

На правах рукописи

Гришаев Роман Викторович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ
ТУРБУЛЕНТНОГО НЕРАВНОВЕСНОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА**

05.27.03 – квантовая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Шатура – 2006

Работа выполнена в Институте проблем лазерных и информационных технологий РАН (ИПЛИТ РАН)

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент РАН
Панченко Владислав Яковлевич
(ИПЛИТ РАН)

кандидат физико-математических наук
Завалов Юрий Николаевич
(ИПЛИТ РАН)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Васильцов Виктор Владимирович
(ИПЛИТ РАН)

кандидат физико-математических наук
Митин Константин Владимирович
(ГНЦ ГУП «НПО Астрофизика»)

Ведущая организация: ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Троицк

Защита состоится «6» июля 2006 г. в 14.30 на заседании диссертационного совета К 002.126.01 по специальности 05.27.03 – квантовая электроника в Институте проблем лазерных и информационных технологий РАН по адресу 140700, г. Шатура, ул. Святоозерская 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПЛИТ РАН

Автореферат разослан «5» июня 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Л.А.Новицкий

Flow in CO₂- laser on Data of Luminescence Diagnostics. Proc. SPIE, v.4184, p.406-409, 2001.

9. Галушкин М.Г., Голубев В.С., Гришаев Р.В., Дубров В.Д., Завалов Ю.Н. Исследование люминесцентным методом оптического качества активной среды CO₂-лазера с ВЧ накачкой: Труды VI межвузовской научной школы молодых специалистов “Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине” / Под ред Ишханова Б.С, Новикова Л.С. - М.: УНЦ ДО, стр. 123-127, 2005.

10. Галушкин М.Г., Голубев В.С., Гришаев Р.В., Дубров В.Д., Завалов Ю.Н. Усиление оптических неоднородностей в активной среде CO₂-лазеров с быстрой аксиальной прокачкой: Труды V межвузовской научной школы молодых специалистов “Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине” / Под ред Ишханова Б.С, Новикова Л.С. - М.: УНЦ ДО, стр. 43-48, 2004.

11. Galuskin M.G., Golubev V.S., Zavalov Yu.N., Dubrov V.D., Buyarov S.A., Grishayev R.V., Panchenko V.Ya. The diagnostic of turbulent flow parameters of active medium mixture in fast-axial flow CO₂ laser. // VII Международная конференция "Лазерные и лазерно-информационные технологии: фундаментальные проблемы и приложения": Программа и аннотации докладов. 22-26 июня 2001, Владимир-Суздаль / Под ред. В.Я.Панченко, В.С.Голубева. – ИПЛИТ РАН, Шатура – ВлГУ, Владимир, 2001. стр.50.

12. M.G.Galuskin, V.S.Golubev, V.Ya.Panchenko, Yu.N.Zavalov, V.D.Dubrov, S.A.Buyarov, R.V.Grishayev The properties of fast-axial turbulent flow of lasermixture with light-induced heat releasing. // Тезисы докладов XVII Международ. конференции по когерентной и нелинейной оптике "ICONO 2001", Минск 26 июня - 1 июля 2001, стр.232.

13. Гришаев Р.В., Завалов Ю.Н. Результаты люминесцентной диагностики активной среды мощного CO₂-лазера с ВЧ накачкой // Тезисы докладов конференции “Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики”, М.: ФИАН, с. 63-64, 2006.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Интерес к исследованию прохождения когерентного излучения через турбулентную неравновесную среду определяется, прежде всего, стремлением к повышению качества выходного излучения мощных прокачных газовых лазеров. Оптические неоднородности активной среды таких лазеров, являющиеся источниками aberrаций волнового фронта генерируемого излучения, можно разделить на крупномасштабные пространственные неоднородности показателя преломления и мелкомасштабные (по сравнению с поперечным размером лазерного пучка) оптические неоднородности, вызванные, в том числе, турбулентными флуктуациями плотности газа, которые носят случайный характер.

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных исследованию мелкомасштабных оптических неоднородностей, ряд вопросов остается слабоизученным, как теоретически, так и экспериментально. В частности, недостаточно исследовано влияние разряда и лазерной генерации на структуру турбулентности активной среды, и эффект, который это влияние оказывает на оптическое качество среды. Здесь, в свою очередь, значительный интерес для исследования представляет эффект усиления амплитуд турбулентных флуктуаций плотности и рефракции в термодинамически неравновесных средах (активная среда газового лазера с быстрой прокачкой смеси, ионосфера). Эти эффекты особенно сильно проявляются в активной среде мощных прокачных газовых лазеров, определяя предельное качество их выходного излучения. Мелкомасштабные оптические неоднородности такой среды усиливаются в результате неоднородной диссипации энергии разряда в тепло, и вносят дополнительные искажения в волновой фронт проходящего такую среду лазерного излучения, что может быть использовано, например, для лабораторного моделирования прохождения когерентных лазерных пучков по протяженным атмосферным трассам на установках с контролируемыми параметрами турбулентности активной среды.

Таким образом, проблема актуальна также для изучения эффективности передачи узконаправленных информационных или энергетических потоков посредством лазерных пучков в атмосфере и, в частности, в ионосфере.

Цель работы заключается в исследовании мелкомасштабных оптических неоднородностей термодинамически неравновесной турбулентной активной среды технологического газоразрядного CO₂-лазера с быстрой аксиальной прокачкой газа (БАПГ). Методом люминесцентной диагностики были проведены измерения турбулентных пульсаций плотности активной среды БАПГ CO₂- лазера с накачкой продольным тлеющим разрядом постоянного тока и БАПГ CO₂- лазера с накачкой поперечным ВЧ разрядом. Также теоретически исследовался эффект усиления мелкомасштабных оптических неоднородностей в БАПГ CO₂- лазере.

Научная новизна. В результате исследования на устойчивость двухтемпературной системы кинетических уравнений, описывающих газоразрядный БАПГ CO₂- лазер, выведена формула расчета пороговой величины удельной объемной мощности разряда (по превышении которой в потоке активной среды происходит развитие мелкомасштабных оптических неоднородностей), с учетом зависимости скорости VT релаксации с верхнего лазерного уровня от температуры рабочей смеси и доли мощности разряда, идущей на прямой нагрев рабочей смеси. Показано существенное влияние этих факторов на расчетную величину пороговой удельной объемной мощности разряда.

На примере турбулентной среды БАПГ CO₂- лазеров среднего давления изучено влияние электрического разряда и интенсивности генерируемого лазерного излучения на пульсации плотности в потоке низкотемпературного ионизованного газа, и на степень когерентности пучка, проходящего через такого рода среду. Для различных величин энергокладов в присутствии и отсутствии излучения экспериментально получены спектры продольных пульсаций плотности активных сред БАПГ CO₂- лазеров с накачкой продольным тлеющим разрядом постоянного тока и накачкой поперечным ВЧ разрядом. В тех случаях, когда продольные пульсации плотности имели колмогоровский характер, сделаны оценки структурной характеристики показателя преломления C_n^2 активной среды.

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретически показано, что наличие зависимости скорости VT релаксации с верхнего лазерного уровня от температуры рабочей смеси существенно снижает пороговое значение

объяснено влиянием направления электрического поля разряда к потоку рабочей смеси.

Публикации по теме диссертации:

1. Галушкин М.Г., Голубев В.С., Ю.Н. Завалов, Ионин А.А., Котков А.А., Короленко П.В., Панченко В.Я., Дубров В.Д., Буяров С.А., Гришаев Р.В. Структура турбулентности активной среды быстропоточного CO₂ –лазера // Квантовая электроника, т.33, №8, стр. 671-676, 2003.
2. Panchenko V.Ya., Zavalov Yu.N., Galushkin M.G., Grishaev R.V., Golubev V.S., Dubrov V.D. The Development of Turbulence in the Active Medium of a Fast-Flow Gas-Discharge Laser // Laser Physics, vol. 16, №1, 2006.
3. Галушкин М.Г., Голубев В.С., Ю.Н. Завалов, Ионин А.А., Котков А.А., Короленко П.В., Панченко В.Я., Дубров В.Д., Буяров С.А., Гришаев Р.В. Исследование мелкомасштабных неоднородностей активной среды прокачных CO₂-лазеров (часть 1): Современные лазерно-информационные и лазерные технологии. Сборник трудов ИППИТ РАН / Под ред. Панченко В.Я., Голубева В.С. - М.: Интерконтакт Наука, с.275-281, 2005.
4. Панченко В.Я., Буяров С.А., Галушкин М.Г., Голубев В.С., Гришаев Р.В., Дубров В.Д., Завалов Ю.Н. Исследование мелкомасштабных неоднородностей активной среды прокачных CO₂-лазеров (часть 2): Современные лазерно-информационные и лазерные технологии. Сборник трудов ИППИТ РАН / Под ред. Панченко В.Я., Голубева В.С. - М.: Интерконтакт Наука, с. 282- 290, 2005.
5. Panchenko V.Ya., Grishaev R.V., Zavalov Yu.N., Dubrov V.D., Dubrovina E.A., et.al. The investigation of quality of FAF RF CO₂ laser active medium by luminescent method // Proc. SPIE vol. 5958, 2005.
6. Galushkin M.G., Golubev V.S., Zavalov Yu.N., Dubrov V.D., et.al. Turbulent flow structure of FAF CO₂ laser active medium at nonuniform temperature and heat generation // Proc. SPIE vol. 5777, p. 469-478, 2005.
7. Buyarov S.A., Dubrov V.D., Golubev V.S., Zavalov Yu.N., Grishayev R.V., Ionin A.A., Kotkov A.A., Panchenko V.Ya., Galushkin M.G. Diagnostics of turbulent flow parameters of active mixture in fast axial flow CO₂ laser // Proc. SPIE, vol. 4644, p.176-182, 2001.
8. Galushkin M.G., Golubev V.S., Panchenko V.Ya., Zavalov Yu.N., Grishayev R.V. The Estimation of Cn2 of Nonequilibrium Turbulent Gas

неустойчивости лежит ниже диапазона, в котором проводились эксперименты (21-30 Вт/см³).

Заключение.

1. Методом люминесцентной диагностики плазмы разряда в ГРТ БАПГ СО₂-лазера с продольной накачкой тлеющим разрядом постоянного тока, получены пространственные спектры турбулентных пульсаций плотности в потоке активной среды в зависимости от различных величин плотности мощности энергоклада в разряд, в присутствии и отсутствии лазерной генерации. Зависимость величины пульсаций плотности активной среды от их пространственного масштаба хорошо описывается законом Колмогорова-Обухова для однородной изотропной турбулентности. Показано, что в неравновесных условиях газового разряда и лазерной генерации в турбулентном потоке активной среды при превышении порогового значения плотности мощности энергоклада происходит возрастание амплитуд флуктуаций плотности и соответствующее увеличение (в 2 - 8 раз) структурной характеристики показателя преломления среды C_n^2 до значений порядка $5 \times 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$.

2. Теоретически исследовано влияние газового разряда и процесса лазерной генерации на турбулентные мелкомасштабные пульсации плотности в потоке активной среды БАПГ СО₂-лазера. Выведена формула расчета порогового значения плотности мощности энергоклада в разряд, выше которого неоднородности плотности в потоке активной смеси БАПГ СО₂-лазера начинают возрастать. Показано, что наличие лазерного излучения понижает расчетный порог. Расчет порогового значения плотности мощности энергоклада в разряд дает удовлетворительное согласие с данными эксперимента.

3. Методом люминесцентной диагностики плазмы разряда в ГРТ БАПГ СО₂-лазера с поперечной ВЧ накачкой получены спектры турбулентных пульсаций плотности в потоке активной среды для различных величин плотности мощности энергоклада. Показано, что с ростом плотности мощности энергоклада происходит рост пульсаций плотности активной среды. Установлено, что вдоль по потоку активной среды пульсации плотности активной среды возрастают. Структура турбулентных пульсаций плотности активной среды лазера носит явно неколмогоровский характер.

4. Отличие в характере поведения спектров турбулентных пульсаций активных сред БАПГ СО₂-лазеров с поперечной ВЧ накачкой и продольной накачкой разрядом постоянного тока

плотности мощности энергоклада для развития мелкомасштабных неоднородностей активной среды газоразрядного БАПГ СО₂-лазера.

2. Структурная характеристика показателя преломления C_n^2 активной среды БАПГ СО₂-лазера с накачкой продольным тлеющим разрядом постоянного тока перестает быть постоянной при превышении пороговой величины удельной объемной мощности разряда и начинает расти с ростом энергоклада. Также показано, что в отсутствие лазерной генерации величина C_n^2 имеет меньшее значение, чем при наличии лазерной генерации.
3. В БАПГ СО₂-лазере способы накачки активной среды (продольным тлеющим разрядом постоянного тока, поперечным ВЧ разрядом) различным образом изменяют спектр турбулентных пульсаций плотности газа. Структура турбулентных пульсаций плотности активной среды БАПГ СО₂-лазера с поперечной ВЧ накачкой имеет неколмогоровский характер.

Достоверность результатов диссертации обеспечивается корректностью постановки задач; тщательностью проработки методики проведения экспериментов; удовлетворительным соответствием результатов расчета с экспериментальными данными.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть применены для оценки влияния различных физических факторов, таких, как: величина энергоклада в разряд, давление смеси, степень турбулизации потока и ряда других, на турбулентные флуктуации рефракции активной среды и, соответственно, на качество выходного излучения БАПГ СО₂-лазеров, что особенно актуально для лазеров мульткиловаттного уровня мощности.

Апробация работы. Материалы, включенные в диссертацию, докладывались на семинарах ИПЛИТ РАН; Международной конференции "Лазерные и лазерно-информационные технологии" (22-26 июня 2001, Суздаль); International Quantum Electronics Conference 2002 (22-27 июня 2002, Москва); XIV International Symposium on Gas

Flow and Chemical Lasers & High-Power Laser Conference (24 - 31 августа 2002, Вроцлав, Польша); VII International Conference "Laser and Laser-Information Technologies: Fundamental Problems and Applications" (27 сентября – 1 октября 2003, Пловдив, Болгария); XV International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers & High-Power Laser Conference (30 августа – 3 сентября 2004, Прага, Чехия); V межвузовской школе молодых специалистов "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине" (15-16 ноября 2004, Москва, МГУ); International Quantum Electronics Conference 2005 (10-15 мая 2005, Санкт-Петербург); VIII Китайско-Российском симпозиуме "Новые материалы и технологии" (31 октября - 7 ноября 2005 года, г. Гуан-Чжоу, Китай); конференции "Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики" (25-28 февраля 2006, Москва, ФИАН).

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 87 страницах. Состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 19 рисунков, 3 таблицы. Список использованной литературы – 81 наименование.

II. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выполненных исследований, сформулированы задачи работы и защищаемые положения, показана их научная новизна.

Первая глава носит обзорный характер. В ней кратко изложены результаты теоретических и экспериментальных работ по исследованию мелкомасштабных оптических неоднородностей мощных прокачных CO_2 -лазеров. Рассматриваются процессы возникновения и развития таких неоднородностей, их влияние на качество выходного излучения.

Вторая глава. На основе уравнений кинетики и теплового баланса для активной среды БАПГ CO_2 -лазера в условиях лазерной генерации исследуется явление нарастания пульсаций плотности в потоке газа вследствие развития тепловой неустойчивости, которая ведет к нарастанию турбулентных пульсаций плотности смеси и является причиной ухудшения оптических свойств активной среды лазера. В частности, учитывается непосредственный нагрев смеси

Четвертая глава. В этой главе описываются эксперименты по регистрации люминесцентного свечения плазмы в ГРТ БАПГ CO_2 -лазера с ВЧ накачкой. Накачка активной среды производится высокочастотным емкостным разрядом поперечным потоку рабочей смеси в ГРТ.

С ростом энерговклада турбулентные пульсации плотности газа возрастают. Воздействие разряда невелико на входе газового потока в разрядную зону ГРТ и максимально проявляет себя ближе к выходу потока газа из разряда: вниз по потоку нарастают амплитуды пульсации плотности среды (Рис. 4).

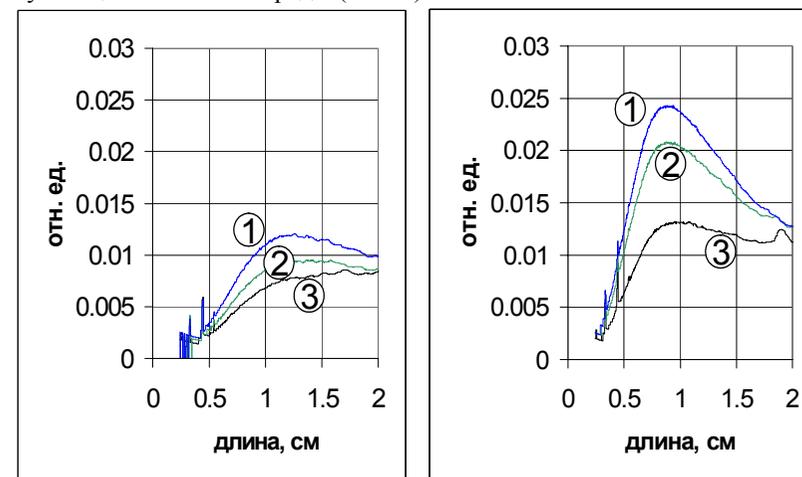


Рис. 4 Спектры относительных пульсаций плотности газа для разных точек наблюдения (слева – в начале зоны разряда, справа - в конце). (1) - 100%, (2) - 85%, (3) - 71% от номинального энерговклада в разряд (30 Вт/см^3).

Спектр пульсаций плотности газа не может быть принят колмогоровским, по причине подавления турбулентных пульсаций с пространственными масштабами выше границы вязкостного и инерционного интервалов.

Расчет порогового значения плотности мощности энерговклада W^* дает 31.5 Вт/см^3 при отсутствии излучения, и 29.5 Вт/см^3 при интенсивности излучения $I = 700 \text{ Вт/см}^3$. Судя по поведению полученных спектров, порог развития ионизационно-перегревной

Проведенные исследования показали, что в неравновесных условиях газового разряда и лазерной генерации в турбулентном потоке активной среды БАПГ CO₂-лазера с накачкой продольным разрядом постоянного тока при превышении порогового значения плотности мощности энерговклада происходит возрастание амплитуд флуктуаций плотности, и соответствующее увеличение структурной характеристики показателя преломления C_n^2 до значений порядка $5 \times 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$ (см. Рис. 3), что соответствует набегу фазы лазерного излучения на апертуре выходного зеркала резонатора: $\Delta\varphi = 0.02$ рад.

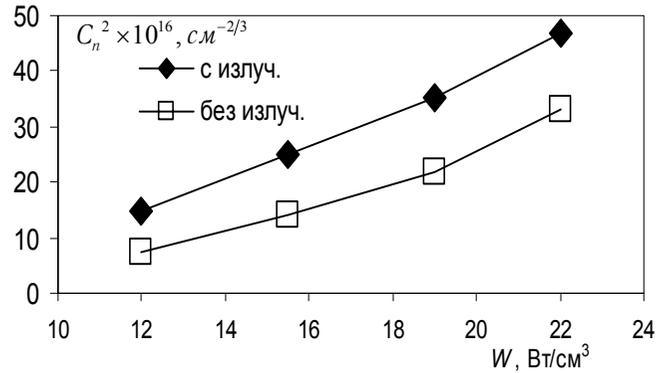


Рис. 3 Зависимость C_n^2 от энерговклада в разряд в присутствии и в отсутствии лазерного излучения.

Результаты диагностики активной среды люминесцентным методом показали, что наличие лазерной генерации приводит к увеличению амплитуд пульсаций плотности среды при тех же значениях энерговклада. Это находится в согласии с тем фактом, что рассчитанные характерные времена развития неустойчивости для энерговкладов превышающих порог развития ионизационно-перегревной неустойчивости имеют меньшую величину в отсутствии лазерного излучения, что означает меньший рост амплитуды пульсаций.

Характер спектрального распределения пульсаций позволяет говорить о применимости модели турбулентности Колмогорова-Обухова в данном случае.

разрядом, и зависимость скоростного коэффициента безизлучательной VT релаксации с ассиметричной моды CO₂ от температуры смеси. Выводится выражение для расчета порогового значения удельной объемной мощности разряда, по превышении которого происходит усиление пульсаций плотности активной среды:

$$W^* = \left\{ \left[\frac{v_3}{v} \frac{\alpha J_s}{c_p \rho \bar{T}} \left(1 + \frac{v_1}{v_3} \frac{J}{J_s} \right) \left(\frac{\gamma_c}{(\gamma_c + \gamma_n) \tau_2} (\hat{k}_{VT} - 1) + 2 \frac{\bar{v}}{l} + \bar{D}_l \frac{4}{a^2} \right) \right] - \left[\frac{\gamma_c}{(\gamma_c + \gamma_n) \tau_2} \left(1 + \frac{J}{J_s} \right) + 2 \frac{\bar{v}}{l} + \bar{D}_l \frac{4}{a^2} \right] \left[\frac{v_3}{v} \frac{\alpha J_s}{c_p \rho \bar{T}} (\hat{k}_{VT} - 1) + 2 \frac{\bar{v}}{l} \frac{T_0}{\bar{T}} - 4 \frac{\bar{v}}{l} - \bar{\chi}_l \frac{8}{a^2} \right] \right\} \times \frac{1}{\frac{(1 + \hat{k})}{c_p \rho \bar{T}} \left[\frac{\gamma_c \eta}{(\gamma_c + \gamma_n) \tau_2} \left(1 + \frac{v_1}{v_3} \frac{J}{J_s} \right) + (1 - \eta) \left(\frac{\gamma_c}{(\gamma_c + \gamma_n) \tau_2} \left(1 + \frac{J}{J_s} \right) + 2 \frac{\bar{v}}{l} + \bar{D}_l \frac{4}{a^2} \right) \right]}$$

где e_3 - число колебательных квантов на объединенном верхнем лазерном уровне; $W = jE$ - удельная объемная мощность разряда; c_p - удельная теплоемкость смеси при постоянном давлении; ρ - плотность газа; α - коэффициент усиления излучения; J - интенсивность излучения; J_s - интенсивность насыщения; v - частота излучения; v_1, v_3 - частоты симметричной и антисимметричной мод; v - скорость течения смеси; \hat{k}_{VT} - скорость безизлучательной столкновительной релаксации с CO₂ (001) на CO₂ (010+100); γ_c - молярная доля CO₂ в смеси, γ_n - N₂; η - доля мощности накачки, идущая на возбуждение верхнего лазерного уровня; $\bar{\chi}_l$ - температуропроводность газа; \bar{D}_l - коэффициент турбулентной диффузии; a - радиус газоразрядной трубки (ГРТ); l - длина ГРТ; T_0 - температура смеси на входе в ГРТ; \bar{T} - средняя по сечению ГРТ температура газа; τ_2 - характерное время столкновительной безизлучательной VT релаксации с ассиметричной моды CO₂; J_s - интенсивность насыщения; $\hat{k} = \left(\frac{\partial \ln W}{\partial \ln T} \right)_p$;

$\hat{k}_{VT} = \left(\frac{\partial \ln k_{VT}}{\partial \ln T} \right)_p$. Выражение рассчитывает пороговое значение

плотности мощности энерговклада для развития неустойчивости для точки активной среды, находящейся в середине зоны разряда на оси ГРТ.

Для расчета параметров активной среды: α , J_s , \bar{T} , τ_2 , входящих в выражение для пороговой плотности мощности энерговклада, составлена программа, в которой система кинетических уравнений БАПГ CO_2 – лазера с заданными начальными условиями численно решалась методом Рунге–Кутты четвертого порядка с переменным шагом.

Третья глава. В данной главе приводятся результаты исследования пространственной неоднородности турбулентного потока молекулярного газа возбужденного самостоятельным разрядом постоянного тока, полученные методом регистрации люминесцентного свечения активной среды БАПГ CO_2 – лазера (см. Рис. 1). Определялось распределение амплитуд относительных продольных пульсаций плотности газа от пространственного масштаба пульсаций. Полученные зависимости представлены для нескольких значений плотности мощности энерговклада в разряд, как в режиме генерации лазерного излучения, так и в его отсутствии, для чего ставилась диафрагма, подавляющая генерацию (Рис. 2).

В режиме непрерывной накачки превышение порогового значения плотности мощности энерговклада приводило к контракции разряда, однако переход к импульсной накачке позволил наблюдать явление усиления оптических неоднородностей в активной среде CO_2 – лазера с быстрой аксиальной прокачкой. Пороговое значение плотности мощности энерговклада, при котором в режиме непрерывной генерации происходила контракция, было $\approx 12 \text{ Вт/см}^3$ с излучением, а без излучения $\approx 13 \text{ Вт/см}^3$. Расчет показал, что заметное развитие ионизационно-перегревной неустойчивости начинается при наличии и при отсутствии излучения с величины плотности мощности энерговклада $W^* \approx 25 \text{ Вт/см}^3$. Расхождение экспериментальных и расчетных данных может быть объяснено тем, что в расчетах полагалось равномерное заполнение объема ГРТ разрядом, тогда как в CO_2 – лазере с продольным потоку смеси разрядом положительный столб разряда имеет тенденцию стягиваться к оси ГРТ, что означает больший энерговклад на оси.

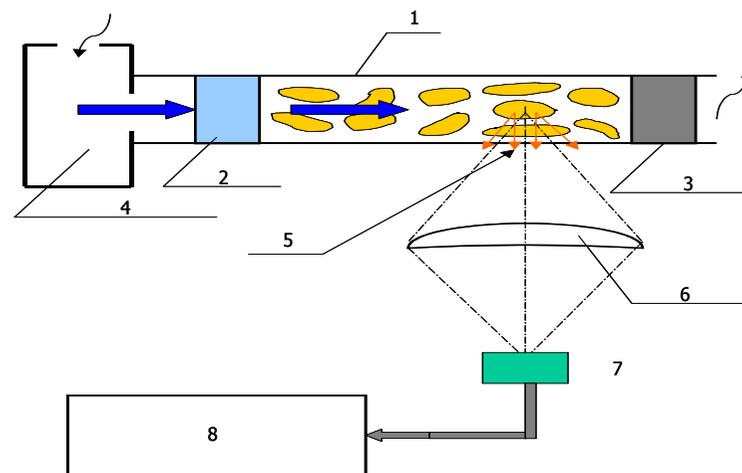


Рис. 1 Схема экспериментальной установки по регистрации люминесцентного сигнала. 1- разрядная трубка CO_2 -лазера, 2- анод, 3- катод, 4- турбулизатор, 5- локальное свечение плазмы разряда, 6- линза, 7- фотодиод, 8- система сбора и обработки данных (усилитель сигнала + АЦП + персональный компьютер)

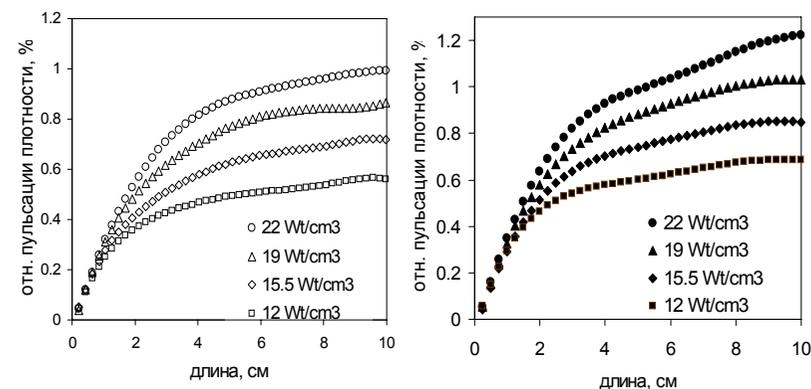


Рис. 2 Зависимость относительных пульсаций плотности газа от пространственного масштаба турбулентных флуктуаций для различных значений плотности мощности энерговклада (слева – без лазерной генерации, справа – в условиях лазерной генерации).