

## **К вопросу о динамике развития светозерозионных поликанальных разрядов**

© Е.Ю. Локтионов, Ю.С. Протасов, Ю.Ю. Протасов, В.Д. Телех

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Описан развиваемый экспериментальный метод исследования динамики и макроструктуры оптических поликанальных разрядов (с временем возбуждения  $\tau \sim 10^{-8}$  с) как в атмосферных, так и в вакуумных условиях. Для создания встречных светозерозионных газоплазменных потоков используются две конденсированные мишени, представляющие собой алюминиевые пленки толщиной 100...200 нм, нанесенные со стороны зазора методом магнетронного распыления на стекло толщиной 2 мм. Экспериментальное определение динамики и макроструктуры поликанальных светозерозионных разрядов выполняется методом поляризационной интерферометрии. Эти исследования необходимы при анализе и разработке широкого спектра фотонных энергоустановок высокой плотности мощности.*

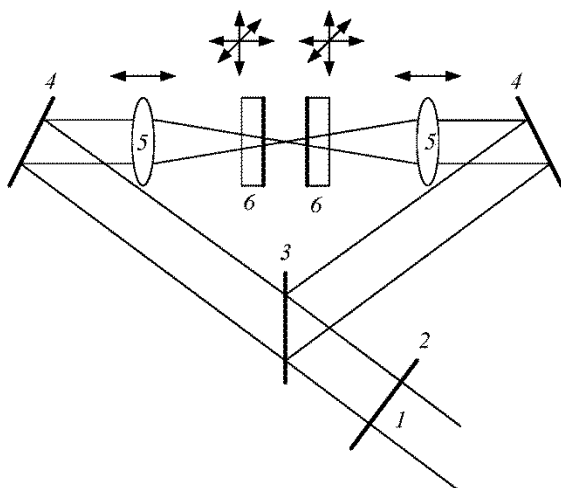
**Ключевые слова:** пространственно ограниченные разряды, кумулятивные разряды, оптические разряды с испаряющейся стенкой, макроструктура, эмиссионные характеристики

В настоящее время решение многих актуальных задач квантовой электроники, фотохимии и теплофизики в значительной степени определяется прогрессом в исследованиях и разработках плазменных высокоинтенсивных источников излучения. Требования, предъявляемые к источникам световой энергии для лазерных и фотохимических применений, весьма многообразны и зависят от конкретных условий их эксплуатации. Наиболее общие из них, определяющие перспективность разработок новых типов источников света, связаны с возможностями достижения высоких яркостных температур излучения, особенно в УФ-области спектра ( $T \geq 15\ 000$  К), и получения больших размеров излучающей поверхности, обеспечения высоких абсолютных и относительных (КПД) выходов излучения в потребных спектральных интервалах и формирования импульсов излучения с требуемыми временными параметрами (в первую очередь импульсов короткой длительности с крутыми передними фронтами), а также с возможностями выполнения ряда технологических условий, таких как многоразовость использования источника, способность работать в частотных режимах, изолированность плазмы от облучаемого объекта и др.

Исследование динамики, макроструктуры, эмиссионных характеристик кумулятивных плазм представляет особенный интерес в связи

с высокими значениями температур и давлений, достигаемых в зоне контакта. Увеличение концентрации и температуры частиц приводит к повышению степени ионизации и увеличению интенсивности вторичного коротковолнового излучения. Применение в качестве мишеней тонких пленок позволяет точно дозировать массовый расход компонентов и регулировать долю сообщенной энергии лазерного излучения, что крайне важно для точной регулировки параметров генерируемой плазмы сложного химического и ионизационного состава. В случае применения многослойных тонких пленок стехиометрический состав смеси может легко поддерживаться постоянным.

Для исследования динамики пространственно ограниченных кумулятивных оптических разрядов с испаряющейся стенкой предлагается схема воздействия, показанная на рис. 1. В этой схеме луч греющего излучения *1* с помощью светоделителя *3* разделяется на два оптических плеча. Светоделитель чувствителен к плоскости поляризации падающего излучения, поворот полуволновой пластинки *2* позволяет изменять соотношение энергий излучения в плечах от 4:1 до 1:1. Далее излучение в каждом из плеч фокусируется кварцевой линзой *5* ( $F \sim 50$  мм) в середине зазора между двумя мишенями, представляющими собой алюминиевые пленки толщиной 200 нм, нанесенные со стороны зазора методом магнетронного распыления на стекло толщиной 2 мм. Кроме напыления, могут быть использованы и другие методы осаждения пленок, в том числе гетерогенных [1]. Применение длиннофокусных линз нежелательно из-за более протяженной каустики — в этом случае может быть достигнута пороговая для повреждения подложки плотность мощности излучения.

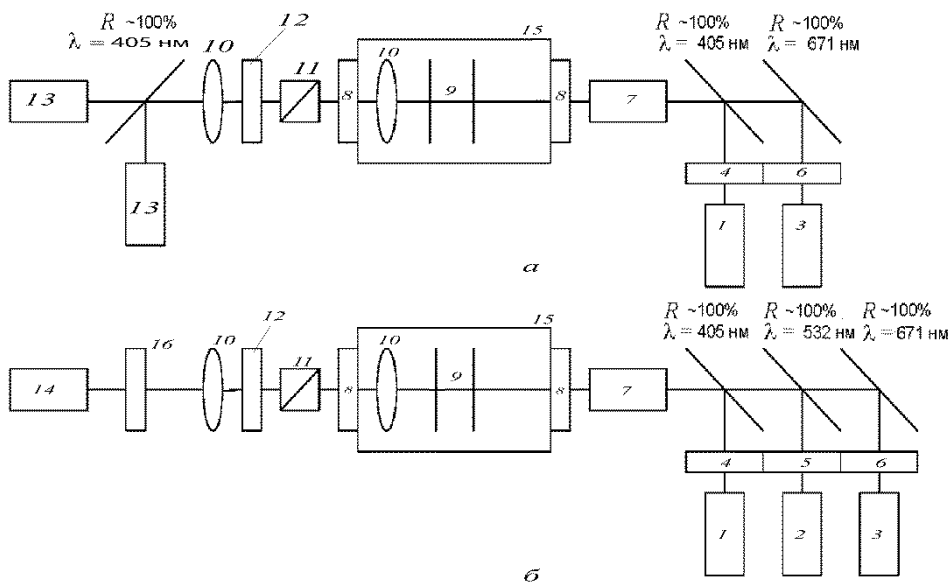


**Рис. 1.** Схема инициирования поликанального оптического разряда:

*1* — греющее лазерное излучение; *2* — полуволновая пластинка; *3* — светоделитель; *4* — глухое зеркало; *5* — собирающая линза; *6* — тонкопленочная мишень на подложке

В результате организованного таким образом воздействия имеет место столкновение лазерно-индуцированных плазменных потоков и (или) ударных волн в буферном газе и их многократное отражение от мишеней, приводящее к возникновению малоподвижных областей с высокой температурой.

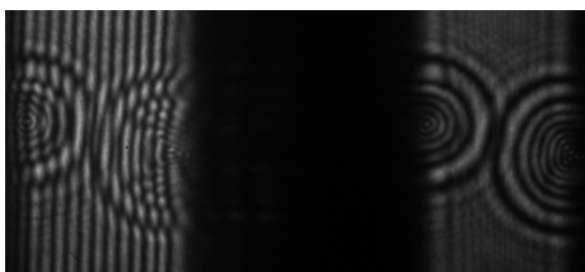
Диагностика динамики и макроструктуры лазерно-индуцированных плазменных потоков осуществляется поляризационным интерферометром [2–4] (интерферометром Номарского), принцип действия которого заключается в следующем (рис. 2): зондирующее излучение твердотельного лазера с диодной накачкой 1–3 (Lasever LSR 405NL-300, LSR 671NL-300; Lighthouse Photonics Sprout-6W), предварительно линейно поляризованное под углом  $45^\circ$  с помощью полуволновых пластинок 4–6 и прошедшее через оптическую неоднородность, разделяется в призме Волластона 11 на два расходящихся под углом  $\sim 10^\circ$  пучка, один из которых поляризован вертикально, а другой — горизонтально. Дополнительно угол разведения лучей может быть отрегулирован линзой 10 для оптимального использования поля кадра.



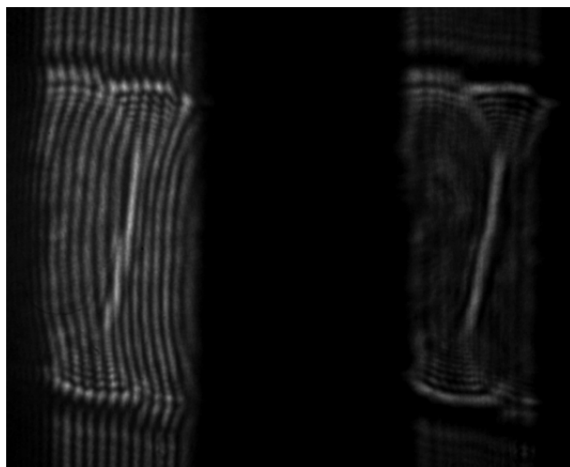
**Рис. 2.** Оптические схемы экспериментальных установок на основе поляризационного интерферометра с монохромными (а) и цветным (б) приемниками:

1, 2, 3 — лазеры с длиной волны соответственно 405, 532 и 671 нм; 4, 5, 6 — полуволновые пластинки с длиной волны соответственно 350...500, 532 и 600...800 нм; 7 — телескоп; 8 — окно вакуумной камеры; 9 — исследуемый объект; 10 — собирающая линза; 11 — призма Волластона; 12 — поляризационный фильтр; 13 — ПЗС-камера с электронно-оптическим преобразователем; 14 — цветная ПЗС-камера; 15 — вакуумная камера; 16 — нейтральный светофильтр

При использовании ахроматических (Edmund Optics NT46-55x  $\Delta\lambda \sim 200 \dots 300$  нм) или перестраиваемых (нулевого порядка, например, серии PO-TWP Alphalas или жидкокристаллических, например, серии LCC Thorlabs) полуволновых пластинок 4–6 без замены оптических элементов и доюстировки схемы могут применяться перестраиваемые лазеры аналогично [5]. Для того чтобы произошла интерференция в зоне перекрытия обыкновенного и необыкновенного лучей после прохождения призмы Волластона, вращением поляризационного фильтра 12 необходимо выровнять плоскость поляризации — снова под углом  $45^\circ$ , так как ортогонально поляризованные компоненты не интерферируют между собой. В области перекрытия сферических (после прохождения через собирающую линзу) волновых фронтов обыкновенного и необыкновенного лучей зондирующего излучения формируется интерференционная картина, а вне зоны перекрытия — теневая (абсорбционная) картина исследуемой области (рис. 3), для четкого разделения которых необходимо перекрыть часть пучка зондирующего излучения.



*a*



*б*

**Рис. 3.** Интерферограмма и тенеграмма зазора между мишенями при встречном облучении (532 нм, 12 нс, 10 Дж/см<sup>2</sup>) через 750 нс (*a*) и через 5 мкс (*б*) после воздействия

Применение цветной ПЗС-камеры (Видеоскан-205/Ц-USB с ПЗС-матрицей SONY ICX205AK) позволяет ограничиться одним приемником излучения, так как из полученного изображения легко могут быть выделены каналы, соответствующие синему (400...450 нм), зеленому (530...570 нм) и красному (610...670 нм) цветам, обеспечивая, например, возможность выбора полос резонансного поглощения в каждом из этих диапазонов. В случае недостаточной чувствительности обычной ПЗС-матрицы могут применяться камеры с усилителями интенсивности, например, на основе микроканальных пластин (Nanogate-2, НПП «Наноскан»). Чтобы регистрация по-прежнему могла осуществляться одним приемником, необходимо развести лучи зондирующего излучения оптическим клином, расположенным до призмы Волластона. Преимущества такого решения особенно ярко проявляются, когда нет необходимости в двухмерном пространственном разрешении — при использовании широкополосного источника когерентного излучения (например, типа Fianium) с помощью щелевых диафрагм может быть выделено большое количество интересных спектральных интервалов.

Пример регистрируемых тене- и интерферограмм показан на рис. 3. В результате организованного таким образом воздействия имеет место столкновение лазерно-индуцированных плазм и (или) ударных волн в буферном газе и их многократное отражение от мишеней, приводящее к возникновению малоподвижных областей с высокой температурой.

В вакууме коэффициент усиления в кумулятивной плазме линии Al II 3900,675 Å достигает 13,5 по сравнению с односторонним воздействием равной энергии в той же геометрии. В атмосферных условиях усиление этой линии составляет ~ 8,4 раза, линии O III 3944,85 Å — ~ 9,4 раза, линий ионов азота — в 3–6 раз.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (госконтракт № 14.518.11.7009) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 11-08-00843, 12-08-12047, 13-08-01391).*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Локтионов Е.Ю., Протасов Ю.Ю. Светозрелионный метод генерации пылевых газоплазменных потоков высокого давления. *Приборы и техника эксперимента*, 2010, № 4, с. 145–149.
- [2] Benattar R., Popovics C., Sigel R. Polarized light interferometer for laser fusion studies. *Review of Scientific Instruments*, 1979, vol. 50, no. 12, pp. 1583–1586.
- [3] Hough P. *Laser, optical and electrical diagnostics of colliding laser-produced plasmas*. Dis. ... Ph. D. Dublin, 2010, 222 p.
- [4] Borner M., Fils J., Frank A., Blazevic A., Hessling T., Pelka A., Schaumann G., Schokel A., Schumacher D., Basko M.M., Maruhn J., Tauschwitz A., Roth M. Development of a Nomarski-type multi-frame interferometer as a time and space resolving diagnostics for the free electron density of laser-generated plasma. *Review of Scientific Instruments*, 2012, vol. 83, no. 4, p. 043501.

- [5] Локтионов Е.Ю., Протасов Ю.Ю., Телех В.Д. Измерение температурной зависимости оптических характеристик материалов в вакууме. *Приборы и техника эксперимента*, 2012, № 1, с. 149–153.

Статья поступила в редакцию 19.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Локтионов Е.Ю., Протасов Ю.С., Протасов Ю.Ю., Телех В.Д. К вопросу о динамике развития светоэрозионных поликанальных разрядов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1040.html>

**Локтионов Егор Юрьевич** — канд. техн. наук, заведующий лабораторией учебно-научного центра «Фотонная энергетика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, специалист в области экспериментальных исследований радиационно-плазмодинамических и оптоотеплофизических процессов взаимодействия мощного излучения с веществом всех агрегатных состояний с использованием новейших методов диагностики. Автор более 50 работ в данной области. e-mail: [stcpe@bmstu.ru](mailto:stcpe@bmstu.ru)

**Протасов Юрий Степанович** — д-р физ.-мат. наук, профессор, заместитель научного руководителя Объединенного учебно-научного центра фотонной энергетике и фотонных технологий МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области физики и техники низкотемпературной плазмы, радиационной газоплазмодинамики и физической электроники. Автор более 400 научных работ, более 10 книг и 300 изобретений. e-mail: [stcpe@bmstu.ru](mailto:stcpe@bmstu.ru)

**Протасов Юрий Юрьевич** — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, специалист в области фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований радиационно-плазмодинамических и оптоотеплофизических процессов взаимодействия мощного излучения с веществом всех агрегатных состояний. Автор более 100 работ в данной области. e-mail: [stcpe@bmstu.ru](mailto:stcpe@bmstu.ru)

**Телех Виктор Дмитриевич** — канд. техн. наук, директор учебно-научного центра «Фотонная энергетика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, специалист в области фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований термодинамических, оптических и транспортных свойств низкотемпературной неидеальной плазмы. Автор более 50 работ в данной области. e-mail: [stcpe@bmstu.ru](mailto:stcpe@bmstu.ru)