

# Газовый лазер для эффективного поддержания плазмы непрерывного оптического разряда в научных и технологических применениях\*

В.П.Зимаков, В.А.Кузнецов, А.Ю.Кедров, Н.Г.Соловьев, А.Н.Шемякин, М.Ю.Якимов

*Разработан и создан стабильный источник мощного лазерного излучения, предназначенный для исследований и технических применений явления непрерывного оптического разряда (НОР). В основу разработки положена технология комбинированного разряда в схеме с быстрой осевой прокачкой газа, что позволило получить мощность излучения более 2.2 кВт с метра активной среды в непрерывном и импульсно-периодическом режиме на длине волны 10.6 мкм с электрооптическим КПД лазера 20%. Продемонстрировано поддержание плазмы НОР в аргоне и воздухе при атмосферном давлении. Исследуются излучательные свойства плазмы НОР, обсуждаются возможные применения.*

**Ключевые слова:** быстрая осевая прокачка, CO<sub>2</sub>-лазер, несамостоятельный разряд, комбинированный разряд, непрерывный оптический разряд.

## 1. Введение

Непрерывный оптический разряд (НОР) был предсказан теоретически и впервые реализован экспериментально в Институте проблем механики (ИПМех РАН) в 1969–1970 гг. [1, 2]. С тех пор в ИПМех РАН проводятся теоретические и экспериментальные исследования НОР, оригинальные результаты которых можно найти в [3–5]. Эти работы, в свою очередь, стимулировали широкие и успешные разработки в области мощных лазеров, которые сформировали отдельное важное направление фундаментальных и прикладных исследований [6]. Но, вместе с тем, открытие явления НОР, по-видимому, несколько опередило время, поскольку НОР пока не находит широкого применения в технологии и исследованиях, несмотря на многообещающие результаты изучения его свойств. Возможная причина этого – в относительной недоступности достаточно мощных непрерывных ИК лазеров для научных лабораторий.

Таким образом, нашей первой целью было разработать недорогой и надежный источник ИК лазерного излучения с высокостабильными выходными характеристиками, подходящими для поддержания НОР. Наши разработки основаны на технологии комбинированного разряда, а именно разряда постоянного тока (РПТ), поддерживаемого емкостным импульсно-периодическим разрядом (ЕИР). Разряд этого типа с успехом применялся ранее в лазерах с поперечной прокачкой «Лантан» мощностью до 5 кВт в непрерывном и импульсно-периодическом

режимах [6]. В технологии РПТ–ЕИР несамостоятельный РПТ используется для лазерной накачки, в то время как ЕИР поддерживает квазистационарную электропроводность активной среды. Стабильность и однородность плазмы разряда, обеспечиваемая ЕИР, благоприятна для более эффективного вклада энергии РПТ по сравнению со вкладом самостоятельного разряда постоянного тока. Проверенный в CO<sub>2</sub>-лазерах с поперечной прокачкой метод РПТ–ЕИР предлагается авторами для использования также и в лазерах с быстрой осевой прокачкой. Такие лазерные системы будут совмещать присущие методу РПТ–ЕИР высокую стабильность и симметрию выходного пучка с уникальными возможностями управления параметрами излучения и масштабирования, предоставляемыми схемой с осевой прокачкой.

## 2. Свойства РПТ–ЕИР

В разрядной трубке РПТ–ЕИР-лазера с быстрой осевой прокачкой колебательные уровни обеспечивающих лазерную генерацию молекул возбуждаются в несамостоятельном РПТ между четырьмя штыревыми анодами, расположенными вверх по потоку, и кольцевым катодом, расположенным вниз по потоку. 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 при этом обычно составляет менее 5% мощности РПТ.

Экспериментальный лазер для отработки и оптимизации схемы РПТ–ЕИР и исследования характеристик активной среды был создан на базе двухступенчатого турбокомпрессора, обеспечивающего перепад давлений на газодинамическом контуре лазера не более 1.4 в газовых смесях, содержащих до 75% гелия.

\*Доложена на конференции «Оптика лазеров 2008», С.-Петербург, Россия.

В.П.Зимаков, В.А.Кузнецов, А.Ю.Кедров, Н.Г.Соловьев, А.Н.Шемякин, М.Ю.Якимов. Институт проблем механики РАН им. А.Ю.Ишлинского, Россия, 119526 Москва, просп. Вернадского, 101, корп. 1; e-mail: solovyov@lantanlaser.ru, shemyakin@lantanlaser.ru, yakimov@lantanlaser.ru

Поступила в редакцию 28 января 2009 г., после доработки – 15 апреля 2009 г.

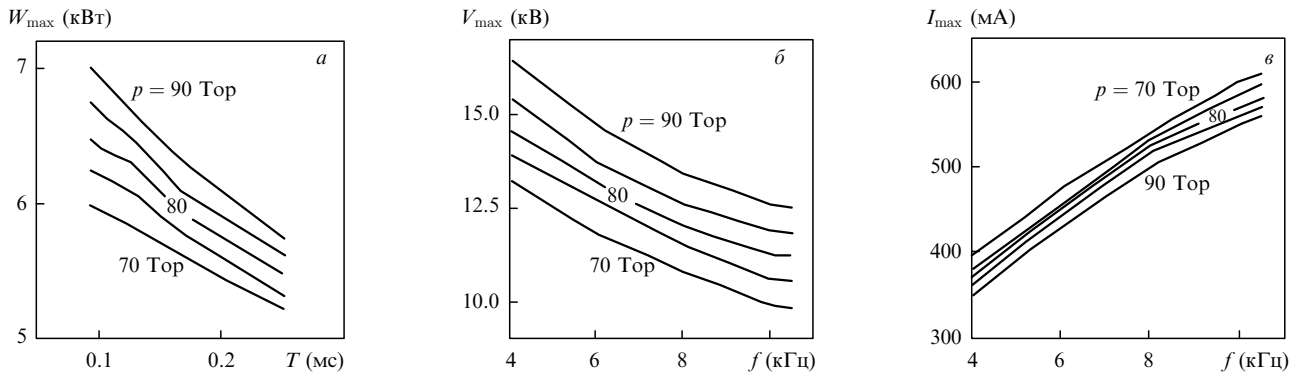


Рис. 1. Предельная мощность  $W_{\max}$  однородного РПТ в зависимости от давления рабочей смеси газов  $p$  и периода  $T$  между импульсами ЕИР (а), а также предельные напряжение  $V_{\max}$  (б) и ток  $I_{\max}$  (в) РПТ в зависимости от частоты  $f$  следования импульсов ЕИР, измеренные в одной из разрядных трубок  $\text{CO}_2$ -лазера с быстрой осевой прокачкой; скорость потока 200 м/с.

Характеристики РПТ – ЕИР в разрядных трубках изучались в широком диапазоне изменения параметров: скорость потока газа до 250 м/с, давление – до 90 Тор в смесях, близких по составу к смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:7:12$ . Оптимизация формы и взаимного расположения электродов РПТ и ЕИР, а также характеристик газового потока на входе в разрядную трубку позволила 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.

На рис. 1 представлены максимальные значения мощности, напряжения и тока РПТ – ЕИР в одной трубке непосредственно перед контракцией, которая возникает, когда эти значения оказываются превышенными. Максимальные значения измерялись в зависимости от частоты  $f$  повторения импульсов ЕИР (или от временного интервала между последовательными импульсами  $T = 1/f$ ) при различном давлении газа в диапазоне, типичном для работы лазера. Достижение максимальных величин определялось по появлению видимых нарушений однородности свечения разряда, а также по появлению нерегулярных пульсаций тока или напряжения РПТ.

Возрастание максимальной мощности разряда с ростом давления (рис. 1, а), а также линейное её снижение при увеличении  $T$  указывают на ионизационно-перегревный механизм неустойчивости разряда [7, 8]. Максимальный ток растет при увеличении частоты повторения импульсов и уменьшается при увеличении давления (рис. 1, в). Максимальное напряжение увеличивается с ростом давления и уменьшается при увеличении частоты повторения импульсов (рис. 1, б). Это дает возможность регулировать электрическое поле РПТ – ЕИР с целью выбора его оптимального значения для возбуждения колебаний молекул  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$  [9].

### 3. Характеристики лазера

Для осуществления лазерной генерации можно использовать две, четыре или большее количество разрядных трубок, объединенных двухзеркальным устойчивым полуконфокальным резонатором. Оптимальный коэффициент отражения выходного зеркала для двух трубок составлял 70 % – 80%, для четырех – 50 % – 60%, для восьми – 30 % – 40%. Оптимизация коэффициента усиления из условия минимизации лучевой нагрузки на зеркала резонатора проводилась путем расчета с использованием измеренных характеристик активной среды [10]. Дли-

на активной среды в каждой разрядной трубке составляла 0.45 м.

Распределение коэффициента усиления в активной среде каждой из разрядных трубок имеет оси симметрии, положение которых задается электродами ЕИР [10]. В лазере с несколькими разрядными трубками электроды ЕИР были повернуты вокруг осей трубок, причем в разных трубках на разные углы, так, чтобы обеспечить осевую симметрию выходного пучка.

Максимальная выходная мощность, полученная с двумя разрядными трубками, была 1.5 кВт. Диаметр пучка, ограниченный в этой серии экспериментов диафрагмой, составлял 17 – 18 мм при числе дифракционных пределов  $M^2$  [11] около 10 при максимальной выходной мощности. Исследование параметров лазерного излучения показало, что высокой однородности активной среды, проявляющейся в симметрии выходного пучка, можно достичь путем выбора формы электродов ЕИР [12]. Диаметр пучка измерялся прибором UFF-100 в соответствии с методикой ISO11146-1:2005 [11], которая дает корректные результаты для пучков, генерируемых в устойчивых резонаторах. Диаметр лазерного пучка, измеренный в различных точках вне резонатора, затем экстраполировался внутрь резонатора гиперболической зависимостью согласно [11]. Таким образом было найдено, что объем, в котором генерируется 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 четырьмя разрядными трубками. Трубки соединялись параллельно по отношению к системе прокачки газа и последовательно по отношению к оптическому резонатору. П-образный резонатор имел длину 4800 мм и содержал два дополнительных поворотных зеркала. Глухое зеркало вогнутое, радиус кривизны 10 м, выходное – плоское, коэффициент отражения 50 %. Диаметр выходного пучка в перетяжке около 22 мм, параметр  $M^2$ , характеризующий его расходимость, равен шести. На рис. 2 приведены зависимости выходной мощности лазера и электрооптического КПД лазера от суммарной электрической мощности энергоклада РПТ – ЕИР во все четыре трубки. Получена максимальная мощность лазерной генерации 4 кВт в непрерывном режиме при КПД, равном 20 %, и средней плотности мощности энергоклада в активную среду  $12.5 \text{ Вт/см}^3$ .

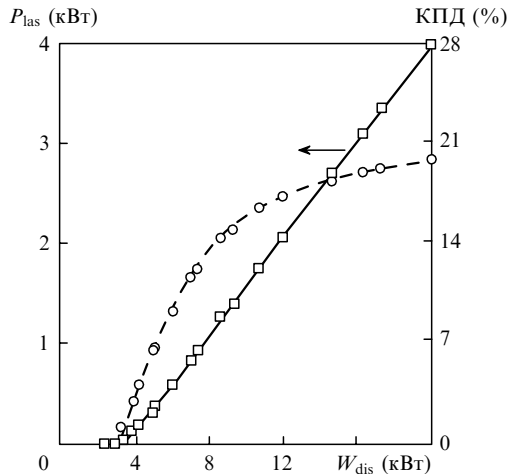


Рис.2. Зависимости выходной мощности  $P_{las}$  и электрооптического КПД лазера с четырьмя разрядными трубками от мощности РПТ-ЕИР  $W_{dis}$ .

Принимая во внимание объем, занятый излучением в активной среде, можно найти, что с единицы этого объема снимается до  $4.5 \text{ Вт/см}^3$ . Это, конечно, не значит, что КПД лазерной генерации достигает 36 % ( $4.5/12.5$ ). Это означает только, что плотность мощности, рассеиваемой в занятой излучением области активного объема, превышает среднюю и, как показано ниже, может достигать  $20 \text{ Вт/см}^3$ . Существуют различные механизмы подкачки мощности в зону лазерного пучка, например неоднородный вклад электрической мощности или турбулентная диффузия. Эти механизмы обсуждаются ниже.

В данных экспериментах объем, занятый излучением в резонаторе, был намеренно ограничен 40 % – 50 % активного объема. Такое соотношение между объемом, занятым излучением, и полным объемом активной среды сохраняется и при увеличенной длине резонатора в лазерах с  $M^2 < 2$  для промышленных применений. Расчет по формуле Ригрода [13] с полученными экспериментальными параметрами активной среды показал, что мощность излучения 6 кВт может быть достигнута с восемью разрядными трубками и резонатором, работающим в режиме поперечной моды низкого порядка. Аналогичный расчет для случаев двух [10, 11] и четырех разрядных трубок проверен экспериментально.

Чтобы объяснить несоответствие средней по объему плотности мощности РПТ ( $12.5 \text{ Вт/см}^3$ ) средней лазерной мощности, снимаемой с единицы занятого излучением объема ( $4.5 \text{ Вт/см}^3$ ), следует рассмотреть возможные механизмы дополнительного поступления возбужденных частиц в зону лазерного пучка. По нашей оценке наблюдаемое расхождение можно объяснить, если плотность мощности РПТ в зоне лазерного пучка превышает  $20 \text{ Вт/см}^3$ . Известно, что в активной среде в зоне генерации излучения высокой интенсивности концентрация активных частиц значительно снижается [14–16]. Оценки роли механизма турбулентной диффузии возбужденных частиц в область генерации излучения подобно тому, как это было сделано в [16], показали, что турбулентным переносом можно объяснить примерно половину наблюдаемого увеличения плотности мощности накачки. Другим механизмом ее увеличения может служить взаимодействие между РПТ и ЕИР при формировании плазмы разряда. Этот эффект проявляется экспериментально в

изменении конфигурации лазерного пучка при изменении мощности излучения [10, 12]. При мощности, близкой к пороговой, сечение пучка в лазере с двумя разрядными трубками в случае, когда электроды ЕИР были ориентированы в обеих трубках одинаково, получалось 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 увеличивалась ширина пучка и росло количество мод в вертикальном направлении, а в горизонтальном направлении оно оставалось почти неизменным. При мощности 1 кВт пучок становился симметричным, и при дальнейшем увеличении мощности расширялся уже в вертикальном направлении.

Эти наблюдения можно объяснить, если принять во внимание, что в холодном газе ионизация в 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. Плазма ЕИР при этом отрывается от стенок и может даже концентрироваться у оси трубки, как и ток РПТ, соответствующий степени ионизации. 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. Кроме того, форма электродов ЕИР может быть специально выбрана таким образом, чтобы получать максимальную ионизацию именно в объеме, занятом излучением, и тем самым способствовать повышению КПД и устойчивости режима генерации на небольшом числе поперечных мод [12].

#### 4. Поддержание НОР

Мощности лазера с четырьмя разрядными трубками РПТ-ЕИР (до 4 кВт в непрерывном режиме) вполне достаточно для поддержания НОР в различных газах при атмосферном или более высоком давлениях. Перед началом экспериментов было, тем не менее, не ясно, хватит ли интенсивности сфокусированного пучка для образования плазмы в парах металла, испаряемого с поверхности мишени, чтобы можно было таким способом инициировать НОР. Однако, несмотря на относительно невысокую интенсивность сфокусированного излучения (площадь поперечного сечения пучка в фокусе составила, согласно измерениям,  $0.1 \text{ мм}^2$ ), плазма легко инициировалась путем внесения металлической проволоки в область фокуса линзы с фокусным расстоянием 100 мм в воздухе или, еще легче, в аргоне при атмосферном давлении и мощности лазера 3–3.5 кВт в непрерывном режиме.

Простейшая схема фокусировки и подачи газа для поддержания НОР показаны на рис.3. Лазерный пучок фокусируется просветленной плосковыпуклой линзой из ZnSe с фокусным расстоянием  $F = 100 \text{ мм}$ . Ось лазерного пучка проходит через сопло диаметром 19 мм, через которое можно подавать в область фокуса различные газы, исключая токсичные, а также дающие токсичные продукты при разложении ( $\text{CO}_2$  в НОР практически полностью разлагается и дает много CO). Точка фокуса находится на расстоянии 19 мм от среза сопла, так чтобы НОР

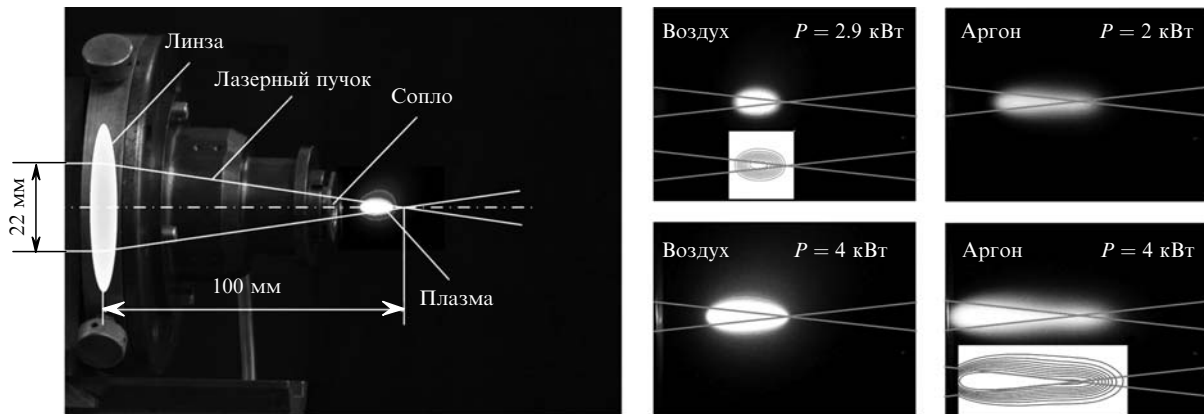


Рис.3. Экспериментальная схема поддержания НОР (слева) и фотографии НОР в воздухе и аргоне (справа), сделанные через светофильтр с целью изучения распределений яркости и температуры внутри плазменного образования (размер кадра –  $30 \times 40$  мм). Контурные графики на врезках образованы линиями одинаковой яркости плазмы в области 512 нм.

находился целиком в атмосфере подаваемого газа. Скорость подаваемого потока обычно составляла 1–2 м/с, но могла быть увеличена до 10 м/с и более. При скоростях, больших нескольких метров в секунду, возможно, происходило подмешивание атмосферного воздуха в струю подаваемого газа.

На рис.3 представлены также фотографии НОР в лабораторном воздухе и аргоне при различной мощности лазера. Измеренные пороговые мощности поддержания НОР в данных условиях составили  $P_0^{\text{Ar}} = 1.2$  кВт для аргона и  $P_0^{\text{air}} = 2.3$  кВт для воздуха. Таким образом, НОР в аргоне при мощности излучения  $P = 2$  кВт и в воздухе при  $P = 4$  кВт (представлены на рис.3) характеризуются близкими значениями  $P/P_0$  и, как видно из рис.3, близки по размерам светящейся области. Различие состоит в том, что в аргоновой плазме рассеивается при этом больше поглощенной лазерной мощности и, кроме того, в случае аргона газ движется со скоростью около 1 м/с, а в случае воздуха газ неподвижен. Контурные графики на врезках рис.3 представляют собой линии равной яркости оптического излучения плазмы. Графики были получены из фотографий, сделанных через свето-

фильтр в узком спектральном диапазоне в области 512 нм, где большая часть излучения плазмы представлена непрерывным спектром. Поскольку плазма НОР практически прозрачна для собственного излучения в указанной области спектра, из этих данных путем преобразования Абеля получают радиальные распределения излучательной способности плазмы НОР в непрерывном спектре, откуда путем пересчета по известной зависимости излучательной способности от температуры можно получить распределение температуры в НОР [3].

Основные свойства плазмы НОР следующие. Самая горячая область расположена на оси лазерного пучка и несколько смещена от центра области, занимаемой плазмой, в сторону лазера. Максимальная температура зависит от рода и давления газа и составляет при атмосферном давлении  $(15 - 20) \times 10^3$  К. Характерные концентрации свободных электронов в плазме в диапазоне давлений от 1 до 10 атм составляют  $10^{17} - 10^{18}$  см $^{-3}$ . Объем плазмы, нагретой выше 10000 К (примерно соответствует размерам светящихся областей на рис.3), зависит от типа газа и мощности излучения и лежит в пределах 0.1–1 см $^3$ .

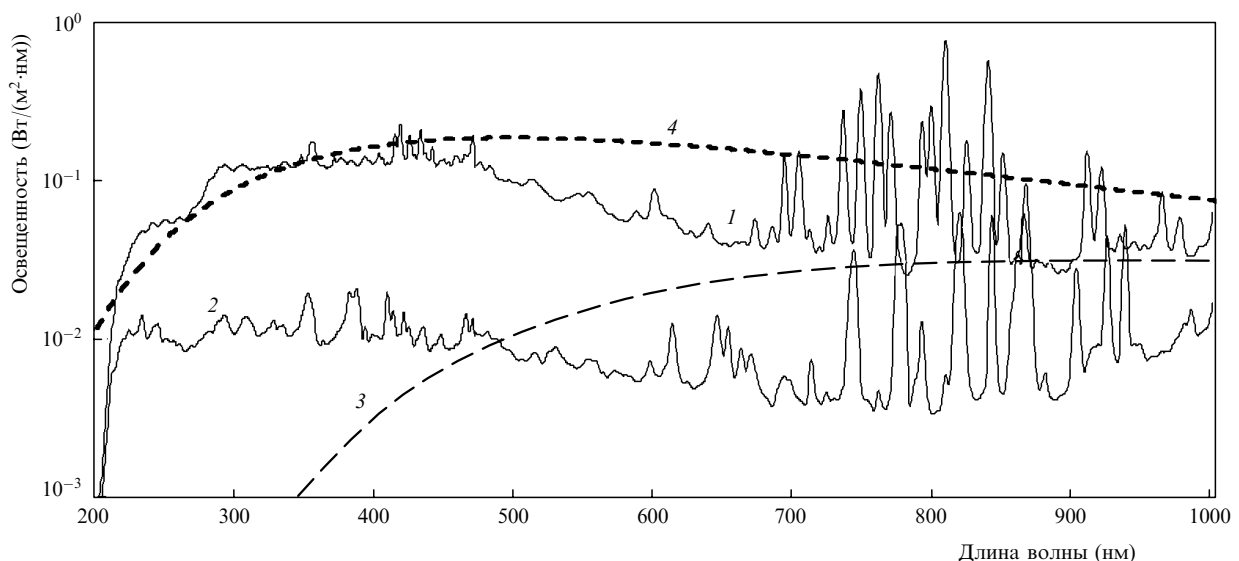


Рис.4. Спектры излучения НОР в аргоне (1) и воздухе (2) при атмосферном давлении, представленные в виде спектральной освещенности на расстоянии 55 см от НОР в сравнении со спектральной освещенностью, создаваемой ленточной вольфрамовой лампой с температурой 3000 К (3) и абсолютно черным телом с температурой 5800 К (4). Мощность лазера 3.2 кВт.

На рис.4 представлены спектры излучения НОР в воздухе и аргоне при атмосферном давлении. Спектры были получены с целью изучения возможности применения НОР в качестве мощного источника УФ излучения. Из рис.4 видно, что для обоих спектров характерен интенсивный континуум в УФ области, что делает их схожими с солнечным спектром на верхней границе атмосферы (промоделирован кривой для абсолютно черного тела с температурой 5800 К). Поскольку плазма НОР в основном прозрачна в наблюдаемой области спектра, НОР излучает много слабее, чем черное тело с характерной для НОР температурой  $15 \times 10^3$  К.

Для других возможных применений НОР можно использовать то обстоятельство, что НОР легко реализуется в химически чистых средах из-за удаленности от стенок, отсутствия электродов, т. е. из-за исключения примесей, сильно влияющих на излучательную способность и другие свойства плазмы. Поэтому НОР представляет собой идеальный объект для исследования спектроскопических свойств газов при высокой температуре (до  $25 \times 10^3$  К в гелии), а также для проверки компьютерных моделей лучистого теплообмена. Рассматриваются и другие возможные применения в областях высокотемпературной газодинамики, создания лазерного ракетного двигателя, термоэлектрических явлений, плазмохимии, напыления пленок, получения мелкодисперсных порошков и т. п.

С помощью НОР могут быть получены также высокоэнthalпийные газовые потоки путем продувания газа через сопло, расположенное вблизи разряда. Разряд устойчив при скоростях потока в холодном газе до 10–12 м/с и давлении газа от 1 до 10 атм и выше [3, 4]. При мощности излучения лабораторного лазера до 6 кВт в непрерывном режиме можно оценить достижимую таким способом энthalпию потока на уровне  $2.5 \times 10^4$  Дж/г при массовом расходе 0.1–0.2 г/с. Для получения сверхзвуковых потоков необходима камера низкого давления, в которую газ, разогретый при высоком давлении в НОР, подается через сопло. Состав получаемой таким образом плазмы соответствует исходному газу, втекающему в разряд, с учетом того, что при нагреве лазерным излучением происходит диссоциация и ионизация газа. Состав плазмы при повышенном давлении близок к термически равновесному. В чистых молекулярных газах ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$  и др.) НОР осуществим при мощности лазера до 6 кВт.

## 5. Заключение

Продемонстрирована экспериментально возможность эффективного применения комбинированного разряда типа РПТ – ЕИР в  $CO_2$ -лазере с быстрой осевой прокачкой. Исследованы свойства активной среды, а также рабочие характеристики и возможности масштабирования лазера. Достигнута выходная мощность более 2.2 кВт с метра длины активной среды с электрооптическим КПД лазера 20 %. Разработаны принципы конструирования лазера мощностью до 6 кВт с высокими КПД и качеством излучения.

Показана возможность поджига и поддержания непрерывного оптического разряда в аргоне и воздухе в лазерном луче с  $M^2 = 6$ . Стабильный и симметричный пучок, получаемый в лазере с быстрой осевой прокачкой, в состоянии поддерживать стабильную и симметричную плазменную область, благоприятную для проведения диагностики и различных прикладных исследований, несмотря на расходимость лазерного излучения, далекую от дифракционного предела.

1. Райзер Ю.П. *Письма в ЖЭТФ*, **11**, 195 (1970).
2. Генералов Н.А., Зимаков В.П., Козлов Г.И., Масюков В.А., Райзер Ю.П. *Письма в ЖЭТФ*, **11**, 447 (1970).
3. Герасименко М.В., Козлов Г.И., Кузнецов В.А. *Квантовая электроника*, **10**, 709 (1983); *Физика плазмы*, **9**, 1269 (1983).
4. Генералов Н.А., Захаров А.М., Косынкин В.Д., Якимов М.Ю. *Физика горения и взрыва*, **22**, 91 (1986).
5. Суржиков С.Т. *Физическая механика газовых разрядов* (М.: изд-во МГТУ им. Баумана, 2006).
6. Generalov N.A., Gorbulev M.I., Solov'yov N.G., Yakimov M.Yu., Zimakov V.P., in *Gas Lasers – Recent Developments and Future Prospects* (Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996, p. 323).
7. Wiegand W.J., Nighan W.L. *Appl. Phys. Lett.*, **26**, 554 (1975).
8. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда* (М.: Наука, 1987).
9. Lowke J.J., Phelps A.V., Irwin B.W. *J. Appl. Phys.*, **44**, 4664 (1973).
10. Generalov N.A., Shemyakin A.N., Solov'yov N.G., Yakimov M.Yu., Zimakov V.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6611**, 6611K (2007).
11. International standard ISO 11146-1:2005 (2005).
12. Зимаков В.П., Кедров А.Ю., Кузнецов В.А., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. *Оптика атмосферы и океана*, **21**, 669 (2008).
13. Rigrod W.W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **14**, 377 (1978).
14. Лосев С.А. *Газодинамические лазеры* (М.: Наука, 1977).
15. Витteman В.Дж. *CO<sub>2</sub>-лазер* (М.: Мир, 1990).
16. Галушкин М.Г., Голубев В.С., Завалова В.Е., Новодворский О.А., Панченко В.Я. *Квантовая электроника*, **22**, 485 (1995).