

# New Possibilities for Applying Optical Discharges to Aerophysical Experiments

V.P. Zimakov, V.A. Kuznetsov, S.Yu. Lavrentyev, N.G. Solovyov,  
A.N. Shemyakin, A.O. Shilov, M.Yu. Yakimov

*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, 119526, Russia  
yakimov@lantanlaser.ru*

## Abstract

Newly developed technologies for sustaining optical discharges (OD) at laser intensities below optical breakdown threshold provide possibilities for expanding their application in aerophysical experiments. High density of the laser power dissipation and high temperature of OD provide possibility to localize high power density energy deposition in any required place. The paper discuss some examples of the use of continuous and periodic pulsed OD for production of high enthalpy gas flows, high energy atomic flow generation, stabilization inductively coupled RF discharges, hyper sound flow control and others.

High brightness plasma light sources based on OD are now most developed to be directly applied for absorption spectroscopy purposes or as point spectral light source for optical density gradients visualization in desired spectral band from UV to IR. Small linear dimensions of the OD plasma together with very high brightness could substantially improve sensibility and resolution of optical devices, providing also the possibility of efficient application of optical fibers for guiding the probe light.

Authors have developed advanced technique for OD plasma stabilization in crossed focused beams of the fiber coupled near-IR laser diode modules, designed and constructed the prototype of a broadband laser plasma light source for various applications. The device provides possibilities for realization continuous, periodic pulsed and hybrid regimes of sustaining OD plasma, which may extend possible areas of its application. Design and characteristics of the OD plasma light source are described, possible applications are discussed.

Keywords: optical discharge, COD, POD, laser plasma light source, laser plasma applications.



*a*



*b*

Prototype laser plasma broadband high brightness spectral light source based on laser plasma stabilized in crossed laser beams technology. (a) Lamp House together with Laser Drive Module. (b) OEM type Light House designed to be incorporated in optical devices.

УДК 533.915.082.5; 537.521.7(04); 533.6.072

# Новые возможности применения оптических разрядов в аэрофизическом эксперименте

**В.П. Зимаков, В.А. Кузнецов, С.Ю. Лаврентьев, Н.Г. Соловьев,  
А.Н. Шемякин, А.О. Шилов, М.Ю. Якимов**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлунского Российской академии наук  
(ИПМех РАН), Россия, Москва, 119526, проспект Вернадского 101, к. 1  
yakimov@lantanlaser.ru*

## Аннотация

Развитые к настоящему времени технологии организации оптических разрядов при интенсивностях лазерного излучения ниже порога оптического пробоя позволяют рассчитывать на расширение возможностей их применения для целей аэрофизического эксперимента. В докладе обсуждаются примеры использования оптических разрядов для создания высокоэнтальпийных потоков газа, генерации пучков атомов с высокой энергией, управления потоками при сверхзвуковом обтекании и другие.

Наиболее близкими к реальному применению для решения, например, задач спектроскопии или визуализации градиентов плотности в потоках газа на сегодняшний день могут считаться плазменные источники излучения на основе оптического разряда. Малые линейные размеры плазмы оптического разряда в сочетании с очень высокой яркостью позволяют повысить чувствительность и разрешающую способность оптических приборов, а также эффективно использовать волоконную оптику для подвода излучения.

Авторы разработали оригинальный метод стабилизации плазмы оптического разряда в скрещенных сфокусированных пучках диодных лазерных модулей, отличающийся рядом преимуществ, и создали на его основе широкополосный источник излучения. Устройство позволяет реализовать непрерывный, импульсно-периодический и гибридный режимы поддержания оптического разряда, расширяющие диапазон его применения. Приводятся характеристики разработанного источника излучения и обсуждаются возможности его применения в экспериментальной технике.

Ключевые слова: оптический разряд, НОР, ИПОР, лазерно-плазменный источник излучения, применение оптических разрядов.

## 1. Введение

С появлением достаточно мощных импульсных и непрерывных лазеров инфракрасного диапазона началась история получения и исследования газовых разрядов в оптическом диапазоне частот электромагнитного излучения. Интерес к практическому применению оптических разрядов (ОР) был в значительной степени стимулирован пионерскими работами по непрерывному оптическому разряду (НОР), выполненными в ИПМех РАН [1, 2]. Обзор основных результатов теоретических и экспериментальных исследований в области оптических разрядов при интенсивности поддерживающего их лазерного излучения ниже порога оптического пробоя можно найти в [3–9]. Время от времени появляются статьи о применениях оптических разрядов, как правило, довольно экзотических, таких как лазерный реактивный двигатель [7], термоэмиссионный преобразователь энергии лазерного излучения в электричество [8], или оптический плазмотрон для синтеза материалов или ионной имплантации [9–10].

К преимуществам оптических разрядов следует отнести возможность их реализации в небольших масштабах в лабораторных условиях. Современный мощный инфракрасный лазер среднего ( $9 \div 11$  мкм) или ближнего ( $0.9 \div 1.1$  мкм) диапазонов обладает полным КПД от 15% до 50%, занимает площадь от одного до нескольких квадратных метров при долговременной непрерывной и/или средней импульсно-периодической выходной мощности от 1 до 10 кВт. В настоящее время такие лазеры вполне могут находиться в распоряжении лаборатории или центра коллективного пользования. Для того чтобы поддерживать стабильную плазму с температурой  $18 \div 20$  тыс.  $^{\circ}\text{K}$ , требуется сфокусировать в нужном месте лазерное излучение достаточной мощности и инициировать плазму каким-либо посторонним источником.

Параметры плазмы оптических разрядов полностью определяются мощностью лазерного излучения, родом плазмообразующего газа и его давлением, а также легко контролируются, например, оптическими спектральными методами. Анализ проходящего через плазму лазерного излучения позволяет уточнить распределение температуры и концентрации электронов в её наиболее горячей центральной части, где спектральные методы дают максимальные погрешности. Такого рода уточнения важны для применения ОР в качестве эталонного объекта при валидации теоретических моделей высокотемпературной газодинамики [6].

## **2. Обзор применений оптических разрядов в аэрофизическом эксперименте**

Среди в целом немногочисленных на сегодняшний день применений оптических разрядов можно выделить интересные возможности для лабораторного моделирования воздействия физических факторов на различных стадиях полета космических аппаратов. Это в первую очередь коротковолновое ультрафиолетовое излучение, потоки нейтральных атомов с высокой кинетической энергией, а также высокоэнтальпийные газовые потоки при одновременном действии излучения и активных частиц, например, на этапе входа спускаемого аппарата в атмосферу планеты с межпланетной траектории со второй космической скоростью. В основе большинства перечисленных применений лежит схема организации оптического разряда в потоке газа в режиме лазерного плазмотрона [4].

На рис. 1 схематически изображены некоторые варианты применения оптических разрядов, которые могут находить применение при лабораторном моделировании различных факторов в аэрофизическом эксперименте.

Схема для моделирования воздействия широкополосного (солнечного) излучения на верхней границе атмосферы показана на рис. 1, *а*. В герметичной камере, типа изображенной на рис. 1, *а*, коротковолновая граница излучаемого плазмой спектра будет определяться потенциалом ионизации инертного газа, которым заполнена камера, и характеристиками пропускания окна, через которое излучение выпускается в вакуумный объем для имитации условий космического пространства, и может быть около 120 нм. Высокая максимальная температура плазмы оптического разряда позволяет получить больше излучения в виде вакуумного ультрафиолета, что позволяет сократить время экспозиции при проведении испытаний.

Высокая плотность диссипации энергии в оптических разрядах позволяет с их помощью получать высокоэнтальпийные потоки небольшого поперечного сечения с высокими параметрами по давлению и температуре торможения [7, 13–15]. На рис. 1, *б* изображена схема лазерного ракетного двигателя, подобного обсуждаемому в [7], по сути представляющего собой генератор высокоэнтальпийного газового потока [13–15]. В камеру, в которой в сфокусированном входной оптической системой луче мощного лазера горит оптический разряд, подается рабочее тело с малой атомарной массой для увеличения удельного импульса. Характерная температура плазмы разряда, определяемая балансом поглощения лазерного излучения и энергетических потерь, достигает 20 тыс.  $^{\circ}\text{K}$ . Плазма сильно излуча-

ет и нагревает стенки разрядной камеры, которые охлаждаются циркулирующим за стенками рабочим телом. При этом подогретое рабочее тело возвращает излученную разрядом энергию обратно в разрядную камеру. Положение плазмы относительно критического сечения сопла выбирается таким образом, чтобы нагрев газа, проходящего через разрядную камеру, был максимальным с учетом тепловой стойкости материала стенок критического сечения сопла. При этом реально достичь температуры газа свыше 5 тыс.  $^{\circ}\text{K}$  и получить удельный импульс до  $1500 \div 2000$  с. Фантастичным для применения в реактивной технике этот проект делает отсутствие непрерывных инфракрасных лазеров мощностью  $1 \div 10$  МВт, а также материалов, способных без потерь и искажения пропускать и фокусировать столь мощное излучение.

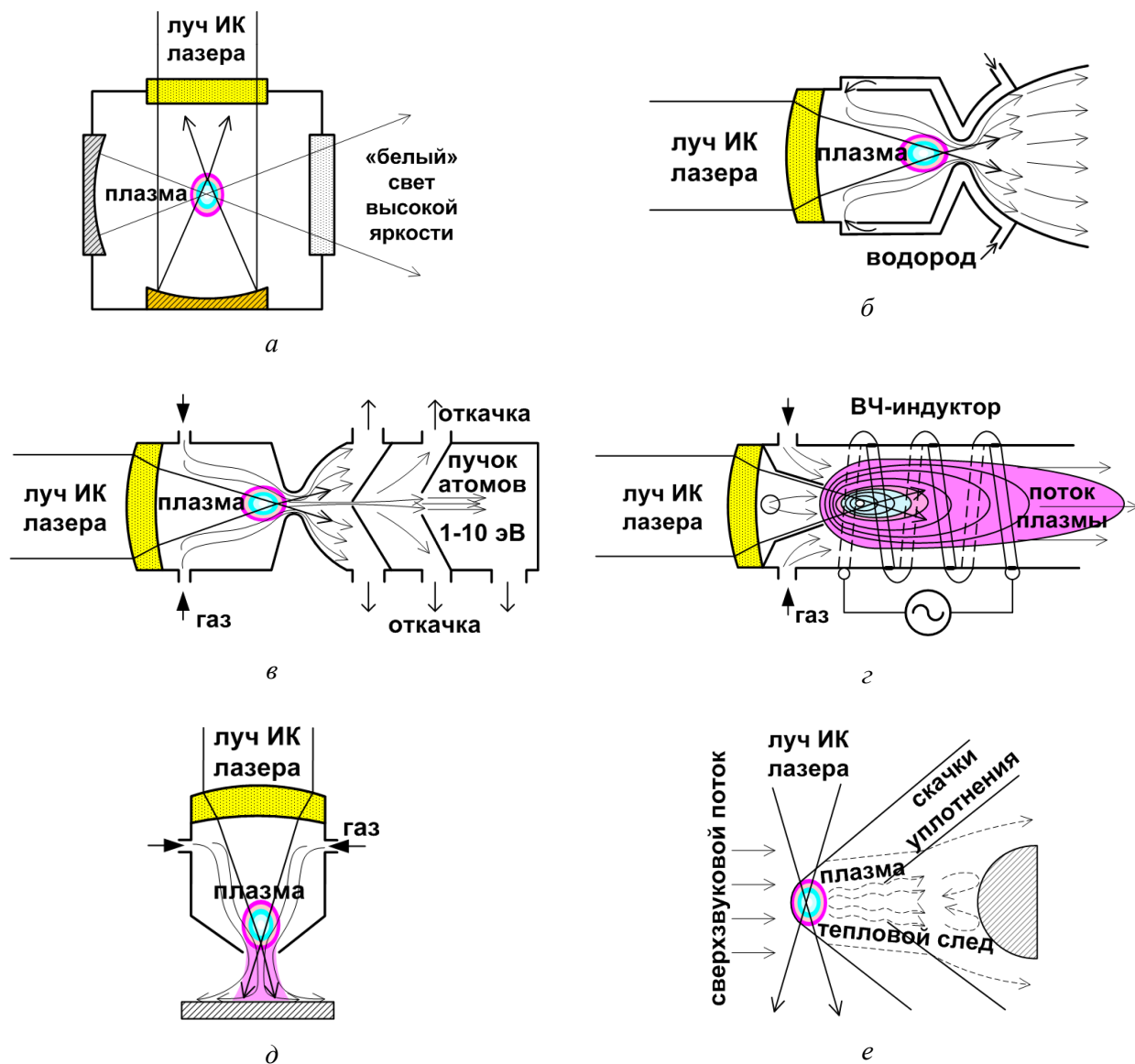


Рис. 1. Применения оптических разрядов для моделирования воздействия излучений, потоков высокоэнтальпийного газа и высокоэнергетических частиц для различных задач аэродинамического эксперимента: (а) моделирование солнечной радиации на верхней границе атмосферы; (б) лазерно-плазменный реактивный двигатель; (в) установка для создания пучков атомов с высокой кинетической энергией; (г) комбинированный лазерно-ВЧИ плазматрон для создания высокоэнтальпийных газовых потоков; (д) лазерный плазматрон для высокотемпературных испытаний, модификации поверхности материала, ионной имплантации и нанесения покрытий; (е) управление сверхзвуковым обтеканием с помощью оптического разряда

На рис. 1, в изображена схема, внешне похожая на описанный выше лазерно-плазменный генератор высокоэнтальпийного потока, но используемая для получения пучков нейтральных атомов с энергией до 10 эВ в лабораторных испытаниях [11–13]. Пучок атомов с высокой кинетической энергией выделяется из расширяющейся в сопле высокоэнтальпийной струи рядом диафрагм (скиммеров), расположенных между промежуточными ступенями дифференциальной откачки. Скорость атомов в пучке достигает максимума при использовании в качестве плазмообразующего газа гелия и может достигать 10 км/с. Более тяжелые атомы присутствуют в пучке в виде добавки к гелию: при расширении в сопле быстро движущиеся атомы гелия увлекают за собой более тяжелые (и медленные) атомы и ускоряют их до сопоставимой скорости.

Плазма оптического разряда представляет собой локальную зону тепловыделения, которая при достаточной плотности диссипации мощности воздействует на структуру и характеристики сверхзвукового потока в области теплового следа [16], что может быть использовано в аэрофизическом эксперименте для оперативного локального управления характеристиками потока (рис. 1, е). При интенсивности лазерного излучения ниже пробойной такое воздействие, хотя и требует постороннего инициирования, может быть реализовано с большей точностью и повторяемостью, чем в случае лазерного пробоя.

От других способов безэлектродной генерации плазмы ОР выгодно отличается благоприятными условиями его реализации при повышенном давлении (от одной до нескольких десятков атмосфер). Благодаря этому свойству ОР можно использовать для стабилизации горения и управления плазмой, например, индукционного ВЧ-разряда в условиях повышенного давления, или, когда чисто индукционный ВЧ-разряд горит нестабильно [17, 18] (рис. 1, з). Такой комбинированный разряд при сохранении всех полезных свойств оптического разряда позволяет решить проблему КПД оптического плазмотрона, определяемого, в свою очередь, КПД генерации лазерного излучения, обычно не превышающем 15 %. Применение похожих комбинированных разрядов обсуждалось в [17] для применения в сложных для чисто индукционного разряда условиях плазмохимической технологии конверсии гексафторида урана. Схема рис. 1, з, благодаря возможности реализации при более высоком давлении и с более высокой температурой плазмы, чем обычный ВЧИ-разряд, наиболее подходит для создания высокоэнтальпийных газовых потоков, моделирующих условия вхождения спускаемого аппарата в атмосферу с межпланетных траекторий со второй космической скоростью [18].

На рис. 1, д показана классическая схема лазерного плазмотрона [4], который может использоваться как для высокотемпературных испытаний материалов, так и для создания новых материалов и покрытий с уникальными свойствами [9–10].

### 3. Источники излучения на основе оптического разряда

Для решения задач визуализации градиентов плотности в аэрофизическом эксперименте в различных спектральных диапазонах и с возможно лучшим временным и пространственным разрешением, а также для микроэлектроники, фотохимии, спектроскопии, фотометрии, аналитического приборостроения и многих других требуются непрерывные или квазинепрерывные источники излучения с равномерно высокой спектральной яркостью в диапазоне от вакуумного УФ до ближнего ИК, отличающиеся высокой временной и пространственной стабильностью характеристик. При этом для большинства приложений принципиально нежелательны характерные для лазерных источников многочисленные спеклы в поле засветки, маскирующие тонкую структуру изображений и снижающие их информативность.

В таких приложениях, как правило, требуется согласование выходной апертуры источника излучения  $2r_p$  (рис. 2) и входной линейной и угловой апертур, например, световода с диаметром центрального волокна  $2r_f < 1$  мм и конусом сбора излучения с углом при вершине  $2\theta_f$ , характеризующимся числовой апертурой  $NA_f = \sin(\theta_f)$ . Световоды, как и опти-

ческие системы приборов, обычно имеют небольшие входные числовые апертуры  $NA_f \approx 0.1 \div 0.25$ . Для более эффективного сбора излучения от компактного плазменного источника входная апертура согласующего конденсора должна быть на уровне  $NA_p \approx 0.5$  или больше, насколько позволяют ограничения, связанные с оптическими aberrациями. Отсюда вытекает условие для размера излучающей области плазмы, из которой возможен эффективный сбор излучения  $r_p < r_f (NA_f / NA_p) \approx 0.1 \div 0.2$  мм.

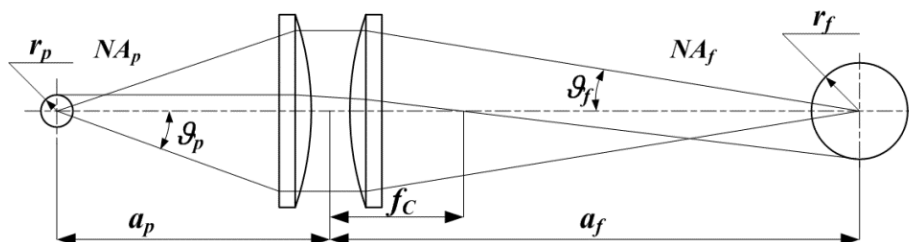


Рис. 2. Схема согласования излучающей плазмы с входной апертурой оптоволоконного световода. Здесь  $f_c$  – фокусное расстояние конденсора;  $a_p$  – расстояние до плазмы;  $a_f$  – расстояние до световода

До недавнего времени предъявляемым требованиям лучше всего отвечали плазменные источники излучения на основе дуговых разрядов высокого давления [22]. Однако минимальный размер дуги  $\sim 0.5 \times 0.5$  мм<sup>2</sup> не позволяет без значительных потерь собирать излучение в оптоволоконно диаметром менее 1 мм, а низкая температура плазмы в обычных дуговых лампах ограничивает яркость (рис. 4), особенно в ультрафиолетовой части спектрального диапазона. Большие рабочие токи и присутствие электродов, находящихся в постоянном контакте с плазмой, создают дополнительные проблемы долговременной и кратковременной стабильности источников излучения дугового разряда.

В настоящее время с развитием физики оптических разрядов при допробойной интенсивности лазерного излучения, непрерывного и импульсно-периодического (НОР/ИПОР) [24, 26], а также техники мощных лазеров, используемых для их поддержания, появилась возможность создания эффективных источников излучения со спектральной яркостью, значительно превышающей яркость традиционных плазменных источников. При этом используется свойство лазерного излучения обеспечивать при фокусировке принципиально более высокую плотность мощности энерговыделения, чем в электрических разрядах, а значит более высокую температуру и яркость плазмы. Плазма ОР более однородна и стабильна, чем электроразрядная плазма или плазма оптического пробоя, отсутствие контакта со стенками и электродами гарантирует долговременную стабильность.

Сообщения о возможности создания эффективного источника излучения на основе НОР, способного успешно конкурировать с традиционными плазменными источниками, появились сравнительно недавно [19, 20]. Важным достижением было использование для поддержания оптического разряда диодных лазерныхборок мощностью до 100 Вт, выпускаемых серийно и широко используемых для накачки твердотельных лазеров. Так, для накачки популярных в настоящее время иттербиевых лазеров используются диодные лазеры с длиной волны  $0.96 \div 0.98$  мкм, близкой к группе сильных резонансных линий поглощения атома ксенона  $0.98$  мкм, коэффициент поглощения в центре которой для условий плазмы дугового разряда составляет  $15 \div 20$  см<sup>-1</sup>. Немаловажным фактором является также прозрачность кварцевых колб стандартных дуговых ламп для лазерного излучения в области 1 мкм – это позволяет вводить излучение в газ прямо через стенку колбы, что невозможно при поддержании оптических разрядов излучением СО<sub>2</sub>-лазера.

Был разработан и запатентован ряд конструкций источников излучения на этой основе [19, 21, 27, 28]. По сравнению с другими плазменными источниками излучения ОР в ксеноне высокого давления обеспечивает компактные размеры излучающей области плазмы ( $0.1 \div 0.3$  мм), высокую яркость плазмы на уровне  $1 \div 10$  Вт·см<sup>-2</sup>·нм<sup>-1</sup>·ср<sup>-1</sup>. При этом за счет

высокой температуры яркость плазмы НОР в ультрафиолетовом диапазоне превышает яркость электродуговой плазмы более чем на порядок [19, 22, 24, 26]. Для реализации последнего преимущества колба лампы должна быть изготовлена из кварцевого стекла, прозрачного в ультрафиолетовом диапазоне до  $\lambda=170$  нм.

Авторы данной работы исследовали факторы, влияющие на спектральную яркость плазмы НОР в ксеноне высокого давления при поддержании плазмы лазерным излучением на длине волны  $\lambda=1.07$  мкм [24]. Исследования проводились с непрерывными и импульсно-периодическими волоконными иттербиевыми лазерами НТО «ИРЭ-Полус», с выходным лучом с низкой расходимостью ( $M^2=1.2\div 6$ ,  $BPP < 2$  мм·мрад). Выходная мощность лазеров могла меняться от 0 до 250 Вт в непрерывном режиме и до 1500 Вт в режиме периодических миллисекундных импульсов. Плазма поддерживалась внутри кварцевых колб стандартных дуговых ксеноновых ламп при давлении от 10 до 24 бар. Лазерное излучение фокусировалось внутри колбы при помощи оптических систем с различным параметром фокусировки  $F=f/d$ , где  $f$  – эквивалентное фокусное расстояние, а  $d$  – диаметр луча. Значение  $F$  определяет угол раствора конуса, в котором находится 86 % мощности сходящегося луча,  $2\theta_f = 2 \cdot \arctg(1/(2F))$ , и оказывает сильное влияние на свойства ОР. В опытах использовались значения  $F=3\div 10$  и выше, так что  $2\theta_f \approx 1/F$ .

Экспериментально определялась зависимость пороговой (минимальной) мощности поддержания НОР  $P_t$  от давления газа  $p$ . Пороговая мощность достигалась либо за счет уменьшения мощности лазера при постоянном давлении, либо при уменьшении давления за счет охлаждения лампы при постоянной мощности лазера. Давление газа определялось по типу лампы и температуре ее колбы и электродов. Результаты экспериментов в ксеноне и аргоне приведены на рис. 3 вместе с аппроксимацией по формуле  $P_t = P_{th}/p^2 + P_{tr}$ , где коэффициенты  $P_{th}$ ,  $P_{tr}$  находились эмпирически.

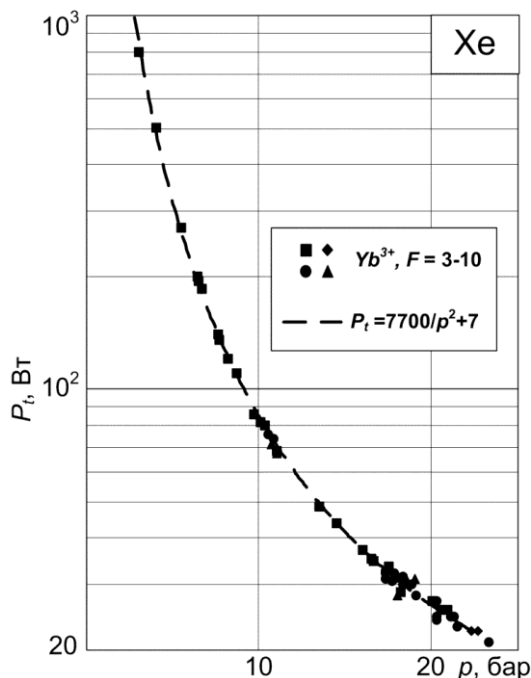


Рис. 3. Зависимость пороговой мощности поддержания НОР в ксеноне излучением иттербиевого лазера  $\lambda=1.07$  мкм от давления плазмообразующего газа  $p$ . Экспериментальные данные (точки), полученные при различных параметрах фокусировки  $F=3\div 10$ , интерполируются зависимостью  $P_t = 7700/p^2 + 7$

Вид зависимости рис. 3 экспериментальных значений пороговой мощности поддержания НОР от давления объясняется совместным вкладом в коэффициент поглощения лазер-

ного излучения механизмов обратного тормозного поглощения и фотоионизации [25] при значительном вкладе поглощения в спектральных линиях электронных переходов атомов, который возрастает при повышении давления и при давлении свыше  $5 \div 10$  бар становится определяющим. Таким образом, можно считать, что в условиях, типичных для лазерно-плазменных источников излучения определяющую роль в поглощении лазерного излучения с длиной волны около 1 мкм в ксеноне играют электронно-возбужденные состояния атомов и спектральные переходы группы  $6s$ - $6p$ .

Практически важно, что именно структура энергетических уровней атомов при высоком давлении обеспечивает достаточное для поддержания ОР поглощение излучения твердотельных лазеров ближнего ИК-диапазона в плазме. Благодаря высокой температуре при высоком давлении плазма ОР представляет собой компактный и яркий источник света в широком спектральном диапазоне. Доступность волоконных и диодных лазеров необходимой мощности при постоянном улучшении их характеристик и снижении стоимости ведет к тому, что источники излучения на основе ОР уже очень скоро станут обычным инструментом исследований и высокотехнологичных производств.

Спектральная яркость излучения плазмы ОР определяется ее размерами и температурой, устанавливающимися в результате баланса между поглощением лазерного излучения и энергетическими потерями плазмы. На рис. 4 приведены экспериментальные данные по спектральной яркости НОР, полученные с лазером  $\lambda = 1.07$  мкм в Хе  $p \approx 22$  бар при  $F = 3.3$ . Там же проведено сравнение яркости плазмы НОР и дугового разряда стандартной ксеноновой лампы высокого давления. Данные для НОР и дугового разряда получены путем сравнения измеренной яркости с яркостью эталонного источника одними и теми же приборами в одинаковых условиях. Видно, что при увеличении мощности лазера яркость НОР увеличивается и в несколько раз превосходит яркость дугового разряда, особенно в ультрафиолетовом диапазоне, что говорит о высокой температуре плазмы НОР.

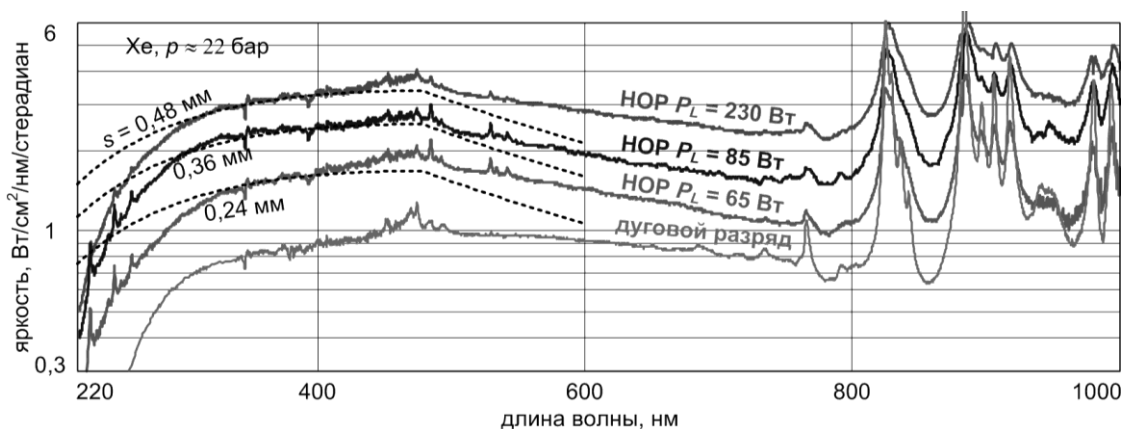


Рис. 4. Спектральная яркость плазмы НОР в сравнении со спектральной яркостью дугового разряда. Ксенон,  $p = 22 \pm 2$  бар,  $F = 3.3$ ,  $\text{Yb}$ -лазер 1.07 мкм, различная мощность излучения  $P_L = 65 \div 230$  Вт. Штриховые линии – расчет спектральной яркости ЛТР плазмы Хе с температурой 15 кК в слое толщиной  $s = 0.24 \div 0.48$  мм, сравнимой с реальным размером НОР

Представление о температуре плазмы НОР можно получить из сравнения измеренной спектральной яркости НОР при разных мощностях лазерного излучения и рассчитанной по формуле для спектральной яркости слоя однородной плазмы с определенной температурой, находящейся в состоянии локального термодинамического равновесия (ЛТР) [25]. Поскольку увеличение спектральной яркости НОР с мощностью лазерного излучения сопровождается увеличением его оптической толщины в направлении наблюдения, считаем, что температура плазмы не меняется, а меняется ее оптическая толщина.

В ходе расчетов оказалось, что, если принять температуру ЛТР плазмы 15 кК и оптическую толщину в диапазоне  $0.24 \div 0.48$  мм, получается хорошее согласие наблюдаемой и



расчетной спектральной яркости в довольно широком спектральном диапазоне (рис. 4). Этот расчет носит оценочный характер, поскольку в нем не учитывается изменение температуры и яркости плазмы НОР вдоль линии наблюдения. Само по себе приближение ЛТР справедливо для плазмы НОР, и найденную расчетную температуру плазмы можно рассматривать как некоторую среднюю температуру плазмы НОР, отвлекаясь при этом от сильной зависимости яркости плазмы от температуры. Снижение яркости излучения реальной плазмы по сравнению с результатами модельного расчета в области длин волн короче 300 нм кроме влияния поглощения стенками кварцевой колбы обусловлено также тем, что коротковолновая ультрафиолетовая компонента излучается более горячими центральными областями НОР, которые имеют меньшую оптическую толщину. Здесь сказывается неоднородность плазмы НОР, не учтенная в модельном расчете. В области короче 250 нм сказывалось поглощение материалом колбы лампы.

Важным фактором, от которого зависят характеристики плазмы, является рефракция лазерного излучения на градиентах плотности нейтральных и заряженных частиц в плазме. Эффекты, связанные с поглощением и рефракцией, могут снизить яркость плазмы НОР более чем на порядок в зависимости от сорта газа, давления, остроты фокусировки, наличия или отсутствия конвективного потока газа. Например, когда влияние рефракции велико, яркость плазмы слабо растет с увеличением мощности, а иногда даже снижается.

Эффекты рефракции можно компенсировать путем более острой фокусировки лазерного луча. Фокусировка должна быть тем сильнее, чем выше давление и соответственно поглощение и рефракция лазерного излучения в газе и плазме. Фокусировка определяется параметром  $F = f/d$ . При малых  $F$  плазма НОР находится вблизи фокуса, выглядит компактной и однородной, а её относительное удлинение примерно пропорционально  $F$ . Для поддержания плазмы с малыми линейными размерами и высокой яркостью следует фокусировать лазерное излучение короткофокусным объективом с малым  $F$ . При увеличении  $F$ , начиная с некоторого предела, зависящего также от давления газа и относительной роли рефракции лазерного излучения, плазма удлиняется и приобретает структуру с двумя или тремя максимумами температуры вдоль оси лазерного излучения [23]. При дальнейшем увеличении  $F$  стабильное горение плазмы нарушается, и плазма либо скачкообразно удаляется от фокуса и переходит в режим с низким поглощением («короткая» плазма), либо проявляет бистабильность [23]. Кроме фокусировки существуют и другие методы компенсации рефракции, например, управление плазмой посредством потока газа [4, 5]. Также при подаче излучения к плазме снизу-вверх устойчивость плазмы немного растет вследствие естественной конвекции.

#### **4. Лазерно-плазменный источник широкополосного излучения для применения в оптических приборах**

Таким образом, при поддержании плазмы в сфокусированном лазерном луче кроме достаточной мощности решающим фактором является его фокусировка. Наилучшие результаты достигаются при фокусировке широкоапертурными объективами с  $NA \approx 0.5$  и более, в которых используют сложную асферическую оптику. Однако, проходя при этом через прозрачную стенку колбы с плазмообразующим газом, широкоапертурный пучок при обычном среднем оптическом качестве стенки будет получать различный фазовый сдвиг после прохождения разных участков стекла в пятне контакта луча со стенкой. Это ведет к неустраняемому ухудшению фокусировки. В этом случае плазма становится нестабильной, более чувствительной к изменению мощности излучения и его пространственно-временных характеристик, снижается яркость и световой поток, излучаемый плазмой.

В [28] предложено для создания эффекта сильной фокусировки поддерживать плазму в области пересечения двух сравнительно слабо сфокусированных лучей, расположенных под углом не менее  $60^\circ$  друг к другу.

Возможность подвода излучения ближнего ИК-диапазона с помощью оптоволоконна позволяет простыми средствами реализовать эту схему, например, как показано на рис. 5. Для оптимальных условий горения оптического разряда область взаимного пересечения лучей не должна быть большого объема, поэтому сами лучи должны быть достаточно высокого исходного качества и должны быть предварительно сфокусированы, а зона их пересечения должна находиться вблизи фокуса приблизительно в том месте, где локализуется оптический разряд при минимальной мощности у порога его погасания в каждом из лучей. Требования к фокусировке в случае такого расположения лучей могут быть снижены, что позволяет использовать объективы с малой числовой апертурой со сферическими преломляющими поверхностями. В случае узких лучей обычные неоднородности стенок кварцевой колбы не приводят к дефокусировке лучей, а только меняют положение точек фокусов, что можно легко исправить простой регулировкой.

На рис. 5 показана одна из возможных конструкций излучателя на основе плазмы, стабилизированной в области пересечения двух относительно слабо сфокусированных лазерных лучей. Приведен закрытый вариант излучателя, заполняемого сухим азотом под давлением для улучшения рабочих и эксплуатационных характеристик при работе в области вакуумного ультрафиолета  $170 < \lambda < 300$  нм.

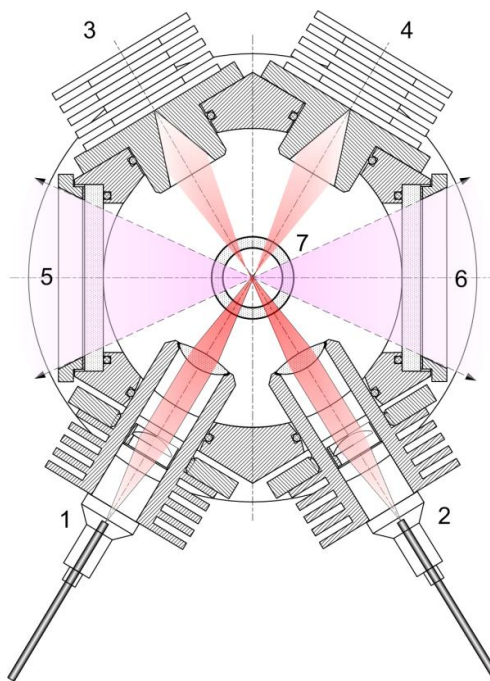


Рис. 5. Поперечное сечение закрытого варианта излучателя на оптическом разряде, стабилизированном в области пересечения лазерных лучей. Каждый из двух лазерных лучей, подводимых по оптоволоконнам, коллимируется и фокусируется отдельной оптической системой (1, 2). Лучи пересекаются вблизи фокуса внутри заполненной ксеноном кварцевой колбы (7), формируя зону, оптимальную для стабилизации компактной плазмы оптического разряда с высокой яркостью. Излучение плазмы выводится через широкоапертурные окна из кварцевого стекла типа КУ-1 (5, 6). Проходящая через плазму небольшая часть мощности лазерного излучения задерживается в поглотителях (3, 4). Полость излучателя заполнена инертным газом под небольшим давлением для уменьшения поглощения УФ-излучения и образования озона

Поддержание ОР в схеме пересекающихся лучей обладает рядом преимуществ, создающих новые возможности повышения температуры и управления характеристиками плазмы ОР, например, за счет импульсно-периодического режима работы одного из лазеров или обоих вместе [27, 29]. Плазма в зоне пересечения лучей менее подвержена пространственным колебаниям и менее чувствительна к изменению пространственно-временных ха-

рактических лазерных источников излучения, поэтому о данной технологии можно говорить, как о методе пассивной стабилизации характеристик плазмы.

В экспериментах авторов [29] показано, что в данной схеме по сравнению со случаем ОР в одиночном слабо сфокусированном луче почти на порядок величины увеличивается коэффициент поглощения лазерного излучения, а также яркость и температура плазмы. При этом сохраняются небольшие размеры излучающей области плазмы, примерно соответствующие размерам области пересечения лазерных лучей.

На рис. 6, а приведены результаты измерения спектральной освещенности, создаваемой плазмой НОР в пересекающихся пучках, а также для сравнения на рис. 6, б показаны графики определенной в тех же условиях спектральной яркости плазмы НОР. Плазма поддерживалась в специально изготовленных кварцевых лампах со стандартным оптическим качеством стенок колбы и различным давлением наполнения  $p=15, 20, 25$  бар соответственно. Суммарная мощность излучателей выбиралась в диапазоне  $P=50 \div 60$  Вт ( $\lambda=0.970 \div 0.976$  мкм) такой, чтобы при различном давлении газа освещенность, создаваемая плазмой на расстоянии 50 см, была примерно одинаковой в видимом и ближнем УФ-диапазонах. Размер излучающей плазмы в видимом диапазоне не превышал  $0.15 \times 0.30$  мм<sup>2</sup>. Спектральная яркость плазмы при измерении усреднялась по части изображения диаметром менее 0.1 мм вокруг ее наиболее яркой центральной области.

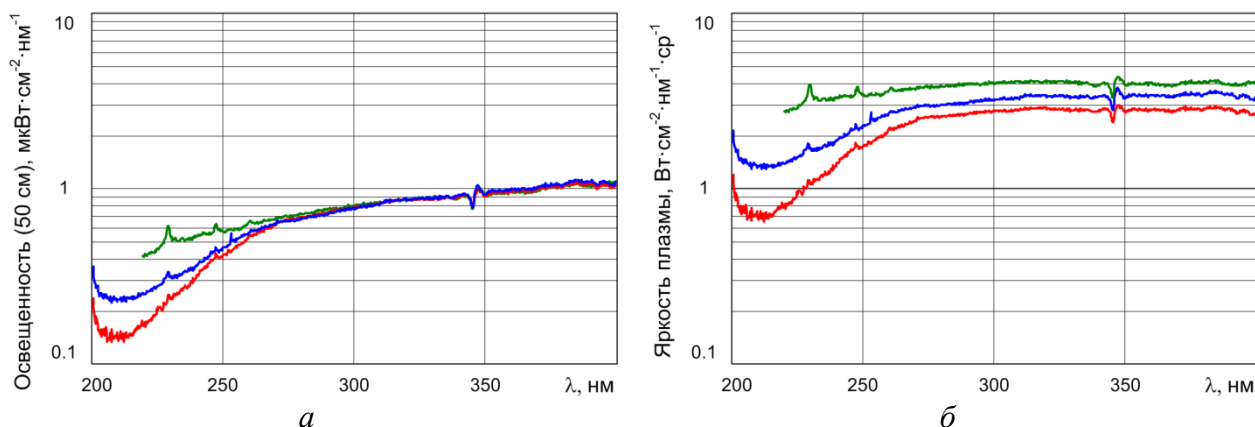


Рис. 6. Спектральная освещенность, создаваемая плазмой оптического разряда в ксеноне в пересекающихся лучах на расстоянии 50 см от разряда (а) и соответствующая спектральная яркость плазмы (б) в ультрафиолетовом диапазоне при различном давлении ксенона, соответственно,  $p \approx 15$  бар (красная кривая – внизу),  $p \approx 20$  бар (синяя) и  $p \approx 25$  (зеленая – сверху). Большое давление соответствует большим значениям освещенности и яркости. Спад спектральных характеристик в области  $\lambda < 250$  нм увеличивается при уменьшении давления ксенона

Видно, что спектр плазмы, полученной при максимальном давлении (зеленая линия), демонстрирует значительно большую интенсивность в области вакуумного ультрафиолета. Отличие графиков спектральной яркости указывает на то, что размеры плазмы уменьшаются с давлением, а также на то, что размер изображения плазмы зависит от длины волны и уменьшается в области ультрафиолета, что вызывает дополнительное увеличение спектральной яркости плазмы в ультрафиолетовой области. При суммарной мощности лазерного излучения около 50 Вт была достигнута максимальная спектральная яркость излучения на уровне  $4 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$  при давлении ксенона свыше 25 бар.

Дополнительного увеличения спектральной яркости до  $10 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$  и выше в области длин волн  $300 \div 350$  нм удастся достичь в комбинированном режиме НОР/ИПОР в пересекающихся лучах в случае, когда лазер 1 работает в непрерывном режиме при мощности излучения до 30 Вт, а лазер 2 – в импульсно-периодическом с большой скважностью и примерно удвоенной по сравнению с непрерывным режимом импульсной мощностью до 60

Вт. При этом по сравнению с НОР, максимальная импульсная яркость плазмы в комбинированном режиме разряда возрастает в  $3 \div 5$  раз [28].

На рис. 7 приведена фотография разработанного авторами прототипа широкополосного источника излучения на плазме оптического разряда со стабилизацией плазмы в области пересечения сфокусированных лучей диодных лазеров.



Рис. 7. Прототип лазерно-плазменного широкополосного источника излучения с пересекающимися лазерными лучами. (а) – общий вид излучателя открытого типа и служебного модуля. (б) – излучатель открытого типа, предназначенный для работы в составе оптического прибора

Прибор состоит из излучателя и служебного блока, соединенных двумя оптоволоконными и одним электрическим кабелем. Основным элементом излучателя, на рис. 7, б открытого типа, является специализированная колба из кварцевого стекла с высоким пропусканием в ультрафиолетовой области, заполненная ксеноном при высоком давлении. Плазма инициируется кратковременным дуговым разрядом между поджигающими электродами. Лазерное излучение подводится по двум оптоволоконкам с отдельными выходными коллиматорами и фокусаторами, снабженными юстировочными устройствами для настройки положения области пересечения лучей вблизи фокальных перетяжек и поджигающих электродов. Излучатель содержит также поглотители неиспользуемого лазерного и плазменного излучения, обеспечивающие защиту прибора и минимальный фон рассеянного лазерного и широкополосного излучения.

Служебный блок (рис. 7, а, справа) конструктивно объединяет модуль лазерных диодов, модуль управления, модуль питания. Модуль лазерных диодов содержит два лазерных диода со схемами управления, термостабилизации и охлаждения. Модуль управления обеспечивает контроль и стабилизацию тока диодов в режимах инициирования и стабильного поддержания плазмы, а также контроль датчиков безопасности и отключение диодов при их срабатывании. Кроме того, отдельная система управления обеспечивает термостабилизацию корпусов лазерных диодов с точностью  $0.1^{\circ}\text{C}$  путем управления током элементов Пельтье. Система обеспечивает также работу источника излучения во всех режимах под управлением внешнего устройства управления при работе в составе оптического прибора.

Жесткая стабилизация температуры лазерных диодов вместе со стабилизацией тока питания диодов и схемой пассивной стабилизации плазмы в пересекающихся лазерных пучках обеспечивают высокую пространственную и временную стабильность излучения плазмы при одновременной стабильности положения плазмы, необходимые для многих приложений.

Источник предназначен для работы в качестве спектрального осветителя высокой яркости в системах аналитических спектрометров, спектрофотометров, эллипсометров, мик-

роскопов, теневых и интерферометрических визуализаторов, а также различных оптико-волоконных устройств, требующих в первую очередь интенсивного широкополосного ультрафиолетового излучения.

Технические характеристики разработанного и изготовленного рабочего прототипа прибора приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Технические характеристики источника излучения с лазерной плазмой, стабилизированной в зоне пересечения лазерных лучей**

Группа параметров	Параметр	Значение	
Оптические характеристики	Спектральный диапазон, нм	190 ÷ 2100	
	Максимальная спектральная яркость в диапазоне $\lambda = 450 \div 500$ нм, Вт·см <sup>-2</sup> ·нм <sup>-1</sup> ·ср <sup>-1</sup> , не менее	3	
	Соотношение спектральных яркостей $B(\lambda = 200 \text{ нм}) : B(\lambda = 350 \text{ нм})$ , не менее	1:3	
	Размеры излучающей области плазмы при $\lambda = 350$ нм, диаметр×длина, мкм, не более	170×350	
	Нестабильность временных и пространственных характеристик, RMS, %, не более	0.2	
	Тип излучателя	открытый	
	Вывод излучения, 2 отверстия с числовой апертурой NA, не менее	2×0.5	
Общие характеристики	Мощность лазерного излучения, макс/рабочая, Вт	60/50	
	Интегральная мощность широкополосного излучения, макс/рабочая, Вт, не менее	40/30	
	Плазмообразующий газ	ксенон высокого давления	
	Потребляемая мощность, Вт, не более	350	
	Тип охлаждения	воздушное	
Массогабаритные характеристики прототипа	Излучатель	размер, д×ш×в, мм	100×100×200
		масса, кг	1.5
	Служебный блок	размер, д×ш×в, мм	420×290×190
		масса, кг	10
Соединение блоков, оптоволоконный и электрический кабель, длина, м, не менее		1	

## 5. Заключение и выводы

Развитые к настоящему времени технологии организации оптических разрядов позволяют рассчитывать на расширение возможностей их применения для целей аэрофизического эксперимента. Одним из наиболее перспективных, с точки зрения авторов, является применение оптических разрядов в комбинации с разрядами других типов для создания высокоэнтальпийных потоков различных газов в широком диапазоне рабочих давлений для оперативных лабораторных испытаний конструкций и материалов. Кроме того, интересна возможность применения квазинепрерывных и импульсно-периодических оптических разрядов для управления потоками при экспериментальной отработке режимов гиперзвукового обтекания различных поверхностей. Для указанных применений на сегодняшний день больше подходят мощные СО<sub>2</sub>-лазеры или импульсно-периодические лазеры ближнего ИК-диапазона с высокой средней и импульсной мощностью.

Для поддержания непрерывных и квазинепрерывных оптических разрядов в инертных газах при высоких давлениях, оптимальных для создания широкополосных источников излучения высокой яркости, более эффективны лазеры ближнего ИК-диапазона длин волн  $0.9 \div 1.1$  мкм, технологии которых в последние годы получили мощное развитие.

На сегодняшний день наиболее близкими к реальному применению для решения задач оптического приборостроения, например, абсорбционной спектроскопии или визуализации градиентов плотности в потоках газа могут считаться плазменные источники излучения на основе оптических разрядов, поддерживаемых диодными или волоконными лазерами ближнего ИК-диапазона. Малые линейные размеры плазмы оптического разряда в сочетании с очень высокой яркостью позволяют значительно повысить чувствительность и разрешающую способность оптических приборов, а также эффективно использовать волоконную оптику для подвода излучения.

На основе проведенного исследования условий и механизмов поддержания непрерывных и квазинепрерывных оптических разрядов в инертных газах высокого давления лазерами ближнего ИК-диапазона авторы статьи разработали новые методы эффективного применения оптических разрядов для создания широкополосных источников излучения высокой яркости. Разработан и реализован практически оригинальный метод пассивной стабилизации плазмы оптического разряда в области пересечения сфокусированных лучей диодных лазерных модулей, отличающийся рядом преимуществ. На этой основе создан источник излучения повышенной стабильности и спектральной яркости в ультрафиолетовом диапазоне. Устройство принципиально позволяет реализовать как непрерывный, так и импульсно-периодический режимы поддержания оптического разряда, расширяющие диапазон его параметров и область применения.

Разработанный источник излучения может применяться в спектральных оптических приборах и системах визуализации различного назначения.

## Благодарности

Авторы признательны ООО “Лантан Лазер” и персонально В.А. Лабусову, И.Г. Рудому и А.М. Сороке за интерес к работе и помощь при создании источников излучения на основе оптических разрядов.

## Литература

1. Райзер Ю.П. О возможности создания светового плазмотрона и необходимой для этого мощности // Письма в ЖЭТФ, 1970, Т. 11(3). С. 195–199.
2. Генералов Н.А., Зимаков В.П., Козлов Г.И., Масюков В.А., Райзер Ю.П. Непрерывно горящий оптический разряд // Письма в ЖЭТФ, 1970, Т. 11(9). С. 447–449.
3. Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов / М.: Наука, 1974. 307 с.
4. Герасименко М.В., Козлов Г.И., Кузнецов В.А. Лазерный плазмотрон // Квантовая электроника, 1983, Т. 10(4). С. 709–717.
5. Генералов Н.А., Захаров А.М., Косынкин В.Д., Якимов М.Ю. Устойчивость непрерывного оптического разряда в потоке атмосферного воздуха // Физика горения и взрыва, 1986, Т. 22(2). С. 91–94.
6. Суржиков С.Т. Физическая механика газовых разрядов / М.: МГТУ им. Баумана. 2006. 640 с.
7. Keefer D.R. Laser sustained plasmas // In Laser-induced plasmas and applications. Radziemski L.J., Cremers D.A., Eds. (NY: Marcel Dekker, 1989) Pp. 169–206.
8. Алексеева И.В., Будник А.П., Жеребцов В.А., Зродников А.В., Суржиков С.Т. Непрерывный оптический разряд в термоэмиссионном преобразователе энергии лазерного излучения в электрическую энергию // Письма в ЖТФ, 1999, Т. 25(7). С. 90–95.
9. Большаков А.П., Востриков В.Г., Дубровский В.Ю., Конов В.И., Косырев Ф.К., Наумов В.Г., Ральченко В.Г. Лазерный плазмотрон для бескамерного осаждения алмазных пленок // Квантовая электроника, 2005, Т. 35(4). С. 385–389.



10. Bagayev S.N., Grachev G.N., Ponomarenko A.G., Smirnov A.L., Demin V.N., Okotrub A.V., Baklanov A.M., Onischuk A.A. A new method of laser-plasma synthesis of nanomaterials. First results and prospects // Proc. SPIE, V. 6732, 2007. P. 673206. doi:10.1117/12.751881
11. Cross J.B., Cremers D.A. High kinetic energy (1–10 eV) laser sustained neutral atom beam source // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B, 1986, V. B13(1-3). P. 658-662. doi:10.1016/0168-583X(86)90586-0
12. Matsui M., Yoneda S., Komurasaki K., Yamagiwa Y., Arakawa Y. Atomic-oxygen-flow generation by laser-driven plasma wind tunnel as low-earth-orbit-environment simulator // AIAA Journal, 2014, V. 52(8), Pp. 1806–1810. doi:10.2514/1.J052991
13. Girard J.M., Lebehot A., Campargue R. Generating conditions of a laser-sustained argon plasma jet // J. Phys. D: Appl. Phys., 1993, V. 26(9). Pp. 1382–1393. doi:10.1088/0022-3727/26/9/007
14. Matsui M., Shinmi K., Komurasaki K., Arakawa Y. Enthalpy distributions of laser driven high enthalpy wind tunnel // AIAA Paper, Pp. 2008–4133. doi:10.2514/6.2008-4133
15. Мирабо Л., Райзер Ю.П., Суржиков С.Т. Лазерные волны горения в соплах Лаваля // ТВТ, 1995, Т. 33(1), С. 13–23.
16. Myrabo L.N., Raizer Yu.P. Laser-Induced Air Spike for Advanced Transatmospheric Vehicles // AIAA Paper, 1994, P. 94-2451. doi:10.2514/6.1994-2451
17. Туманов Ю.Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее / М.: Физматлит, 2003. 760 с.
18. Inoue T., Uehara S., Komurasaki K., Arakawa Y. Inductively coupled plasmas supported by laser plasmas for high enthalpy flow // AIAA Paper, 2005, P. 2005-950. doi:10.2514/6.2005-950
19. Smith D.K., et al. Laser Driven Light Source / US patent #7435982, 2008; #8309943, 2012.
20. Horne S., Smith D., Besen M., Partlow M., Stolyarov D., Zhu H., Holber W. A novel high-brightness, broadband light-source technology from the VUV to the IR // Proc. SPIE, V. 7680, 2010. P. 76800L. doi:10.1117/12.850269
21. Анциферов П.С., Кошелев К.Н., Кривцун В.М., Лаш А.А. Источник света с лазерной накачкой и способ генерации излучения / Приоритет 11.04.2013, патент RU2534223, 2013.
22. Arp U., Vest R., Houston J., Lucatoro T. Argon mini-arc meets its match: use of a laser-driven plasma source in ultraviolet-detector calibrations // Applied Optics, 2014. V. 53(6), Pp. 1089–1093. doi:10.1364/AO.53.001089
23. Kuznetsov V.A., Solovyov N.G., Shemyakin A.N., Shilov A.O., Yakimov M.Yu., Zimakov V.P. Bistable behavior of a continuous optical discharge as a laser beam propagation effect // Proc. SPIE, V. 8600, 2013. P. 860002. doi:10.1117/12.2003658
24. Зимаков В.П., Кузнецов В.А., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Шилов А.О., Якимов М.Ю. Взаимодействие лазерного излучения ближнего ИК-диапазона с плазмой непрерывного оптического разряда // Физика плазмы, 2016, Т. 42(1), С. 74–80. doi:10.7868/S0367292115110104
25. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Долгопрудный, МО: Интеллект, 2009. 736 с.
26. Рудой И.Г., Соловьев Н.Г., Сорока А.М., Шилов А.О., Якимов М.Ю. Поддержание плазмы в ксеноне импульсно-периодическим лазерным излучением // Физика плазмы, 2015, Т. 41(10), С. 929–932. doi:10.7868/S036729211510008X
27. Рудой И.Г., Соловьев Н.Г., Сорока А.М., Якимов М.Ю. Способ генерации широкополосного оптического излучения с высокой яркостью // Приоритет 18.08.2014, патент RU2571433, 2015.
28. Рудой И.Г., Соловьев Н.Г., Сорока А.М., Якимов М.Ю. Источник широкополосного оптического излучения с высокой яркостью // Приоритет 16.03.2015, патент RU157892, 2015.
29. Зимаков В.П., Кузнецов В.А., Рудой И.Г., Соловьев Н.Г., Сорока А.М., Шемякин А.Н., Шилов А.О., Якимов М.Ю. Импульсно-периодические и комбинированные режимы поддержания оптических разрядов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, Т. 16, вып. 2, 2015. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-2/articles/548/>

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2016 г.