приближении к порогу генерации.
3. Выявлен резонансный характер реакции мощности на внешний оптический сигнал лазера-приемника с сильной инерционностью активной среды.
4. Показано, что конкуренция мод в активной среде двухмодового лазера является дополнительным фактором, увеличивающим чувствительность внутрилазерного приема.
5. Получены экспериментальные зависимости фактора межмодовой связи от межмодового расщепления в лазерах с различным характером поляризаций мод.
6. Показано, что отраженное лазерное излучение представляет собой частично когерентный гауссов пучок с волновым параметром, определяющимся длиной волны, радиусом перетяжки и количеством пятен когерентности.
7. Показано, что при внутрилазерном приеме частично когерентного излучения эффективно действующий радиус входной апертуры приемопередающего телескопа может быть доведен до величины  $\sim 10$  см, что повышает эффективность внутрилазерного приема в  $10^3$  раз по сравнению с приемом без телескопа.

Практическая ценность результатов диссертационной работы:

1. Предложен метод формирования двух информативных сигналов в лазерном интерферометре с использованием перекрестного взаимодействия мод лазера-приемника.
2. Разработан и испытан двухканальный квадратурный лазерный интерферометр, обладающий высокими рабочими характеристиками.
3. Интерферометр использован при исследованиях динамики показателя преломления плазмы эрозийного капиллярного разряда в воздухе.
4. Результаты работы могут быть использованы для разработки но-

вых методик и создания на их основе высокочувствительных измерительных и диагностических дистанционных приборов и комплексов для решения научных и практических задач:

- в научном приборостроении - при разработке высокочувствительных, широкодиапазонных и быстродействующих интерферометрических измерительных средств;
- в авиакосмической отрасли - при разработке оптических локаторов и дальномеров нового поколения;
- на газопроводном транспорте, на газохранилищах, в городских газовых сетях - при разработке дистанционных газоанализаторов для мобильного контроля утечек, в том числе при использовании автомобильных и воздушных средств;
- в диагностике плазмы, и в частности на крупномасштабных установках УТС типа Токамак;
- в медицине - при разработке новых диагностических приборов и методик, связанных с контролем за состоянием тканей.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Факторами, определяющими чувствительность и быстродействие внутрिलाзерного приема, являются:
  - накопление поля внешней волны в резонаторе;
  - автодинное усиление сигнала;
  - инерционность активной среды;
  - конкуренция мод в активной среде.
2. Отраженное лазерное излучение представляет собой частично когерентный гауссов пучок с волновым параметром, определяющимся длиной волны, радиусом перетяжки и количеством пятен когерентности.
3. При внутрिलाзерном приеме частично когерентного излучения эффективно действующий радиус входной апертуры приемопередающего телескопа может быть доведен до величин  $\sim 10$  см, что повышает эффективность внутрिलाзерного приема в  $10^3$  раз по сравнению с приемом без телескопа.
4. Рабочие характеристики двухканального интерферометра:
  - Минимальный эффективный коэффициент отражения по мощности при котором интерферометр сохраняет работоспособность:  $\rho^2 = 6.4 \cdot 10^{-11} \text{ Гц}^{-1/2}$
  - Чувствительность измерений оптической длины при единичном коэффициенте отражения:  $\Delta L = 1.4 \cdot 10^{-9} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$

- Временное разрешение: ~ 10 нс.

#### Доклады на конференциях

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих научных конференциях и семинарах:

1. XXIV Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС. (17-21 февраля, Звенигород, 1997)
2. Научная сессия МИФИ-98 (21-23 января, МИФИ, Москва, 1998)
3. XI конференция по физике газового разряда. (июнь, Рязань, 1998)
4. Российский семинар «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды» (8-9 июня, Москва, 1998)
5. Научная сессия МИФИ-99 (18-22 января, МИФИ, Москва, 1999)
6. Международная конференция «Физика атмосферного аэрозоля» (12-17 апреля, Москва, 1999)
7. III международная научно-техническая конференция «Инженерно-физические проблемы авиационной и космической техники» (1-4 июня, Егорьевск, 1999)
8. International symposium Plasma'99 "Research and applications of plasmas" (July 7-9, Warsaw, Poland, 1999)
9. 6 Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и проблемы измерений» (23-25 ноября, Москва, 1999)
10. Научная сессия МИФИ-2000 (17-21 января МИФИ, Москва, 2000)

#### Публикации

По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ, из них 4 статьи и 11 тезисов докладов. Их список приведен в конце автореферата.

#### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из 4 глав, содержит 122 страницы, включая 54 рисунка, 2 таблицы и список литературы из 173 пунктов.



## Содержание работы

Во введении к диссертации дается краткая характеристика работы, сформулирована ее цель и актуальность.

В литературном обзоре (глава 1) проведен сравнительный анализ чувствительности и функциональных возможностей методов когерентного (оптическое гетеродинирование и гомодинирование, внутрिलाзерный прием) и некогерентного (прямая фоторегистрация) приема слабого оптического излучения. Показано, что в большинстве случаев чувствительность когерентного приема выше чувствительности прямой фоторегистрации и только в особых условиях при использовании фотоприемников с высоким внутренним усилением или при использовании преддетекторного усиления в ОКУ они одного порядка. Наряду с высокой чувствительностью когерентные методы обладают большей информативностью по сравнению с прямой фоторегистрацией, так как позволяют, помимо амплитудной, регистрировать еще частотную и фазовую модуляцию в излучении. Внутрिलाзерный прием обладает всеми достоинствами традиционного лазерного гетеродинирования, но при этом обеспечивает существенно более высокую чувствительность и значительно более широкие функциональные возможности измерительных методик, реализованных на его основе. На основании проведенного анализа формулируются основные задачи, которые необходимо решить в диссертации.

Глава 2 посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию амплитудно-частотных характеристик одномодовых и двухмодовых лазеров с различной инерционностью активных сред при инжекции слабого внешнего излучения, и изучению факторов, позволяющих повысить чувствительность внутрिलाзерного приема. Теоретический анализ проведен в общей постановке, когда лазер-приемник, в качестве которого может быть использован, как одномодовый, так и двухмодовый лазер, регистрирует внешнее излучение, например, излучение другого однотипного лазера, и в частности собственное отраженное излучение. В результате расчета определены величины изменения частоты  $\delta\omega$  и мощности  $\rho$  генерации лазера-приемника с безынерционной активной средой, при инжекции в него внешнего излучения отраженного от отражателя, установленного на расстоянии  $\ell$  от лазера-приемника:

В случае одномодовой генерации лазера-приемника:

$$\delta\omega = \rho \frac{\Delta\Omega}{2} \sin(\Omega t - 2k_e \ell) \quad (1)$$

$$p^{(l)} = \rho \sqrt{P_{in} P_{out}} \frac{\Delta\Omega}{\Delta\Omega} \frac{\eta_0}{\eta_0 - 1} \frac{\Gamma_1}{\sqrt{\Gamma_1^2 + f^2}} \cos(ft - 2k_e \ell) \quad (2)$$

В случае двухмодовой генерации (регистрируемое излучение имеет ту же поляризацию, что и  $p_1$ ):

$$p_1^{(ll)} = p^{(l)} \frac{1}{S} \frac{a}{a+b} \frac{\Gamma_2}{\sqrt{\Gamma_2^2 + f^2}}, \quad p_2^{(ll)} = -\frac{b}{a} p_1^{(ll)}, \quad \Gamma_2 = S\Gamma_1$$

Здесь,  $\rho$  - эффективный амплитудный коэффициент отражения внешнего отражателя,  $P_{out}$  - мощность регистрируемого излучения,  $P_{in}$  - средняя мощность генерации лазера-приемника,  $f$  - разность частот регистрируемого излучения с волновым числом  $k_e$  и излучения лазера-приемника,  $\Delta\Omega = c(1 - \rho_1 \rho_2)/L$  - полоса резонатора лазера длиной  $L$ , образованного зеркалами с амплитудными коэффициентами отражения  $\rho_1$  и  $\rho_2$ ,  $c$  - скорость света, величина  $\Delta\Omega = (c/L)(\sigma_2^2/\rho_2)$  может рассматриваться как полоса фиктивного резонатора с коэффициентом пропускания выходного зеркала  $\sigma_2$ , и не имеющего других потерь,  $\Gamma_1 = \Delta\Omega(\eta_0 - 1)/\eta_0$  - полоса реакции одномодового лазера-приемника на внешнее излучение,  $\eta_0$  - превышение ненасыщенного усиления над потерями,  $S = (a-b)/(a+b)$  - фактор межмодовой связи,  $a$  - параметр собственного насыщения усиления,  $b$  - параметр перекрестного насыщения, слабо отличающийся от  $a$ .

Выражение (2) показывает, что регистрация на лазер является гетеродинной. Об этом свидетельствует линейная зависимость  $\rho$  от амплитудного коэффициента отражения или корневая - от мощности регистрируемого излучения. В то же время лазерный гетеродин является нелинейным, выполняющим функцию квадратичного фотодетектора обычных оптических гетеродинов. Гетеродинный сигнал  $\rho$  формируется уже в активной среде лазера, а роль фотодетектора заключается в фотоэлектрическом преобразовании сигнала. Амплитуда модуляции мощности может достигать очень больших значений вблизи порога генерации ( $\eta_0 \rightarrow 0$ ), величина  $\eta_0/(\eta_0 - 1)$  определяет автодинное усиление при внутрилазерном приеме. Отношение полос в (2) свидетельствует о том, что в резонаторе лазера накапливается поле отраженной волны, как в интерферометре Фабри-Перо. При использовании двухмодовых лазеров чувствительность внутрилазерного приема значительно повышается за счет конкуренции мод в активной среде. Повышение определяется величиной  $1/S$ , для лазеров с сильной конкуренцией  $S \sim 10^{-1} - 10^{-2}$ . Однако, при этом, в  $S$  раз уменьшается полоса  $\Gamma_2$ .

Выводы теоретического анализа были проверены в эксперименте. На рис.1,2 представлены экспериментально полученные зависимости амплитуды изменения мощности в одномодовом лазере-приемнике (He-Ne лазер с  $\lambda=3.39$  мкм) от мощности регистрируемого излучения и средней мощности лазера-приемника.

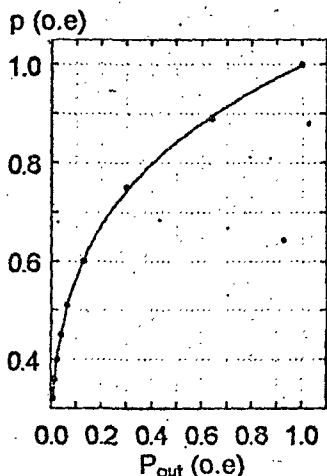


Рис.1 Зависимость амплитуды изменения мощности генерации лазера-приемника от мощности внешнего излучения  $P_{out}$

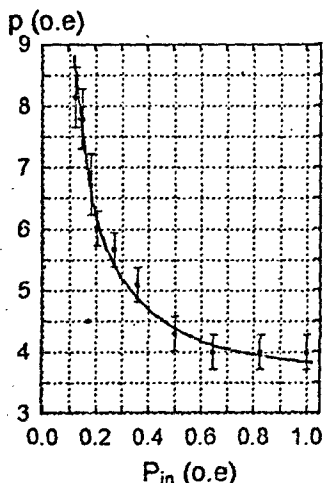


Рис.2 Зависимость амплитуды изменения мощности генерации лазера-приемника от средней мощности генерации  $P_{in}$

Были проведены экспериментальные исследования характеристик двухмодовых лазеров при их использовании для внутрилазерного приема излучения. Использовался He-Ne зеemanовский лазер и He-Ne лазер с фазоанизотропным резонатором ( $\lambda=3.39$  мкм) с генерацией на круговых и линейных ортогонально поляризованных модах, соответственно.

На рис.3 представлены экспериментальные зависимости  $\rho^{(II)}/\rho^{(I)}$  от межмодового расщепления. Как известно, уменьшение межмодового расщепления приводит к увеличению межмодовой конкуренции и, соответственно, к уменьшению  $S$ . Видно, что при  $\omega_{1,2}=10$  МГц амплитуда реакции двухмодового лазера более чем на порядок выше амплитуды реакции одномодового лазера. С уменьшением фактора связи  $S$  увеличивается амплитуда реакции мощности лазера и, соответственно, уменьшается полоса реакции  $\Gamma_2$  (рис.4). В работе экспериментально показано, что реакция мощности у зеemanовского лазера меньше, а

полоса реакции больше, чем у лазера с фазоанизотропным резонатором.

• Теоретически выявлен и при использовании  $\text{CO}_2$  лазера волноводного типа экспериментально подтвержден резонансный характер реакции мощности лазера-приемника с сильной инерционностью актив-

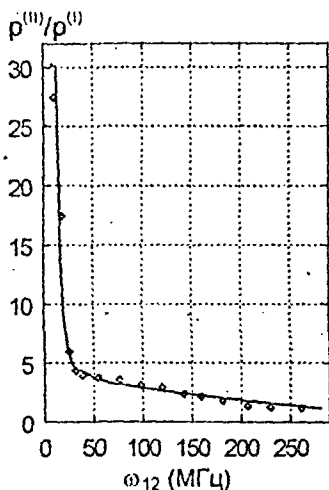


Рис.3 Зависимость амплитуды модуляции мощности в двухмодовом режиме к одномодовому от межмодового расщепления  $\omega_{12}$ .

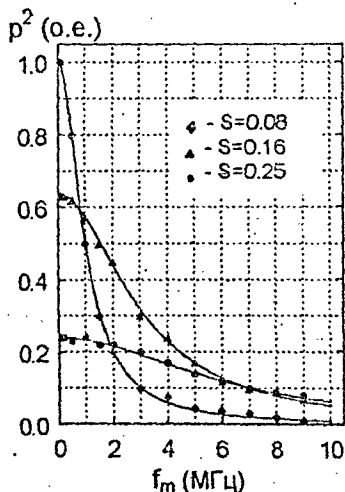


Рис.4 Амплитудно-частотная характеристика двухмодового лазера-приемника.

ной среды. Проведенный расчет показал, что амплитуда изменения мощности испытывает резонанс  $p_{\max} = p_0 \Delta\Omega / \gamma_a (\eta_0 - 1) / \eta_0^2 \sim 10^4 p_0$  с шириной  $\sqrt{3} \gamma_a \eta_0$  на разностной частоте  $f_{\text{рез}} = \sqrt{\Delta\Omega / \gamma_a (\eta_0 - 1)}$ . Здесь  $\gamma_a$  – принятая одинаковой для обоих лазерных уровней ширина,  $p_0$  – максимальная амплитуда изменения мощности лазера с безынерционной активной средой. Экспериментально измеренная частота резонанса мощности  $\text{CO}_2$  лазера  $f = 350 \pm 20$  кГц соответствует времени релаксации рабочих уровней лазерного перехода  $\sim 3 \cdot 10^{-4}$  с, что согласуется с известными данными для этого типа лазеров.

Глава 3 посвящена исследованию эффективности внутрилазерного приема частично когерентного излучения и повышению чувствительности приема при использовании прямо-передающих оптических систем. Рассмотрены вопросы приема лазерного излучения,

отраженного с нарушением пространственной когерентности от удаленных отражателей. Величина сигнала регистрации, в этом случае, определяется согласованием отраженного монохроматического светового пучка с угловой и линейной апертурами приемного устройства. Как известно, в отличие от прямого фотодетектирования при традиционном лазерном гетеродинамировании и внутрिलाзерном приеме качество согласования зависит от комплексной величины  $\mu$  - степени пространственной когерентности света на входной апертуре приемника. Поэтому в работе проведено изучение характеристик частично когерентного отраженного излучения и закономерностей его распространения без ограничения на величины углов падения и

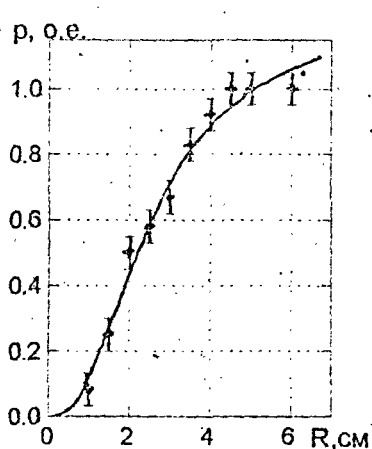


Рис.5 Зависимость гетеродинного сигнала от радиуса апертуры приемопередающего телескопа при внутрिलाзерном приеме

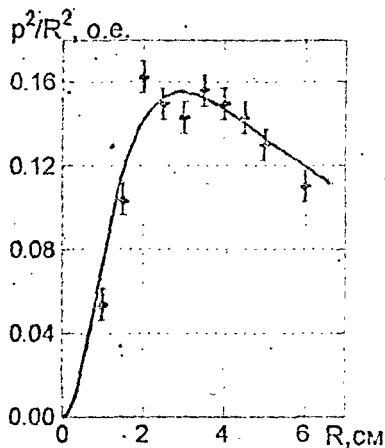


Рис.6 Зависимость эффективности внутрिलाзерного приема от радиуса апертуры приемопередающего телескопа

наблюдения. В результате показано, что в дальней зоне отраженного излучения существует параболическая, близкая к сферической, поверхность регулярной фазы с центром, совпадающим с центром освещенного пятна, и радиусом, равным расстоянию до отражателя. Это дало основание ввести в рассмотрение степень пространственной когерентности, как функцию угловых перемещений, так же, как интенсивность излучения представляется функцией углов наблюдения. Получены соотношения связывающие интенсивность и пространственную когерентность в дальней зоне с пространственной когерентностью и интенсивностью на отражателе и в изображении проектирующих оптических систем с учетом их апертурных ограничений. Показано, что

при угловой апертуре приемного устройства, малой по сравнению с углом рассеяния от отражателя, в приближении мягкой диафрагмы принимаемую часть отраженного лазерного излучения можно представить частично когерентным гауссовым пучком с волновым параметром, определяющимся длиной волны, радиусом перетяжки и количеством пятен когерентности.

Проведен теоретический анализ эффективности регистрации отраженного лазерного излучения при приеме большого количества пятен когерентности. Показано, что в это случае расчет эффективности согласования можно провести в представлении геометрической оптики. Применимость геометрических представлений для согласования отраженного лазерного излучения с приемной системой была проверена в эксперименте с использованием ОКУ.

При гетеродинном приеме, как известно, регистрируется порядка одного пятна когерентности и, следовательно, эффективно действующий апертурный угол проектирующей системы сравним с углом когерентности, а соответствующий эффективный радиус когерентности на отражателе – с радиусом светового пятна. Для внутрилазерного приема, кроме этого, необходимо учитывать, что сигналы регистрации по мощности и частотам генерации вырабатываются по всей длине активной среды лазера. В результате проведенного анализа, показано, что согласование частично когерентного гауссова пучка с гетеродинным достигается одновременно во всей каустике гетеродина и может применяться при внутрилазерном приеме. Рассчитаны величины гетеродинного сигнала при традиционном лазерном гетеродинировании и при внутрилазерном приеме в зависимости от углового увеличения и апертурного ограничения проектирующей оптической. В работе была проведена теоретическая и экспериментальная оценка возможного повышения эффективности внутрилазерного приема отраженного излучения при использовании приемопередающего телескопа (рис. 5, 6). Как видно, экспериментальные значения (показаны точками) хорошо согласуются с расчетной кривой. При используемом в эксперименте угловом увеличении телескопа, эффективность приема максимальна при радиусе главного зеркала 3 см. Показано, что в условиях спокойной атмосферы радиус апертуры приемопередающего телескопа можно довести до величин ~10 см и повысить эффективность внутрилазерного приема на 3 порядка по сравнению с приемом без телескопа.

Глава 4 посвящена разработке двухканального интерферометра на основе внутрилазерного приема отраженного излучения. Как видно из (1) и (2) изменения мощности и частоты генерации лазера-приемника,

при регистрации собственного отраженного излучения гармонически зависят от оптической длины пути света до отражателя. Поэтому внутрिलाзерный прием может быть положен в основу интерферометрических методик для измерений перемещений или изменений показателя преломления среды. В месте с тем внутрिलाзерный прием, обладающий высокой чувствительностью, позволяет проводить такие измерения при использовании удаленных отражателей с низким коэффициентом отражения, в том числе при использовании отражателей с диффузным характером поверхности.

Принцип работы интерферометра основан на перекрестном воздействии отраженного излучения на моды двухмодового лазера-приемника. Для этого на пути света к отражателю устанавливается четвертьволновая фазовая пластинка, взаимно преобразующая поляризации излучений мод с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . В результате перекрестного воздействия отраженных волн на моды возникает модуляция мощности обеих мод на разностной частоте  $f = \omega_2 - \omega_1$ :

$$P_{12} \cong \pm r P \frac{\Delta\Omega^*}{\Delta\Omega} \frac{1}{S} \frac{\eta}{\eta - 1} \frac{\Gamma}{\sqrt{\Gamma^2 + f^2}} \sin(2k\ell) \sin(ft) \quad (\text{I-канал})$$

и появляется вторая гармоника в сигнале межмодовых биений:

$$U_b \cong \frac{1}{2} r P \frac{\Delta\Omega^*}{f} \cos(2k\ell) \cos(2ft) \quad (\text{II-канал}).$$

Полезные сигналы реализуются на высоких несущих частотах  $f$  и  $2f$ , существенно превышающих диапазон фликкер-шумов фотоприемников. Изменение оптической длины пути вызывает соответствующие изменения в амплитудах модуляций по каждому из каналов. Сигналы демодулируются при гетеродинировании с сигналом межмодовых биений и сигналом удвоенной частоты и поступают на вход быстродействующей платы аналого-цифрового преобразователя компьютера. Использование двух каналов позволяет реализовать идеологию квадратурного интерферометра и дает возможность измерять с высокой фотозлектрической точностью изменения оптической длины, много большие длины волны излучения и одновременно контролировать коэффициент отражения поверхности отражателя.

При разработке интерферометра за основу был принят двухмодовый зеемановский He-Ne лазер с  $\lambda = 3.39$  мкм, межмодовым расщеплением  $f = 5$  МГц и экспериментально измеренной полосой реакции 17 МГц. При испытаниях интерферометр показал высокие рабочие характеристики (см. положения выносимые на защиту).

Интерферометр был использован для одновременного контроля меняющегося во времени показателя преломления плазмы и коэффициента отражения при исследовании эрозионного капиллярного разряда в воздухе. Сложность эксперимента заключалась в том, что в наиболее интересном варианте зондирования разряда вдоль его оси можно было использовать только отражение от поверхности графитового катода с начальным коэффициентом отражения  $\rho \sim 0,1$ . К тому же, в процессе развития разряда поверхность катода модифицировалась и менялся коэффициент отражения. Оптическая длина пути в разряде менялась на несколько длин волн, при этом требовалась точность измерений не хуже одной сотой длины волны. Этим условиям известные интерферометрические средства не удовлетворяют. С помощью разработанного прибора были получены зависимости  $\xi(t)$  и  $\rho(t)$ . В частности, в результате однократного разряда, длящегося 6 мс, наблюдалось уменьшение амплитудного коэффициента отражения катода на 5%.

В заключении представлены основные результаты работы:

1. Показано, что лазер в качестве приемника оптического излучения является двухканальным активным гетеродинным приемником, включающим в себя функцию квадратичного детектирования сигнала. Информативными сигналами служат изменения мощности и частоты генерации лазера-приемника.
2. Показано, что увеличение чувствительности внутрилазерного приема по сравнению с традиционным лазерным гетеродинированием определяется: накоплением поля отраженной волны в резонаторе лазера-приемника, и автодинным усилением сигнала, величина которого возрастает при приближении к порогу генерации.
3. Исследованы амплитудно-частотные характеристики одномодовых лазеров с различной инерционностью активных сред при инжекции излучения другого однотипного лазера. Выявлен резонансный характер реакции мощности лазера-приемника с сильной инерционностью активной среды на внешний оптический сигнал.
4. Проведены теоретические и экспериментальные исследования характеристик двухмодовых лазеров-приемников. Показано, что конкуренция мод в активной среде является дополнительным фактором, увеличивающим чувствительность внутрилазерного приема.
5. При использовании двухмодовых лазеров в качестве приемников излучения впервые получены экспериментальные зависимости фактора межмодовой связи от межмодового расщепления в лазерах с различным характером поляризации мод.



6. Получены характеристики частично когерентных световых пучков и определены методы их согласования с когерентным излучением в лазер-приемнике.
7. Получены критерии согласования лазера-приемника с приемопередающей оптической системой. Показано, что при внутрилазерном приеме частично когерентного излучения эффективно действующий радиус входной апертуры приемопередающего телескопа может быть доведен до величин  $\sim 10$  см, что повышает эффективность внутрилазерного приема в  $10^3$  раз по сравнению с приемом без телескопа.
8. Предложен метод формирования информативных сигналов с использованием перекрестного взаимодействия мод лазера-приемника при отражении от исследуемого объекта.
9. Разработан и испытан в условиях реального плазменного эксперимента двухканальный интерферометр, обладающий высокими рабочими характеристиками.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Козин Г.И., Кузнецов А.П., Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Савелов А.С. Двухмодовый лазерный интерферометр с внешним диффузным отражателем для диагностики термоядерной плазмы // Тезисы докладов XXIV Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. г. Звенигород, 182-184, (1997)
2. Козин Г.И., Кузнецов А.П., Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Савелов А.С. Новый двухканальный лазерный интерферометр, научные и технические области его применения // Тез. докл. Российского семинара «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля вещества и окружающей среды» Москва, МИФИ, 10-11, (1998)
3. Козин Г.И., Кузнецов А.П., Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Савелов А.С. Исследование эрозийного капиллярного разряда в воздухе с помощью нового двухканального лазерного интерферометра // Тез. докл. XI конф. по физике газового разряда. Рязань, ч.2. 75-77, (1998)
4. Козин Г.И., Корнилов С.Т., Кузнецов А.П., Прокопова Н.М. Влияние инерционности активной среды на внутрилазерный прием оптического излучения // Сборник научных трудов. Научная сессия МИФИ-99, том 3, М., МИФИ, 56-57, (1999)

5. Козин Г.И., Кузнецов А.П., Лебединский М.О. Характеристики двухмодового лазера при воздействии внешнего излучения // *Сборник научных трудов. Научная сессия МИФИ-99, том 3, 58-59, (1999)*
6. Козин Г.И., Кузнецов А.П., Пространственная когерентность и интенсивность отраженного лазерного излучения // *Сборник научных трудов. Научная сессия МИФИ-99, том 3, 72, (1999)*
7. Козин Г.И., Кузнецов А.П. Двухканальный лазерный интерферометр на основе внутрилазерного приема диффузно отраженного излучения // *Сборник научных трудов. Научная сессия МИФИ-98, ч.2, 176-177, (1998)*
8. Козин Г.И., Кузнецов А.П., Пространственная когерентность и интенсивность отраженного лазерного излучения // *Квантовая электроника, 25, №12, 1079-1083, (1998)*
9. Волков А.А., Козин Г.И., Корнилов С.Т., Кузнецов А.П., Прокопова Н.М. Лазерная локация на основе активного приема отраженного излучения // *Сборник научных трудов. Научная сессия МИФИ-99, том 3, 73-74, (1999)*
10. Козин Г.И., Кузнецов А.П., Корнилов С.Т., Лебединский М.О., Прокопова Н.М., Проценко Е.Д. Регистрация рассеянного на аэрозолях лазерного излучения методом двухчастотного внутрилазерного приема // *Труды международной конференции «Физика атмосферного аэрозоля», Москва, 200-206, (1999)*
11. Козин Г.И., Кузнецов А.П. Двухчастотный интерферометр с внутрилазерной регистрацией отраженного излучения // *Тезисы докладов 6 Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» Москва, 244-245, (1999)*
12. Козин Г.И., Кузнецов А.П. Дистанционный контроль вибраций двухканальным активным лазерным интерферометром // *Тезисы докладов III международной научно-технической конференции «Инженерно-физические проблемы авиационной и космической техники», 262-263, г. Егорьевск, (1999)*
13. Козин Г.И., Кузнецов А.П., Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Савелов А.С. Двухканальный интерферометр на основе внутрилазерной регистрации отраженного излучения // *Измерительная техника, №7, 36-39, (1999)*
14. Kozin G.I., Kuznetsov A.P., Bashutin O.A., Vovchenko E.D., Savjolov A.S. Novel active double-channel laser interferometer // *Journal of Technical Physics, 40, №1, 407-409, (1999)*
15. Козин Г.И., Кузнецов А.П., Лебединский М.О. Эффективность гетеродинного приема отраженного лазерного излучения // *Сборник на-*

Цитированная литература:

- 1\*. Donati S. Laser interferometry by induced modulation of cavity field // *J. Appl. Phys.*, 49, №2, 495-497, (1978)
- 2\*. Бураков С.Д., Годлевский А.П., Останин С.А. Определение профиля удаленных объектов когерентным автодиным лидаром // *Оптика атмосферы*, 3, №5, 547-551, (1990)
- 3\*. Годлевский А.П., Иванов А.К., Копытин Ю.Д. Высококчувствительный газоанализ атмосферы на основе внутрирезонаторного лазерного приема рассеянного излучения // *Квантовая электроника*, 9, №9, 2007-2012, (1982)
- 4\*. Картунов В.Н., Дмитриев А.К., Панченко В.Я., и др. Диагностика прохождения лазерного излучения через границы слоев биотканей методом автодиного детектирования обратно рассеянного излучения // *Тез. докл. V международная научно-техническая конференция Оптические методы исследования потоков, Москва, 162-163, (1999)*
- 5\*. Smith J.A., Rathe U.W., Burger C.P. Laser with optical feedback as displacement sensors // *Opt. Eng.*, 34, №9, 2802-2810, (1995)
- 6\*. Берштейн И.Л. Воздействие отраженного сигнала на работу лазера // *Изв. Вузов – Радиофизика, Том XVI, №4, 526-530, (1973)*
- 7\*. Казарян Р.А., Мнацакян Т.А. Характеристики внутрирезонаторного приема ИК оптического сигнала в атмосфере и повышение его помехоустойчивости // *Квантовая электроника*, 14, №3, 607-609, (1987)
- 8\*. Викторов Е.А., Галактионова Н.М., Мак А.А. Высококчувствительная регистрация слабого отраженного или рассеянного излучения методом внутрирезонаторного когерентного приема с YAG-Nd-лазером // *Оптика и спектроскопия*, 62, в.2, 430-436, (1987)
- 9\*. Козин Г.И., Петров В.В., Проценко Е.Д. Детектирование отраженного излучения по частоте биений двухмодового лазера // *Квантовая электроника*, 18, №3, 391-393, (1991)