

На правах рукописи



ЯКИМОВ Михаил Юрьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОТОКАМИ ГАЗА И ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЕНИЕ ЕГО  
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Специальность: 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва – 2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук  
Институте проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор  
**Райзер Юрий Петрович**

доктор физико-математических наук, профессор  
**Василяк Леонид Михайлович**

доктор физико-математических наук, профессор  
**Уваров Александр Викторович**

Ведущая организация: **Учреждение Российской академии наук Институт  
теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН**

Защита состоится 11 марта 2010 года в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного  
совета Д002.240.01 при Институте проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН по  
адресу: 119526, Москва, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПМех РАН

Автореферат разослан 12 января 2010 года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д002.240.01  
при ИПМех РАН

Кандидат физико-математических наук

Сысоева Е.Я.

**Актуальность темы.** В настоящее время механика высокотемпературных и неравновесных потоков газа развивается в тесной связи с техникой газовых лазеров. Развитие газовых лазеров обогатило высокотемпературную неравновесную газодинамику такими новыми интересными явлениями как тлеющий разряд большой мощности в быстром потоке газа и непрерывный оптический разряд (НОР). Дальнейшие перспективы техники мощных газовых лазеров в значительной мере зависят от прогресса в понимании и описании газодинамических явлений, связанных с распространением лазерного излучения в неравновесных и высокотемпературных средах, возникающих при генерации излучения, транспортировке и взаимодействии с веществом, осуществляемом в научных или технологических целях.

В данной работе решается крупная задача экспериментальной разработки научных основ применения широкого круга газодинамических, физических и оптических явлений в технике мощных газовых лазеров, организации оптически однородных потоков колебательно-возбужденного газа на основе несамостоятельного тлеющего разряда постоянного тока (РПТ) в быстром потоке газа с ионизацией емкостным импульсно-периодическим разрядом (ЕИР), процессах получения мощного лазерного излучения и управления его характеристиками в условиях взаимодействия с потоком газа, а также с движущейся плазмой непрерывного оптического разряда (НОР) при атмосферном давлении.

К моменту постановки задач данного исследования применение РПТ-ЕИР для накачки  $\text{CO}_2$ -лазеров показало перспективность такого способа накачки и привело к созданию в ИПМех РАН действующего прототипа серии технологических лазеров "Лантан" [1]. Тем не менее, некоторые важные с научной и практической точки зрения вопросы, касающиеся данного способа организации разряда, требовали дальнейшего исследования.

Актуален, в частности, вопрос о возможности генерации в активных средах мощных быстропроточных газовых лазеров излучения высокой яркости с расходимостью, ограниченной преимущественно дифракцией. Основными параметрами лазера большой мощности, предназначенного для научных и технологических применений, кроме мощности излучения и КПД, являются угол расходимости и осевая яркость излучения, так как они определяют максимально достижимую плотность мощности сфокусированного излучения и, в конечном итоге, эффективность применения лазера в процессах, основанных на взаимодействии лазерного излучения с веществом. Повышение мощности при сохранении высокого качества излучения стало основным направлением совершенствования мощных газовых лазеров с начала их практического применения. Большинство лазеров большой средней мощности составляют в настоящее время  $\text{CO}_2$ -лазеры, позволяющие генерировать высокую мощность излучения с высоким КПД и малой расходимостью.

Мощность лазера может быть повышена либо путем повышения плотности накачки, либо путем увеличения объема активной среды. В технике быстропроточных газовых лазеров предпочтительнее второй путь, поскольку повышение плотности мощности накачки ограничено возможностями конвективного

теплоотвода, а также возрастанием неоднородности газовой активной среды при увеличении давления газа. В широкоапертурной активной среде большого объема, характеризующейся числом Френеля  $N > 5$  ( $N = a^2/\lambda L$ , где  $a$  – апертура,  $L$  – длина резонатора,  $\lambda$  – длина волны излучения) применение традиционного устойчивого резонатора с плоскими и сферическими зеркалами не может обеспечить генерацию излучения с малой расходимостью, в результате чего резко снижается эффект от увеличения мощности и сужается диапазон возможных применений.

В связи с вышесказанным в конце 80-х начале 90-х гг. XX века активно исследовались оптические резонаторы, способные генерировать излучение с малой расходимостью при больших, чем устойчивый резонатор, числах Френеля [2]. Значительная часть из них основана на применении неустойчивых резонаторов с переменным по радиусу коэффициентом отражения частично прозрачного выходного зеркала [3]. Зеркала с гауссовым или супергауссовым профилем коэффициента отражения имеют на прозрачной подложке четвертьволновое диэлектрическое покрытие с оптической толщиной, уменьшающейся от центра к краю зеркала. Исследовались и другие перспективные схемы оптических резонаторов. Экспериментальному исследованию особенностей процесса генерации мощного лазерного излучения с малым углом расходимости в  $\text{CO}_2$ -лазерах с накачкой РПТ-ЕИР в быстром поперечном потоке газа уделена значительная часть данной работы.

Кроме угла расходимости важными характеристиками лазерного излучения являются стабильность и симметрия диаграммы направленности. Мощные лазеры с потоком газа в активной среде, перпендикулярным оптической оси резонатора, имеют ряд принципиальных ограничений, затрудняющих получение излучения большой мощности с высокой симметрией и стабильностью. Это связано с взаимодействием мощного излучения с потоком возбужденного газа, что также исследуется в данной работе, предложены схемы резонаторов, позволяющие значительно повысить осевую симметрию генерируемого в активной среде с быстрой поперечной прокачкой лазерного излучения. Тем не менее, радикальным решением этого вопроса является переход к активной среде с быстрой осевой прокачкой газа.

Технология РПТ-ЕИР, показавшая высокие характеристики в системах с прямоугольными разрядными камерами и поперечной прокачкой, перспективна для применения в системах с быстрой осевой прокачкой, что показали предварительные эксперименты, проведенные в конце 80-х годов в ИПМех РАН и [4]. Однако для эффективного применения технологии РПТ-ЕИР в системе с быстрой осевой прокачкой требовалось решить ряд принципиальных задач, касающихся особенностей организации разряда в трубке с быстрым потоком газа, повышения примерно на порядок по сравнению с поперечной прокачкой удельной мощности разряда, определения критериев выбора устройства прокачки с необходимыми параметрами, и т.п. Эти задачи также решались в данной работе.

В последнее время все большую актуальность приобретает применение мощных  $\text{CO}_2$ -лазеров для генерации плазмы НОР [5]. Это связано с большим

интересом к применению плазмы НОР в аэрокосмической отрасли, в новейших плазменных технологиях и в научных исследованиях. Мощные  $\text{CO}_2$ -лазеры сделали возможной реализацию НОР в лаборатории, и пока остаются единственным доступным средством для его поддержания. Поскольку мощные  $\text{CO}_2$ -лазеры, несмотря на свою распространенность в промышленности, редкость в лабораториях, многие аспекты, связанные с НОР, не исследованы. Так, например, до последнего времени ощущается недостаток экспериментальных данных по газодинамическим и оптическим характеристикам плазмы НОР при атмосферном давлении и ниже. Это обусловлено тем, что энергетический порог поддержания НОР обратно пропорционален квадрату давления, и для его изучения при низком давлении требуется лазер большой мощности.

**Целью диссертационной работы** является экспериментальная разработка нового научного направления создания оптически однородных активных сред на основе РПТ-ЕИР в быстром потоке газа, направленном продольно и поперечно относительно оптической оси лазерного резонатора, и их применение для экспериментального исследования взаимодействий мощного лазерного излучения с движущимся колебательно-возбужденным газом и плазмой, влияния этих взаимодействий на свойства активных сред и характеристики лазерного излучения, а также разработка научных основ создания лазерных и плазменных устройств для научных и технологических применений.

Для этого решались следующие задачи:

1. Создавались экспериментальные установки для исследования физических, химических и газодинамических явлений в РПТ-ЕИР в быстром поперечном и осевом потоке газа, на которых проводились исследования условий создания оптически однородных потоков колебательно-возбужденного молекулярного газа.

2. На базе разработанных газодинамических установок создавались мощные газовые лазеры, которые использовались для изучения возможностей получения мощного лазерного излучения с высокой яркостью и высоким КПД.

3. Мощное лазерное излучение с высокими характеристиками, полученное в результате проведенных исследований, использовалось, в частности, для исследования взаимодействия излучения с движущейся плазмой оптического разряда.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Разработаны методы получения оптически однородных активных сред и лазерного излучения с высокими характеристиками в широкоапертурных разрядных камерах большого объема мощных  $\text{CO}_2$ -лазеров с накачкой РПТ-ЕИР в поперечном потоке газа; впервые получено излучение мощностью 5 кВт в непрерывном режиме в  $\text{CO}_2$ -лазере с неустойчивым резонатором с переменным по радиусу коэффициентом отражения выходного зеркала.

2. С резонаторами различных типов в условиях одной и той же активной среды с быстрой поперечной прокачкой наблюдалось общее явление нарушения осевой

симметрии излучения, объясняемое особенностями насыщения активной среды в многопроходных резонаторах с движущейся активной средой; предложена простая теоретическая модель явления, на основе которой разработана и реализована схема оптического резонатора, позволяющая повысить осевую симметрию излучения в лазерах с быстрой поперечной прокачкой.

3. Впервые разработаны научные принципы организации однородного комбинированного разряда постоянного тока, поддерживаемого емкостным импульсно-периодическим разрядом, в быстром *осевом* потоке газа в трубке с целью создания нового высокоэффективного газового лазера с быстрой *осевой* прокачкой; метод позволяет повысить КПД лазера по сравнению с аналогами, а также дает новые возможности управления характеристиками излучения.
4. Впервые разработан и создан действующий экспериментальный макет газового лазера мощностью 4 кВт с высоким КПД на основе комбинированного разряда в быстром *осевом* потоке газа, который позволяет, в частности, осуществлять НОР в потоке атомарных и молекулярных газов при атмосферном давлении.
5. Впервые проведено экспериментальное исследование НОР в потоке воздуха при атмосферном давлении, получены новые данные по диапазону устойчивости НОР в турбулентном потоке газа, рефракции лазерного излучения в плазме НОР в потоке, а также спектральные характеристики теплового излучения плазмы НОР при атмосферном давлении.

### **Практическая ценность и реализация результатов работы.**

Работа представляет собой комплексное экспериментальное исследование физических и химических процессов, сопровождающих работу мощных быстропротекающих газоразрядных лазеров непрерывного и импульсно-периодического действия на замкнутом цикле. Эксперименты проводились на полномасштабных макетах, являющихся прототипами разработанных к настоящему времени в ИПМех РАН технологических лазеров, принятых к промышленному производству, а также разрабатываемых в настоящее время с учетом возможности их промышленного производства. Проведенное исследование представляет интерес также с точки зрения оценки перспектив метода организации разряда типа РПТ-ЕИР для разработки более мощных и эффективных лазерных установок для научных и промышленных применений. Ниже представлены основные практические результаты диссертации.

1. Экспериментально и теоретически обоснованы условия формирования активных сред с высокой оптической однородностью в лазерах с накачкой комбинированным разрядом в потоке с анизотропной искусственной турбулентностью, установлены источники неоднородности РПТ-ЕИР, разработаны методы устранения этих неоднородностей. Полученные результаты использовались при создании промышленных технологических лазеров серии "Лантан".

2. Разработаны методы получения излучения с высокими характеристиками в широкоапертурных активных средах с поперечным потоком газа мощных CO<sub>2</sub>-

лазеров. Продемонстрирована возможность использования различных схем оптических резонаторов в  $\text{CO}_2$ -лазерах с поперечной прокачкой при мощностях излучения от 2 до 5 кВт в непрерывном режиме и качестве пучка, близком к дифракционному. На основе учета факторов насыщения активной среды в условиях быстрой поперечной прокачки разработаны схемы оптических резонаторов, позволяющие получать устойчивую генерацию основной моды с высокой осевой симметрией излучения. Полученные результаты реализованы в экспериментальных и технологических лазерных комплексах.

3. Разработаны научные основы создания высокоэффективных  $\text{CO}_2$ -лазеров мощностью до 6 кВт с высоким КПД и качеством излучения на основе накачки РПТ-ЕИР в быстром осевом потоке газа. Создана экспериментальная лазерная установка мощностью 4 кВт (более 2,2 кВт с метра активной длины) в непрерывном и импульсно-периодическом режиме при КПД 20%, которая используется для проведения экспериментов с поддержанием плазмы непрерывного оптического разряда при атмосферном давлении.

4. Экспериментально разработана методика согласования импульсных генераторов с различной длительностью фронта импульса с емкостной нагрузкой типа системы разрядных трубок, а также методика определения оптимальной формы электродов ЕИР, позволяющая управлять распределением характеристик РПТ в поперечном сечении разрядной трубки. Полученные результаты использовались для управления характеристиками лазерного излучения при создании лазеров с РПТ-ЕИР.

5. Результаты исследования пределов стабильности и механизмов распространения НОР в потоке газа при атмосферном давлении могут быть использованы при создании генераторов плазмы и высокоскоростных потоков.

6. Результаты исследования спектров оптического излучения НОР могут использоваться для создания источников излучения на основе НОР.

7. Результаты исследования рефракции лазерного излучения в плазме НОР при атмосферном давлении могут использоваться для независимого контроля параметров плазмы НОР в научных и технологических применениях.

Результаты диссертационной работы могут также использоваться:

- при фундаментальных и прикладных исследованиях взаимодействия лазерного излучения с веществом в физической газовой динамике;
- при проектировании и создании мощных газовых лазеров для научных и технологических применений;
- в научных исследованиях и технологических процессах с использованием плазмы неравновесного колебательно-возбужденного газа, а также непрерывного оптического разряда;
- для создания в лабораторных условиях высокотемпературных и высоконеравновесных объектов для проверки расчетных схем задач динамики колебательно-возбужденного газа и плотной высокотемпературной плазмы.

Достоверность полученных результатов подтверждается успешным созданием действующих экспериментальных образцов мощных  $\text{CO}_2$ -лазерных систем с

высокими энергетическими характеристиками. Ряд технических решений защищен патентами.

**На защиту выносятся следующие положения и научные результаты:**

1. Разработка физических основ и создание экспериментальных установок для исследования быстрых дозвуковых потоков газа высокой степени неравновесности, генерации мощного лазерного излучения и поддержания непрерывного оптического разряда, изучения течения колебательно-возбужденного газа и его взаимодействия с мощным лазерным излучением, обеспечивающая измерение электрических характеристик разряда, параметров потока рабочего газа в разрядной камере, мощности, пространственных и временных характеристик лазерного излучения, а также различных характеристик непрерывного оптического разряда.

2. Совокупность результатов по исследованию физических особенностей активных сред газовых лазеров с быстрым потоком газа, возбуждаемых комбинированным разрядом постоянного тока с ионизацией емкостным импульсно-периодическим разрядом, в том числе данные о динамике срыва объемного разряда в дуговой режим, нарушении оптической однородности объемного разряда, включая предельные режимы накачки  $\text{CO}_2$ -лазера. Определение оптимальных режимов накачки и генерации.

3. Результаты по исследованию, разработке и созданию оптических резонаторов, позволяющих получать мощное лазерное излучение с малой расходимостью в лазерах с быстрой поперечной прокачкой. В частности, в лазерах с поперечной прокачкой и комбинированным разрядом с резонаторами различных типов наблюдалось нарушение осевой симметрии генерируемого лазерного излучения, обусловленное нелинейным взаимодействием мощного лазерного излучения и быстрого потока активной среды. Предложена простая теоретическая модель явления, на основе которой разработана схема резонатора с частичной компенсацией эффекта неоднородного насыщения коэффициента усиления, позволяющая получать лазерное излучение с высокой симметрией и КПД.

4. Совокупность результатов по разработке научных основ и созданию нового газового лазера с накачкой РПТ-ЕИР в трубках с быстрой осевой прокачкой с высокими энергетическими характеристиками, высоким КПД, симметрией и стабильностью излучения. В частности методика оптимизации формы электродов емкостного импульсно-периодического разряда для получения заданного распределения плотности тока несамостоятельного разряда в разрядной камере цилиндрической формы (трубке) и предложенный на этой основе метод стабилизации модового состава излучения и управления его пространственными характеристиками.

5. Результаты исследования предельных режимов существования непрерывного оптического разряда (НОР) в скоростном турбулентном потоке газа при атмосферном давлении, в частности, экспериментальное обнаружение эффекта превышения стационарных скоростей распространения волн лазерного горения в



луче непрерывного лазера над теплопроводностными, а также обнаружение колебательных режимов существования плазмы НОР при малой скорости потока в случае осевого и перпендикулярного потоков, приводящих к погасанию плазмы НОР.

6. Результаты исследования взаимодействия излучения с плазмой НОР в потоке газа при атмосферном давлении, в том числе исследования рефракции лазерного излучения в плазме НОР в стационарном и колебательном режиме ее существования, а также определение спектральной освещенности, создаваемой плазмой НОР.

7. Разработка экспериментальной методики контроля результатов спектральных измерений распределения температуры в плазме НОР в потоке газа путем наблюдения рефракции поддерживающего лазерного излучения на градиентах электронной плотности в плазме НОР. В частности, путем наблюдения рефракции установлено, что распределение электронной плотности в центре НОР в потоке аргона при атмосферном давлении имеет плато с локальным минимумом, что свидетельствует о достижении температуры полной однократной ионизации.

### **Апробация результатов работы**

Результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях: "Научная конференция МФТИ" (Долгопрудный, 1984, 1986, 1988); "Семеновские чтения", (МФТИ, Долгопрудный, 1988, 1989); всесоюзные конференции "Лазерная техника и технология" (Вильнюс, 1988); "Кинетические и газодинамические процессы в неравновесных средах" (Красновидово, МО, МГУ, 1988); "IV конференция по физике газового разряда" (Казань, 1992); международные конференции: "Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO-91" (Балтимор, США, 1991), "Laser Resonators with GRM" (Флоренция, Италия, 1993); "NATO Advanced Research Workshop on Gas Lasers" (Москва, 1995); "Оптика лазеров, LO" (Санкт-Петербург, 1993, 1998, 2003, 2006, 2008); "Лазерные технологии, ILLA" (1995, 1998); "Применение лазеров в технологии, LAE" (Санкт-Петербург, 1996); "Lasers '97", (Мюнхен, Германия, 1997); "Photonics West: Laser Resonators" (Сан-Хосе, США, 1998, 2003); "Применение лазеров и лазерные технологии, LAT" (Москва, IQEC-LAT'2002, Санкт-Петербург, ICONO-LAT'2005); "Методы аэрофизических исследований, ISMAR" (Новосибирск, 2004, 2006, 2008); "Импульсные лазеры на атомах и молекулах, AMPL" (Томск, Россия, 2007, 2009); "Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергии. Харитоновские чтения" (г. Саров, Нижегородской обл., 2008); "VI Международный аэрокосмический конгресс, IAC" (Москва, 2009); всероссийские семинары: "Технологии и оборудование для обработки концентрированными потоками энергии" (Москва, ИМАШ РАН, 2006, 2007, 2008); "Технология и оборудование для термической обработки материалов высококонцентрированными источниками энергии (лазер, электронный луч)" (СПб.: Институт сварки России, 2006, 2007); "Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем (АФМ)" (Москва, ИПМех РАН, 2008, 2009); всероссийские конференции:

"Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине" (Новосибирск, ИТПМ СО РАН, 2009); "Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики. Демидовские чтения" (Москва, ФИАН, 2006), а также на научных семинарах ИПМех РАН (Москва), ИТПМ СО РАН (Новосибирск), ИПЛИТ РАН (Шатура), ИЛТ (Ахен, Германия).

### **Публикации**

Материалы диссертации опубликованы в 35 научных трудах. Основные результаты диссертации отражены в 9 публикациях в ведущих отечественных и зарубежных журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки РФ для публикации научных результатов диссертации, а также в двух патентах на полезную модель. Список основных трудов находится в конце автореферата.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Общий объем работы – 342 страницы, включая 146 рисунков и 27 таблиц. Библиография содержит 410 наименований.

### **Личный вклад**

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично, или в соавторстве при его непосредственном участии, или под его непосредственным руководством.

### **Содержание диссертации**

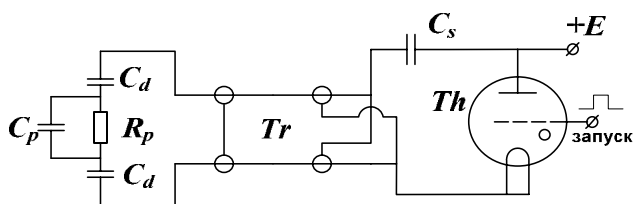
**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, отмечается ее научная новизна и практическая ценность, формулируются защищаемые положения.

**В первой главе** приведены результаты экспериментального исследования несамостоятельного тлеющего разряда с ионизацией емкостным импульсно-периодическим разрядом (РПТ-ЕИР) в быстром потоке молекулярных газов, анализируются основные особенности разряда этого типа, влияющие на характеристики колебательно возбужденной среды, ее оптическую однородность и способность сохранять устойчивость при больших вкладываемых мощностях.

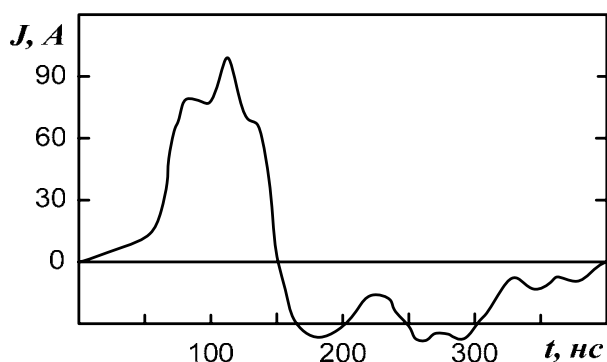
В *обзоре литературы* (§1.1) анализируются перспективные способы создания однородных в больших объемах неравновесных потоков газовых смесей, содержащих колебательно возбужденную молекулярную компоненту, с помощью тлеющих газовых разрядов при повышенном давлении и мощности, которые находят применение в мощных непрерывных СО<sub>2</sub>-лазерах с охлаждением активной среды скоростным потоком газа. Рассмотрены тлеющие разряды постоянного тока в

разрядных камерах большого объема со стабилизацией путем секционирования электродов; разряды со стабилизацией в быстром турбулентном потоке, преимущественно в трубках с быстрой осевой прокачкой; разряды с вводом энергии емкостным способом, т.е. через стенку разрядной камеры, в том числе ВЧ-разряды, в быстром потоке газа; несамостоятельные тлеющие разряды, поддерживаемые электронным пучком; и, наконец, мощные несамостоятельные разряды с ионизацией вспомогательными разрядами малой средней мощности, или комбинированные разряды. Определяются главные особенности комбинированного разряда РПТ-ЕИР (Рис. 3) по сравнению с разрядами других типов, а именно высокая однородность накачки, обусловленная однородностью емкостного импульсно-периодического разряда в большом объеме, и сравнительно небольшая удельная мощность накачки несамостоятельным разрядом при сохранении возможности масштабирования и увеличения мощности разряда и лазера за счет увеличения размеров разрядной камеры.

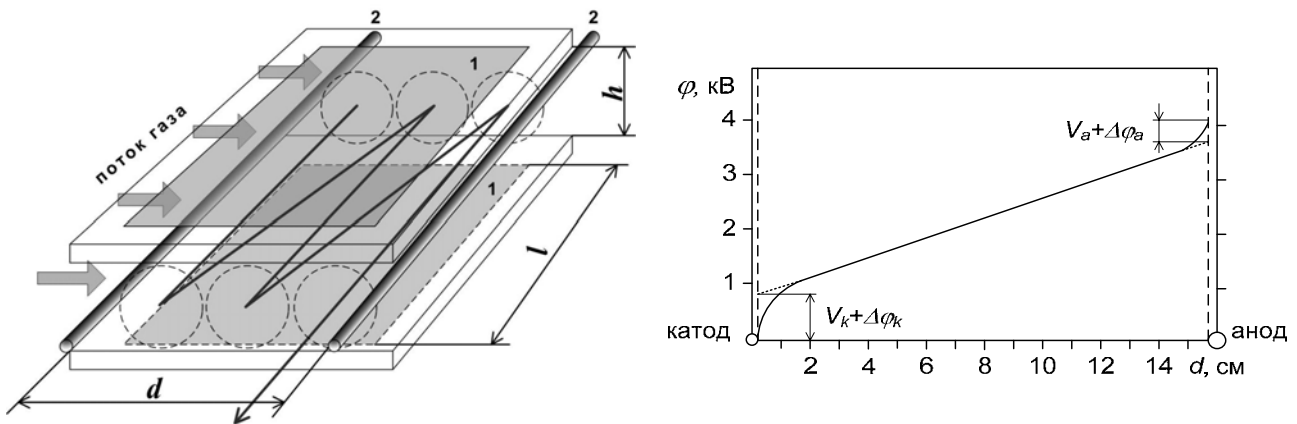
В последующих параграфах данной главы приводятся результаты экспериментальных исследований, проведенных автором на созданной при его непосредственном участии экспериментальной установке на базе действующего макета мощного  $\text{CO}_2$ -лазера "Лантан" [1]. В ходе исследований решался комплекс взаимосвязанных задач физики несамостоятельного разряда типа РПТ-ЕИР. Во-первых, определялись факторы, определяющие плотность электронов, достижимую средствами емкостного импульсного разряда; во-вторых, выяснялись механизмы формирования и роль приэлектродных падений напряжения в несамостоятельном РПТ с трубчатыми электродами; в-третьих, изучалось влияние приэлектродных процессов на однородность и предельные энергетические характеристики РПТ. Результаты проведенных исследований имеют значение для оценки перспектив повышения характеристик разряда данного типа при использовании его в мощных непрерывных  $\text{CO}_2$ -лазерах.



**Рис. 1.** Разрядная цепь ЕИР с эквивалентной схемой разрядной камеры:  $C_d$  – емкость диэлектрических пластин,  $C_p, R_p$  – емкость и сопротивление плазмы.



**Рис. 2.** Осциллограмма тока ЕИР через разрядную камеру лазера "Лантан-3".



**Рис. 3.** Схема разрядной камеры РПТ-ЕИР и распределение потенциала в межэлектродном промежутке РПТ. 1 – электроды ЕИР; 2 – электроды РПТ. Показаны зеркала и оптическая ось резонатора, диэлектрические пластины, изолирующие плазму от электродов ЕИР. Объем разрядной камеры  $V = l \times h \times d$ .

По результатам исследования емкостного импульсного разряда (Рис. 1-3) в смесях молекулярных газов при различных давлениях в быстром потоке установлено, что проводимость плазмы РПТ-ЕИР пропорциональна амплитуде импульсного тока. Таким образом, изменяя амплитуду импульсного тока ЕИР, можно управлять проводимостью плазмы и всеми характеристиками РПТ-ЕИР. Однородность ЕИР в объеме разрядной камеры обусловлена совместным действием распределенной емкости диэлектрических пластин и быстрого потока газа.

Найдено приближенное аналитическое решение задачи о распределении электрического поля между двумя трубчатыми электродами в прямоугольном канале (Рис. 3), заполненном однородно проводящей средой. Полученные формулы применены для анализа экспериментальных данных о распределении электрического поля в РПТ-ЕИР в лазере "Лантан-1". Показано, что в условиях РПТ-ЕИР с трубчатыми электродами вблизи электродов формируются области самостоятельной ионизации, контролируемой диссоциативным прилипанием, влияющие на электрические характеристики разряда и во многом определяющие устойчивость разряда к контракции. Учет элементарных процессов в сильном поле вблизи электродов РПТ позволяет качественно объяснить наблюдаемый вид ВАХ разряда в азоте и лазерной смеси, а также проанализировать осциллограммы спада тока РПТ в промежутках между ионизирующими импульсами.

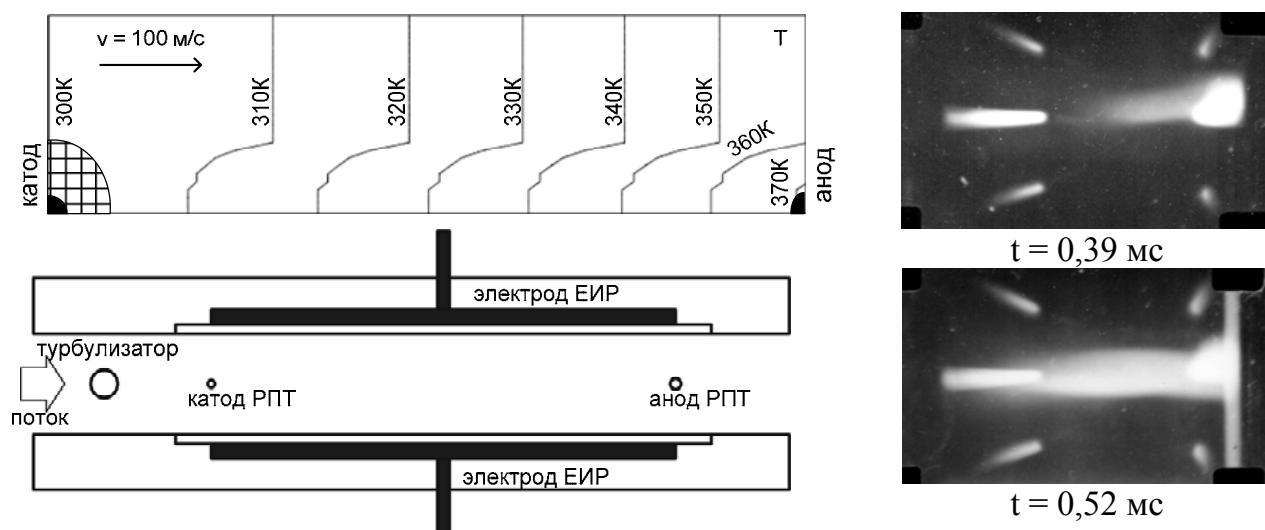
Эксперименты с добавлением в лазерную смесь электроотрицательных или активных в отношении диссоциативного прилипания компонентов показали, что их наличие сильно сказывается на характеристиках разряда. Значительное влияние примесей  $O_2$  и  $CO_2$  обусловлено диссоциативным прилипанием электронов в областях с повышенной напряженностью электрического поля вблизи электродов РПТ. В смесях  $O_2/N_2/(He)$  наблюдались плазмохимические реакции образования окислов азота, вызывающие временные изменения ВАХ и прочих параметров разряда. Накопление окислов азота и связанное с ним ухудшение параметров разряда

происходило при включенном РПТ, а при отключенном РПТ под действием ЕИР окислы азота распадались и параметры разряда восстанавливались.

В смесях  $\text{CO}_2/\text{N}_2/(\text{He})$  наблюдалось небольшое начальное ухудшение энергетических характеристик, связанное с процессом диссоциации  $\text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CO} + 1/2\text{O}_2$ , причем после установления равновесия изменения параметров разряда не происходило. Установившаяся степень диссоциации  $\text{CO}_2$  зависела от вкладываемой в разряд мощности и не превышала 20%. Стабилизирующее влияние на состав смеси и свойства разряда в целом оказывало присутствие небольшого количества  $\text{CO}$ . Добавка  $\text{CO}$  в смесь  $\text{O}_2/\text{N}_2/(\text{He})$  в количестве  $[\text{CO}] > 2[\text{O}_2]$  устраняла временные эволюции ВАХ, стабилизировала энергетические характеристики разряда. Благодаря процессу  $\text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CO} + 1/2\text{O}_2$  практически весь кислород переходил в  $\text{CO}_2$ .

По причине относительно короткого разряда в лазере "Лантан-1" ( $d = 15$  см,  $h = 5,5$  см) характер приэлектродных неоднородностей РПТ проявляется в нем особенно сильно. Относительное влияние приэлектродных областей РПТ на ВАХ разряда и осциллограммы спада тока между импульсами уменьшается с увеличением межэлектродного расстояния ( $d = 26$  см в лазерах "Лантан-3, -5"). Тем не менее, их устойчивость оказывает определяющее влияние на устойчивость разряда в целом, а неоднородность тепловыделения приводит к появлению "теплового следа", нарушающего однородность в разрядной камере.

На Рис. 4 показано рассчитанное в двухтемпературной модели колебательной релаксации распределение поступательной температуры в продольном сечении разрядной камеры при плотности мощности накачки  $3 \text{ Вт/см}^3$  и давлении 37 Торр смеси  $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He}$ . Зона повышенного энерговыделения вблизи катода заштрихована. Аналогичная зона вблизи анода не учитывалась, поскольку ее размер меньше характерной длины колебательной релаксации. Диффузия не учитывалась, поэтому "тепловой след" распространяется вниз по потоку по всей длине разрядной камеры.



**Рис. 4.** Распределение температуры в разрядной камере и "тепловой след" за катодной зоной энерговыделения (заштрихована). Внизу: положение турбулизатора относительно электродов в разрядной камере. Справа: кадры развития контракции, снятые с интервалом времени 0,13 мс. Сверху и снизу на фото отражения свечения электродов РПТ от стенок камеры.

Справа на Рис. 4 показаны два кадра скоростной киносъемки развития шнура контракции РПТ-ЕИР по достижении критических параметров.

Исследование процесса шнурования (или контракции) разряда проводилось методом скоростной киносъемки с временным разрешением до 0,1 мс. Использовалась скоростная кинокамера СКС-1М. Установлено, что шнурование разряда начинается в зоне неоднородного энерговыделения вблизи анода, и распространение шнура к катоду происходит в области теплового следа. Характерное время развития процесса – несколько десятых миллисекунды.

Для того, чтобы эффективно размывать тепловой след, необходим коэффициент диффузии не менее  $250 \text{ см}^2/\text{с}$ . Такой коэффициент диффузии может обеспечить турбулентная диффузия. Турбулизатор в виде цилиндра диаметром 15 мм, расположенный на 60 мм вверх по потоку от катода, создает поперечные пульсации скорости потока, эффективно разрушающие тепловой след за катодом и способствующие повышению однородности разряда. При этом критическая мощность разряда, при которой происходит контракция, возрастает до 1,5 раз.

Основным результатом проведенных исследований РПТ-ЕИР является разработка совместно с Н.А.Генераловым, В.Д.Косынкиным, В.П.Зимаковым и Н.Г.Соловьевым научных основ создания потоков колебательно-возбужденных молекулярных газов в разрядных камерах большого объема с высокой степенью однородности и их применение для создания мощных газовых лазеров с высоким КПД и качеством излучения.

Результаты проведенных исследований были использованы при разработке и создании серии технологических лазеров "Лантан". Конструкция основного лазера этой серии "Лантан-3", который выпускался серийно на Ижевском механическом заводе и в НПО "Ротор", г. Черкассы, Украина, описана в Приложении А.

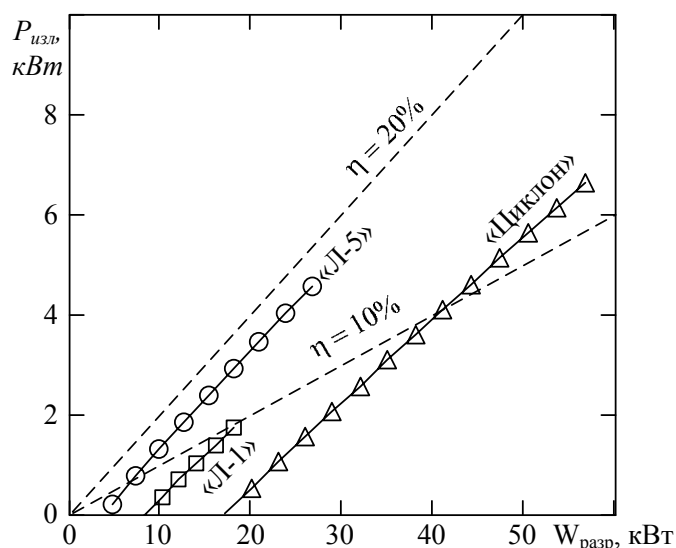
В **Главе 2** приводятся результаты исследования возможности управления параметрами излучения с целью получения лазерных пучков с наилучшими возможными характеристиками и высокой эффективностью, а также их взаимодействия с потоком колебательно-возбужденного газа в резонаторах лазеров с накачкой РПТ-ЕИР с быстрой поперечной прокачкой.

В §2.1 приведены результаты исследования генерации излучения в лазерах "Циклон" и "Лантан" с РПТ-ЕИР с помощью устойчивых многопроходных резонаторов с плоскими и сферическими зеркалами, с конфигурацией от полуконфокального до близкого к плоскому или концентрическому, с оптической длиной от 4,5 до 12,5 м и с числом Френеля от 1,4 до 14. Для проведения измерений была разработана методика сканирования несфокусированного и сфокусированного лазерного луча полированными шариками. Излучение, рассеянное шариком,двигающимся по кругу большого радиуса через зону луча, в малый телесный угол, регистрировалось быстродействующим фотоспротивлением типа ФСГ-22 или пироэлектрическим датчиком. Полученные в результате распределения интенсивности излучения использовались для определения диаметра лазерного луча, его угловой расходимости и дифракционных параметров  $K$  и  $M^2$  в соответствии с отечественными и международными стандартами [6, 7].

Измерения показали, что характеристики излучения лазеров с РПТ-ЕИР с устойчивыми резонаторами в основном соответствуют теоретическим оценкам для случаев одномодовой и многомодовой генерации, выполненным без учета фазовых искажений в активной среде. Эти результаты, в особенности для случаев резонаторов с конфигурацией, приближающейся к плоскому, а также для резонаторов с малым числом Френеля, свидетельствуют о высоком оптическом качестве активной среды и больших потенциальных возможностях схемы РПТ-ЕИР для получения лазерного излучения высокого качества с высокой эффективностью.

Зависимости мощности излучения лазеров серии "Лантан" и "Циклон" от мощности РПТ-ЕИР, представленные на Рис. 5, свидетельствуют о возможности получения излучения с высоким электрооптическим КПД, стремящимся в случае оптимизированного резонатора "Лантан-5" к 18-20%. С устойчивыми резонаторами максимальный КПД получался в случае полуконфокального резонатора, генерирующего максимальное количество поперечных мод (до  $M^2 = 10$  в случае "Лантан-5"), а КПД резонаторов с малым числом Френеля, генерировавшим излучение с  $M^2 = 2$ , не превышал 10%. Устойчивые резонаторы, близкие к плоскому, в принципе давали излучение с КПД до 13-14% с малой расходимостью, но они проявляли нестабильность генерации и высокую чувствительность к разъюстировке и термодформациям, и скорее демонстрировали возможности, чем могли использоваться практически.

Активные среды  $\text{CO}_2$ -лазеров с быстрой поперечной прокачкой, с накачкой РПТ-ЕИР или другими типами тлеющего разряда с выходной мощностью 5 кВт и выше характеризуются геометрическим числом Френеля  $N \sim 10$  и ненасыщенным коэффициентом усиления  $\alpha$  от 0,5 до 1% на сантиметр и интенсивностью насыщения  $I_S \sim 0,2 \text{ кВт/см}^2$ .



**Рис. 5.** Зависимость выходной мощности лазера  $P_{изл}$  от мощности, вкладываемой в разряд  $W_{разр}$ , для лазеров "Лантан-1", "Циклон" и "Лантан-5", различающиеся длиной резонатора.

Для эффективного вывода излучения в таких лазерах необходимо как можно равномернее заполнить излучением активный объем, и для этого лучше всего подходят неустойчивые резонаторы с увеличением  $M < 2$  и выводом излучения в виде кольца по периферии выходного зеркала. Главным недостатком неустойчивого резонатора с небольшим увеличением является низкое качество выходного лазерного пучка, выражающееся в существенном превышении диаметра пятна фокусировки над дифракционным пределом, а также в неравномерном распределении интенсивности по сечению фокального пятна. Причина этого кроется в сложном характере дифракции на краю выходного зеркала, приводящем к образованию и усилению так называемой "сходящейся волны" в активной среде и ее интерференции с основной модой резонатора. Специальные схемы резонаторов основаны на различных методах подавления "сходящейся волны" [2, 3].

В §§2.2,2.3 дан обзор литературы, в котором рассматриваются следующие специальные схемы оптических резонаторов: неустойчивый резонатор с выводом излучения через равномерно отражающее частично прозрачное зеркало; устойчивые и неустойчивые резонаторы с большими дифракционными потерями; устойчивые резонаторы с асферическими зеркалами, предназначенные для генерации супергауссовских мод; самофильтрующий неустойчивый резонатор; многопроходный устойчиво-неустойчивый резонатор, устойчивый в плоскости, параллельной газовому потоку, и неустойчивый в перпендикулярной плоскости, с односторонним выводом излучения по краю цилиндрического зеркала; неустойчивый резонатор с круглыми зеркалами со ступенчатым профилем коэффициента отражения частично-прозрачного выходного зеркала с согласованием фазы; а также неустойчивые резонаторы с выводом излучения через ВРМ. ВРМ (от VRM – variable reflectivity mirror) – частично отражающее зеркало с переменным по радиусу коэффициентом отражения, либо с гауссовским профилем коэффициента отражения  $R(r) = R_0 \exp(-2(r/w_a)^2)$ , либо с супергауссовским, определяющим семейство профилей со сглаженным краем:

$$R(r) = R_0 \exp(-2(r/w_a)^n). \quad (1)$$

Гауссовский профиль коэффициента отражения является частным случаем супергауссовского с показателем степени  $n = 2$ .

Последний тип резонатора по ряду причин оказывается наиболее привлекательным для использования в широкоапертурных активных средах газовых лазеров со сравнительно небольшим усилением. Например, самофильтрующий неустойчивый резонатор (СФНР) [8] дает осесимметричный пучок хорошего качества только при большом увеличении  $M$  и соответственно малом коэффициенте обратной связи ( $\gamma \sim 1/M^2$ ). Для его эффективного применения требуется активная среда с большим коэффициентом усиления, но и в этом случае интенсивность излучения сильно меняется по длине резонатора, и равномерного заполнения активной среды излучением достичь не удастся, что приводит к снижению КПД. В §2.4 диссертации показано, что, СФН резонатору с увеличением 5 с большим плечом длиной 17,2 м можно поставить в соответствие полностью эквивалентный по конфигурации излучения в активной среде (на длине 7,5 м, примыкающей к



сферическому зеркалу) неустойчивый ВРМ резонатор с увеличением  $M = 1,67$ . Этот эквивалентный резонатор, кроме того, что он физически короче и при этом дает близкое по характеристикам излучение, позволяет более эффективно использовать активную среду за счет большего коэффициента обратной связи (25-30% в зависимости от максимума коэффициента отражения гауссовского зеркала).

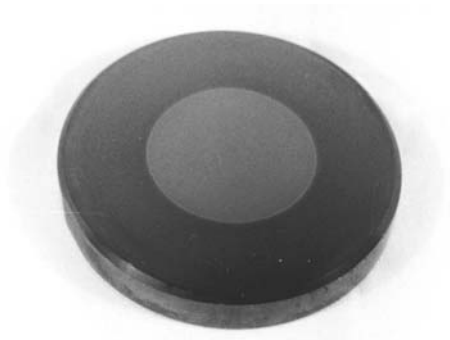
Теория оптических резонаторов с гауссовскими апертурными диафрагмами разработана в целом ряде теоретических работ, обзор которых дан в §2.3 диссертации. Первоначально гауссовские зеркала рассматривались просто как удобное для теоретического рассмотрения приближенное представление внутрирезонаторных диафрагм. С развитием техники нанесения интерференционных покрытий с заданными характеристиками, интерес к практической реализации таких резонаторов только усиливался. Тем не менее, применение резонаторов с ВРМ в газовых лазерах большой непрерывной или импульсно-периодической мощности сдерживалось повышенными требованиями к проходной внутрирезонаторной оптике по коэффициенту поглощения, и к моменту начала работ по их применению в лазерах "Лантан" было известно всего два примера испытания подобных резонаторов в лазерах с выходной мощностью до 1 кВт.

В §§2.5,2.6 диссертации представлены результаты исследования характеристик излучения технологических лазеров типа "Лантан" с устойчивым резонатором в режиме больших дифракционных потерь с выводом излучения через зеркало с гауссовским профилем коэффициента отражения (выходная мощность до 2 кВт), а также с неустойчивым резонатором с супергауссовским профилем коэффициента отражения выходного зеркала (выходная мощность до 5 кВт).

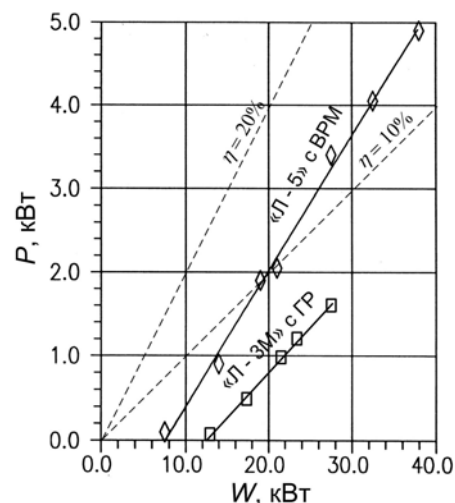
Выходные зеркала с переменным по радиусу коэффициентом отражения разрабатывались и изготавливались в ИПМех РАН [9] и в Лаборатории оптических элементов и сенсорных структур ИПЛИТ РАН (г. Шатура, Московской обл.) [10].

В экспериментах по применению ВРМ в устойчивом резонаторе с большими дифракционными потерями использовалось плоское гауссовское зеркало [9] с параметрами покрытия (см. формулу (1))  $R_0 = 0,17$ ,  $w_a = 0,7$  см,  $n = 2$ . Сферическое супергауссовское зеркало с радиусом кривизны  $R_1 = -20$  м и с параметрами покрытия  $R_0 = 0,68$ ,  $w_a = 1,35$  см,  $n = 4$  применялось в неустойчивом ВРМ резонаторе с увеличением  $M = 1,75$ . Коэффициент поглощения в центре супергауссовского зеркала [10] не превышал 0,2%, поэтому оно могло использоваться при выходной мощности лазерного излучения до 5 кВт (Рис. 6).

На Рис. 7 показаны результаты по выходной мощности и КПД, полученные в экспериментах с этими двумя резонаторами. Низкий КПД резонатора с гауссовским зеркалом обусловлен небольшим коэффициентом обратной связи и малым объемом моды в резонаторе. Видно практически двукратное преимущество по КПД неустойчивого ВРМ резонатора с супергауссовским зеркалом. Дифференциальный КПД оказался около 16%, меньше полученного на том же лазере, снабженным обычным устойчивым резонатором в многомодовом режиме (Рис.5). Это обусловлено



**Рис. 6.** ВРМ-зеркало из ZnSe с нанесенными просветляющим и отражающим покрытием с переменным по радиусу коэффициентом отражения (пятно в центре) [10].



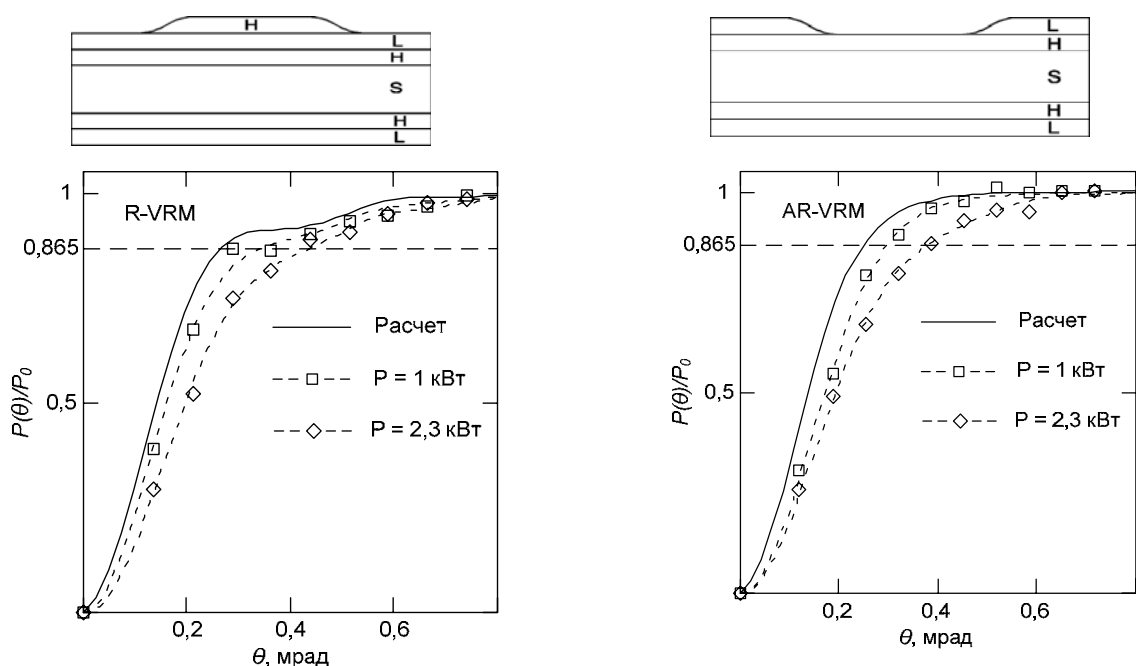
**Рис. 7.** Зависимость выходной мощности лазера  $P$  от мощности, вкладываемой в разряд  $W$ , для лазеров с устойчивым (ГР) и неустойчивым (ВРМ) резонаторами.

более высокими потерями за проход, а также менее однородным заполнением объема активной среды. Измерения в дальней зоне показали, что более 80% мощности излучалось в полный угол 0,6 мрад. Реальное распределение примерно в 1,5 раза шире по сравнению с теоретическим, что объясняется неучтенными в расчете фазовыми искажениями волнового фронта на выходе из резонатора.

Чувствительность резонатора к разбюстировке зеркал оказалась умеренной, эффект теплового клина, присущий активной среде лазеров с поперечной прокачкой, в описываемых экспериментах был мал ( $2 \cdot 10^{-5}$  рад на  $1 \text{ Вт/м}^3$  мощности накачки).

Дальнейшие эксперименты с ВРМ резонаторами были направлены на преодоление ограничения, связанного с изменением фазы при отражении и прохождении лазерного излучения через покрытие переменной толщины, которое и давало переменный по радиусу коэффициент отражения. Переменный коэффициент отражения, в частности, можно получить, нанося на просветленную поверхность слой материала с высоким коэффициентом отражения (R-VRM, Рис. 8). Другой способ – создать слой с переменным коэффициентом отражения в самом просветляющем покрытии (AR-VRM, Рис. 8). Численные расчеты распространения излучения в резонаторе с применением интеграла Френеля-Кирхгофа и метода итераций (подробнее в Приложении В) показали, что в случае AR-VRM фазовые искажения, возникающие при отражении от зеркала, в основном компенсируются искажениями, возникающими при прохождении излучения через зеркало, тогда как в случае R-VRM эти искажения складываются.

На Рис. 8 приведены результаты измерения доли полной мощности лазерного излучения, содержащейся в заданном телесном угле в зависимости от угла при разной мощности излучения в сравнении с теоретической оценкой. Измерения



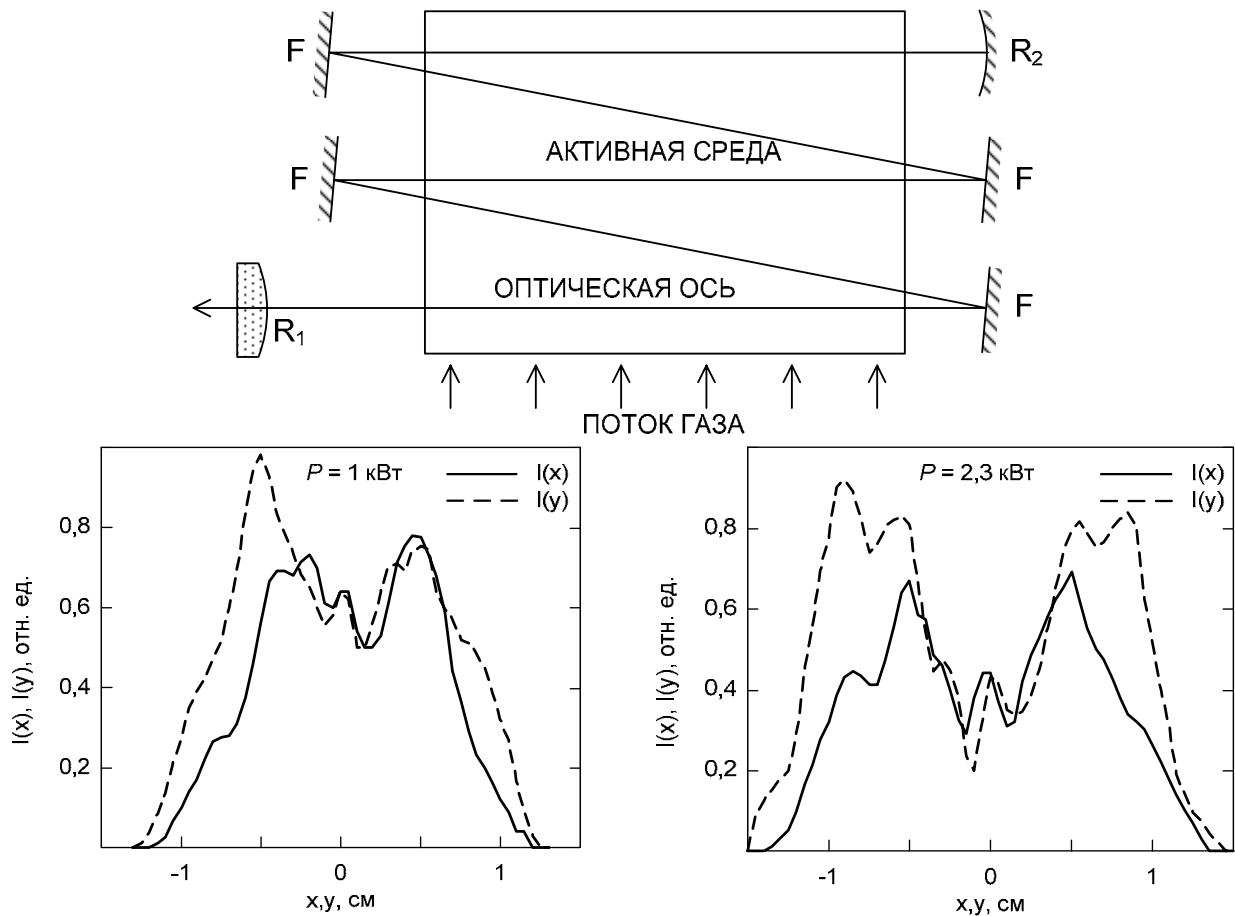
**Рис. 8.** Структура ВРМ-зеркал (S – подложка из ZnSe, L, H – покрытия с низким (L) и высоким (H) коэффициентами преломления) и угловые характеристики мощности излучения.

проводились по специально разработанной методике с высоким временным разрешением на основе метода калиброванных диафрагм [7] (Приложение Г). Видно, что компенсация фазы хорошо работает при малой мощности излучения, а при мощности излучения свыше 2,3 кВт характеристики излучения в обоих случаях практически одинаковы.

Такое поведение излучения в эксперименте было обусловлено тем, что с целью исключения влияния излучения, отражающегося от верхней и нижней стенок разрядной камеры в экспериментах по компенсации фазовых искажений увеличение резонатора было уменьшено от 1,75 до 1,4 путем уменьшения радиуса кривизны глухого зеркала от 35 до 30 м. При этом несколько снизился КПД генерации, и изменились условия подавления высших мод генерации, что привело к их генерации при мощности излучения свыше 2 кВт. Высшие моды менее подвержены фазовым искажениям и при их появлении эффект фазовой компенсации маскировался.

Из данных, приведенных на Рис. 9, видно, что при увеличении мощности излучения увеличение ширины пучка на выходе из резонатора, обусловленное возбуждением высших поперечных мод, происходит в направлении, перпендикулярном направлению движения возбужденного газа в активной среде резонатора.

Подобные эксперименты были проведены с целым рядом резонаторов, как и с неустойчивым ВРМ резонатором, и основные результаты этих экспериментов представлены в Таблице 1. Характеристики излучения измерялись прибором для сканирования распределения интенсивности сфокусированного и нефокусированного пучков UFF-100. Характеристики излучения ВРМ резонатора



**Рис. 9.** Расположение многопроходного ВРМ резонатора по отношению к потоку газа и распределения интенсивности излучения в ближней зоне вдоль (X) и поперек (Y) направления потока.

сравниваются с характеристиками устойчивого резонатора с увеличенной эффективной длиной (РУЭД), реализованного на лазере "Лантан-3М".

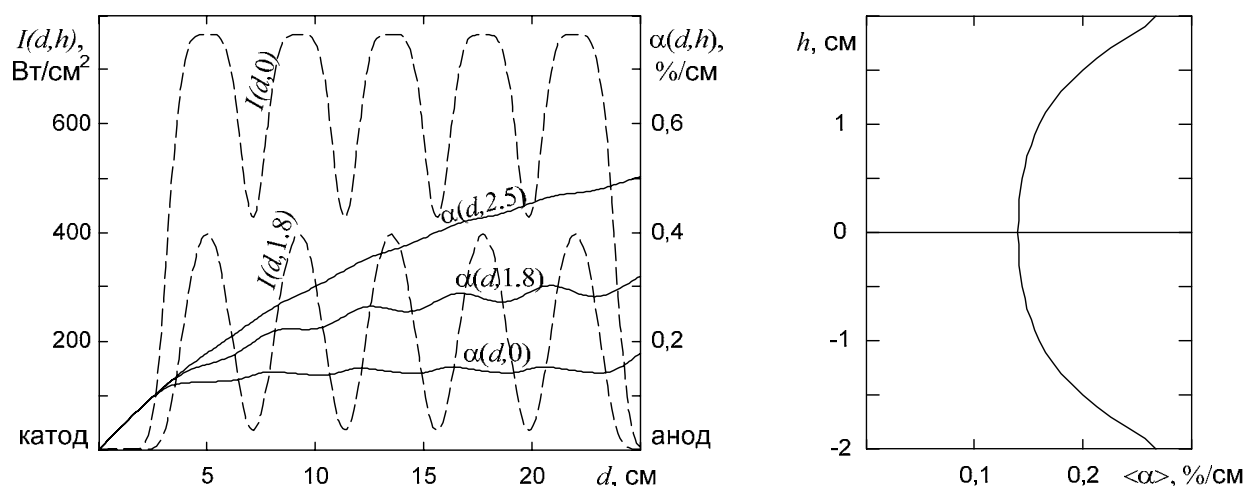
Из данных Таблицы 1 видно, что дифракционный параметр  $M^2$ , характеризующий, в частности, модовый состав излучения, измеренный в направлении поперек потока значительно отличается от измеренного вдоль потока, т.е. высшие моды генерации возбуждаются в поперечном потоке направления.

**Таблица 1.** Характеристики лазерных пучков, полученных с помощью устойчивого РУЭД и неустойчивого ВРМ резонаторов.

Тип резонатора	$w_y, w_x$ , на линзе, мм		$w_{0y}, w_{0x}$ , в фокусе, мм		Дифр. параметр $M^2$	
	Y	X	Y	X	Y	X
Направление к потоку (X – вдоль)						
РУЭД (X-TEM <sub>00</sub> , Y -TEM <sub>01</sub> )	23	17	0.27	0.21	2.2	1.25
РУЭД (X -TEM <sub>00</sub> , Y - TEM <sub>00</sub> + TEM <sub>01</sub> )	21	18	0.22	0.19	1.75	1.25
Неустойчивый ВРМ-резонатор	25	21	0.2	0.17	1.7	1.2

Для объяснения этого эффекта были проведены теоретические оценки распределения насыщенного коэффициента усиления в многопроходном резонаторе в простой двухтемпературной модели движущейся колебательно-возбужденной среды с учетом возбуждения колебаний молекул тлеющим разрядом в резонаторе, колебательной релаксации и вывода части колебательной энергии из потока с помощью лазерного излучения высокой интенсивности. Результаты расчета насыщенного коэффициента усиления для конфигурации резонатора, представленной на Рис. 9, приведены на Рис. 10. Излучение внутри резонатора промоделировано супергауссовским распределением с интенсивностью, постоянной по длине резонатора. Распределение интенсивности в среднем сечении разрядной камеры по ширине показано на Рис. 10 пунктиром для центральной линии, соединяющей катод и анод ( $h = 0$ ) и для линии, вдоль которой максимальная интенсивность излучения в 2 раза меньше, чем на оси. Сплошными линиями показаны распределения коэффициента усиления вдоль потока по направлению  $d$  от катода к аноду для  $h = 0$ ,  $h = 1,8$  см и  $h = 2,5$  см, где интенсивность излучения минимальна. Справа представлен график зависимости насыщенного коэффициента усиления, усредненного по всей длине резонатора от выходного до глухого зеркала и ширине пучка, от вертикальной координаты в пучке, отсчитываемой от его середины. Вдоль вертикального направления в среднем коэффициент усиления возрастает примерно вдвое на периферии пучка по сравнению с его серединой, в этом и заключается причина возбуждения высших поперечных мод, в первую очередь вдоль вертикального направления. Распределение усредненного насыщенного коэффициента усиления вдоль горизонтального направления  $d$  гораздо более равномерно.

Для преодоления отрицательных последствий рассматриваемого эффекта был

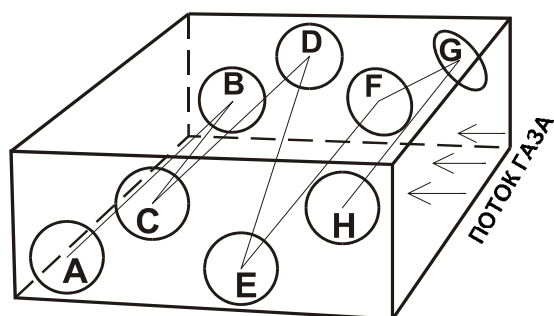


**Рис. 10.** Распределение насыщенного коэффициента усиления  $\alpha(d, h)$  при трех значениях  $h$ , посчитанные для середины камеры ( $x = l/2$ ). Пунктиром показана интенсивность излучения  $I(d, h)$  вдоль потока  $d$  от катода к аноду в среднем сечении ( $x = l/2$ ) при двух значениях  $h$ , отсчитываемых от середины камеры. Справа – распределение по высоте  $h$  насыщенного коэффициента усиления, усредненного по всем сечениям пучка внутри резонатора.

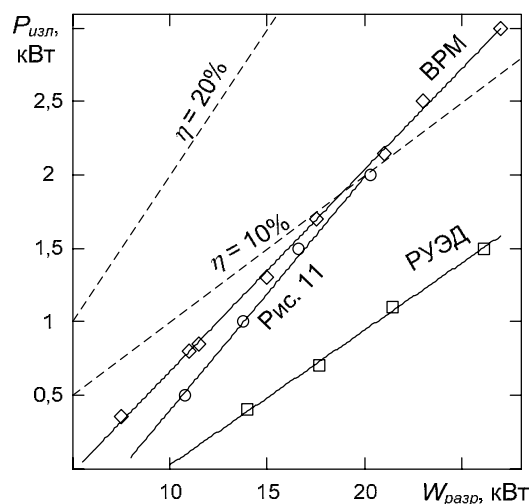
предложен и создан многопроходный устойчивый резонатор с оптической осью, расположенной в пересекающихся плоскостях. Оптическая ось резонатора была сложена в двух пересекающихся плоскостях ABC и DEF, как показано на Рис. 11. Дополнительная плоскость FGH, в которой оптическая ось сложена П-образно, помогала более однородно заполнить излучением поперечное сечение потока. Генерация высших мод в вертикальном направлении подавлялась за счет насыщения коэффициента усиления также в зонах самопересечения пучка в вертикальном направлении, появляющихся в такой конфигурации.

Резонатор такого типа был установлен на лазере "Лантан". Расстояние от зеркала до зеркала вдоль оптической оси составляло в среднем 1,6 м, полная длина резонатора была 9,8 м. Резонатор был устойчивым, коэффициент отражения выходного зеркала – 17%. Лазер продемонстрировал высокое качество излучения, мощность до 2,5 кВт в непрерывном режиме и дифференциальный КПД 16%.

На Рис. 12 показан график зависимости мощности излучения от вкладываемой в разряд мощности для резонаторов трех типов: неустойчивого ВРМ резонатора, резонатора с увеличенной эффективной длиной (РУЭД) и устойчивого многопроходного резонатора, сложенного в пересекающихся плоскостях (Рис. 11). Последняя конструкция оказалась удачной и была реализована на лазере "Лантан-3М", работающем в режиме  $TEM_{00}$  моды. Неустойчивый резонатор с ВРМ также эксплуатируется на лазере "Лантан-5". В технологических экспериментах, проведенных на лазере "Лантан-5" с ВРМ-резонатором было установлено, что в стандартных технологических процессах резки черных и цветных металлов в непрерывном и импульсно-периодическом режиме, а также пробивки отверстий излучение, полученное в ВРМ резонаторе, проявляет себя в соответствии с измеренными значениями дифракционного параметра  $M^2$ , полностью аналогично излучению с таким же  $M^2$ , но полученном в устойчивом резонаторе.



**Рис. 11.** Расположение зеркал в резонаторе с оптической осью, свернутой в пересекающихся плоскостях. Н – выходное зеркало, А – сферическое глухое зеркало.

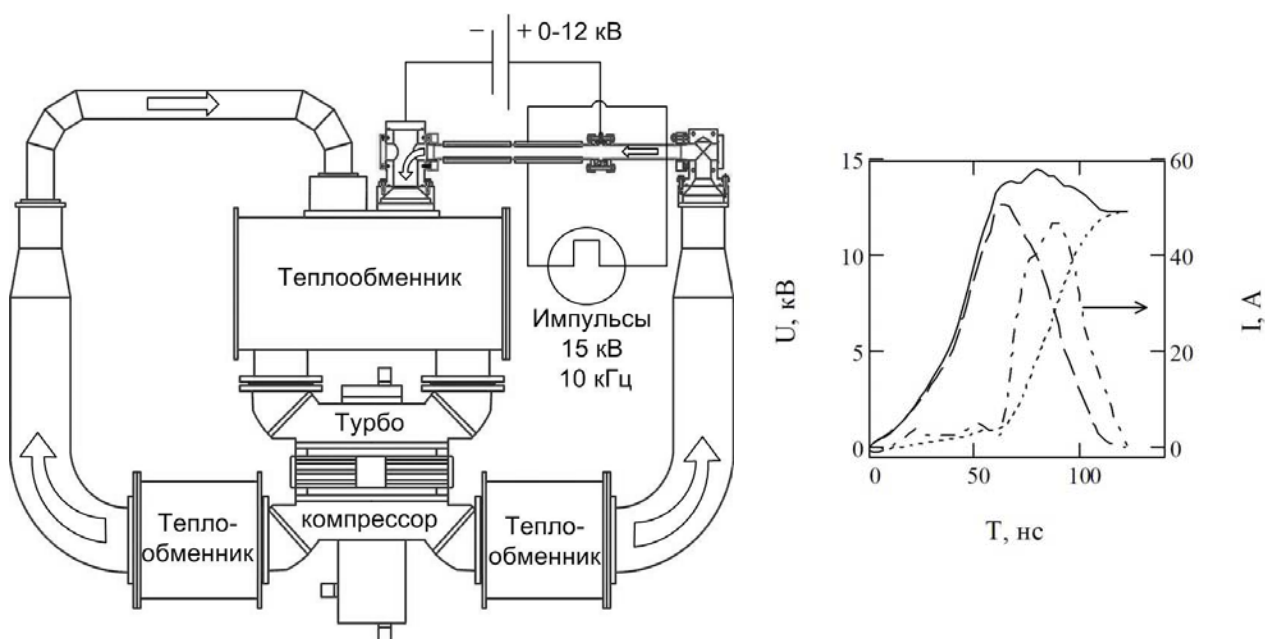


**Рис. 12.** Зависимости мощности излучения  $P_{изл}$  от мощности, вкладываемой в разряд,  $W_{разр}$ , для неустойчивого ВРМ резонатора, устойчивого РУЭД, а также показанного на Рис. 11.

**Глава 3** посвящена разработке научных основ и созданию мощных непрерывных лазеров с накачкой РПТ-ЕИР с быстрым осевым потоком газа. Технология комбинированного разряда РПТ-ЕИР применяется для стабилизации мощного однородного тлеющего разряда в цилиндрической разрядной камере (трубке) в быстром потоке газа. В разрядной трубке РПТ-ЕИР лазера с быстрой осевой прокачкой колебательные уровни молекул, обеспечивающих лазерную генерацию, возбуждаются в несамостоятельном РПТ между штыревыми анодами, расположенными вверх по потоку, и кольцевым катодом вниз по потоку (Рис. 13). Напряженность электрического поля РПТ в комбинированном разряде ниже, чем требуется для ионизации, и может быть оптимизирована для наиболее эффективного возбуждения лазерных уровней. При низкой напряженности поля ионизационные неустойчивости подавлены, и высокий уровень турбулентности газового потока для поддержания однородности РПТ-ЕИР не требуется. Средняя по времени мощность ЕИР составляет менее 5 % мощности РПТ.

Исследовано влияние различных факторов на стабильность и однородность характеристик РПТ-ЕИР в схеме с быстрой осевой прокачкой. Разработаны методы оптимизации формы и взаимного расположения электродов РПТ-ЕИР, а также согласования выхода импульсного генератора ЕИР с емкостной нагрузкой типа системы разрядных трубок, что при соответствующей организации потока газа позволило получить лазерную мощность более 2,2 кВт с метра активной длины в непрерывном и импульсно-периодическом режиме при КПД 20%.

На основе двухступенчатого радиального турбокомпрессора, обеспечивающего перепад давления до 1,4 при работе на смесях с содержанием гелия до 75%, была создана экспериментальная газодинамическая труба для отработки разрядной схемы и определения параметров активной среды (Рис. 12).



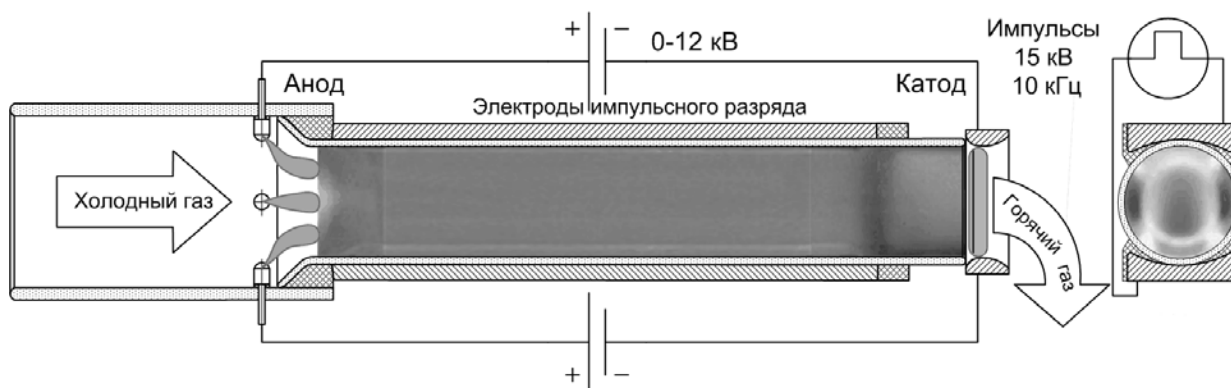
**Рис. 12.** Установка для исследования характеристик РПТ-ЕИР в быстром осевом потоке газа в трубке. Справа – осциллограмма тока и напряжения ЕИР.

Характеристики РПТ-ЕИР в трубках изучались в широком диапазоне изменения параметров: скорость потока газа до 250 м/с, давление – до 90 Торр в смесях, близких к  $1\text{CO}_2:7\text{N}_2:12\text{He}$ . Оптимизация формы и взаимного расположения электродов РПТ и ЕИР, а также характеристик газового потока на входе в разрядную трубку позволили достичь средней плотности вкладываемой в разряд мощности до  $17,5 \text{ Вт/см}^3$  в трубках с внутренним диаметром 35 мм и расстоянием между катодом и анодом РПТ 400 мм.

Ориентировочное давление смеси на входе в трубку от 80 до 100 Торр, на выходе из трубки от 60 до 80 Торр. Скорость газа на оси трубки без разряда составляет 200 м/с, что соответствует объемному расходу газа через трубку  $Q = 200 \text{ дм}^3/\text{с}$  или при  $\rho_{75} = 0,057 \text{ кг/м}^3$  массовый расход  $G_{75} = 0,0114 \text{ кг/с}$ . Течение дозвуковое,  $Re \approx 22000$ . При вкладе мощности до 5-6 кВт при давлении 75 Торр (526 Дж/г) газ в трубке может нагреться на 250-300 градусов, при этом скорость на выходе будет соответственно больше скорости на входе, но останется дозвуковой (скорость звука в гелиевой смеси более 500 м/с).

На графике Рис. 12 приведены осциллограммы импульсного напряжения и тока через одну разрядную трубку. Представлены напряжение на электродах (сплошная линия), напряжение на плазме (штриховая), суммарное напряжение на диэлектрических стенках (пунктир) и ток через плазму (штрих-пунктир). Определенные трудности представляло согласование выхода импульсного генератора с разрядной трубкой и системой разрядных трубок. Электрическая емкость между металлическим электродом и проводящей плазмой в трубке порядка 100 пФ, что представляет дополнительные трудности при попытке вложить в плазму импульсную мощность. Проблема была решена путем секционирования электродов и соединения их в длинную линию с волновым сопротивлением, равным выходному сопротивлению импульсного генератора, причем минимальные значения емкости и индуктивности единичной секции определялись параметрами фронта импульса. В случае импульсов, показанных на Рис. 12, параметры единичной секции соответствовали параметрам трубки, и согласование системы трубок достигалось объединением их в длинную линию без секционирования электродов.

Внешний вид разрядной трубки и картина свечения разряда приведены на Рис. 13. При большой мощности РПТ вблизи штыревых анодов плотность тока настолько

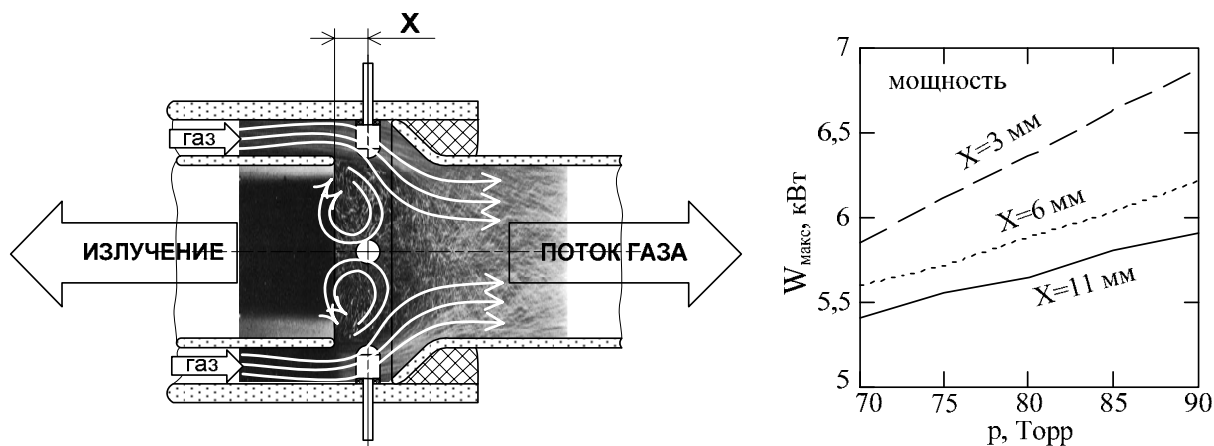


**Рис. 13.** Схема расположения электродов РПТ-ЕИР и свечение разряда в трубке.

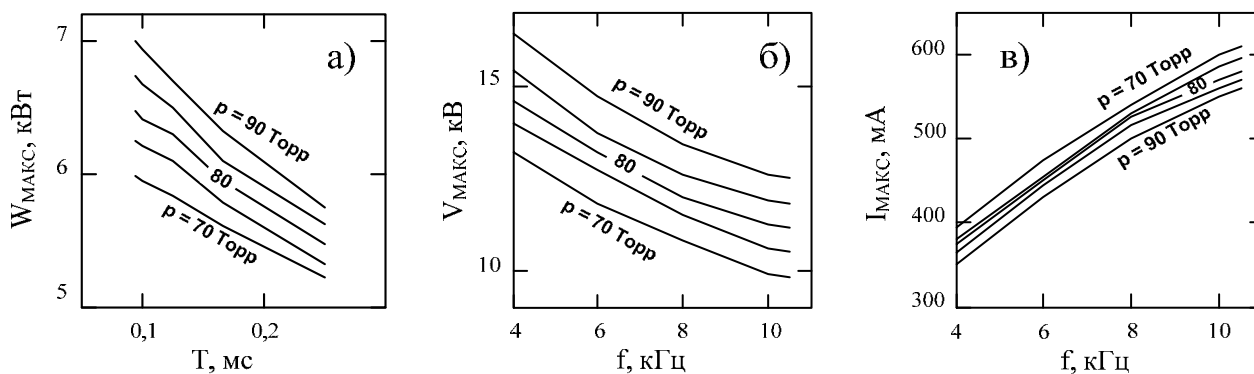


велика, что разряд контрагирует, и ток протекает в виде тонких ярко светящихся шнуров, как схематически показано на Рис. 13. При этом в объеме разрядной трубки плазма сохраняет однородность. При увеличении мощности разряда постоянного тока происходит нарушение однородности протекания тока и в объеме разрядной трубки. По мере увеличения мощности РПТ происходит некоторое увеличение размеров прианодной контрагированной зоны, и когда мощность достигает некоторого предельного значения, происходит мгновенное распространение контракции на весь разрядный промежуток. Для различных конфигураций анода были проведены эксперименты по определению предельной вкладываемой мощности. Было показано, что предельная вкладываемая мощность существенно растет по мере удаления токового пятна из пристеночного пограничного слоя потока за счет удлинения анодных штырьков, а также применения турбулизаторов, разрушающих пристеночный погранслои. Наибольшего эффекта увеличения предельной мощности РПТ удалось добиться при организации втекания газа в прианодную зону через кольцевой зазор, так чтобы токовые пятна на анодах оказались в зоне с максимальной скоростью потока.

Застойная зона у торца внутренней трубки, образующей кольцевой зазор, играет важную роль в формировании потока вблизи анодов. Как видно из приведенного на Рис. 14 графика, при изменении расстояния  $X$  от 11 до 3 мм наблюдалось значительное увеличение предельной мощности. Максимальные достигнутые при  $X = 3$  мм характеристики РПТ в зависимости от давления газа и частоты ЕИР также представлены на Рис. 15. Структура потока, формирующаяся вблизи торца внутренней трубы, способствует устойчивости прианодной зоны к контракции. Возрастание максимальной мощности разряда с давлением (Рис. 15, а), а также линейное её снижение при увеличении временного интервала между импульсами указывают на ионизационно-перегревный механизм неустойчивости разряда. Максимальный ток растет с частотой повторения импульсов и уменьшается при увеличении давления (Рис.15,в). Максимальное напряжение увеличивается с давлением и уменьшается с ростом частоты повторения импульсов (Рис. 15,б).



**Рис. 14.** Картина течения газа вблизи анодов РПТ при кольцевом вводе потока в разрядную трубку и зависимость предельной мощности РПТ-ЕИР от расстояния от среза сопла до анода.



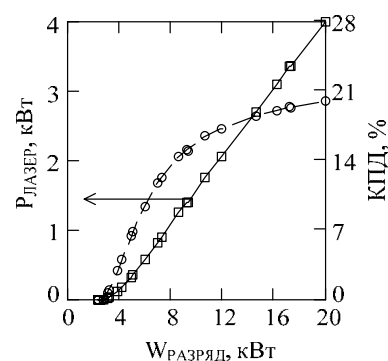
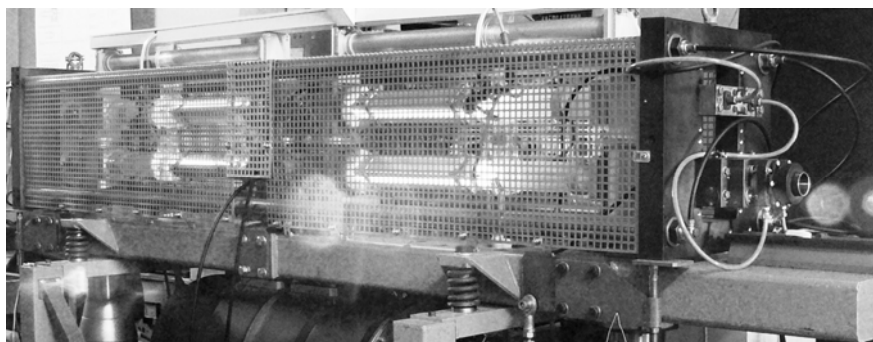
**Рис. 15.** Предельные характеристики РПТ-ЕИР в одной разрядной трубке в зависимости от частоты повторения импульсов ЕИР и давления газовой смеси.

Это дает возможность регулирования электрического поля РПТ-ЕИР с целью выбора оптимального значения для возбуждения колебаний молекул  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$ .

Для осуществления лазерной генерации можно использовать две, четыре или большее количество разрядных трубок, объединенных двухзеркальным устойчивым полуконфокальным резонатором. Оптимальный коэффициент отражения выходного зеркала для 2-х трубок составлял 70-80%, для 4-х – 50-60%, для 8-ми – 30-40%. Оптимизация по коэффициенту усиления проводилась путем расчета с измеренными характеристиками активной среды при условии минимизации лучевой нагрузки на зеркало резонатора. Длина активной среды в каждой разрядной трубке 0,45 м.

Распределение коэффициента усиления в активной среде каждой из разрядных трубок имеет оси симметрии, положение которых задается электродами ЕИР. В лазере с несколькими разрядными трубками электроды ЕИР были повернуты вокруг осей трубок на разные углы, так чтобы обеспечить осевую симметрию выходного луча (Рис. 16). Максимальная выходная мощность, полученная с 2-мя разрядными трубками, была 1,5 кВт. Диаметр луча, ограниченный в этой серии экспериментов диафрагмой, составлял 17-18 мм при величине дифракционного параметра  $M^2$  около 10 на максимальной мощности. Исследование лазерной генерации показало, что высокой однородности активной среды, проявляющейся в симметрии выходного пучка, можно достичь путем выбора формы электродов ЕИР. Диаметр пучка измерялся прибором UFF-100 в соответствии с методиками [6, 7]. Диаметр лазерного пучка, измеренный в различных точках снаружи резонатора, затем экстраполировался внутрь резонатора гиперболической зависимостью согласно [6]. Таким образом, было найдено, что объем, в котором содержится 90% мощности лазерного пучка, составляет не более 50% объема активной среды, с учетом разрядного промежутка и послесвечения вниз по потоку.

На основе результатов экспериментов с двумя разрядными трубками была разработана и построена значительно более мощная установка с 4-мя разрядными трубками (Рис. 16). Трубки соединяются параллельно по отношению к системе прокачки газа и последовательно по отношению к оптическому резонатору. Общая длина резонатора 4800 мм, резонатор П-образный, содержит 2 дополнительных поворотных зеркала. Глухое зеркало вогнутое, радиус кривизны 10 м. Выходное –



**Рис. 16.** Экспериментальный лазер с четырьмя разрядными трубками РПТ-ЕИР с быстрой осевой прокачкой и его характеристики.

плоское, коэффициент отражения 50%. Диаметр выходного пучка в перетяжке около 22 мм, дифракционный  $M^2 = 6,6$ .

На графике Рис. 16 представлены также зависимости выходной мощности лазера и КПД разряда от суммарной электрической мощности энергоблока РПТ-ЕИР во все четыре трубки. Получена максимальная мощность лазерной генерации 4 кВт в непрерывном режиме с КПД 20% при средней плотности мощности энергоблока в активную среду  $12,5 \text{ Вт/см}^3$ . Принимая во внимание объем, занятый излучением в активной среде, можно найти, что с единицы объема, занятого излучением, снимается до  $4,5 \text{ Вт/см}^3$ . Это, конечно, не значит, что КПД лазерной генерации достигает  $4,5/12,5 = 36\%$ . Это означает только что плотность мощности, рассеиваемой в области активного объема, занятой излучением, превышает среднюю и, как показано ниже, может достигать  $20 \text{ Вт/см}^3$ . Существуют различные механизмы подкачки мощности в зону луча, например, неоднородный вклад электрической мощности или турбулентная диффузия, которые обсуждаются ниже.

В данных экспериментах объем, занятый излучением в резонаторе, был намеренно ограничен 40-50% активного объема. Такое соотношение между объемом, занятым излучением, и объемом активной среды сохраняется и при увеличенной длине резонатора в лазерах с  $M^2 < 2$  для промышленных применений. Расчет с полученными экспериментально параметрами активной среды показал, что мощность излучения 6 кВт может быть получена с 8-ю разрядными трубками и резонатором, работающем в режиме поперечной моды низкого порядка. Расчет для случаев 2-х и 4-х разрядных трубок проверен экспериментально.

Чтобы объяснить расхождение между средней по объему плотности мощности РПТ  $12,5 \text{ Вт/см}^3$  и средней мощностью, снимаемой с единицы объема, занятого излучением  $4,5 \text{ Вт/см}^3$ , следует рассмотреть возможные механизмы дополнительного поступления возбужденных частиц в зону излучения. Наблюдаемое расхождение можно объяснить, если плотность мощности РПТ в зоне луча превышает  $20 \text{ Вт/см}^3$ . Известно, что в активной среде в зоне, занятой излучением высокой интенсивности, концентрация активных частиц значительно снижается. Оценки роли механизма турбулентной диффузии возбужденных частиц в область, занятую излучением, подобно тому, как это было сделано в [11], показали, что турбулентным переносом можно объяснить примерно половину наблюдаемого увеличения накачки. Другим

механизмом увеличения мощности накачки может служить взаимодействие между РПТ, ЕИР и плазмой разряда. Этот эффект проявляется экспериментально в изменении конфигурации пучка при изменении мощности излучения. При мощности, близкой к пороговой, пучок в лазере с 2-мя разрядными трубками в случае, когда электроды ЕИР были ориентированы в обеих трубках одинаково, получался сильно эллиптическим, сжатым в вертикальном направлении, т.е. в направлении разрядного тока ЕИР. Количество поперечных мод в вертикальном направлении также было меньше, чем в горизонтальном. При увеличении мощности ширина пучка и количество мод в вертикальном направлении росло, а в горизонтальном направлении оставалось почти неизменным. При мощности 1 кВт луч становился симметричным, и при дальнейшем увеличении мощности расширился уже в вертикальном направлении.

Эти наблюдения можно объяснить, если принять во внимание, что в холодном газе ионизация ЕИР происходит неоднородно, в основном вблизи стенок трубки. Накачка РПТ при малой мощности также будет происходить вблизи стенок трубки, что и приводит к эллиптичности пучка в этом случае. При большей мощности начинают сказываться эффекты нагрева газа и замедления гибели заряженных частиц в постоянном электрическом поле. ЕИР при этом отрывается от стенок и может даже концентрироваться к оси трубки, как и накачка РПТ, следующая за ионизацией. Негативное влияние этих эффектов на осевую симметрию генерируемого пучка может быть легко устранено в лазере с большим количеством трубок, если по-разному ориентировать электроды ЕИР в разных трубках. Форма электродов ЕИР может быть специально выбрана таким образом, чтобы производить максимальную ионизацию в объеме, занятом излучением, и тем самым способствовать повышению КПД и устойчивости режима генерации на небольшом числе поперечных мод.

Для расчета формы электродов ЕИР, обеспечивающих однородную ионизацию в сечении разрядной трубки, в рамках модели однородно проводящей среды удалось получить приближенные аналитические выражения для формы поверхности электрода. Оказалось, что при определенной проводимости активной среды, которая в свою очередь зависит от мощности РПТ, можно найти близкую к цилиндрической поверхность с определенным радиусом кривизны, так что плотность импульсного тока будет распределена равномерно по сечению разрядной трубки, причем при меньших значениях проводимости плотность импульсного тока на оси трубки будет снижаться, а на краю увеличиваться, и наоборот. Таким образом, показано, что выбор формы поверхности ЕИР сводится к выбору радиуса кривизны цилиндрической поверхности, предложены соотношения для определения этого радиуса в зависимости от параметров импульсов и мощности разряда, а также разработана технология изготовления электродов с учетом требований электрической изоляции и удобства установки электрода на разрядной трубке. Показаны также возможности для управления модовым составом излучения с помощью выбора формы электрода ЕИР.

**Глава 4** посвящена экспериментальному исследованию взаимодействия мощного лазерного излучения с плазмой непрерывного оптического разряда (НОР) в потоке газа при атмосферном давлении с учетом рефракции лазерного излучения в плазме НОР, а также собственного теплового излучения плазмы НОР.

НОР в потоке газа представляет собой удобный объект для исследования взаимодействия плотной высокотемпературной плазмы с потоком газа, воздействие потоком позволяет стабилизировать НОР, а также воздействовать на его характеристики, например, изменять температуру плазмы, изменять условия прохождения лазерного излучения через плазму и т.п. Плазма НОР при атмосферном давлении характеризуется сравнительно небольшим коэффициентом поглощения лазерного излучения [5], и поэтому для ее поддержания требуются соответственно большие мощности лазерного излучения, чем при более высоком давлении, но вместе с тем реализуются более высокие температуры и большие объемы плазмы. Большое значение имеет также удобство проведения экспериментов и измерений прямо в открытом воздухе, без камеры высокого давления. На момент начала данных экспериментов в литературе отсутствовали экспериментальные данные об устойчивости НОР в стационарном потоке воздуха при атмосферном давлении. Этот и другие вопросы взаимодействия НОР с потоком газа требовали дальнейшего исследования.

В экспериментах данной работы НОР поддерживался излучением мощного CO<sub>2</sub>-лазера с РПТ-ЕИР с быстрой поперечной прокачкой "Циклон" мощностью до 10 кВт в непрерывном режиме (Глава 2), а также экспериментального CO<sub>2</sub>-лазера с быстрой осевой прокачкой мощностью до 4 кВт (Глава 3). Проводилось тщательное измерение характеристик лазерного излучения в зоне взаимодействия с плазмой НОР с учетом аббераций, вносимых фокусирующей оптикой.

Исследование характеристик излучения лазера "Циклон" показало, что в диапазоне мощности от 1 до 6 кВт дифракционный параметр  $M^2$  увеличивается от 2 до 8. Отмечалось устойчивое инициирование и горение НОР в неподвижном воздухе при атмосферном давлении при фокусировке линзами из NaCl с фокусным расстоянием до 250 мм при диаметре лазерного луча на линзе 30-38 мм и мощности лазерного излучения  $P > 2$  кВт. Для исследования влияния турбулентного потока газа на устойчивость НОР поток воздуха подавался в район НОР через сопло диаметром 20 мм. Однородность потока контролировалась трубкой Пито, скорость потока определялась путем измерения объемного расхода воздуха через сечение сопла. Интенсивность турбулентности  $\varepsilon$  определялась по размыванию теплового следа от нагретой нити. Оказалось, что в широком диапазоне скоростей ( $Re \leq 5000$ )  $\varepsilon = \sqrt{v'^2}/v = 20\%$ , а масштаб турбулентности  $L_{yL} \sim 1$  мм.

Влияние потока на устойчивость НОР исследовалось в случаях:

1. поток направлен от линзы к разряду вдоль оптической оси, по направлению лазерного излучения;
2. поток направлен перпендикулярно оптической оси и однороден в области границы плазмы разряда, обращенной к источнику лазерного излучения;

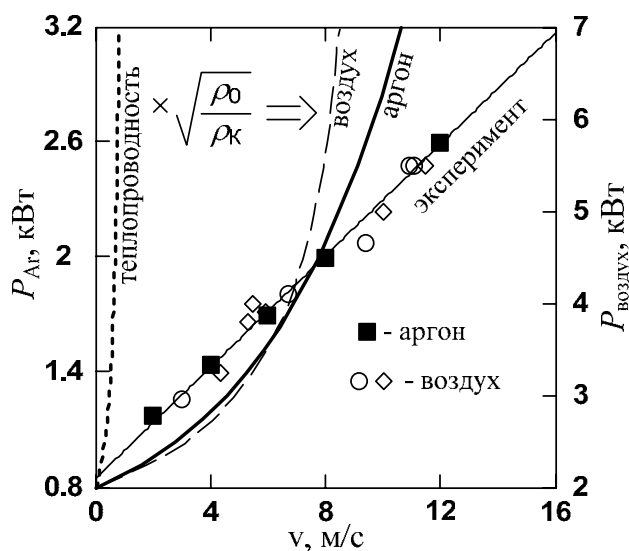
3. то же, что {2}, но однородный поток охватывает только часть разряда, лежащую в "тени" другой его части по отношению к лазерному излучению;

4. поток направлен противоположно случаю {1} – навстречу лазерному лучу.

В случае {1} и {2} НОР ведет себя примерно одинаково – с увеличением скорости потока плазма несколько уменьшается в размерах, ее передний фронт смещается в область фокальной перетяжки, и по достижении предельной скорости плазма гаснет.

Данные экспериментов для случая {1} в воздухе и аргоне вместе с теоретическими оценками представлены на Рис. 17. Предельная скорость  $v$  растет практически линейно с ростом мощности лазерного излучения  $P$ , причем экспериментальное значение  $v \sim 10-15$  м/с более чем на порядок превышает оценку в модели теплопроводностного механизма распространения волны светового горения  $v_t \sim 1$  м/с. Расхождение в основном устраняется при учете газодинамических эффектов обтекания "горячих" областей НОР набегающим потоком холодного газа [12], приводящем к множителю  $\sqrt{\rho_0/\rho_K}$ , где  $\rho_0$  – начальная плотность газа, а  $\rho_K$  – характерная плотность плазмы НОР с учетом диссоциации и ионизации. Несмотря на некоторую неопределенность значения  $\rho_K$ , данный множитель дает верный порядок величины предельной скорости, однако сохраняет слабую зависимость предельной скорости от мощности  $v \sim \sqrt{P}$ , тогда как эксперимент дает  $v \sim P$  (Рис. 17).

При мощности лазера свыше 4 кВт для воздуха и 2 кВт для аргона увеличение предельной скорости по сравнению с рассматриваемой моделью может быть вызвано дополнительным нагревом газа тепловым излучением плазмы НОР. Учет



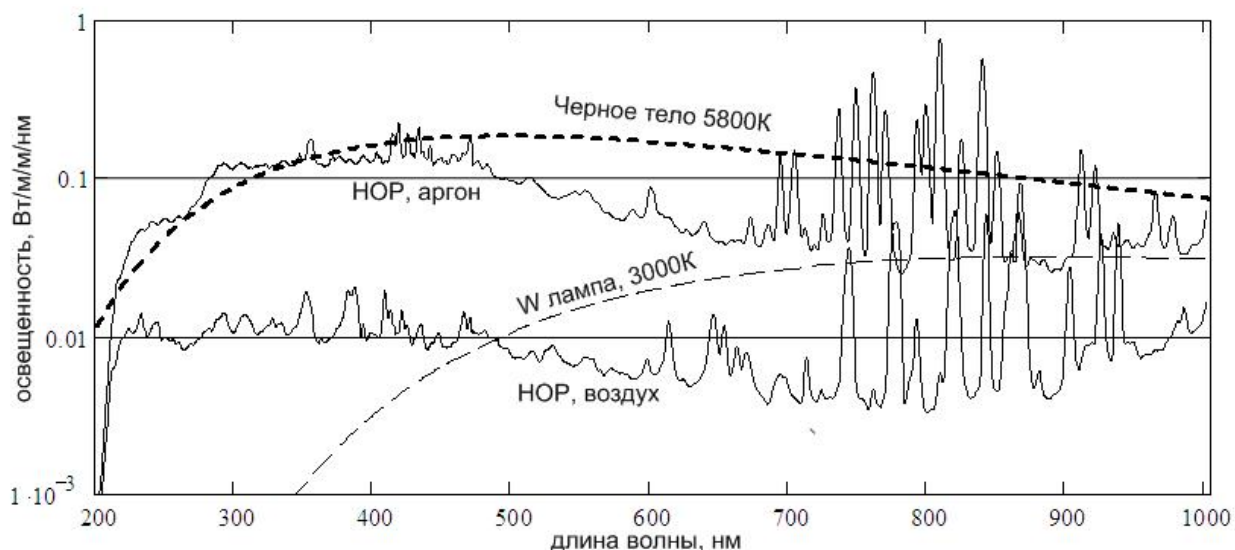
**Рис. 17.** Пределы существования НОР в потоке аргона и воздуха при атмосферном давлении по мощности лазерного излучения и скорости потока. Пунктирная кривая – оценка в одномерной модели светового горения (теплопроводностный механизм распространения) [5], сплошная и штриховая линии – одномерная модель с учетом обтекания [12] в условиях, соответствующих эксперименту. Точки и прямая линия – эксперимент в аргоне (вертикальная ось слева) и воздухе (ось справа).

последнего фактора позволяет объяснить отклонение экспериментальной зависимости  $\nu(P)$  от теоретической оценки  $\nu \sim \sqrt{P}$ , не учитывающей излучательного теплообмена. При малой мощности лазерного излучения размеры плазмы малы, и вклад излучения мал по сравнению с обычной теплопроводностью. Сходство зависимостей  $\nu(P)$ , полученных в воздухе и аргоне, свидетельствует об общности рассматриваемых механизмов распространения разряда.

В случае {4} НОР гаснет при самых малых скоростях потока. В случае {3} при скоростях потока до 1 м/с развиваются пульсации плазмы НОР, приводящие к ее погасанию. Киносъемка показала, что колебания представляют собой распад-возникновение плазмы в части разряда, охваченной потоком, с характерными частотами порядка нескольких герц. Колебания плазмы, приводящие к погасанию разряда в случае {3}, как и неустойчивость в случае {4}, объясняются нарушением энергетического баланса "теневого" части НОР при воздействии на нее потока газа.

Основные свойства плазмы НОР следующие. Самая горячая область расположена на оси лазерного луча и несколько смещена от центра плазмы в сторону лазера. Максимальная температура зависит от рода газа и составляет при атмосферном давлении от 15 до 20 кК и выше. Характерная концентрация свободных электронов в плазме при атмосферном давлении  $N_e \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Объем плазмы, нагретой выше 10 кК (наиболее ярко светящиеся области), зависит от поглощаемой плазмой доли мощности излучения и лежит в пределах  $0,1 - 1 \text{ см}^3$ .

На Рис. 18 представлена спектральная освещенность, создаваемая НОР в воздухе и аргоне при атмосферном давлении. Спектры были получены с целью изучения возможности применения НОР в качестве мощного источника ультрафиолетового излучения.



**Рис. 18.** Спектральная освещенность, создаваемая плазмой НОР на расстоянии 55 см при атмосферном давлении, мощность излучения лазера 3 кВт.

Для обоих спектров характерен интенсивный континуум в ультрафиолетовой области, что делает их схожими с солнечным спектром на верхней границе атмосферы (промоделирован кривой для абсолютно черного тела с температурой 5800 °K на Рис. 18). Поскольку плазма НОР, в основном, прозрачна в наблюдаемой области спектра, НОР излучает слабее, чем черное тело с температурой 17 кК.

НОР представляет собой сложную плазодинамическую систему. Плазма НОР воздействует на поддерживающее ее лазерное излучение, вызывая ослабление интенсивности последнего вследствие поглощения и рефракции. При этом происходит самовоздействие плазмы, вследствие которого меняются условия ее поддержания, могут развиваться колебания, приводящие к погасанию плазмы. При этом влияние рефракции не так однозначно, как влияние поглощения, поскольку связано не только с наличием свободных электронов, но и с их пространственным распределением в зоне лазерного луча. В некоторых случаях влияние рефракции может оказаться определяющим. Экспериментальные результаты в этой области до сих пор немногочисленны и носят, в основном, качественный характер. Кроме того, анализ проходящего через НОР излучения в принципе позволяет уточнить распределение концентрации электронов в наиболее горячей центральной части НОР, где спектральные методы дают максимальные погрешности. Такого рода уточнения имеют большое значение для возможности применения НОР в качестве эталонного объекта для проверки численных расчетов и теоретических моделей высокотемпературной газодинамики.

В диссертации были реализованы экспериментальные методы, позволяющие одновременно регистрировать распределение температуры в плазме НОР и рефракцию поддерживающего НОР лазерного излучения. В качестве объекта исследования был выбран НОР в режиме лазерного плазмотрона в потоке аргона при атмосферном давлении. С одной стороны, эта система исследовалась экспериментально в различной постановке, что дает хорошие возможности для сравнения результатов. С другой стороны, систематического изучения рефракции лазерного излучения в аргоне при атмосферном давлении до настоящей работы не проводилось. Для повышения достоверности данных проводились тщательные измерения характеристик лазерного излучения в зоне НОР в отсутствие плазмы.

В §4.8 приведены данные по измерению рефракции лазерного излучения в НОР в потоке аргона. Оказалось, что в широком диапазоне скоростей газового потока рефракция незначительна и не может оказывать значительного влияния на свойства плазмы НОР. Этот вывод находится в противоречии с результатами ряда работ других авторов, полученных, в основном, при давлении выше атмосферного, где отмечалась важная роль рефракции. В связи с этим была предложена теоретическая модель, объясняющая причину малой рефракции излучения при скорости потока  $v > 2$  м/с и резкий рост рефракции при малых скоростях потока.

По зарегистрированным измеренным распределениям температуры в НОР измерялось положение условных границ плазмы вдоль лазерного луча и максимального диаметра плазмы. Установлено, что при больших скоростях потока диаметр луча  $d_f$  меньше диаметра плазмы  $d_p$ . Это значит, что весь луч, проходящий



через плазму, находится вблизи оси плазмы, где поперечные градиенты электронной плотности малы, а значит мала и рефракция, что и наблюдается в эксперименте. При малых скоростях потока плазма выходит в область большего диаметра луча, и диаметр плазмы приближается к диаметру луча. При этом значительная часть лазерного излучения оказывается в области больших поперечных градиентов электронной концентрации, что вызывает появление сильной рефракции. Взаимодействие подвергающегося рефракции луча и плазмы, вызывающее колебания задней границы плазмы, способствует дальнейшему усилению эффекта рефракции, а также появлению колебаний угла рефракции, синхронных с колебаниями плазмы.

Как показали теоретические расчеты, сделанные в предположении параболического радиального профиля концентрации электронов и коэффициента преломления в плазме НОР, приведенные выше рассуждения объясняют факт зависимости рефракции от положения плазмы относительно фокальной перетяжки и от скорости потока, но приводят к плавной зависимости рефракции от положения плазмы и скорости потока, не объясняя резкой зависимости, наблюдающейся в эксперименте. Наблюдающийся эффект резкой смены величины и знака рефракции при скорости потока выше 2 м/с свидетельствует об отклонении профиля концентрации электронов от параболического и может использоваться для оценки формы этого профиля. Смена сильной дефокусировки лазерного излучения на небольшую фокусировку при достижении скорости потока 2 м/с в НОР в аргоне при атмосферном давлении свидетельствует о наличии плато с небольшим локальным минимумом радиального распределения концентрации электронов, а это, в свою очередь, указывает на достижение температуры полной однократной ионизации (около 17 кК), когда при дальнейшем росте температуры при прекращении ионизации происходит снижение концентрации свободных электронов из-за уменьшения плотности плазмы. Размер плато можно определить из сопоставления данных измерения диаметра луча и положения границ плазмы.

В **Приложении А** описана конструкция прототипа технологического лазера "Лантан-3" с быстрой поперечной прокачкой и накачкой РПТ-ЕИР, модификации которого выпускались серийно на Ижевском механическом заводе, г. Ижевск, Россия, и в НПО "Ротор", г. Черкассы, Украина.

В **Приложении Б** содержится описание способов получения высококачественных негауссовских пучков в мощных технологических СО<sub>2</sub>-лазерах, в частности, получение луча с супергауссовским распределением интенсивности в устойчивом резонаторе с увеличенной эффективной длиной за счет дифракции на одной из внутренних диафрагм. Показано, что пучки с супергауссовским распределением интенсивности меньше искажаются при прохождении прозрачных оптических элементов с объемным и поверхностным поглощением, чем гауссовские пучки. Описаны эксперименты по обработке материалов негауссовскими пучками.

В **Приложении В** дан пример программы численного расчета основной моды неустойчивого ВРМ резонатора.

В Приложении Г описана методика измерения параметров мощного лазерного излучения методом калиброванных диафрагм и приведен пример программы обработки результатов измерения параметров излучения методом калиброванных диафрагм.

### **Основные результаты и выводы дисертации:**

Проведенные исследования позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Экспериментально и теоретически обоснованы условия формирования активных сред с высокой оптической однородностью в лазерах с накачкой комбинированным разрядом постоянного тока (РПТ) с ионизацией емкостным импульсно-периодическим разрядом (ЕИР) в быстром потоке газа с анизотропной искусственной турбулентностью, установлены источники неоднородности РПТ-ЕИР, разработаны методы устранения этих неоднородностей. Полученные результаты использовались при создании промышленных технологических лазеров серии "Лантан". Показано, что за счет высокой однородности ионизации методом ЕИР комбинированный разряд РПТ-ЕИР позволяет получить однородную в большом объеме неравновесную среду. Разработана методика учета геометрического фактора приэлектродной неоднородности потенциала в РПТ-ЕИР. Получено соотношение, описывающее зависимость суммарного приэлектродного падения напряжения от давления лазерной смеси. Показана роль диссоциативного прилипания в формировании приэлектродных областей РПТ. Проанализировано влияние приэлектродных процессов на характеристики разряда.

Показано, что неоднородность энерговыделения вблизи катода приводит к образованию теплового следа за катодом, который оказывается основным фактором неоднородности РПТ-ЕИР и существенно влияет на устойчивость и процесс контракции разряда. Экспериментально установлено, что при контракции неустойчивость зарождается в зоне неоднородности вблизи анода. Образующийся шнур ускоренно прорастает от анода к катоду, следуя тепловому следу от катодной зоны, и замыкает разрядный промежуток. Создание турбулентности в зоне катодной неоднородности способствует разрушению теплового следа и значительному увеличению предельных характеристик РПТ-ЕИР. Показано, что пульсации температуры газа, вызываемые турбулентностью, и связанные с ними пульсации коэффициента преломления, не оказывают существенного влияния на распространение излучения с длиной волны 10,6 мкм. Установлено, что основным фактором нарушения оптической однородности РПТ-ЕИР является "тепловой клин" – постоянный градиент температуры и коэффициента преломления по длине разрядной камеры вдоль направления потока газа.

2. Разработаны методы получения излучения с высокими характеристиками в широкоапертурных активных средах с поперечным потоком газа мощных СО<sub>2</sub>-лазеров. Продемонстрирована возможность использования различных схем оптических резонаторов в СО<sub>2</sub>-лазерах с поперечной прокачкой при мощностях излучения от 2 до 5 кВт в непрерывном режиме и качестве пучка, близком к

дифракционному. Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования работы неустойчивых резонаторов с переменным по радиусу коэффициентом отражения выходного зеркала (VRM резонатор) в непрерывных CO<sub>2</sub>-лазерах мощностью до 5 кВт в одномодовом режиме и режиме нескольких поперечных мод. Показано, что при соответствующей конструкции выходного VRM-зеркала можно добиться выравнивания распределения фазы в поперечном сечении луча на выходе из резонатора. Показано, что излучение, которое дает неустойчивый резонатор на основе VRM допускает корректное описание с помощью дифракционных параметров  $M^2$  и  $K$ .

3. Исследованы причины нарушения осевой симметрии при генерации нескольких поперечных мод в резонаторах различных типов с пространственно однородной насыщающейся активной средой в условиях быстрой *поперечной* прокачки. В резонаторах различных типов с одной и той же активной средой с быстрой *поперечной* прокачкой наблюдалось общее явление нарушения осевой симметрии излучения, объясняемое особенностями насыщения активной среды в многопроходных резонаторах с движущейся активной средой; предложена простая теоретическая модель явления, на основе которой разработана и реализована схема оптического резонатора, позволяющая повысить осевую симметрию излучения в лазерах с быстрой *поперечной* прокачкой.

4. Разработаны научные основы стабилизации мощного однородного тлеющего разряда в быстром *осевом* потоке газа с помощью оригинальной технологии комбинированного разряда: продольного разряда постоянного тока (РПТ), поддерживаемый емкостным импульсно-периодическим разрядом (ЕИР). Комбинированный разряд не предъявляет высоких требований к газодинамическим методам стабилизации, что позволяет упростить конструкцию и увеличить КПД. Исследовано влияние различных факторов на стабильность, однородность и предельные характеристики РПТ-ИР в схеме с быстрой *осевой* прокачкой. Определены параметры средства прокачки, газодинамического контура, форма и взаимное расположение электродов РПТ-ИР для достижения максимальных энергетических характеристик однородной колебательно возбужденной сред в трубке.

5. Разработаны методы определения оптимальной формы электродов ЕИР, позволяющие управлять распределением характеристик РПТ в поперечном сечении цилиндрической разрядной трубки, а также условия согласования импульсных генераторов с различной длительностью фронта импульса с емкостной нагрузкой типа системы разрядных трубок. Теоретически получены аналитические выражения для формы электродов емкостного импульсно-периодического разряда, обеспечивающие однородное протекание тока в цилиндрической проводящей среде. Показано, что цилиндрическая форма электродов импульсно-периодического разряда обеспечивает однородное протекание тока при соответствующем выборе радиусов кривизны. Выведено соотношение, связывающее длительность фронта нарастания импульсного напряжения с параметрами разрядной трубки: радиусом, толщиной стенок, диэлектрической проницаемостью материала стенок и

электропроводностью среды внутри трубки. Полученные соотношения могут быть использованы при проектировании газоразрядных устройств на основе комбинированного разряда, поддерживаемого емкостным импульсным разрядом.

6. Разработаны принципы конструирования лазера мощностью до 6 кВт с высоким электрооптическим КПД и качеством излучения на основе эффективного применения РПТ-ЕИР в схеме с быстрой осевой прокачкой. Создана экспериментальная установка для отработки разрядной схемы и определения параметров активной среды, что позволило получить лазерную мощность 4 кВт (более 2,2 кВт с метра активной длины) в непрерывном и импульсно-периодическом режиме при КПД 20% в относительно простой по конструкции и надежной лазерной установке. На установке продемонстрирована возможность поддержания непрерывного оптического разряда (НОР) в атомарных и молекулярных газах при атмосферном давлении. Установлена экспериментально возможность масштабирования  $\text{CO}_2$ -лазера с быстрой осевой прокачкой с комбинированным разрядом типа РПТ-ИР.

7. Проведено экспериментальное исследование условий поддержания непрерывного оптического разряда в потоке газа при атмосферном давлении. Установлено превышение скоростей стационарного распространения волны светового горения над теплопроводностными. Эффект объясняется обтеканием холодным газом более горячих внутренних областей НОР. Для воздуха и аргона получена линейная зависимость предельной скорости существования НОР в потоке газа в широком диапазоне мощности лазерного излучения. Одномерная теплопроводностная модель с поправкой на газодинамический эффект обтекания набегающим газом горячих областей НОР дает правильный порядок величины наблюдаемых скоростей распространения разряда, но не объясняет линейной зависимости. Для объяснения характера зависимости предлагается учитывать прогрев газа перед плазменным фронтом тепловым излучением плазмы НОР, которое становится существенным при большой мощности лазерного излучения.

Обнаружено, что НОР устойчив в широком диапазоне скорости потока газа, направленном вдоль оси лазерного излучения и перпендикулярно ей, и неустойчив в потоке, направленном навстречу лазерному излучению. Обнаружены колебательные режимы теневой по отношению к лазерному лучу границы НОР в перпендикулярном оптической оси потоке, а также в осевом потоке при малой скорости. Возникают апериодические колебания охваченной потоком части разряда, заключающиеся в распаде и восстановлении плазмы с характерными частотами порядка нескольких герц. Развитие колебаний приводит к погасанию разряда при малых скоростях потока (около 1 м/с).

8. Впервые приведены данные одновременных измерений структуры НОР и рефракции лазерного излучения в НОР в режиме лазерного плазмотрона. В широком диапазоне скоростей газового потока  $v > 2$  м/с рефракция незначительна и не может оказывать влияния на свойства плазмы НОР. При малых скоростях потока обнаружено взаимодействие подвергнувшегося сильной рефракции луча и плазмы,

вызывающее согласованные колебания задней границы НОР и лазерного луча, прошедшего через плазму.

Резкая зависимость среднего угла рефракции от скорости потока и положения плазмы относительно фокуса, указывает на то, что распределение концентрации электронов в поперечном сечении плазмы НОР имеет плато с небольшим локальным минимумом в центре, что свидетельствует о достижении температуры полной первой ионизации в плазме НОР в аргоне при атмосферном давлении. Эффект может использоваться для проверки данных измерений температуры и электронной концентрации, полученных оптическими методами, а также для калибровки.

9. Получены спектры излучения НОР в воздухе и аргоне при атмосферном давлении. Спектры были получены в виде графиков абсолютной спектральной освещенности с целью изучения возможности применения НОР в качестве мощного источника ультрафиолетового излучения. Для спектров НОР характерен интенсивный континуум в ультрафиолетовой области, что делает их схожими с солнечным спектром на верхней границе атмосферы.

#### **Список цитируемой литературы:**

1. Генералов Н.А., Зимаков В.П., Косынкин В.Д., Райзер Ю.П., Соловьев Н.Г. Быстропроточный технологический СО<sub>2</sub>-лазер комбинированного действия // Квантовая электроника, т. 9, №8, с. 1549-1557 (1982)
2. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки (М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990) 264 с.
3. Sigman A.E. Lasers (University Science Books, Mill Valley, CA, 1986) 1283 p.
4. Витшас А.Ф., Лопота В.А., Менахин Л.П., Сорока А.М., Чулков В.В. Электроразрядный лазер с конвективным охлаждением // Патент СССР SU 1725778 А3. Дата подачи заявки: 1990.04.24, Дата публикации: 1992.07.04.
5. Райзер Ю.П. Оптические разряды // Успехи физических наук, т.132, в. 3, с. 549-581 (1980)
6. International standard ISO 11146-1:2005. Lasers and laser-related equipment .Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios. Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams (2005)
7. ГОСТ 26086-84. Лазеры. Методы измерения диаметра пучка и энергетической расходимости лазерного излучения (М.: ИПК Издательство стандартов, 2002) 14 с.
8. Иванченко А.И., Крашенинников В.В., Пономаренко А.Г., Шулятьев В.Б. Самофильтрующий резонатор в СО<sub>2</sub>-лазере непрерывного действия // Квантовая электроника, т. 16, №2, с. 305-307 (1989)
9. Кузнецов М.Н., Куликов О.Л. Характеристики излучения импульсного СО<sub>2</sub>-лазера с неустойчивым резонатором и выходным зеркалом с переменным по сечению пучка отражением // Квантовая электроника, т. 18, №6, с. 697-698 (1991)

10. Глебов В.Н., Малютин А.М. Светоделительное интерференционное покрытие // Патент РФ №2097800. Заявка: 94035838/28; Дата подачи заявки: 1994.09.26; Опубликовано: 1997.11.27.
11. Galushkin M.G., Golubev V.S., Dembovetsky V.V., Zavalov Y.N., Zavalova V.Y. Influence of turbulent diffusion of excited molecules upon energy parameters of fast-axial-flow CO<sub>2</sub> laser (Proc. SPIE, V. 2713, 1996) P. 25-29.
12. Гуськов К.Г., Райзер Ю.П., Суржигов С.Т. О наблюдаемой скорости медленного движения оптического разряда // Квантовая электроника, т. 17, №7, с. 937-942 (1990).

#### Публикации по теме диссертации:

1. Генералов Н.А., Захаров А.М., Косынкин В.Д., Якимов М.Ю. Устойчивость непрерывного оптического разряда в потоке атмосферного воздуха // Физика горения и взрыва, т. 22, №2, с. 91-94 (1986).

2. Генералов Н.А., Зимаков В.П., Соловьев Н.Г., Якимов М.Ю. Повышение качества излучения мощных технологических лазеров с поперечной прокачкой путем применения специальных схем оптических резонаторов // Известия РАН. Серия физическая, т. 58, №2, с. 104-109 (1994).

3. Generalov N.A., Solov'yov N.G., Yakimov M.Yu., Zimakov V.P. High power industrial CO<sub>2</sub> laser "Lantan-5" with graded reflectivity mirror resonator // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, V. 3, N. 4, p. 533-540 (1994).

4. Генералов Н.А., Горбуленко М.И., Зимаков В.П., Соловьев Н.Г., Якимов М.Ю. Получение и применение высококачественных негауссовых пучков мощных технологических СО<sub>2</sub>-лазеров // Известия РАН. Серия физическая, т. 61, №8, с. 1554-1559 (1997).

5. Генералов Н.А., Зимаков В.П., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю., Яценко Н.А. Применение распределенного золотого катализатора для повышения выходной мощности и КПД отпаянного СО<sub>2</sub>-лазера с накачкой поперечным ВЧ разрядом в трубках // Квантовая электроника, т. 35, №12, с. 1131-1137 (2005).

6. Зимаков В.П., Кедров А.Ю., Кузнецов В.А., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Возбуждение быстропотоčných газовых лазеров методами комбинированного разряда // Оптика атмосферы и океана, т. 21, №8, с. 669-673 (2008).

7. Зимаков В.П., Кузнецов В.А., Кедров А.Ю., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Газовый лазер для эффективного поддержания плазмы непрерывного оптического разряда в научных и технологических применениях // Квантовая электроника, т. 39, № 9, с. 797-801 (2009).

8. Зимаков В.П., Кузнецов В.А., Кедров А.Ю., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Рефракция лазерного излучения в плазме непрерывного оптического разряда в потоке газа при атмосферном давлении // Оптика атмосферы и океана, т. 22, № 11, с. 1023-1028 (2009).

9. Шемякин А.Н., Рачков М.Ю., Якимов М.Ю. Измерение мощности лазерного излучения технологического комплекса с несамостоятельным тлеющим разрядом // *Машиностроение и инженерное образование*, №2(19), с. 22-29 (2009)

10. Верин В.М., Генералов Н.А., Зимаков В.П., Москалев В.С., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Разрядная трубка для газового лазера // Патент на полезную модель № 39228 (Заявка № 2004114177 от 13.05.2004)

11. Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Установка для лазерной обработки // Патент на полезную модель №75601. Рег. 20.08.2008. (Заявка № 2008120473 от 26.05.2008)

12. Generalov N.A., Gorbulyenko M.I., Solov'yov N.G., Yakimov M.Yu., Zimakov V.P. High-power industrial CO<sub>2</sub> lasers excited by a non-self sustained glow discharge // *Gas Lasers - Recent Developments and Future Prospects. NATO ASI Series 3. High technology V. 10*, W.J.Witteman, V.N.Ochkin, Eds. (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996, 365 p.) P. 323 – 341.

13. Generalov N.A., Solov'yov N.G., Yakimov M.Yu., Zimakov V. P. High Power CO<sub>2</sub> Laser with VRM Unstable Resonator: Beam Quality Control and Characterization // *Progress in R&D of High-Power Industrial CO<sub>2</sub> Lasers: Selected Papers on 1991-2000*, V.Ya.Panchenko, V.S.Golubev, Eds. (Proc. SPIE, V. 4165, 2000, 324 p.). P. 210-218.

14. Зимаков В.П., Кедров А.Ю., Кузнецов В.А., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Изучение условий стабильности комбинированного разряда в дозвуковом потоке газа с целью разработки нового поколения высокоэффективных лазеров с быстрой осевой прокачкой // *Актуальные проблемы механики: механика жидкости, газа и плазмы*. С.Т.Суржиков, ред. (М.: Наука, 2008, 258 с.). С. 85-94.

15. Бойцов О.М., Верин В.М., Генералов Н.А., Зимаков В.П., Зотов В.П., Москалев В.С., Поденок С.Е., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Технологический лазер Лантан-3. Препринт №407 (М. : Изд.ИПМ АН СССР, 1989) 38 с.

16. Генералов Н.А., Захаров А.М., Косынкин В.Д., Якимов М.Ю. Непрерывный оптический разряд в потоке воздуха при атмосферном давлении // *Элементарные процессы в химически реагирующих средах*. (М.: изд. МФТИ, 1985) С. 35-40.

17. Якимов М.Ю. Простой интерфейс для стыковки времяпролетного масс-спектрометра с микро-ЭВМ // *Физико-химические процессы в преобразователях энергии*. (М.: изд. МФТИ, 1987) С. 26-29.

18. Генералов Н.А., Зимаков В.П., Рудой И.Г., Соловьев Н.Г., Сорока А.М., Якимов М.Ю. Некоторые особенности продольного к потоку разряда мощного СО<sub>2</sub> - лазера с внешней ионизацией // *Лазерная технология*, вып.6. (Вильнюс: Ин-т физики АН ЛитССР, 1988) С. 23-24.

19. Генералов Н.А., Соловьев Н.Г., Сорока А.М., Якимов М.Ю. О роли плазмохимических реакций в СО<sub>2</sub>-лазере замкнутого цикла с несамостоятельным разрядом // *Лазерная технология*, вып. 6. (Вильнюс: Ин-т физики АН ЛитССР, 1988) С. 9-10.

20. Generalov N.A., Solov'yov N.G., Yakimov M.Yu., Zimakov V.P. Application of the electrodeless pulser-sustained glow discharge for development of high-power industrial CO<sub>2</sub> lasers // Conference on Lasers and Electro-Optics, 1991.(Optical Society of America, Washington, D.C., 1991) P. 322-324.

21. Меркулов В.И., Якимов М.Ю. Экспериментальное исследование диссоциации CO<sub>2</sub> под действием емкостного импульсно-периодического разряда // Физические взаимодействия в химически реагирующих системах. Междугосударственный сборник. (М.: изд. МФТИ, 1991) С. 69-75.

22. Generalov N.A., Solov'yov N.G., Yakimov M.Yu., Zimakov V.P. Beam Quality Improvement by Means of Unstable Resonator with Variable Reflectivity Output Coupler // Laser Resonators, A.V.Kudryashov, P.Galarneau, Eds. (Proc. SPIE, V.3267, 1998) P. 144-155.

23. Bartels H., Generalov N.A., Habich U., Solov'yov N.G., Yakimov M.Yu., Zimakov V.P. VRM Resonator Performance in High Power CW CO<sub>2</sub> Lasers // Laser Optics '98: Gas, Liquid, and Free-Electron Lasers, O.B.Danilov, Ed. (Proc. SPIE, V. 3686, 1999) P. 121-129.

24. Generalov N.A., Moskalev V.S., Solov'yov N.G., Yakimov M.Yu., Zimakov V.P. Gain Saturation Effects and Beam Symmetrization in Fast-Transverse-Flow Industrial Lasers with Folded Resonators // Laser Resonators and Beam Control VI. A.V.Kudryashov, A.H.Paxton, Eds. (Proc. SPIE, V. 4969, 2003) P. 288-295

25. Generalov N.A., Moskalev V.S., Solov'yov N.G., Yakimov M.Yu., Zimakov V.P. Beam quality and efficiency improvements of fast-transverse-flow CO<sub>2</sub> lasers with multiple-pass resonators // Proc. International Conference on the Methods of Aerophysical Research. Part III. (Novosibirsk: Publishing House "Nonparel", 2004) P. 77-82.

26. Generalov N.A., Shemyakin A.N., Solov'yov N.G., Yakimov M.Yu., Zimakov V. P. Efficiency improvements of sealed-off CO<sub>2</sub> lasers excited by transverse RF discharge in tubes // Proc. International Conference on the Methods of Aerophysical Research. Part III. (Novosibirsk: Publishing House "Nonparel", 2004) P. 83-88.

27. Generalov N.A., Kuznetsov V.A., Shemyakin A.N., Solov'yov N.G., Yakimov M.Y., Yatsenko N.A., Zimakov V.P. 27.1 MHz transverse RF discharge performance in a sealed-off CO<sub>2</sub> laser // International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2005: High-Power Lasers and Applications. W.L.Bohn, V.S.Golubev, A.A.Ionin, V.Y.Panchenko, Eds. (Proc. SPIE, V. 6053, 2006) P. 133-140.

28. Зимаков В.П., Генералов Н.А., Москалев В.С., Москаленко О.А., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Применение разряда постоянного тока с ионизацией емкостным импульсно-периодическим разрядом в газовом лазере с быстрой осевой прокачкой // Перспективные результаты фундаментальных исследований. Под ред. К.В.Фролова, В.Я.Шевченко, Б.В.Гусева, Д.С.Скребкова. (М.: Эксподизайн, 2006) С. 197-198.

29. Generalov N.A., Shemyakin A.N., Solov'yov N.G., Yakimov M.Yu., Zimakov V.P. Application of the combined DC and capacitive periodic-pulsed discharge to the excitation of fast-axial-flow gas laser // Laser Optics 2006: High-Power Gas Lasers. O.B.Danilov, Ed. (Proc. SPIE, V. 6611, 2007) P. 66110K.



30. Generalov N.A., Moskalev V.S., Moskalenko O.A., Shemyakin A.N., Solov'yov N.G., Yakimov M.Yu., Zimakov V.P. Operational characteristics of the combined dc discharge with external periodic-pulsed ionization and scaling of fast-axial-flow gas laser // Proc. International Conference on the Methods of Aerophysical Research. Part II. V.M.Fomin, Ed. (Novosibirsk: Parallel, 2007) P. 78-83.

31. Yakimov M.Yu., Kuznetsov V.A., Solov'yov N.G., Kedrov A.Yu. Conditions for homogeneity of transverse capacitive periodic-pulsed discharge applied to combined DC-CPD discharge in fast-axial-flow laser // Proc. International Conference on the Methods of Aerophysical Research. Part II. V.M. Fomin, Ed. (Novosibirsk: Parallel, 2007) P. 217-223.

32. Зимаков В. П., Кедров А. Ю., Кузнецов В. А., Соловьев Н. Г., Шемякин А. Н., Якимов М. Ю. Новые возможности для улучшения технических и экономических характеристик лазерных излучателей с быстрой осевой прокачкой // Сборник научных трудов и инженерных разработок. Ориентированные фундаментальные исследования – федеральные целевые программы, наукоемкое производство. Под ред. К.В. Фролова. (М.: Эксподизайн, 2007) С. 47-49.

33. Kedrov A.Yu., Kuznetsov V.A., Shemyakin A.N., Solov'yov N.G., Yakimov M.Yu., Zimakov V.P. Experimental Study of Capacitive Periodic-pulsed Discharge Applied to Active Medium Ionization in Gas Lasers with Combined Discharges // Atomic and Molecular Pulsed Lasers VII. V.F.Tarasenko, Ed. (Proc. SPIE, V. 6938, 2008) P. 6938-10.

34. Зимаков В. П., Кедров А. Ю., Кузнецов В. А., Соловьев Н. Г., Шемякин А. Н., Якимов М.Ю. Мощные непрерывные и импульсно-периодические лазеры с комбинированным разрядом // Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергии. Труды Международной конференции X Харитоновские тематические научные чтения. 11-14 марта 2008 года. Под ред. С.Г. Гаранина. (Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008) С. 254-260.

35. Kuznetsov V.A., Shemyakin A.N., Solov'yov N.G., Yakimov M.Yu., Kedrov A.Yu., Zimakov V.P. Efficient fast-axial-flow gas laser for sustaining of the continuous optical discharge // International Conference on Methods of Aerophysical Research, ICMAR'2008. June, 30 – July, 6, 2008. Sec. V. Methods of Aerophysical research in interdisciplinary problems and advanced technologies (Novosibirsk: Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 2008)

36. Зимаков В.П., Кузнецов В.А., Кедров А.Ю., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Методы стабилизации однородного разряда в потоке газа и разработка эффективных газовых лазеров // Всероссийская школа-семинар "Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем". Сборник научных трудов. (М.: ИПМех РАН, 2009. 281 с.) С. 47-60.

ЯКИМОВ Михаил Юрьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
С ПОТОКАМИ ГАЗА И ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЕНИЕ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Подписано к печати 8.12.2009      Заказ № 36-2009      Тираж 85 экз.

---

Отпечатано на ризографе Института проблем механики Российской академии наук  
Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН  
119526, Москва, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1