

Periodic-Pulsed and Combined Modes of Sustaining Optical Discharges

V.P. Zimakov, V.A. Kuznetsov, I.G. Rudoy, N.G. Solov'ev,
A.M. Soroka, A.N. Shemyakin, A.O. Shilov, M.Yu. Yakimov

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

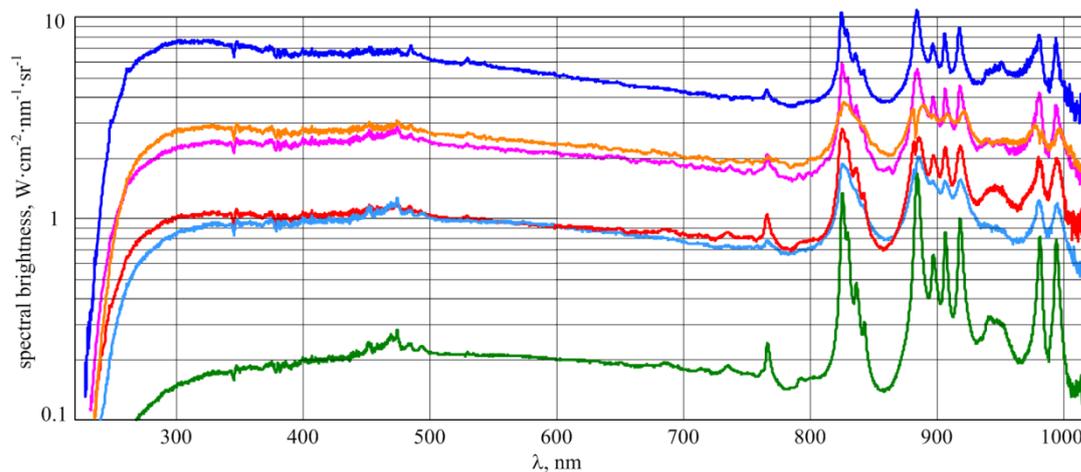
Abstract

Periodic-pulsed optical discharges (POD) sustained by near-IR laser radiation ($\lambda = 0.96 \div 1.07 \mu\text{m}$) in high-pressure xenon have been obtained and studied. In the beginning of the laser pulse POD plasma has higher temperature and brightness than the continuous optical discharge (COD) plasma. At the end of a long enough pulse POD plasma reaches the conditions close to COD. By the termination of the laser pulse the charged particles recombine, but due to xenon atoms in excited states retained in the gas during $\sim 200 \mu\text{s}$ plasma initiation in the next pulse is observed to occur without optical breakdown.

In the combined optical discharge mode focused beams of CW or periodic-pulsed lasers intersect in the region optimal for sustaining optical discharge. Such a scheme provides more stabilized plasma with absorption and brightness several times higher compared to those of a single beam of the adequate power. In this paper combined optical discharges sustained by two CW or periodic-pulsed diode lasers ($\lambda = 0.97 \div 0.98 \mu\text{m}$) are studied.

The periodic-pulsed and combined optical discharge modes can find an application in high-brightness broadband radiation sources.

Key words: laser plasma, COD, POD, combined optical discharge, spectral brightness.



COD & POD, double beam:

— COD/ $P_1=27\text{W}$ & POD/ $f_r=10\text{kHz}/\tau=22\mu\text{s}/P_2=63\text{W}$

— Double beam COD/ $P_1=26\text{W}/P_2=37\text{W}$

Arc discharge:

— Arc discharge, Xe, 75W

COD & POD, single beam:

— POD/ $f_r=14\text{kHz}/\tau=42\mu\text{s}/P_2=63\text{W}$

— COD/ $\lambda=974\text{nm}/P=56\text{W}$

— COD/ $\lambda=978\text{nm}/P=26\text{W}$

Spectral brightness of the combined optical discharges COD&POD in crossing double beam (two upper curves) compared to a single beam COD and POD, as well as DC arc discharge in Xe, $p = 20 \div 25$ bar and more under the arc discharge. Spectral characteristics show substantial drop under $\lambda \leq 250$ nm mainly due to the quartz bulb walls material characteristics.

Импульсно-периодические и комбинированные режимы поддержания оптических разрядов

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

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
yakimov@lantanlaser.ru*

Аннотация

В ксеноне при высоком давлении получены и исследованы импульсно-периодические оптические разряды (ИПОР), поддерживаемые лазерным излучением $\lambda = 0.96 \div 1.07$ мкм. В начале импульса по температуре и яркости плазма ИПОР превосходит плазму непрерывного оптического разряда (НОР). К концу достаточно длинного импульса плазма достигает состояния, близкого к НОР. По окончании импульса заряженные частицы рекомбинируют, но благодаря сохраняющимся на протяжении ~ 200 мкс возбужденным состояниям атома ксенона наблюдается инициирование плазмы в очередном импульсе без оптического пробоя.

При комбинированном режиме оптического разряда сфокусированные лучи непрерывных или импульсно-периодических лазеров пересекаются под углом в области, оптимальной для поддержания плазмы. Такая схема дает более устойчивую плазму с повышенным в несколько раз поглощением и яркостью по сравнению с одиночным лучом. В данной работе исследуются комбинированные оптические разряды, поддерживаемые излучением двух непрерывных или импульсно-периодических диодных лазеров с $\lambda = 0.97 \div 0.98$ мкм. Импульсно-периодические и комбинированные режимы оптических разрядов могут найти применение в широкополосных источниках излучения высокой спектральной яркости.

Ключевые слова: НОР, ИПОР, комбинированный разряд, спектральная яркость.

1. Введение

Непрерывный оптический разряд (НОР) [1], впервые полученный в 1970 году [2, 3], к настоящему времени нашел применение как источник излучения равномерно высокой спектральной яркости в широком диапазоне длин волн от вакуумного ультрафиолета до инфракрасного [4]. Это применение стало возможным в первую очередь благодаря появлению мощных лазеров ближнего ИК-диапазона с высокими потребительскими характеристиками, в частности, диодных (полупроводниковых) и волоконных лазеров. Также была обнаружена [4, 5] возможность эффективного использования этих лазеров для поддержания НОР в ксеноне высокого давления с пороговой мощностью на уровне нескольких десятков ватт. Следует подчеркнуть, что резкое снижение порога поддержания НОР в ближнем ИК-диапазоне установлено пока только для тяжелых инертных газов при высоком давлении [6]. В ранних экспериментах по поддержанию волн светового горения (нестационарный аналог НОР), проведенных с миллисекундными неодимовыми лазерами с большой энергией в импульсе, было установлено, что пороговая мощность лазерного излучения $\lambda = 1.06$ мкм для поддержания плазмы в аргоне и воздухе при атмосферном давлении составляет сотни киловатт, что примерно на два порядка больше соответствующих величин для случая CO_2 -лазера с $\lambda = 1.06$ мкм [7, 8]. Примерно такое же соотношение пороговых величин для поддержания НОР излучением 1 мкм и 10 мкм вытекает из рассмотрения механизмов поглощения лазерного излучения в плазме в непрерывном спектре. Вклад механизма фотоионизации, который на длине

волны 1 мкм примерно вдвое превышает вклад обратного тормозного поглощения, принципиально не меняет ситуацию. Однако в плазме при повышенном давлении в диапазоне $p = 1 \div 10$ МПа уширение тесно расположенных высоковозбужденных энергетических уровней атомов типа ксенона может приводить к сильному дополнительному росту коэффициента поглощения на длине волны $\lambda \approx 1$ мкм за счет внутриаомных связанно-связанных переходов. Ширина сильных спектральных линий атома ксенона в плазме с температурой $T > 10$ кК при давлении $p \approx 2$ МПа увеличивается до нескольких нанометров, что соответствует ширине полосы генерации мощных диодных и волоконных лазеров. При достаточно широких линиях поглощения можно настроить, например, диодный лазер на сильную линию поглощения, что даст снижение пороговой мощности поддержания НОР до нескольких ватт, то есть меньше, чем обеспечивает CO_2 -лазер в тех же условиях за счет преимущественно обратного тормозного поглощения. Даже когда полоса излучения лазера не совпадает ни с одной из спектральных линий, если давление достаточно велико, а спектральные линии расположены достаточно часто, в диапазоне $\lambda \approx 1$ мкм определяющий вклад в поглощение будут вносить перекрывающиеся крылья ближайших уширенных линий [9].

Интересно, что даже в условиях преобладания поглощения лазерного излучения за счет механизмов внутриаомных переходов, не требующих нагрева плазмы до температуры полной ионизации, принципиально достижимая спектральная яркость плазмы НОР с лазером $\lambda \approx 1$ мкм оказывается выше, чем в случае НОР на $\lambda = 10.6$ мкм, за счет меньшего влияния рефракции и лучшего проникновения излучения $\lambda \approx 1$ мкм в плазму при высоком давлении.

Поглощение и преломление, или рефракция лазерного излучения оказывают на свойства плазмы НОР определяющее влияние. Рефракция возникает за счет градиентов плотности нейтрального газа и свободных электронов, причем на длине волны $\lambda \approx 1$ мкм оба фактора вносят сравнимый по величине вклад в результирующую рефракцию [6, 9]. Так при слабой фокусировке лазерного излучения с параметром $F = f/d \geq 8 \div 10$ на длине волны Yb^{3+} -лазера $\lambda = 1.07$ мкм влияние рефракции приводит к тому, что с ростом мощности лазерного излучения увеличиваются размеры НОР, а яркость плазмы не увеличивается или даже снижается [9].

Усиление фокусировки частично компенсирует влияние рефракции. Как показывают эксперименты, фокусировка может считаться сильной при $F \leq 3 \div 4$, а в некоторых случаях $F < 2$, в зависимости от длины волны лазерного излучения, температуры и давления газа – т.е. параметров, определяющих рефракцию. При сильной фокусировке плазма становится менее вытянутой вдоль оптической оси и располагается ближе к точке фокуса, где интенсивность лазерного излучения максимальна. В этих условиях яркость плазмы растет с ростом мощности лазерного излучения, но при этом увеличивается и размер плазмы, плазма смещается в область меньшей интенсивности лазерного излучения, вследствие чего рост яркости плазмы замедляется. Оставаться в области высокой интенсивности излучения плазме мешает главным образом рефракция, приводящая к расширению лазерного луча внутри плазмы и соответствующему снижению интенсивности ее нагрева.

В экспериментах по поддержанию НОР [9] излучением непрерывного Yb^{3+} -лазера максимальную спектральную яркость плазмы на уровне $I_p = 3 \div 4$ Вт·см⁻²·нм⁻¹·ср⁻¹ в спектральном диапазоне 300 ÷ 350 нм удалось получить в ксеноне при давлении $p \approx 22$ бар и параметре фокусировки $F = 3.3$. Расчет показал, что характеристики плазмы в среднем соответствуют условиям ЛТР при температуре $T \approx 15$ кК, плотности электронов $N_e \approx 4 \times 10^{18}$ см⁻³ и оптической толщине слоя излучающей плазмы $S_p \approx 0.2 \div 0.4$ мм.

Новые возможности контроля и повышения характеристик плазмы оптического разряда авторы данной статьи связывают с обнаруженной ими возможностью импульсно-периодического поддержания плазмы оптического разряда (ИПОР) при интенсивности лазерного излучения, характерной для НОР [10, 11], а также с технологией комбинированных режимов поддержания НОР/ИПОР в пересекающихся лучах двух или более лазеров [12].

2. Импульсно-периодический режим оптического разряда (ИПОР)

2.1. Условия поддержания ИПОР

В экспериментах по поддержанию импульсно-периодического разряда использовался волоконный иттербиевый лазер YLR-150/1500-QCW [13] (IPG Photonics Corp.) с максимальной мощностью излучения в непрерывном режиме $P = 260$ Вт на длине волны $\lambda = 1.07$ мкм. Ширина полосы генерации $\Delta\lambda = 2 \div 5$ нм в зависимости от мощности излучения. В импульсном режиме генерации средняя по времени мощность излучения не превышала $P_p = 160$ Вт, длительность импульса не менее $\tau = 200$ мкс, частота следования импульсов не более $f_r = 2.7$ кГц. Режим ИПОР наблюдался при частотах повторения импульсов в диапазоне $f_r = 2 \div 2.7$ кГц, при этом диапазон регулировки импульсной мощности и длительности импульсов оказывался очень узким – от 200 до 330 Вт при практически неизменной длительности импульсов около 200 мкс. Луч на выходе коллиматора лазера был диаметром $d = 9$ мм с расходимостью, характеризующейся $BPP = 1.2$ мм·мрад, $M^2 = 3.5$. Излучение фокусировалось кварцевой линзой с фокусным расстоянием $f = 50$ мм с параметром $F = f/d = 5.6$. При такой фокусировке диаметр луча в перетяжке составлял $25 \div 30$ мкм, а плотность мощности в фокусе при мощности излучения $P = 265$ Вт, соответственно, $I \approx 5 \times 10^7$ Вт/см².

На рис. 1 показано взаимное расположение колбы с ксеноном, плазмы и лазерного луча. Эксперименты проводились в лампах, наполненных ксеноном до давления соответственно 8 бар и 14 бар при температуре 20⁰С. Плазма в лазерном луче инициировалась кратковременным дуговым разрядом между вспомогательными электродами. Газ в колбе нагревался под действием дугового разряда, лазерного излучения и плазмы, при этом давление газа могло возрасти до 13 бар и 20 бар соответственно давлению наполнения.

На рис. 2 показаны типичные осциллограммы импульсно-периодического лазерного излучения на входе и выходе плазмы, а также осциллограмма интегрального излучения плазмы, характеризующая время формирования плазмы после инициирования в каждом импульсе, а также время распада плазмы после окончания импульса. Процесс формирования плазмы, как и процесс ее распада, в основном завершался за время менее 100 мкс.

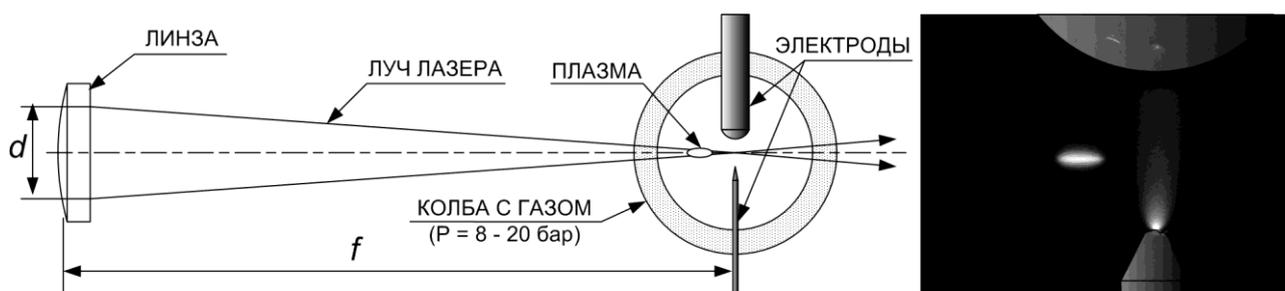


Рис. 1. Схема ИПОР: взаимное расположение плазмы, разрядной камеры, инициирующих электродов и лазерного луча. Справа – инициирование ИПОР от плазмы дугового разряда.

На рис. 3 проведено сравнение усредненных по времени распределений яркости изображения плазмы НОР и ИПОР в сходных условиях по средней и импульсной мощности. Изображения внешне сходны, различия сводятся к тому, что плазма НОР представляет собой установившийся по времени процесс, а ИПОР – усредненный по времени процесс распространения плазмы в канале луча, повторяющийся в каждом импульсе. Прямыми линиями показана условная граница лазерного луча в области фокуса в отсутствие плазмы.

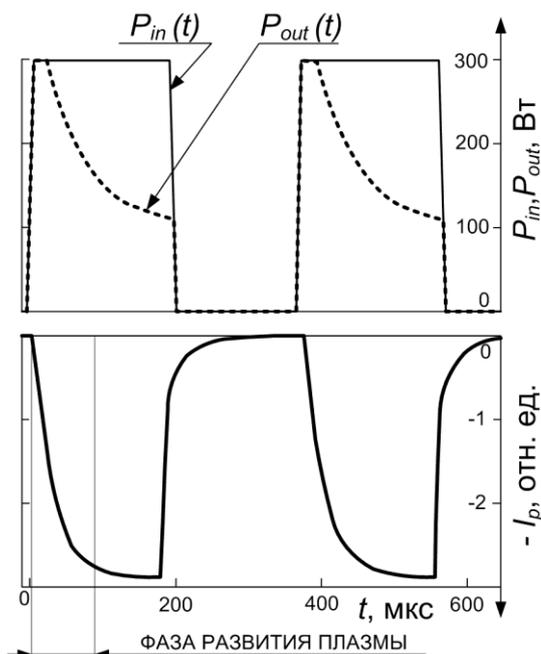


Рис. 2. Типичный вид осциллограмм падающего P_{in} и прошедшего через плазму P_{out} лазерного излучения, а также теплового излучения плазмы I_p ИПОР (сигнал ФЭУ - обратной полярности).

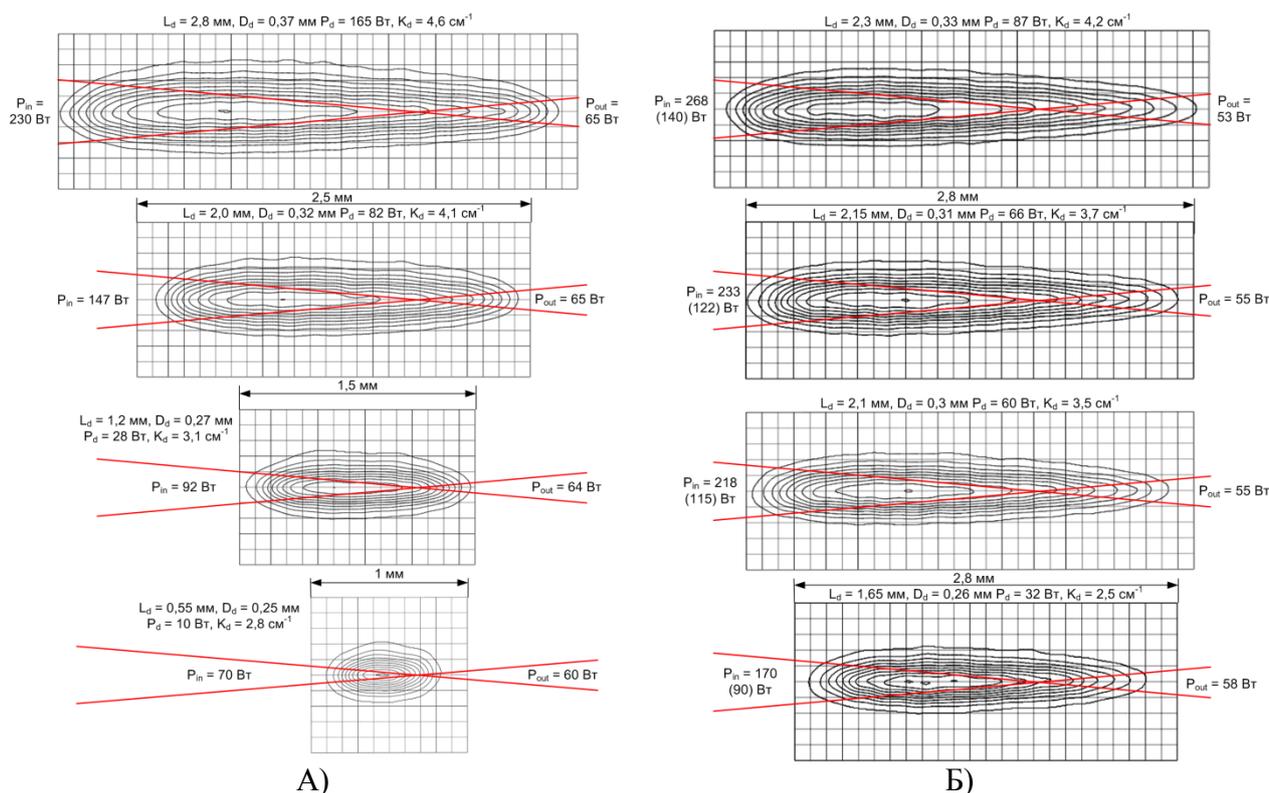


Рис. 3. Средние по времени распределения яркости плазмы НОР (А) и ИПОР(Б). Указана непрерывная, импульсная и средняя по времени (в скобках) падающая на плазму мощность лазерного излучения P_{in} и проходящая мощность P_{out} , средняя длина плазмы L_p и диаметр D_p . Ксенон, $p = 11 \div 14$ бар, параметр фокусировки $F = 5.6$, частота повторения $f_r = 2.7$ кГц, $P_{in} = 70 \div 268$ Вт.

На рис. 4. в условных цветах показано изменение яркости плазмы в процессе одного полного цикла ИПОР. Кадры получены в процессе скоростной съемки с интервалом 25 мкс. Частота следования импульсов составляла $f_r = 2.7$ кГц, длительность импульса излучения $\tau = 200$ мкс, мощность лазерного излучения, падающего на плазму, $P_{in} = 265$ Вт в импульсе.

Размер кадра $3.5 \times 3.5 \text{ мм}^2$, точка фокуса расположена на расстоянии 1.2 мм от левого края кадра, излучение падает справа налево, расположение кадра относительно вертикального направления нормальное. Видно, что в течение $\sim 100 \text{ мкс}$ с момента инициирования плазма увеличивается в размерах и яркости, затем стабилизируется и на отметке 200 мкс начинает гаснуть. При этом за время 50 мкс яркость плазмы уменьшается более чем в 20 раз, что соответствует постоянной времени погасания от 10 до 20 мкс.

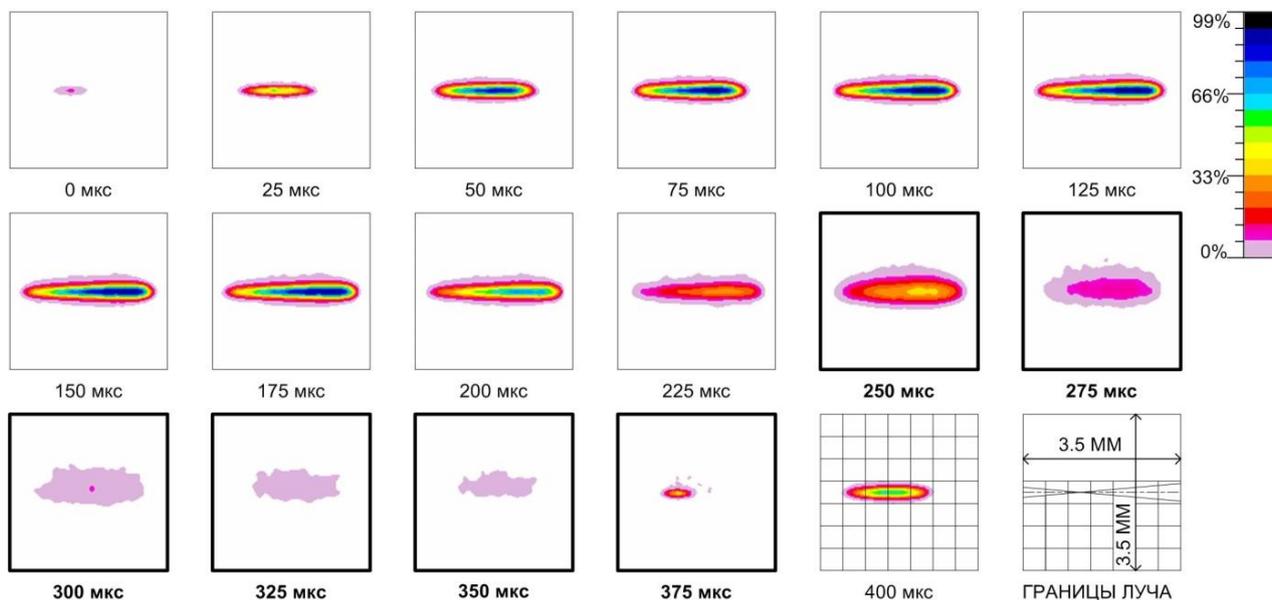


Рис. 4. Покадровая съемка одного цикла ИПОР с шагом 25 мкс. Относительная яркость излучения плазмы представлена в условных цветах. Размер кадра $3.5 \times 3.5 \text{ мм}^2$. Лазерное излучение включено от 10 до 210 мкс ($\tau = 200 \text{ мкс}$), выключено от 210 до 370 мкс. Выдержка при съемке кадров от 250 мкс до 375 мкс (обведены утолщенной линией) увеличена в 8 раз. Ксенон, $p = 11 \pm 1 \text{ бар}$, параметр фокусировки $F = 5.6$, частота повторения импульсов $f_r = 2.7 \text{ кГц}$, мощность излучения $P_{in} = 265 \text{ Вт}$.

Тем не менее, к началу следующего импульса лазерного излучения остается достаточно активных атомов, чтобы инициировать плазму при интенсивности излучения на уровне $I \approx 5 \times 10^7 \text{ Вт/см}^2$, что на два порядка меньше пробойного. Скорее всего, сильное нелинейное поглощение развивается в результате быстрого нагрева газа за счет поглощения лазерного излучения с квантом $h\nu = 1.16 \text{ эВ}$ ($\lambda = 1.07 \text{ мкм}$), оставшимися от предыдущего импульса возбужденными атомами ксенона в метастабильных состояниях $5p^5 6s$ и $5p^5 6s'$, а также в резонансных состояниях, релаксация которых при высоком давлении затруднена вследствие пленения резонансного излучения. Как было показано ранее, за поглощение лазерного излучения как в начальной, так и в развитой фазе разряда в основном отвечают электронные переходы между связанными состояниями атома ксенона $5p^5 6s$ и $5p^5 6p$. Быстрому разогреву газа способствует также высокая скорость релаксации $6p$ -состояний в $6s$ при столкновениях с нейтральными атомами ксенона. Этот процесс, проходящий при плотности атомов $N_a > 10^{19} \text{ см}^{-3}$ за $t < 10 \text{ нс}$, обеспечивает быстрый перевод энергии электронного возбуждения в тепло и одновременно препятствует насыщению поглощения, а также переизлучению энергии, идущей на нагрев.

2.2. Характеристики плазмы ИПОР

Для определения импульсной яркости использовалась оптическая система, создававшая увеличенное в 40 раз изображение плазмы ИПОР. На изображении находилась точка максимальной яркости, в которую помещалась входная апертура световода диаметром 0.45 мм. Для снятия осциллограммы интегральной освещенности выход оптоволокну подключался к

ФЭУ с широкой полосой чувствительности фотокатода, а для снятия интегрального по времени спектра – к обзорному ПЗС–спектрометру.

Спектрометр имел диапазон $200 \div 1100$ нм, среднее разрешение по длинам волн 0.25 нм и предварительно калибровался по абсолютной величине яркости источника с использованием стандартных эталонов яркости – дейтериевой лампы в УФ-диапазоне и ленточной вольфрамовой лампы в видимом и ИК-диапазонах. Полученный усредненный по времени спектр умножался на скважность, определяемую из осциллограммы импульса, чтобы получить импульсную спектральную яркость ИПОР. При этом игнорировалась зависимость скважности от длины волны. В действительности скважность импульсов растет с уменьшением длины волны, поскольку излучение более энергичных квантов спадает быстрее, но полное время спада излучения по окончании лазерного импульса относительно невелико, и возможное изменение скважности с длиной волны составляет по оценкам не более $10 \div 15$ %.

На рис. 5. показано сравнение спектральной яркости НОР и ИПОР, полученных при разном давлении ксенона.

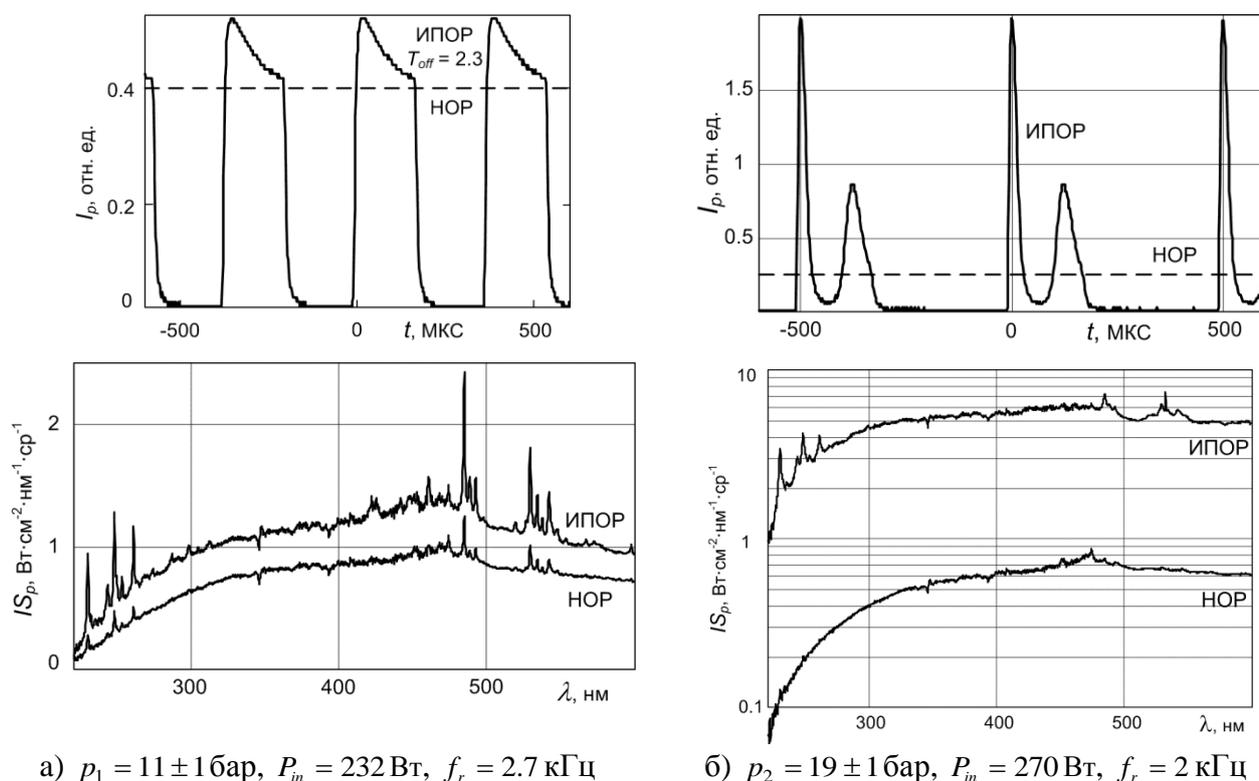


Рис. 5. Осциллограммы излучения и спектральная яркость ИПОР в сравнении с НОР, полученные в ксеноне при давлении $p_1 = 11 \pm 1$ бар (а) и $p_2 = 19 \pm 1$ бар (б). Параметр фокусировки $F = f/d = 8$. Указана импульсная мощность излучения и частота повторения. В непрерывном режиме $P_{in} = 232$ Вт.

Помимо того, что на развитие плазмы в ИПОР при $p_2 = 18\text{--}20$ бар значительное влияние оказывает рефракция лазерного излучения, что сказывается на форме импульса света в процессе формирования плазмы – процесс формирования происходит с выраженными колебаниями – импульсная яркость плазмы ИПОР при давлении p_2 почти на порядок превосходит яркость плазмы НОР, в то время как при $p_1 = 10\text{--}12$ бар яркость плазмы ИПОР превосходит яркость НОР не намного. Причина такого различия в яркости НОР и ИПОР при повышенном давлении также, очевидно, заключается в роли рефракции, уменьшающей яркость установившейся плазмы НОР. На начальном этапе формирования плазмы ИПОР она находится в области высокой интенсивности лазерного луча, когда влияние рефракции практически отсутствует. На высокую температуру движущейся плазмы ИПОР указывают резко усилившиеся по сравнению с НОР спектральные линии ионов ксенона в области 220–270 нм, 480 нм и 540 нм, как можно видеть на рис. 5.

2.3. Динамика распространения фронтов ИПОР

Передвигая приемную апертуру оптоволоконна вдоль оси изображения плазмы, с помощью ФЭУ и осциллографа, синхронизованного с лазерными импульсами, изучали распространение плазменных фронтов по лазерному лучу. На рис. 6 представлен график времени задержки прихода плазменного фронта относительно начала лазерного импульса в зависимости от координаты плазменного фронта вдоль оптической оси z в виде параметра подобия $\sqrt{\tau \times F}$, где τ – время, прошедшее от начала лазерного импульса. Точка на оптической оси, соответствующая минимальной задержке, отвечает точке фокуса лазерного излучения в отсутствие плазмы.

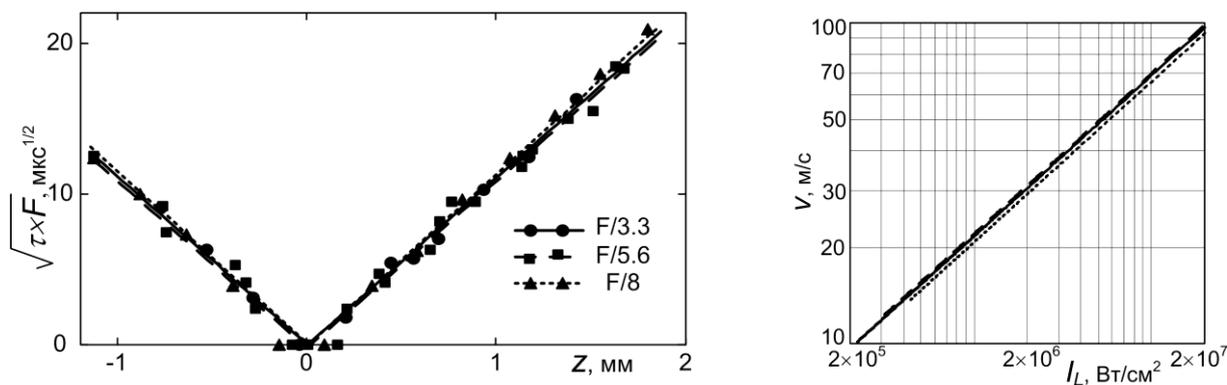


Рис. 6. Распространение плазменных фронтов в ИПОР в ксеноне при $p = 11 \pm 1$ бар, $P = 270$ Вт и различных $F = 3.3 \div 8$. Представлена зависимость параметра подобия $\sqrt{\tau \times F}$, где τ – время, прошедшее от начала лазерного импульса, от координаты плазменного фронта вдоль оптической оси z . Справа – скорость распространения плазменного фронта v в зависимости от средней интенсивности лазерного излучения I_L , полученная из приведенных данных.

Плазма распространяется в обе стороны от фокуса примерно с одинаковой скоростью, пока плазменный фронт с затененной стороны не останавливается. По данным рис. 6 можно определить, что за время от 1 до 100 мкс скорость распространения плазменного фронта убывает пропорционально $\sqrt{I_L}$ (I_L – интенсивность лазерного излучения в сходящемся лазерном луче), уменьшаясь от первоначального значения около 100 м/с до 10 м/с. Наблюдаемые скорости распространения отвечают теплопроводностному механизму с учетом газодинамических эффектов обтекания горячих областей плазмы холодным газом.

Распространение плазмы при повышенном давлении носит более сложный характер (рис. 7). При больших F в более плотной плазме проявляются эффекты рефракции, приводящие, в частности, к пульсациям яркости в процессе установления стационарной плазмы после быстрого включения луча. В импульсно-периодическом режиме это приводит к тому, что в лазерном луче распространяются друг за другом два плазменных фронта, которые при переходе к непрерывному режиму сливаются, и в результате образуется структурированная плазма с двумя или более максимумами температуры и яркости. По мере компенсации влияния рефракции при уменьшении F плазменные фронты сливаются.

Например, при уменьшении F до 3.3 при давлении $p_2 = 18 \div 20$ бар на рис. 7 можно видеть, что форма изменения яркости на плазменном фронте становится подобной случаю $F = 8$ при $p_1 = 10 \div 12$ бар (рис. 5). При дальнейшем уменьшении F до $2.5 \div 3$ они становятся совершенно подобны, несмотря на существенные различия давления и параметра фокусировки. Можно утверждать, что с точки зрения рефракции двукратное увеличение давления может быть компенсировано четырехкратным уменьшением параметра фокусировки, т.е. имеет место подобие с критерием $p\sqrt{F}$.

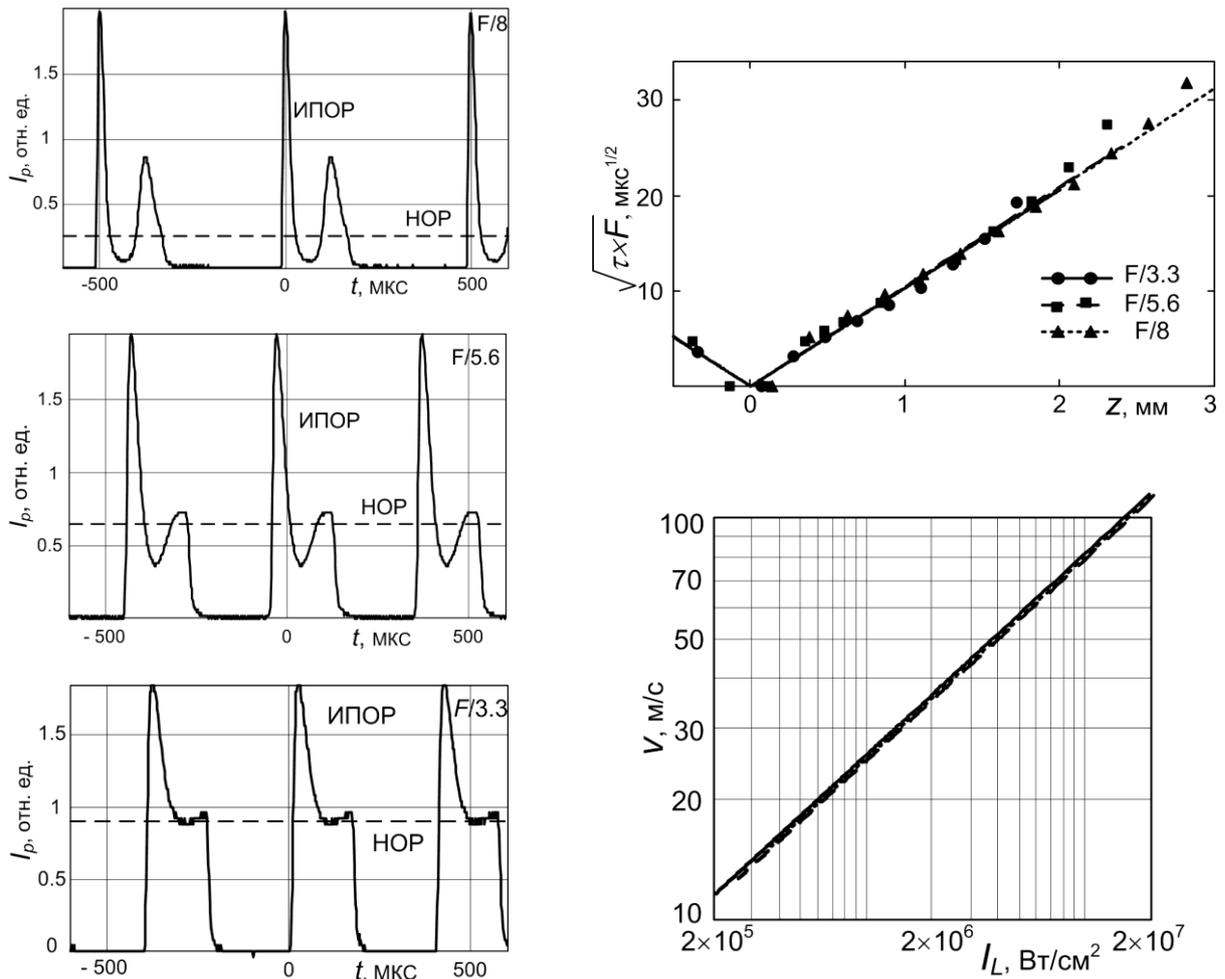


Рис. 7. Динамика плазменных фронтов в ИПОР в ксеноне при $p = 19 \pm 1$ бар и различных параметрах фокусировки $F = 3.3 \div 8$. Представлены осциллограммы излучения плазмы в точке максимальной яркости (слева), а также (справа) зависимости, аналогичные рис. 6, при $p = 19 \pm 1$ бар, $P_m = 265$ Вт.

Соответственно, при повышенном давлении $p_2 = 18 \div 20$ бар различие спектральной яркости между НОР и ИПОР уменьшается с уменьшением F , то есть по мере компенсации эффектов рефракции (рис. 8). В основном это происходит в результате сильной зависимости яркости НОР от F . Яркость ИПОР по мере компенсации рефракции с уменьшением F почти не растет, и это понятно, поскольку в импульсном режиме распространения влияние рефракции на яркость первого плазменного фронта несущественно. При $F = 3.3$ и $p_2 = 18 \div 20$ бар была достигнута максимальная спектральная яркость ИПОР на уровне $7 \div 8 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ в области $450 \div 500$ нм, что практически вдвое выше максимальной яркости НОР в тех же условиях и соответственно выше максимальной яркости серийно выпускаемых фирмой Energetiq Technologies [4, 5] источников света на основе НОР. Здесь следует оговориться, что серийные источники с данными экспериментами сравнивать нужно с оговорками, поскольку в серийных источниках используются лазеры с длиной волны $0.970 \div 0.975$ мкм, а также другие системы фокусировки, другое давление ксенона, так что там другие условия поглощения и рефракции лазерного излучения, и соответственно возможен другой результат. Но физические явления, сопровождающие поддержание плазмы и определяющие ее характеристики, в обоих случаях аналогичны.

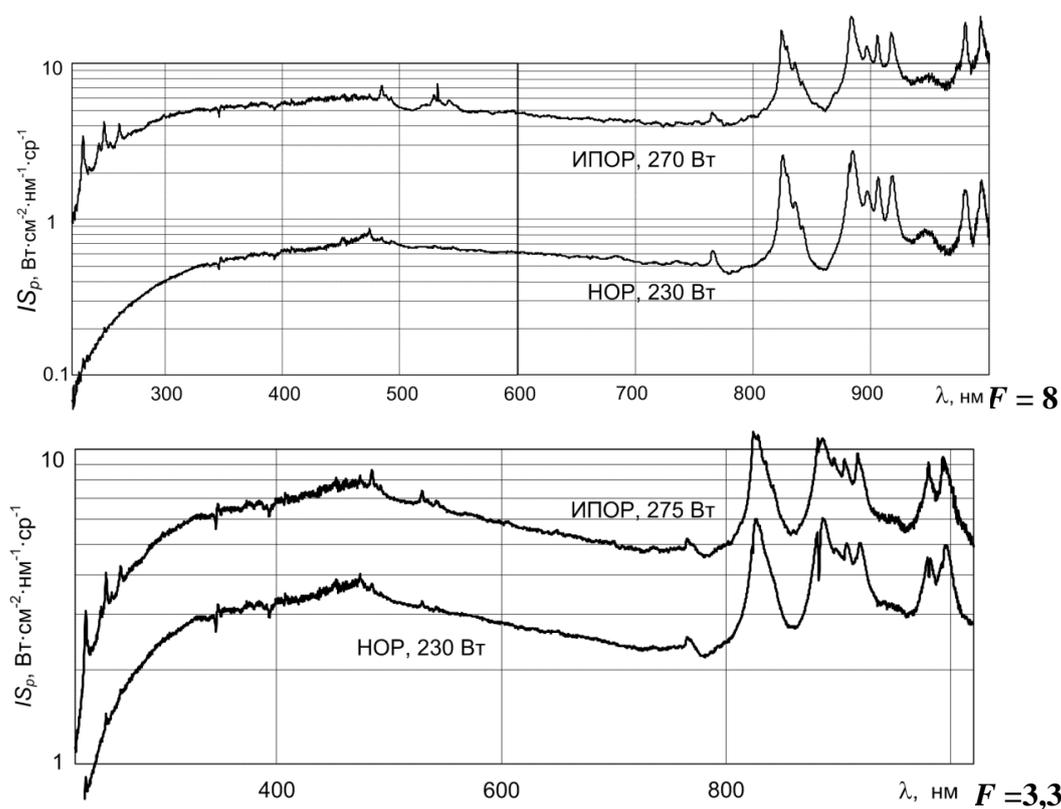


Рис. 8. Сравнение спектральной яркости НОР и ИПОР, полученных в Хе при $p = 19 \pm 1$ бар при различных параметрах фокусировки $F = 3.3$ и $F = 8$.

3. Комбинированные режимы поддержания оптического разряда

3.1. Поддержание НОР диодными лазерами в диапазоне $0.97 \div 0.98$ мкм

Для исследования эффектов поддержания оптических разрядов излучением в области группы линий поглощения ксенона 980 нм хорошо подходят распространенные диодные лазерные модули накачки иттербиевых лазеров, работающие в диапазоне длин волн $0.97 \div 0.98$ мкм. Типичные диодные лазерные модули серии PLD корпорации IPG Photonics [14] имеют выходную мощность от 30 до 60 Вт в оптическом волокне диаметром 100 мкм с числовой апертурой $NA < 0.15$. Последнее означает, что при фокусировке излучения оптической системой с $NA > 0.15$ ($F < 3$) можно получить диаметр луча в перетяжке менее 100 мкм, что не намного хуже пространственных параметров излучения, характерных для CO_2 -лазеров. С учетом высокого коэффициента поглощения ксеноновой плазмы в области 980 нм это необходимое и достаточное условие для эффективного поддержания НОР.

На рис. 9 приведена фотография НОР в ксеноне при $p \approx 20$ бар, поддерживаемого излучением диодного лазерного модуля PLD-33 с максимальной выходной мощностью около 30 Вт, излучающего в спектральной полосе шириной около 6 нм с центром $\lambda = 978$ нм. Плазма НОР состоит из двух почти отдельных частей – это эффект рефракции лазерного излучения в плазме, исследованный в [6] на примере НОР, поддерживаемого излучением волоконного иттербиевого лазера. В случае диодного лазера вблизи группы сильных линий поглощения ксенона эффекты рефракции усиливаются одновременно с поглощением, в результате чего НОР приобретает необычную форму с разделением на два плазмоида. В тех же условиях было возможно поддерживать НОР также в виде одного плазмоида с меньшим поглощением, причем одиночный плазмоид мог располагаться как на месте первого, так и на месте второго плазмоида на рис. 9, перемещаясь при небольшом изменении мощности лазерного излучения.

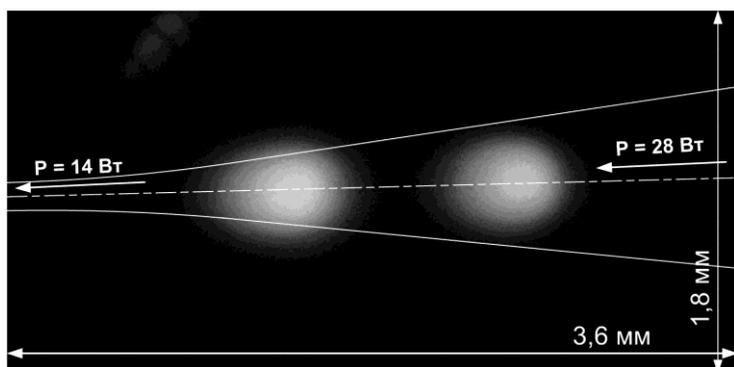


Рис. 9. Двойной НОР в луче диодного лазера ДЛМ–30. P – мощность лазерного излучения на входе и выходе из плазмы, параметр фокусировки $F = 4$. Линиями показаны оптическая ось и условные границы лазерного луча в отсутствие плазмы, стрелками – направление распространения лазерного излучения. В этих условиях возможен также одиночный НОР. Хе, $p \approx 20$ бар.

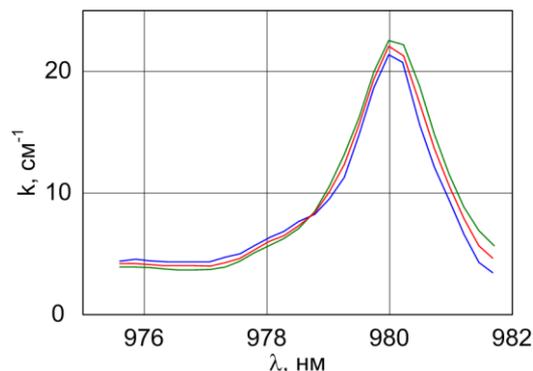


Рис. 10. Усредненный спектр коэффициента поглощения k лазерного излучения плазмой НОР в условиях рис. 9, измеренный вблизи оптической оси луча в полосе излучения диодного лазера. Показан результат измерений при трех состояниях НОР.

Во всех случаях был измерен усредненный коэффициент поглощения лазерного излучения вблизи оптической оси (и одновременно оси плазмоидов), результат измерений показан на рис. 10. На графике хорошо видна уширенная линия поглощения ксенона $\lambda = 980$ нм.

Пороговая мощность поддержания НОР диодным лазером вблизи линии поглощения была около 20 Вт, тем не менее, температура и спектральная яркость плазмы, как будет видно ниже, оказались низкими (рис. 13). При настройке на линию поглощения высокий коэффициент поглощения достигается при сравнительно низкой температуре плазмы: для достижения стационарного состояния в этом случае плазме НОР, как самосогласованной системе, не требуется нагреваться до высокой температуры.

Для того, чтобы повысить температуру до уровня, при котором яркость плазмы возрастает в несколько раз, оказалось достаточно использовать более мощный лазерный модуль той же серии PLD–60, обеспечивающий необходимую для поддержания НОР мощность излучения при меньшем токе накачки. Особенность заключается в том, что от тока накачки зависит температура излучающего перехода, вследствие чего с увеличением тока полоса излучения лазера смещается в сторону увеличения длины волны с коэффициентом около 1 нм/А. Поэтому при одинаковых условиях охлаждения и мощности излучения более мощный модуль дает полосу генерации, смещенную на несколько нанометров в коротковолновую область. При этом порог поддержания НОР увеличивается примерно в 1.5 раза, поскольку уменьшается коэффициент поглощения лазерного излучения, а яркость плазмы значительно возрастает (рис. 13).

Более мощный лазерный модуль позволяет также за счет модуляции тока накачки получить импульсно-периодический режим и реализовать ИПОР. Допускается модуляция разрядного тока с частотой до 50 кГц без потери или даже с некоторым увеличением импульсной мощности излучения по сравнению с непрерывным режимом.

3.2. Комбинированные режимы НОР/ИПОР в пересекающихся лучах

Компактность и доступность диодных лазерных модулей позволяет естественным образом реализовать схему оптического разряда в пересекающихся лучах, например, как показано на рис. 11. Для оптимальных условий горения оптического разряда область взаимного пересечения лучей не должна быть большого объема, поэтому каждый из лучей должен быть предварительно сфокусирован, угол между оптическими осями лучей должен быть не меньше 60° , 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, или еще дальше от точки фокуса.

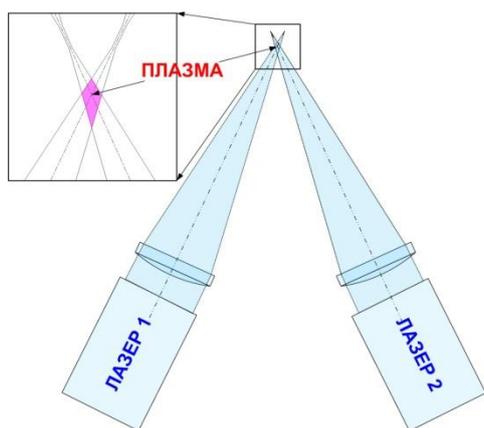


Рис. 11. Схема НОР в пересекающихся лазерных лучах. Каждый из лучей фокусируется отдельной оптической системой, лучи пересекаются вблизи фокуса в зоне, оптимальной для поддержания оптического разряда.

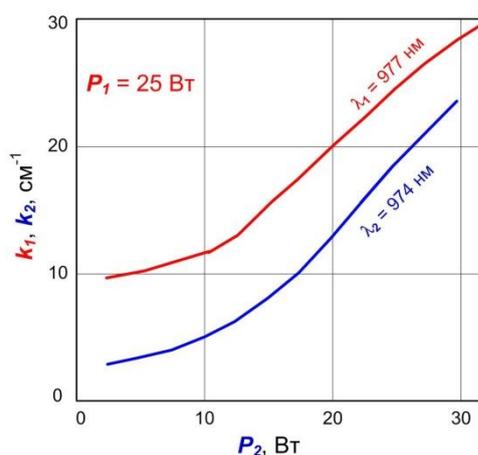


Рис. 12. Коэффициенты поглощения k_1 и k_2 излучения диодных лазеров 1 и 2 с центрами полос излучения на длинах волн $\lambda_1 = 977 \text{ нм}$ и $\lambda_2 = 974 \text{ нм}$ в плазме оптического разряда в скрещенных лучах этих лазеров при фиксированной мощности $P_1 = 25 \text{ Вт}$ лазера 1 в зависимости от мощности P_2 лазера 2. Ширина полосы $\Delta\lambda = 6 \text{ нм}$. Ксенон, $p \approx 20 \text{ бар}$.

Оказалось, что поддержание НОР в схеме пересекающихся лучей обладает рядом преимуществ, создающих новые возможности повышения температуры и управления характеристиками плазмы НОР. На рис. 12 показана зависимость коэффициента поглощения излучения лазеров, поддерживающих НОР в схеме пересекающихся лазерных лучей, от мощности излучения одного из лазеров при фиксированной мощности излучения другого.

При этом лазеры генерировали излучение в полосах шириной около 6 нм с центром, отличающимся по длине волны на 3 нм. Оказалось, что при увеличении мощности излучения второго лазера от нуля до 30 Вт коэффициент поглощения плазмой излучения обоих лазеров возрастает от 3 до 7 раз, т.е. растет температура и яркость плазмы, причем в гораздо большей степени, чем при соответствующем увеличении мощности каждого из лазеров.

На рис. 13 приведены результаты измерения спектральной яркости плазмы комбинированных разрядов в пересекающихся пучках, а также для сравнения на том же графике показаны определенные в тех же условиях спектральная яркость НОР и ИПОР в одиночных лучах, а также спектральная яркость катодной области дугового разряда. Во всех случаях разряд возбуждался в одной и той же колбе ксеноновой дуговой лампы мощностью 75 Вт, колба которой была изготовлена из кварца, препятствующего образованию озона во время работы и поэтому плохо пропускавшего излучение с длиной волны короче 250 нм, а особенно короче 230 нм.

Плазма НОР в луче лазера с полосой излучения, настроенной близко к линии поглощения ксенона $\lambda = 980 \text{ нм}$, демонстрирует яркость в 5 раз ниже, чем яркость катодной области дугового разряда, причем с увеличением мощности излучения яркость плазмы НОР в этом случае практически не растет. При отстройке от полосы поглощения яркость плазмы возрастает, а также увеличивается в некоторых пределах с ростом мощности излучения, и поэтому кривая, полученная для НОР, поддерживаемого лазером на длине волны ближе к $\lambda = 974 \text{ нм}$, практически совпадает с кривой спектральной яркости катодной области дугового разряда. В несколько раз большую яркость демонстрирует режим ИПОР на длине волны около $\lambda = 974 \text{ нм}$ при импульсной мощности, всего на 10% выше мощности, при которой получена характеристика соответствующего НОР. НОР в скрещенных лучах при такой же суммарной мощности излучения, как и импульсная мощность в случае ИПОР, показывает даже несколько большую спектральную яркость плазмы, чем ИПОР в одиночном луче.

Эффекты рефракции, ограничивающие возможности ввода энергии лазерного излучения в плазму, усугубляются по мере увеличения давления плазмообразующего газа, а также при наличии близких к полосе генерации лазера линий поглощения. В этой области параметров импульсно-периодические и комбинированные режимы предоставляют возможность выхода из ситуации. Чем сильнее влияние рефракции, тем сильнее выигрыш по параметрам плазмы дают ИПОР и комбинированные режимы по сравнению с НОР.

Таким образом, найденные режимы оптических разрядов могут найти применение при генерации плазмы в условиях повышенной плотности, например, для получения в лабораторных условиях неидеальной плазмы, а также в плазменных источниках широкополосного излучения высокой спектральной яркости [11, 12].

Длительность импульса порядка десятков микросекунд при частоте повторения до нескольких десятков килогерц позволяет применять ИПОР в тех же приборах, что и НОР, только с большей эффективностью.

Благодарности

Авторы признательны ООО НТО «ИРЭ–Полус» за помощь в проведении исследований и В.Е. Прохорову за высокоскоростную киносъемку плазмы ИПОР.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 13-08-00141).

Литература

1. Райзер Ю.П. Оптические разряды // УФН, 1980, Т.132, Вып.3, С.549–581.
2. Райзер Ю.П. О возможности создания светового плазмотрона и необходимой для этого мощности. // Письма в ЖЭТФ, 1970, Т. 11, В. 3, С. 195–199.
3. 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, В. 9, С. 447–449.
4. Smith D.K. Laser driven light source // Patent US #7435982. 2008.
5. 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, 2010. V. 7680, P. 76800L.
6. Zimakov V.P., Kuznetsov V.A., Solovyov N.G., Shemyakin A.N., Shilov A.O., Yakimov M.Yu. Bistable behavior of a continuous optical discharge as a laser beam propagation effect // Proc. SPIE. 2013. V. 8600. P. 860002.
7. Бункин Ф. В., Конов В. И., Прохоров А. М., Федоров В. Б. Лазерная искра в режиме «медленного горения» // Письма в ЖЭТФ, 1969, Т. 9, В. 11, С. 609–612.
8. Буфетов И.А., Прохоров А.М., Федоров В.Б., Фомин В.К. Медленное горение лазерной плазмы и оптические разряды // Труды ИОФАН. Т. 10. М.: Наука, 1988. С. 3-74.
9. Зимаков В.П., Кузнецов В.А., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Шилов А.О., Якимов М.Ю. Оптические разряды, поддерживаемые излучением лазеров ближнего ИК-диапазона // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т. 15, вып. 5. 14с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-5/articles/247/>
10. 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.
11. Рудой И.Г., Соловьев Н.Г., Сорока А.М., Якимов М.Ю. Способ генерации широкополосного оптического излучения с высокой яркостью // Заявка №2014133807/28, 2014. Патент на изобретение РФ №2571433, 2015.
12. Рудой И.Г., Соловьев Н.Г., Сорока А.М., Якимов М.Ю. Источник широкополосного оптического излучения с высокой яркостью // Заявка №2015109061/28, 2015. Патент на полезную модель РФ №157892, 2015.
13. IPG Photonics Corp.: QCW Single-mode Ytterbium Fiber Lasers // http://www.ipgphotonics.com/QCW_sm.htm
14. IPG Photonics Corp.: PLD-33 Series, PLD-60 Series: High Power Multi-mode Laser Diodes // http://www.ipgphotonics.com/products_pld33.htm http://www.ipgphotonics.com/products_pld60.htm

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2015 г.