

УДК:539.141;537.868

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРОВ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

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

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского, пр. Вернадского, 101, кор.1, Москва, Россия
E-mail: yakimov@lantanlaser.ru

Аннотация

В статье представлены недавние исследования непрерывного оптического разряда (НОР) выдержанного волокон Yb лазерам в редком газе высокого давления. Во-первых, было установлено, что порог мощности лазера для поддержания НОР в $\lambda \approx 1 \text{ мкм}$ лазерного излучения в высоком давлении Хе (десятки ватт) и Аг (сотен ватт) оказались значительно ниже, чем могли ожидать, близко или сравнима близко при $\lambda = 10.6 \text{ мкм}$ излучения CO₂-лазером. Эти результаты показали важное различие механизмов поглощения плазмы в средней и ближней к ИК диапазонах. Затем НОР при длине волны $\lambda \approx 1 \text{ мкм}$ оказалась стабильной в более широком диапазоне F-чисел (f/d) лазерного луча фокусирующей системы, что указывает на более низкое влияние лазерного луча преломления. Подробное исследование механизма преломления плазмы показало бистабильный эффект, не наблюдавшаяся в ранних экспериментах с НОР. Также представлены оригинальные результаты по НОР характеристики плазмы в высоком давлении аргона и ксенона, полученные из недавних экспериментов с волоконным лазером иттербия.

Ключевые слова: стационарная плазма, непрерывный оптический разряд, плотная плазма, ксенон, лазер, длина волны

Введение

Непрерывный оптический разряд (НОР), в котором плотная плазма поддерживается за счёт поглощения непрерывного лазерного излучения, в настоящее время является одним из нескольких способов (и, возможно, самым эффективным и удобным из них) получения стационарной плазмы с температурой 20-25 кК в лабораторных условиях при атмосферном давлении и выше. Явление НОР было теоретически предсказано и впервые получено в эксперименте в Институте проблем механики им. А. Ю. Ишлинского в 1969-1970 [1-2].

Обзор основных результатов теоретического и экспериментального изучения НОР, проводимого с тех пор, можно найти в [3-4]. По мере того, как с развитием непрерывных лазеров высокой мощности, главным образом CO₂-лазеров, возросли возможности получения НОР, экспериментальным путём были найдены основные характеристики НОР и условия его поддержания, развивались методы диагностики плазмы НОР, были созданы теоретические модели для вычисления условий поддержания и характеристик НОР в различных условиях. Однако, несмотря на успехи в изучении и понимании НОР, его производствен-

ное и технологическое применение до последнего времени было ограничено высокой стоимостью эксплуатации, а также относительно низким КПД CO₂-лазеров высокой мощности.

В настоящее время мы наблюдаем быстрый прогресс технологии твердотельных лазеров. Сочетание характеристик современных серийных мощных твердотельных лазеров [6] превосходит лучшие образцы газовых лазеров, в течение многих лет широко и успешно применявшихся в промышленности и научных исследованиях. Сейчас доступны непрерывные лазеры с выходной мощностью свыше 10 кВт, в том числе одномодовые лазеры большой яркости. Полный КПД волоконных лазеров высокой мощности может достигать 20% или даже 30%, а полупроводниковых лазерных модулей до 50%.

На данный момент, кроме нескольких первых публикаций авторов данной статьи, известны весьма немногочисленные сообщения о возможности поддержания НОР излучением лазеров на длине волны около 1 мкм [5, 16]. Тем не менее, с учетом сказанного выше эта возможность очень интересна с точки зрения расширения области реального технического применения НОР и возобновления интереса к его исследованиям.

В этой статье приводятся оригинальные результаты, полученные авторами в экспериментах по поддержанию НОР волоконными иттербиевыми лазерами в инертных газах при давлении от 3 до 25 бар.

Поддержание НОР в ксеноне с помощью волоконного Yb-лазера

Предварительные оценки мощности лазера, необходимой для поддержания НОР, были сделаны для ксенона при высоком давлении. Ксенон благодаря своей низкой теплопроводности и низкому потенциалу ионизации является оптимальным газом для поддержания НОР. Оценку минимальной мощности поддержания НОР можно дать, основываясь на упрощённом рассмотрении баланса энергии плазмы при лазерном нагреве [7]. Сфокусированный лазерный луч при $\lambda = 1,07$ мкм имеет диаметр от нескольких до нескольких десятков микрон в зависимости от параметров фокусирующей линзы и характеристик луча [6]. При мощности, близкой к пороговой, плазма локализуется в области фокуса, где ее размеры малы, и лучистые потери, пропорциональные её объёму, также малы. Поглощение лазерного излучения тоже мало просто из-за того, что малы размеры плазмы, так что выполняется приближение малого поглощения. Поэтому формула для пороговой мощности НОР может быть записана в теплопроводностном виде:

$$P_t = \frac{2\pi \times \Theta(T)}{\mu_l(T)} \tag{1}$$

где $\Theta(T)$ – потенциал потока тепла при некоторой характерной температуре плазмы T , определяемой потенциалом ионизации [7]. Величину $\Theta(T)$ можно найти, зная температурную зависимость коэффициента теплопроводности для равновесной ксеноновой плазмы, когда главную роль играет электронная составляющая теплопроводности [8]. Зависимость $\mu_l(T)$ можно оценить по формуле Унзольда-Краммерса [9], описывающей процессы поглощения в свободно-свободных и связанно-свободных электронных переходах, и не принимающей во внимание поглощения за счет связанно-связанных переходов.

Таким образом, можно найти, что в ксеноне на длине волны около 1 мкм в диапазоне давлений 10-20 бар оценка пороговой мощности варьируется от 300 до 500 Вт, уменьшаясь с ростом давления. Если обратиться к более подробным вычислениям μ_l для непрерывного спектра [10-12] при давлении 15 бар и длине волны 1,07 мкм, также получится около 500 Вт, что соответствует $\mu_l \approx 0,5 \text{ см}^{-1}$.

В эксперименте использовался волоконный иттербиевый лазер ЛС-1 [6], предоставленный НТО «ИРЭ-Полюс». Схема эксперимента показана на рисунке 1.

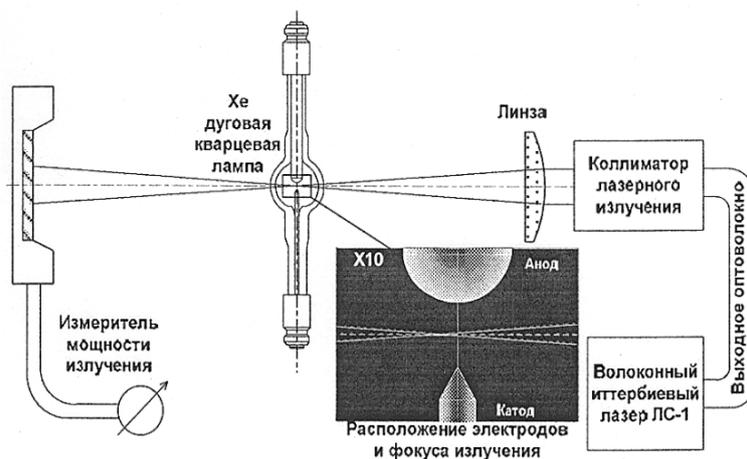


Рис. 1. Экспериментальная схема для поддержания НОР и измерения его характеристик.

Максимальная непрерывная мощность лазера 1 кВт в смешанной моде третьего порядка, центр полосы излучения $\lambda = 1,07$ мкм, ширина от 2 до 5 нм в зависимости от мощности. Параметр фокусировки луча $F=7$.

Стабильная плазма НОР зажигалась от электрической дуги и существовала неограниченное время после выключения дуги за счет поглощения части падающего на нее лазерного излучения, если мощность лазерного излуче-

ния превышала пороговое значение, оказавшееся равным 50 Вт, на порядок меньше вычисленного по формуле 1. При этом давление в лампе за счет ее нагрева изменялось в диапазоне 14-18 бар. Плазма находилась в сходящейся части сфокусированного лазерного луча, её задняя граница была расположена вблизи точки фокуса. Форма плазмы приблизительно соответствовала форме поверхности равной интенсивности поддерживающего её луча (см. рисунок 2).

Размеры плазмы были измерены по распределению яркости ее изображения, полученного в узкой спектральной области, не содержащей сильных линий. Доля мощности лазерного излучения, поглощённого плазмой, возрастала с увеличением мощности, стремясь к 30%. Коэффициент поглощения, определяемый по закону Ламберта-Бэра, составлял в среднем 3 см^{-1} , т.е. был на порядок выше вычисленного по формуле Унзольда-Крамерса.

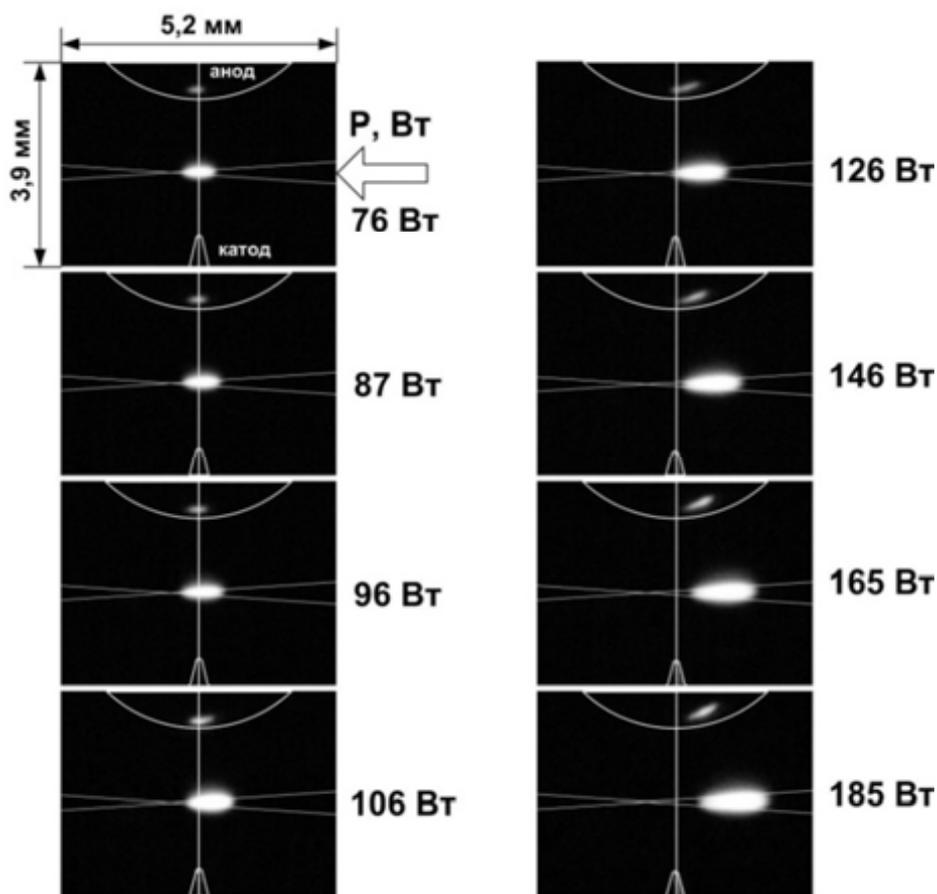


Рис. 2. Положение и размеры НОР в зависимости от мощности поддерживающего его излучения волоконного иттербиевого лазера. Линиями обозначены границы электродов лампы, лазерного луча, а также середина кадра.

Плотность рассеиваемой в плазме мощности лазерного излучения достигала 3 МВт/см^3 . Доля излучаемой плазмой мощности составляла 50-60% от поглощённой мощности лазера. Оставшаяся мощность выводилась из объема плазмы за счет теплопроводности и конвекции.

О механизмах высокого поглощения лазерного излучения в плазме

Долгое время – с тех пор, как НОР был впервые получен с CO_2 -лазером ($\lambda = 10.6 \text{ мкм}$) – считалось, что лазеры ближнего инфракрасного диапазона ($\lambda \approx 1 \text{ мкм}$) невозможно использовать для эффективного поддержания НОР из-за низких коэффициентов поглощения лазерного излучения, а значит – высоких пороговых мощностей [7, 9]. Этот тезис подтвер-

ждался экспериментальными данными, полученными для так называемых волн лазерного (или светового) горения, поддерживаемых излучением мощных неодимовых импульсных лазеров в воздухе при атмосферном давлении [15]. В этом случае связанно-связанные переходы не вносят вклада в поглощение лазерного излучения, и коэффициент поглощения на длине волны 1,06 мкм оказался в 200 раз меньше, чем при 10,6 мкм, что подтверждает прогноз, сделанный по формуле Унзольда-Краммера [9].

В случае ксенона под высоким давлением высокие коэффициенты поглощения невозможно объяснить только свободно-свободными и связанно-свободными переходами. Как видно из сравнения оценок пороговой мощности в предыдущем параграфе с экспериментальными данными, поглощение определяется главным образом внутриатомными связанно-связанными переходами между энергетическими уровнями верхних возбуждённых состояний ксенона 6s-6р. Спектральный диапазон лазера близок к спектральным переходам ксенона 1,053, 1,071, 1,076, 1,084 и 1,090 мкм. Единственный из этих переходов, попадающий в диапазон лазера ($\lambda = 1,071$ мкм), является одновременно и самым слабым. Сильные линии вблизи диапазона лазера ($\lambda = 1,053$ мкм и $\lambda = 1,090$ мкм) могут участвовать в поглощении за счёт своих крыльев [13]. Последнее предположение подтверждают наши наблюдения: спектр излучения лазера не изменяется после прохода через поглощающую плазму. По мере увеличения давления и температуры линии испускания и поглощения уширяются из-за столкновений и эффекта Штарка, так что с ростом давления участие линий в поглощении становится более заметным.

Пороговая мощность поддержания НОР

Более детальные исследования поддержания НОР при длине волны 1,07 мкм проводились с одномодовыми непрерывными волоконными иттербиевыми лазерами YLS-200-SM и YLR-150-1500-QCW, также предоставленными НТО «ИРЭ-Полус», с выходным лучом по свойствам близким к Гауссову пучку ($M^2 = 1.1$). Выходная мощность этих лазеров могла меняться от 0 до 250 Вт в непрерывном режиме и до 1500 Вт в режиме миллисекундных импульсов, что с точки зрения установления

теплового баланса плазмы НОР практически соответствует непрерывному режиму.

НОР исследовался либо внутри герметичного кварцевого корпуса стандартных дуговых ксеноновых ламп при давлениях от 10 до 24 бар, либо в колбе перезаполняемой дуговой лампы, заполнявшееся ксеноном или аргоном до определенного давления. Лазерное излучение фокусировалось внутри колбы при помощи оптических систем с различным параметром $F = f/d$, где f – эквивалентное фокусное расстояние, а d – эквивалентный диаметр луча. Значение F определяет угол раствора конуса, в котором находится 86% мощности сходящегося луча, $\alpha = \arctg(1/F)$, что является важной характеристикой, оказывающей сильное влияние на свойства НОР. В опытах использовался диапазон значений F от 3 до 15, так что можно считать, что $\alpha \approx 1/F$ с точностью не хуже 3%.

В первую очередь в экспериментах определялась зависимость пороговой мощности от давления газа p . В ходе отдельного эксперимента кварцевая колба нагревалась дуговым разрядом. Затем, после зажигания НОР, дуга выключалась, и пороговая мощность поддержания НОР достигалась либо уменьшением мощности лазера при почти постоянном давлении, либо постепенным уменьшением давления, например, за счёт охлаждения лампы, при постоянной мощности. После погасания НОР определялись мощность лазерного излучения и давление газа, при которых это произошло.

Результаты измерений пороговых значений мощности излучения для поддержания НОР в ксеноне, определенные в диапазоне давлений от 3 до 24 бар, интерполировались функцией

$$P_c^{Xe}(p) = \frac{7700}{p^2} + 7Вт$$

$$P_c^{Xe}(p) = \frac{7700}{p^2} + 7Вт \quad (2)$$

Аналогично для аргона в диапазоне $p = 5-16$ бар получено:

$$P_c^{Ar}(p) = \frac{26000}{p^2} + 240Вт.$$

$$P_c^{Ar}(p) = \frac{26000}{p^2} + 240Вт \quad (3)$$

В эксперименте с ксеноном стабильный НОР не существовал для $F = 15$ и $p > 16$ бар при горизонтальном положении оптической оси. При этом можно было наблюдать движение плазмы вдоль луча, периодически начинавшееся от инициировавшего ее дугового разряда. В этом случае при выключении дуги плазма гасла.

Видно, что реальная пороговая мощность в ксеноне при $\lambda = 1,07$ мкм оказалась более чем на порядок меньше приведённых выше теоретических оценок. Также при $p > 16$ бар пороговая мощность поддержания НОР излучением $\lambda = 1,07$ мкм оказалась меньше 37 Вт, т.е. меньше соответствующих значений для CO_2 -лазеров $\lambda = 10,6$ мкм [14]. Для НОР в аргоне пороговая мощность оказалась в 4-5 раз ниже теоретических оценок по формуле Унзольда-Крамерса (а коэффициент поглощения лазерного излучения примерно во столько же раз выше), но в изученном диапазоне давлений в 5-10 раз выше соответствующих значений для поддержания НОР излучением CO_2 -лазера [14]. Можно показать, что наблюдаемая разница теоретических и экспериментальных значений пороговой мощности и, соответственно, коэффициента поглощения лазерного излучения устраняется при учете поглощения в связанно-связанных электронных переходах систем уровней 4s-4p аргона и 6s-6p ксенона.

Форма и бистабильность плазмы

Форма плазмы, поддерживаемой гауссовым пучком, примерно соответствовала поверхности равной интенсивности в сфокусированном гауссовом пучке. Значение интенсивности лазерного излучения на условной поверхности НОР находилось в пределах 100-1000 кВт/см² и уменьшалось с ростом мощности лазера и размеров плазмы. При стабильных условиях размеры плазмы росли пропорционально мощности лазера, доля поглощаемой мощности лазерного излучения также постоянно возрастала, достигая значений 75-80%.

С увеличением давления или параметра фокусировки условия стабильности нарушаются. В экспериментах давление менялось из-за нагрева и охлаждения герметичного корпуса лампы.

Нестабильное или бистабильное поведение плазмы наблюдалось при повышенном давлении, когда мощность излучения была до-

статочно велика или колба лампы была предварительно сильно нагрета дуговым разрядом. Обычно наблюдались два характерных локально стабильных состояния плазмы – «длинная» плазма с высоким поглощением лазерного излучения, или «короткая» плазма с низким поглощением (рисунок 3). На рисунке 4 показаны обобщённые параметры плазмы НОР, зависящие от параметра фокусировки. При $F < 6$ и $F > 10$ мы наблюдаем состояния только «длинной» или только «короткой» плазмы соответственно. В области бистабильности (заштрихована) плазма может существовать в одном из двух состояний, переходя из одного в другое при изменении давления или температуры, или искусственно при небольшом, но резком изменении мощности лазера или перемещении точки фокуса.

Причиной бистабильности плазмы при определённых значениях параметра фокусировки может быть рефракция лазерного луча на градиентах коэффициента преломления, вызванных изменением плотности, как нейтрального газа, так и свободных электронов в плазме – эффект, подробно изученный для НОР, поддерживаемого излучением CO_2 -лазера с длиной волны 10,6 мкм [17-22].

Чтобы подтвердить вычисляемую теоретически [21, 22] зависимость преломления лазерного луча в определённых условиях, мы сравнили вычисленные значения диаметров преломлённого луча после «длинной» и «короткой» плазмы с их реальными значениями, измеренными экспериментально стандартным оборудованием для анализа пространственной структуры лазерного луча. На рисунке 5 показаны результаты таких вычислений для реальных случаев «длинной» и «короткой» плазмы, так что можно представить, как меняется радиус луча при распространении без плазмы (сплошная линия), с «короткой» плазмой (штрих-пунктир) и «длинной» плазмой (пунктир). Зоны, занятые плазмой (затенены), определены для расчета как области с параболическим профилем электронной составляющей показателя преломления. Передняя и задняя границы раздела областей горячего и холодного газа рассматривались как сферические поверхности, определяемые условиями баланса теплопроводности и конвекции, а их действие рассматривалось как действие сферической поверхности линзы.

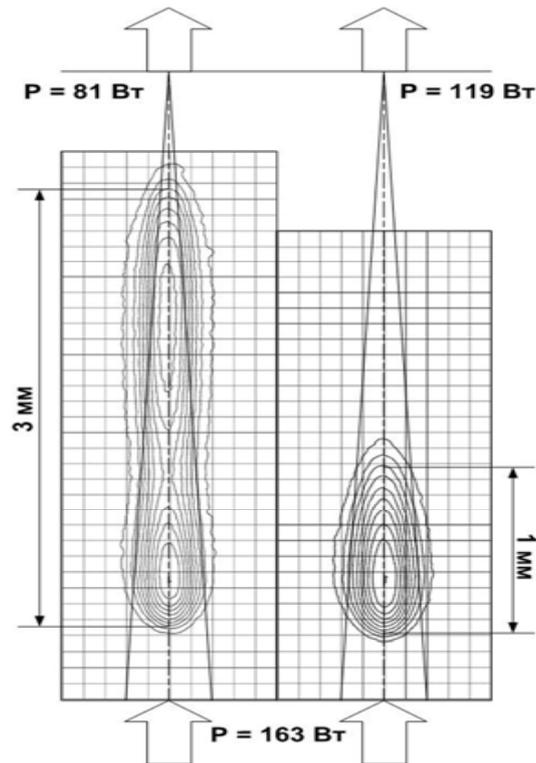


Рис. 3. «Длинная» и «короткая» плазма в ксеноне $p = 20$ бар, $F = 10$.
Представлены линиями равной яркости изображения плазмы.

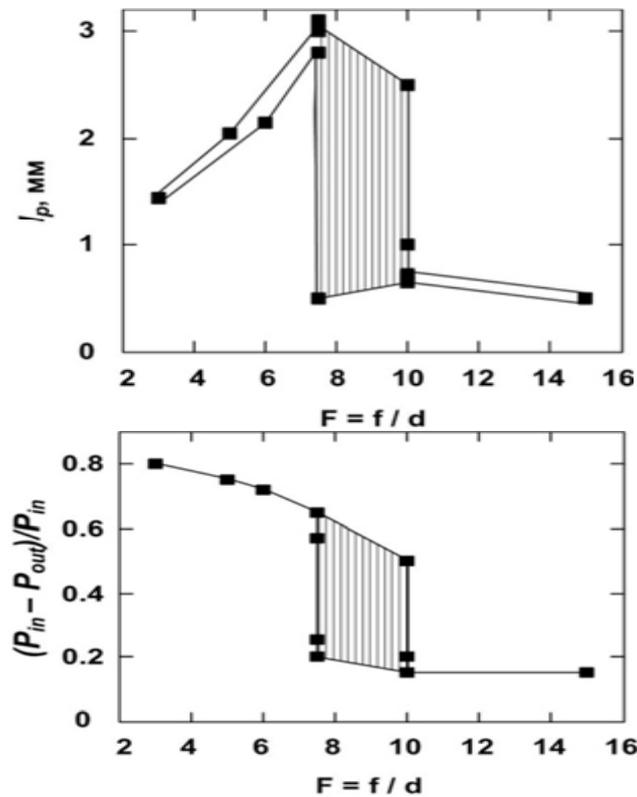


Рис. 4. Длина плазмы НОР l_p и доля поглощенной плазмой лазерной мощности $(P_{in} - P_{out})/P_{in}$ в зависимости от $F = f/d$ в ксеноне при давлении 18-20 бар, $P_{in} = 150$ Вт.

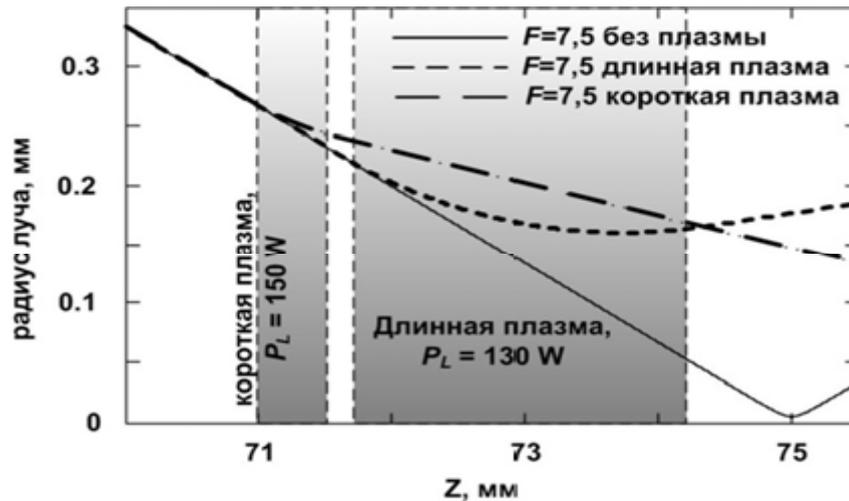


Рис. 5. Теоретическая модель преломления лазерного луча в «длинной» и «короткой» плазме. Показано изменение радиуса луча в зависимости от расстояния от линзы Z .

На рисунке 6 сравниваются вычисленные и измеренные значения радиусов лазерного луча, определенные по уровню $1/e^2$ от максимальной интенсивности, на различном расстоянии от фокусирующей линзы после прохождения плазмы. Измеренные профили луча за плазмой являются усредненными, однако можно видеть соответствие между ними и вычисленными значениями радиуса, прошедшего через среду, моделирующую плазму, гауссова пучка.

В ходе экспериментов обнаружилось, что бистабильное поведение плазмы НОР прояв-

ляется при $F > 7$. Основываясь на расчетной модели, можно показать, что при $F > 7$ появляется локальный минимум диаметра луча – либо внутри плазмы, либо близко к ее задней границе. Это может привести к нестабильности заднего фронта «длинной» плазмы с последующим переходом в «короткое» состояние. Почему после этого перехода «короткая» плазма может стабилизироваться и не перейти обратно в «длинное» состояние? На наш взгляд, причина может быть в рефракции на границе между холодным газом и горячим, окружающим ионизованную область разряда.

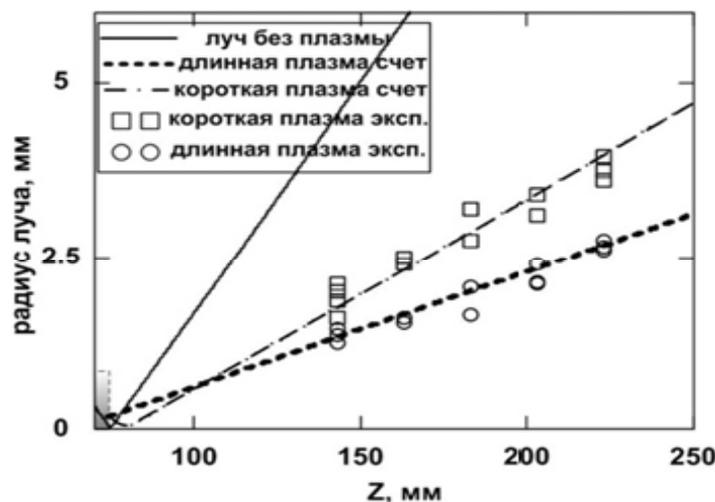


Рис. 6. То же, что и на рисунке 5, в сравнении с данными измерений диаметра преломленного лазерного луча на различных расстояниях от линзы после «длинной» и «короткой» плазмы.

Преломление на границе области горячего газа является доминирующим эффектом в случае «короткой» плазмы, как видно на рис. 5.

Радиус сферической области горячего газа в случае «короткой» плазмы мал, так что преломление максимально.

В то же время рефракция на свободных электронах в короткой плазме мала.

В случае «длинной» плазмы преломление на границе холодного и горячего газа незначительно по сравнению с рефракцией на плазме: радиус границы горячего газа у «длинной» плазмы пропорционально больше, чем у «короткой».

Эта причина представляется достаточной для того, чтобы состояние «короткой» плазмы было локально устойчивым.

Заключение

Появление в последние годы твердотельных лазеров ближнего нового поколения, и реализация с их помощью НОР имеет большое значение для дальнейших исследований и применений. В данной работе экспериментально обнаружены и изучены явления, характерные для поддержания НОР на длине волны 1,07 мкм.

Обнаружено, что пороговые мощности поддержания НОР излучением $\lambda = 1,07$ мкм в Хе и Аг при высоком давлении оказались сравнимыми с соответствующими величинами при $\lambda = 10,6$ мкм, что объясняется различием механизмов поглощения излучения ближнего и среднего ИК-диапазона в плазме.

Другой важный результат – стабильность НОР в широком диапазоне параметра фокусировки лазерного луча – объясняется особенностями рефракции излучения $\lambda = 1$ мкм в плазме НОР, которые при определенных условиях приводят к эффекту бистабильности НОР, ранее не наблюдавшемуся.

Работа поддержана грантом РФФИ 13-08-00141.

Литература

1. Райзер Ю.П. // Письма в ЖЭТФ, 1970, Т. 11, В. 3, С. 195.
2. Генералов Н.А., Зимаков В.П., Козлов Г.И., Масюков В.А., Райзер Ю.П. // Письма в ЖЭТФ, 1970, Т. 11, В. 9, С. 447.
3. Суржиков С.Т. Физическая механика газовых разрядов // МГТУ им. Баумана, Москва, 2006.
4. Keefer D.R. // Laser-induced plasmas and applications, Radziemski, L.J., Cremers, D.A., Eds. / Marcel Dekker, NY, P. 169, 1989.
5. US patent # 7,435,982 // Laser driven light source / Smith D.K., 2008.
6. Промышленные волоконные иттербиевые лазеры НТО «ИРЭ-Полус»/http://www.ntoirepolus.ru/products_powerful.htm
7. Райзер Ю. П. Лазерная искра и распространение разрядов // М.:Наука, 1974.
8. Flesch P. Light and light sources: High intensity discharge lamps / Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
9. Райзер Ю.П. Физика газового разряда /Долгопрудный, МО, изд. Интеллект, 2009.
10. Биберман Л.М., Норман Г.Э. // УФН, 1967, Т. 91, В. 2, С. 193.
11. Янков В.В. // Оптика и спектроскопия, 1963, Т. 14, №1, С. 29.
12. Gidalevich E., Goldsmith S., Boxman R.L // Plasma Sources Sci. Technol., 2004, V. 13, P. 454.
13. Klein L. // Applied Optics, 1968, V. 7, P. 677.
14. Генералов Н.А., Зимаков В.П., Козлов Г.И., Масюков В.А., Райзер Ю.П. // ЖЭТФ, 1971, Т. 61, В. 1, С. 1434.
15. Буфетов И.А., Прохоров А.М., Федоров В.Б., Фомин В.К. // Труды ИОФАН. Т. 10 / М.: Наука, 1988. С. 3.
16. Sperber D., Eckel H.-A., Steimer S., Fasloulas S., //Contrib. Plasma Phys. 2012, V. 52, P. 636.
17. Глова А.Ф., Лебедев Ф.В., Ярцев В.П. //Квантовая электроника, 1985, Т. 12, С. 2471.
18. Козлов Г.И., Кузнецов В.А. // Письма ЖТФ, 1994, Т. 20, С. 197.
19. Райзер Ю.П., Силантьев А.Ю., Суржиков С.Т. // ТВТ, 1987, Т. 25, №3, С. 454.
20. Будник А.П., Вакуловский А.С., Попов А.Г., Суржиков С. Т. // Математическое моделирование, 1996, Т. 8, С. 3.
21. Zimakov V.P., Kedrov A.Yu., Kuznetsov V.A., Shemyakin A.N., Solov'yov N.G., Yakimov M.Yu. // SPIE 7913-05, 2011.
22. Zimakov V.P., Kuznetsov V.A., Shemyakin A.N., Solov'yov N.G., Shilov A.O., Yakimov M.Yu. // SPIE 8600-02, 2013

NEW POSSIBILITIES FOR STATIONARY PLASMA GENERATION
BY MEANS OF NEAR-IR BAND LASERS

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

A.Yu. Ishlinskii Institute of Mechanical problems, Vernadsky av., 101, housing 1, Moscow, Russia
E-mail: yakimov@lantanlaser.ru**Abstract**

The paper represents recent studies of continuous optical discharge (COD) sustained in high pressure rare gases by fiber Yb lasers. First, it was found that threshold laser power for sustaining COD by $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$ laser radiation in high pressure Xe (tens watts) and Ar (hundreds watts) appeared to be considerably lower than could be expected, close or comparable to that for $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ radiation of CO₂ lasers. This result revealed the important difference of plasma absorption mechanisms in mid and near-IR bands. Then COD at $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$ was found to be stable in a wider range of F-numbers (f/d) of the laser beam focusing system, which indicates lower influence of laser beam refraction. Detailed investigation of the refraction mechanisms revealed plasma bistability effect, not previously observed in experiments with COD. Original results on COD plasma characteristics in high pressure argon and xenon obtained from recent experiments with ytterbium fiber lasers are also presented.

Keywords: stationary plasma, a continuous optical discharge, dense plasma, xenon, laser, wavelength

ЖАҚЫН ИҚ-ДИАПАЗОНЫНДАҒЫ СӘУЛЕЛЕР КӨМЕГІМЕН ТҰРАҚТЫ ПЛАЗМАДАҒЫ
ГЕНЕРАЦИЯНЫҢ ЖАҢА МҮМКІНДІГІ

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

А.Ю. Ишлинский атындағы Механика проблемалар институты,
Вернадский даңғылы, 101, тұрғын үй 1, Мәскеу, Россия
E-mail: yakimov@lantanlaser.ru**Аннотация**

Осы мақалада жоғары қысымды сирек газда Yb талшықтары лазермен ұсталған үздіксіз оптикалық разрядтағы (ҮОР) соңғы нәтижелер көрсетілген. Біріншіден ҮОР қолдау үшін $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$ жоғары қысымдағы Xe (ондаған ватт) және Ar (жүздеген ватт) лазерлі шығылу ойлағаннан аз болғаны, CO₂ лазерімен шағылу $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ кезінде жағын немесе салыстырмалы жақын екені анықталды. Бұл нәтижелер орташа және қысқа ИҚ диапазондарда плазма сіңу механизмдері маңызды әр түрлілігі көрсетілді. Содан кейін ҮОР $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$ кезінде F-саны (f/d) кең диапазонында тұрақты болып табылады. Плазманың сіңу механизмін толық зерттеу ҮОР алдыңғы тәжірибелерінде байқалмаған битұрақты эффект көрсетті. Талшықты лазерлі иттербиймен алынған нәтижелер аргон және ксенонның жоғарғы қысымды плазма сипаттамалары ҮОР бойынша нақты нәтижелер көрсетілген.

Түйінді сөздер: стационарлық плазма, үздіксіз оптикалық разряд, тығыз плазма, ксенон, лазерлік, толқын ұзындығы