

Краткие сообщения

04

Непрерывный оптический разряд в лазерном резонаторе

© Ю.А. Чивель

MerPhotonics,
42100 Сент-Этьенн, Франция
e-mail: yuri.chivel@mail.ru

(Поступило в Редакцию 23 июня 2015 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований оптического разряда, помещенного в лазерный резонатор. Установлено значительное увеличение поглощения лазерного излучения, вплоть до полного поглощения. Рассмотрены оптические схемы инициирования и поддержания оптического разряда в резонаторе, расширяющие область применения оптического разряда в технологиях.

Введение

Большие мощности, необходимые для поддержания плазмы оптического разряда [1,2], несколько киловатт при полном поглощении лазерного излучения, квадратичная зависимость поглощения плазмы оптического разряда от длины волны $\alpha \sim \lambda^2 \sim 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ (газ Ar, $\lambda = 1.06 \mu\text{м}$), делают затруднительным применение коротковолновых лазеров, что значительно сужает область использования оптического разряда в технологиях [3,4].

Расширение области применения оптического разряда путем использования компактных лазерных систем ближнего ИК, видимого и УФ диапазонов и повышение эффективности использования энергии лазера представляется крайне актуальной задачей. Ее решение возможно через построение многоходовых схем, в предельном случае путем организации пробоя газа с образованием плазменной области и ее поддержание в концентри-

ческом резонаторе непрерывного лазера или лазера с большой длительностью импульса [5], предназначенного для поддержания разряда (рис. 1, *a*). Пробой газа осуществляют путем острой фокусировки объективом 5 излучения короткоимпульсного лазера 4. Благодаря многократному прохождению через плазменную область излучения непрерывного лазера в резонаторе с полностью отражающими лазерное излучение зеркалами 1,6 вся мощность лазера расходуется только на поддержание оптического разряда 7 и полностью вкладывается в разряд независимо от длины волны лазерного излучения. Ввиду низкого показателя поглощения плазмы оптического разряда влияние плазмы на генерационные характеристики лазера будет незначительным. Для их уменьшения при необходимости можно использовать трехзеркальный резонатор (рис. 1, *b*) и располагать область оптического разряда 7 в дополнительном концентрическом резонаторе, образованном полупрозрачным зеркалом 3 и глухим 6 (рис. 1, *b*). Пробой газа с образованием плазменной области и ее поддержание можно осуществлять в в фокальной области конического пучка (рис. 1, *c*). Система с коническим пучком [6] является оптимальной для технологии, так как позволяет получить разряд большой площади. Предлагаемые схемы поддержания оптического разряда позволяют устранить одну из острых проблем технологического применения оптического разряда — нагрев поверхности обработки проходящим через разряд мощным лазерным излучением.

1. Эксперимент

Эксперименты проводились на лазерном плазмотроне атмосферного давления, принципиальная схема которого представлена на рис. 2. Луч непрерывного CO₂-лазера с выходной мощностью 3 kW фокусировался линзой из ZnSe ($F \sim 180 \text{ мм}$) на выходе сопла, через которое прокачивался аргон (рис. 2). В области каустики лазерного излучения возникала плазма оптического пробоя, в которой происходят процессы нагрева и ионизации

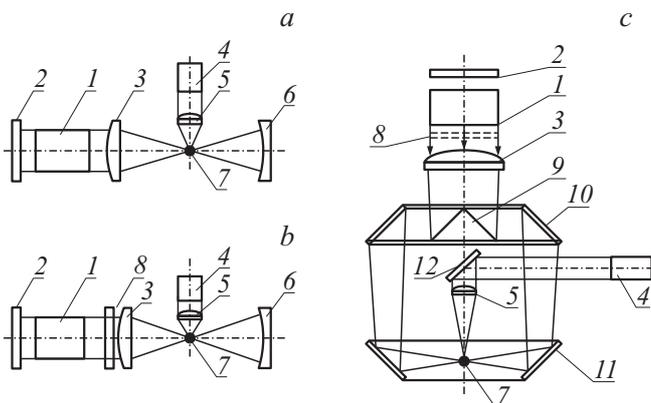


Рис. 1. Варианты размещения оптического разряда в резонаторе лазера: *a* — в резонаторе, *b* — в дополнительном резонаторе, *c* — в резонаторе с коническими элементами. 1 — активный элемент, 2,6 — глухое зеркало резонатора, 3 — линза, 4 — короткоимпульсный лазер, 5 — объектив, 7 — оптический разряд, 8 — полупрозрачное зеркало резонатора, 9 — аксикон, 10,11 — коническое зеркало.

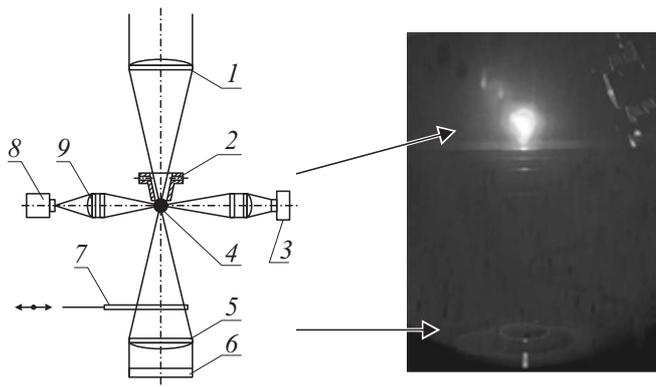


Рис. 2. Схема эксперимента: 1,5 — объектив, 2 — сопло с системой подачи газа, 3 — ССД-камера с фильтрами, 4 — оптический разряд, 6 — зеркало, 7 — шторка, 8 — фотодиод, 9 — объектив с фильтром.

газа. Сформированная таким образом плазменная струя свободно вытекала из сопла плазмотрона. При этом часть лазерного излучения ($\sim 30\%$) не поглощалась плазмой. Используемый лазер представлял собой отпаянный электроразрядный CO_2 -лазер непрерывного действия с устойчивым резонатором. Излучение выводилось через полупрозрачное зеркало с коэффициентом отражения 70% и имело гауссово распределение с диаметром в фокусе линзы $300\ \mu\text{m}$. Скорость прокачки аргона составляла $2\ \text{m/s}$. На расстоянии $180\ \text{mm}$ от фокальной плоскости линзы размещалась система из идентичной линзы из ZnSe с фокусным расстоянием $180\ \text{mm}$ и плоского медного зеркала. Фокусы линз совмещались, излучение возвращалось в резонатор и тем самым формировался трехзеркальный резонатор.

Для измерения интенсивности излучения оптического разряда на расстоянии $100\ \text{mm}$ от фокуса размещался фотоприемник на основе фотодиода ФДУК. Изображение центральной области оптического разряда диаметром $4\ \text{mm}$ с помощью объектива строилось на приемной площадке ФДУК. Излучение сплошного спектра плазмы Ag регистрировалось в узкой полосе $20\ \text{nm}$ вблизи длины волны $810\ \text{nm}$.

С помощью цифрового фотоаппарата осуществлялась покадровая съемка разряда в спектральной полосе шириной $100\ \text{nm}$ вблизи линии $450\ \text{nm}$, вырезаемой интерференционным фильтром. Регистрация изображения оптического разряда и измерение интенсивности излучения разряда проводились при включенном и отключенном с помощью шторки дополнительном резонаторе.

Предварительно, с использованием проходного калориметра, были проведены измерения поглощения лазерного излучения в плазме разряда в зависимости от мощности лазерного излучения и расхода плазмообразующего газа. Установлено, что в использованном диапазоне мощностей лазерного излучения и расхода газа поглощение составляет около 70% (рис. 3, *c*).

2. Результаты и обсуждение

Эксперименты установили резкое увеличение поглощения плазмы разряда, помещенного в дополнительный резонатор (рис. 3, *b*), что проявлялось в увеличении размера плазмы и в очень незначительном увеличении интенсивности непрерывного спектра излучения плазмы (максимум 15%), что также отмечалось в [7] при увеличении мощности лазера. Влияние внесения оптического разряда в резонатор не оказывает существенного влияния на генерационные характеристики лазера, так как исходя из соотношения $P_r = PT_{pl}^2 Tl \cdot Rm$ (где P — выходная мощность лазера, T_{pl} , Tl — пропускание плазмы и выходного зеркала лазера, Rm — отражение системы зеркало–линза) только $\approx 2.0\%$ лазерного излучения будет возвращено в резонатор. Наблюдаемый эффект роста размера плазмы явно связан с ростом поглощения в плазме из-за многочисленных проходов излучения лазера через оптический разряд. Используя результаты измерений изменения размеров оптического разряда, изменения в поглощении были оценены. Площадь поверхности разряда увеличилась на $10\text{--}12\%$, а объем увеличился на $18\text{--}20\%$. Потери энергии разряда состоят

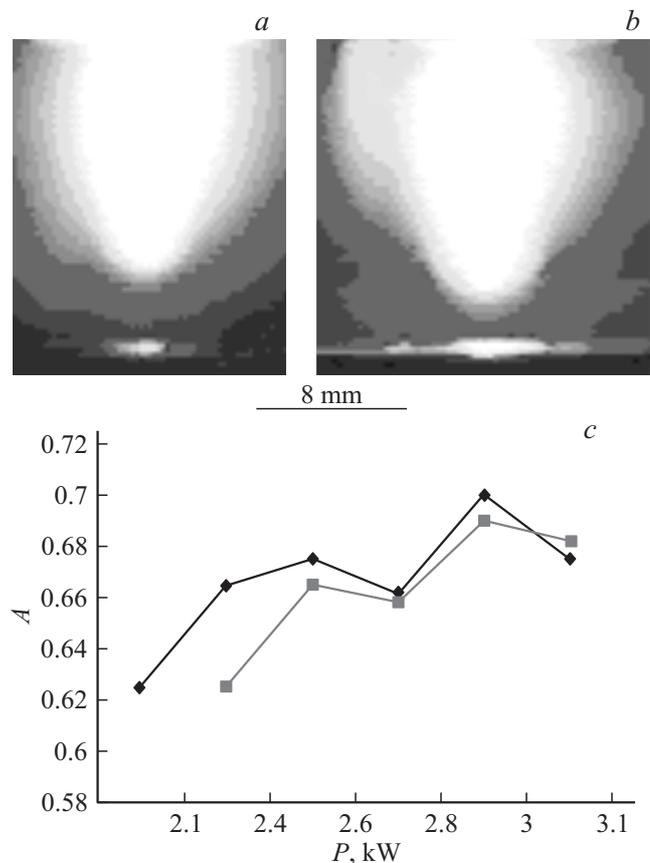


Рис. 3. Общий вид оптического разряда: *a* — свободного, *b* — помещенного в резонатор, $P = 3\ \text{kW}$, расход газа — $0.2\ \text{m}^3/\text{h}$, *c* — зависимость коэффициента поглощения плазмы оптического разряда от мощности лазерного излучения и расхода газа Ar : \square — $0.175\ \text{m}^3/\text{h}$, \blacklozenge — $0.2\ \text{m}^3/\text{h}$.

из потерь на излучение и потерь путем теплопроводности. Радиационные потери, из-за прозрачности разряда в этом диапазоне температур $15-20 \cdot 10^3$ К при атмосферном давлении пропорциональны объему разряда. Потери на теплопроводность $P = S \cdot \Delta\theta$ [2] пропорциональны площади поверхности разряда S . Таким образом, можно констатировать, что из-за расположения оптического разряда в дополнительном резонаторе поглощение увеличилось на 28–32%, т. е. стало почти 100%.

Заключение

Таким образом, внутррезонаторное размещение оптического разряда позволяет практически полностью поглощать лазерное излучение в УФ, видимой и ближней ИК областях спектра, что существенно расширит область применения оптического разряда. Возможность использовать широкий спектр лазерных длин волн, особенно в УФ области, для управления параметрами плазмы оптического разряда и контроля химических реакций создает уникальные возможности в области лазерной плазмохимии.

Список литературы

- [1] Бункин Ф.В., Конов В.И., Прохоров А.М. // Письма в ЖЭТФ. 1964. Т. 9. С. 599.
- [2] Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов: М.: Наука, 1974. 307 с.
- [3] Konov V.I., Prokhorov A.M., Uglov S.A., Bolshakov A.P., Leontiev I.A., Dausinger F., Hugel H., Angstenberger B., Sepold G., Metev S. // Appl. Phys. A. 1998. Vol. 66. P. 575–582.
- [4] Большаков А.П., Востриков В.Г., Дубровский В.Ю., Конов В.И., Косырцев Ф.К., Наумов В.Г., Ральченко В.Г. // Квант. электрон. 2005. Т. 35, № 4. С. 385–389.
- [5] Chivel Yu. // Patent Application № 2010130149. 03.10.2010.
- [6] Chivel Yu. // Proc. SPIE. 2013. Vol. 9065. P. 9065-19.
- [7] Козлов Г.И., Селезнева И.В. // ЖТФ. 1978. Vol. 48. С. 386–401.