

УДК 621.386.8

Исследование оптических характеристик лазерной плазмы фотохронографическими методами

Приведены результаты фотохронографических исследований пространственно-временных и спектральных характеристик лазерной плазмы в оптическом диапазоне, полученные на установке «Искра-5» в различных экспериментах. Диагностика проводилась с использованием щелевого фоторегистратора на основе электронно-оптического преобразователя ПИМ-112 с микросекундными длительностями разверток.

**А. Г. Кравченко, Д. Н. Литвин,
В. В. Мисько, А. В. Сенник,
К. В. Стародубцев, В. М. Тараканов**

Введение

В экспериментах, проводимых на лазерных установках ВНИИЭФ, получили широкое применение методики на основе фотохронографической аппаратуры. Основным преимуществом обобщения такого класса является сочетание высокого пространственного и временного разрешений. Для исследования характеристик лазерной плазмы в оптическом диапазоне авторами разработан ряд фоторегистраторов на основе электронно-оптических преобразователей (ЭОП) различного типа. В настоящей работе описан регистратор с микросекундными длительностями разверток. Прибор используется в ряде методик регистрации параметров лазерной плазмы в экспериментах различного типа, проводимых на установке «Искра-5».

Так, в основной камере взаимодействия установки «Искра-5» были проведены эксперименты по исследованию пространственно-временных характеристик плазменного образования, возникающего в атмосфере фонового газа под действием ударной волны (УВ). Ударные волны возникали при вводе преобразованного во вторую гармонику ($\lambda = 0,66$ мкм) излучения всех 12 каналов установки внутрь полых сферических мишеней из пластика.

На стенде МКВ-4 установки «Искра-5» были выполнены эксперименты по исследованию спектрально-временных характеристик плазменного образования, возникающего при одноканальном лазерном облучении ($\lambda = 1,315$ мкм) алюминиевых мишеней при различном давлении фонового газа.

Фотохронограф микросекундного диапазона

Фотохронограф разработан на основе малогабаритного ЭОП ПИМ-112 с фотокатодом S20 производства компании БИФО [1].

Фотокатод ЭОП выполнен на волоконно-оптическом диске и имеет диапазон спектральной чувствительности от 380 до 850 нм, размер катода 8×16 мм, пространственное разрешение на фотокатоде около 25 пар линий/мм.

В качестве отклоняющей системы в ЭОП используются две пары взаимно перпендикулярных пластин, что позволяет реализовать как режим щелевой развертки, так и кадровую съемку изображения. Отличительной особенностью конструкции ЭОП является применение микроканальной пластины, которая может быть использована в качестве электронно-оптического затвора и усилителя яркости с управляемым коэффициентом усиления. Это позволило исключить из конструкции фоторегистратора усилитель яркости, что снизило его стоимость и габариты.

Для съемки изображения с экрана ЭОП в регистраторе применена цифровая 14-разрядная ПЗС-камера S2C-077APF производства НПО СИЛАР [2]. Входное окно камеры выполнено в виде плавающей волоконно-оптической пластины, что обеспечивает оптический контакт с экраном ЭОП.

В камере используется ПЗС-матрица ISD077APF с размером пикселя 16×16 мкм при рабочем кадре 1024×1024 пикселя. Пространственное разрешение камеры оценивается как 2–3 пикселя. Таким образом, применение камеры данной модификации не вносит ухудшения в пространственное разрешение фоторегистратора и позволяет использовать большую часть экрана ЭОП. Большой динамический диапазон регистрации камеры (порядка 2000) также не ограничивает линейность всего фоторегистратора.

Фоторегистратор оснащен платами питания и управления на современной электронной базе. Связь с элементами управления регистратора осуществляется посредством волоконно-оптической линии связи и интерфейса RS232 из состава ПЗС-камеры. Предусмотрено управление следующими параметрами регистратора: задержкой запуска от прихода синхроимпульса; напряжением питания микроканальной пластины (усиление сигнала и электронно-оптический затвор); временем экспозиции кадра и задержкой между кадрами (для режима одно- и девятикадровой съемки); диапазоном длительности развертки (для щелевой съемки).

В случае использования регистратора в кадровом режиме изображение наблюдаемого объекта перестраивается непосредственно на входное волоконное окно ЭОП.

Для реализации режима щелевой развертки в регистраторе предусмотрена регулируемая времяанализирующая щель, с помощью которой изображение проецируемого на нее объекта переносится на фотокатод ЭОП.

Внешний вид собранного фотохронографа приведен на рис. 1.

В описываемых методиках регистрации параметров плазмы фотохронограф использован в режиме щелевой развертки с длительностью регистрации ~ 20 мкс. Предельное временное разрешение фоторегистратора ~ 100 нс, пространственное разрешение 80 мкм, линейный динамический диапазон регистрации ~ 1000 .

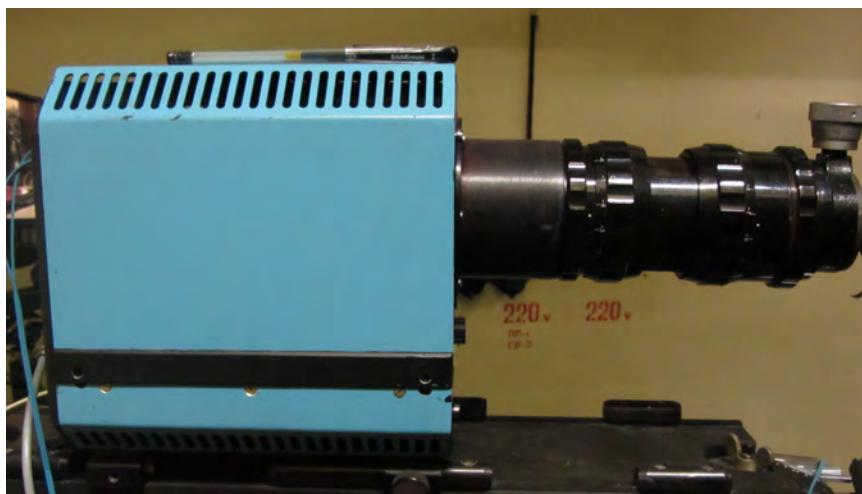


Рис. 1. Фотохронографическая камера СЭР-6

Исследование пространственно-временных характеристик плазменных образований

С использованием основной камеры взаимодействия установки «Искра-5» [3, 4] реализована фотохронографическая методика исследований пространственно-временных характеристик плазменных образований (ПО) в микросекундном диапазоне.

Оптическая схема регистрации динамики развития ПО при использовании разработанного прибора в режиме щелевой развертки представлена на рис. 2. Данная оптическая схема обеспечивает поле зрения в области мишени ~ 40 см, при этом пространственное разрешение, приведенное к плоскости мишени, составляет 1,5 мм. Спектральный диапазон регистрации ограничен светофильтрами для отсечки бликов рассеянного лазерного излучения, диапазон регистрации составляет от 0,35 до 0,5 мкм.

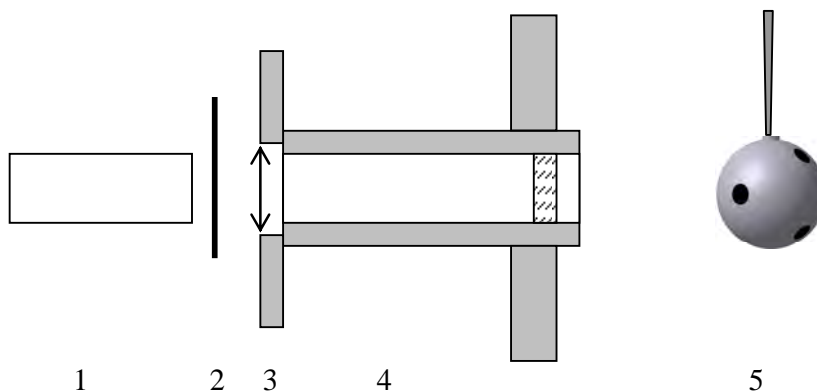


Рис. 2. Оптическая схема диагностики области ПО регистратором в режиме щелевой развертки (вид на мишень со стороны регистратора): 1 – фоторегистратор, 2 – набор светофильтров, 3 – объектив «Юпитер-8», 4 – блок юстировки объектива, 5 – мишень

Исследована динамика развития ПО, расширяющегося в атмосферу фонового газа под воздействием мощных УВ. Ударные волны формировались при вводе преобразованного во вторую гармонику ($\lambda = 0,66$ мкм) излучения всех 12 каналов установки внутрь полых сферических мишеней. Мишень диаметром 3,2 мм с толщиной стенки 2 мкм выполнена из полипараксилилена, масса мишени 7 мкг. В мишени выполнено 6 отверстий диаметром 600 мкм для ввода излучения. В экспериментах давление остаточного воздуха в камере взаимодействия варьировалось от 0,1 до 1 Торр. Суммарная лазерная энергия, введенная в мишень, составляла порядка 2400 Дж. Длительность лазерного импульса на полувысоте $\sim 0,5$ нс.

На рис. 3 приведена фотохронограмма, полученная при давлении остаточного воздуха $p_0 = 1$ Торр.

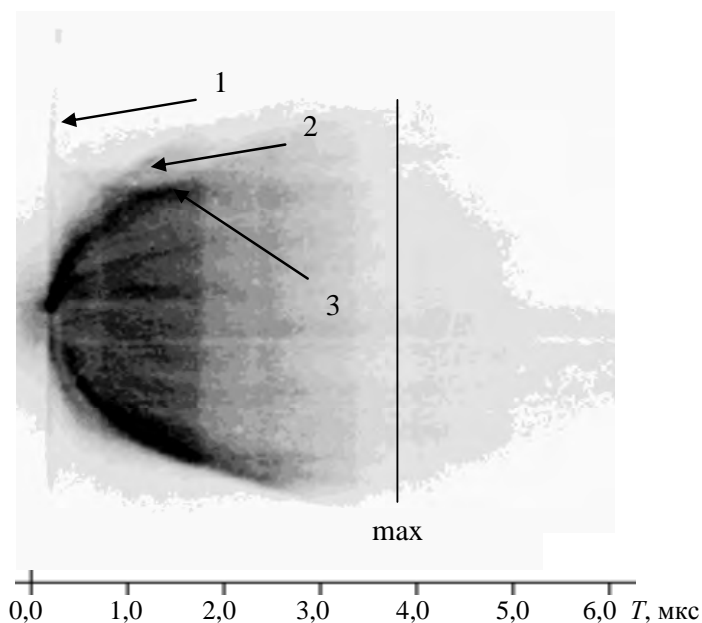


Рис. 3. Результат регистрации светимости ПО при давлении остаточного воздуха $p_0 = 1$ Торр: 1 – «сверхбыстрая» компонента УВ; 2 – «быстрая»; 3 – «медленная»; max – момент достижения ПО максимального размера

При рассмотрении увеличенного участка хронограммы (рис. 4) отчетливо видна структура УВ, состоящая из «медленной», «быстрой» и «сверхбыстрой» компонент. Расстояние от поверхности мишени, на котором происходит отрыв «сверхбыстрой» компоненты от «медленной» и «быстрой», составляет 2 см. Момент времени, когда это происходит, составляет < 100 нс. При этом отрыв симметричен относительно начального положения мишени снизу и сверху.

Схожий характер динамики развития ПО зарегистрирован и в эксперименте с давлением остаточного воздуха $p_0 = 0,1$ Торр (рис. 5). Структура ударной волны также состоит из «медленной», «быстрой» и «сверхбыстрой» компонент. Заметно пересечение «сверхбыстрой» УВ, отраженной от конструкции подвеса мишени, с «медленной» и «быстрой» компонентами.

На рис. 6 приведен увеличенный участок хронограммы, показывающий сложный характер формирования ударной волны. Отрыв «сверхбыстрой» компоненты от «медленной» и «быстрой» происходит за время < 80 нс, т. е. за пределами временного разрешения прибора. Расстояние от поверхности мишени, на котором происходит этот отрыв, можно определить как 2 см с точно-

стью до искажения насыщенным сигналом. Отрыв симметричен относительно начального положения мишени снизу и сверху. Пересечение отраженной «сверхбыстрой» и «медленной» компонент происходит на расстоянии 4 см от центра мишени через 480 нс.

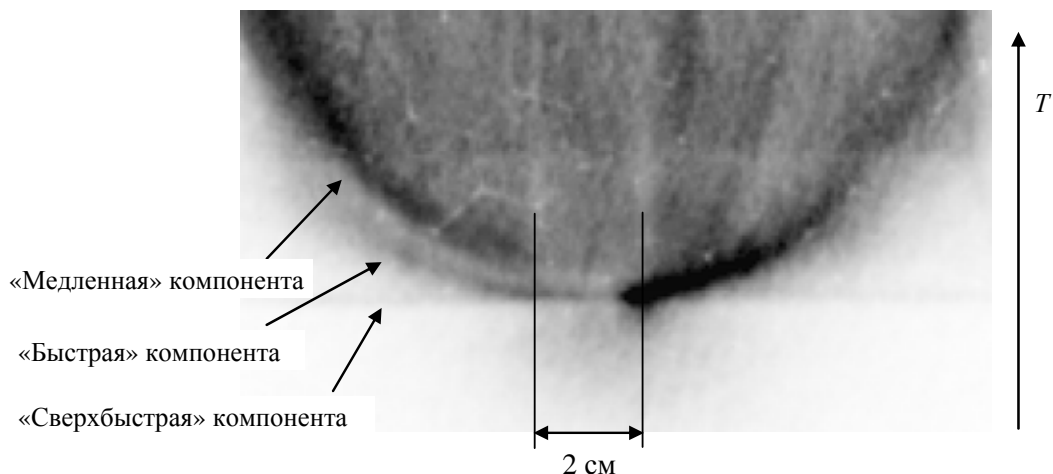


Рис. 4. Структура ударной волны при давлении остаточного воздуха $p_0 = 1$ Торр

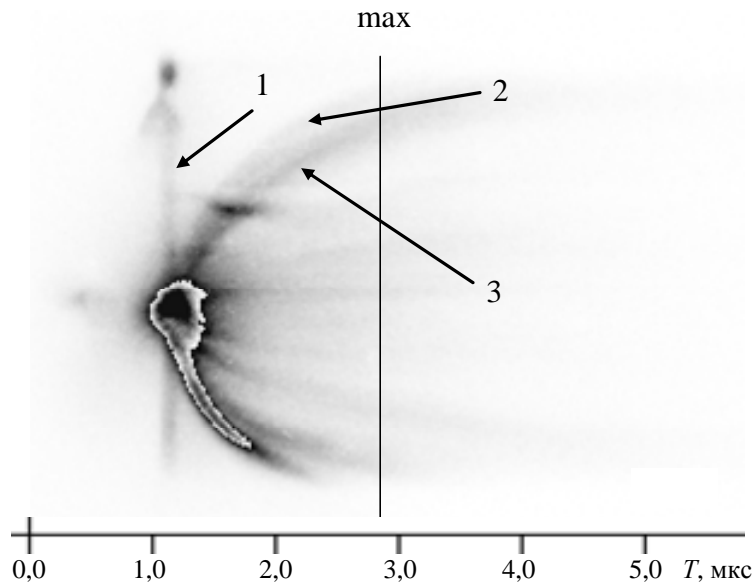


Рис. 5. Результат регистрации светимости ПО при давлении остаточного воздуха $p_0 = 0,1$ Торр: 1 – «сверхбыстрая» компонента УВ; 2 – «быстрая»; 3 – «медленная»; max – момент достижения ПО максимального размера

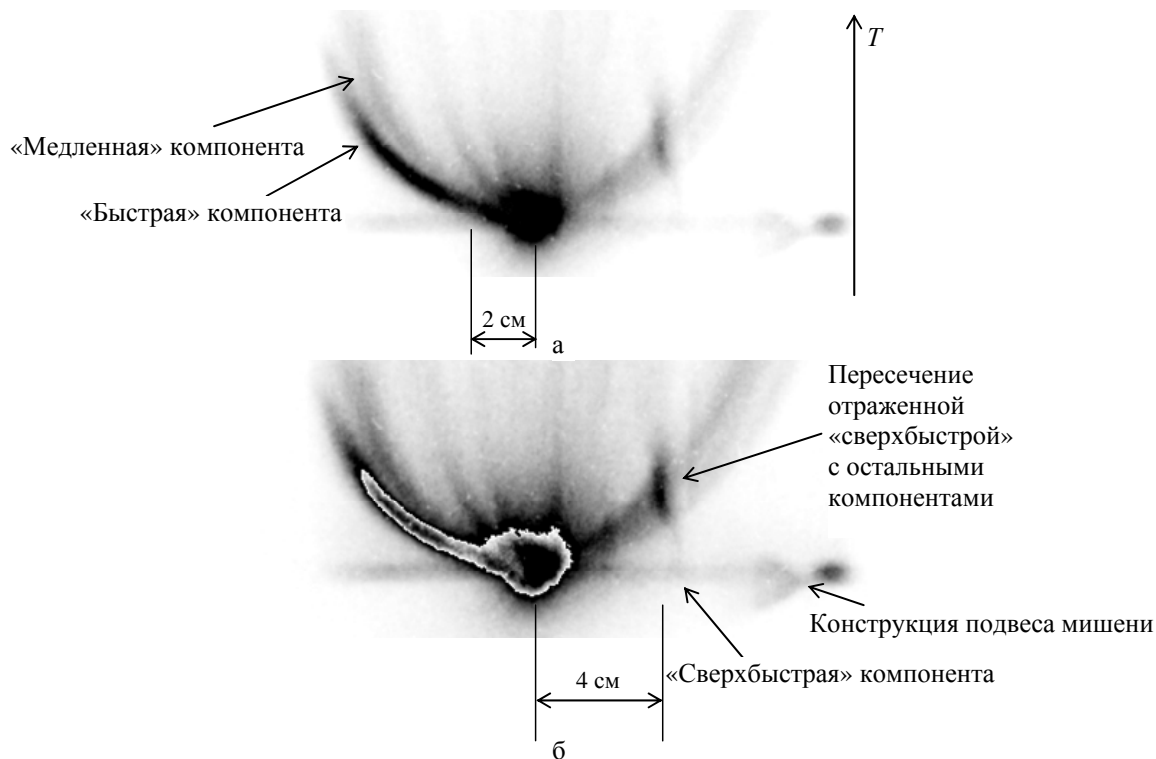


Рис. 6. Структура ударной волны при давлении остаточного воздуха $p_0 = 0,1$ Торр: *а* и *б* отличаются по контрасту в два раза для более наглядного представления результата

Полученные пространственно-временные изображения демонстрируют сложную газодинамическую структуру наблюдаемых ПО. Локальные выбросы интенсивности в виде «струй» на хронограммах могут быть образованы вследствие изначального неравномерного облучения внутренней поверхности мишеней сфокусированным лазерным излучением.

Сравнение динамики и характера развития ПО можно провести по результатам оцифровки хронограмм.

На рис. 7 представлены радиально-временные $R-T$ -диаграммы, построенные для «медленной» и «быстрой» компонент при различных давлениях фонового газа. Ноль на оси ординат указывает на начальное положение мишени.

Последние по времени точки на $R-T$ -диаграммах соответствуют началу остывания границы регистрируемого ПО и последующему уменьшению их видимого размера. Область остывания просматривается на хронограммах при контрастировании. Окончание разлета ПО в атмосферу фонового газа показано на рис. 8.

Сложность пространственно-временной структуры, наблюдаемой в ПО, отражает также пространственный профиль на заданный момент времени. На рис. 9 представлены профили светимости ПО при различных давлениях фонового газа, построенные для временных интервалов, в которых ПО достигают максимального размера (max на рис. 3, 5). Ноль на оси абсцисс соответствует началу положению мишени.

Анализ хронограмм, временных и пространственных профилей светимости позволяет сделать вывод, что при давлении $p_0 = 0,1$ Торр наблюдается более сложная и асимметричная структура ПО. При давлении $p_0 = 1$ Торр светимость ПО имеет более равномерный пространственно-

временной характер. Результаты показывают, что в случае разреженной атмосферы фонового газа неравномерность лазерного облучения мишени приводит к развитию значительно более заметных газодинамических неустойчивостей в ПО.

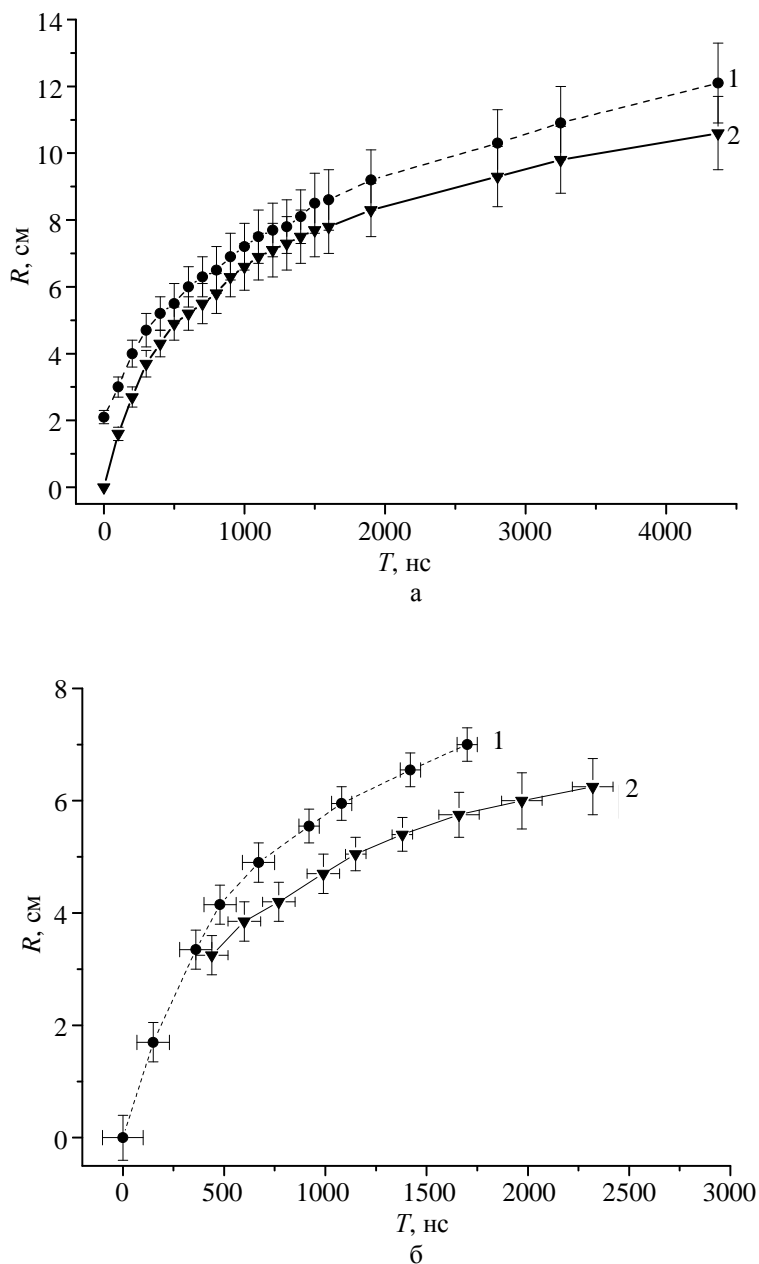


Рис. 7. R - T -диаграммы светимости ПО для «быстрой» (1) и «медленной» (2) компонент:
а - $p_0 = 1$ Торр; б - $p_0 = 0,1$ Торр

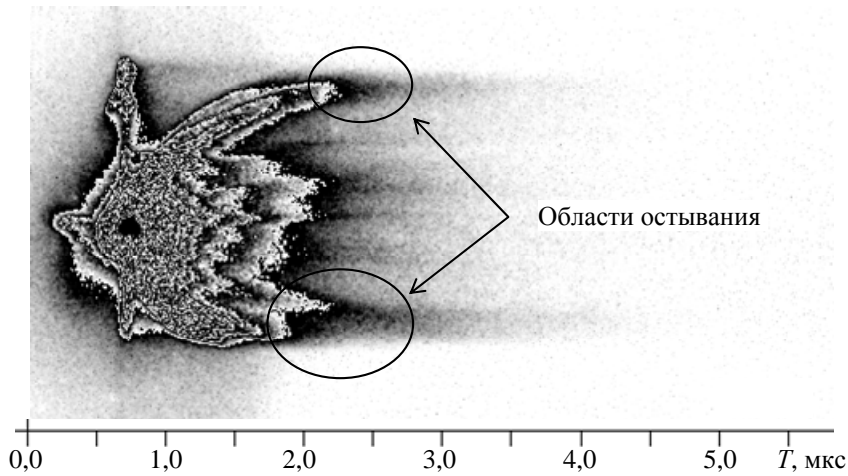


Рис. 8. Участок остывания ПО при $p_0 = 0,1$ Торр

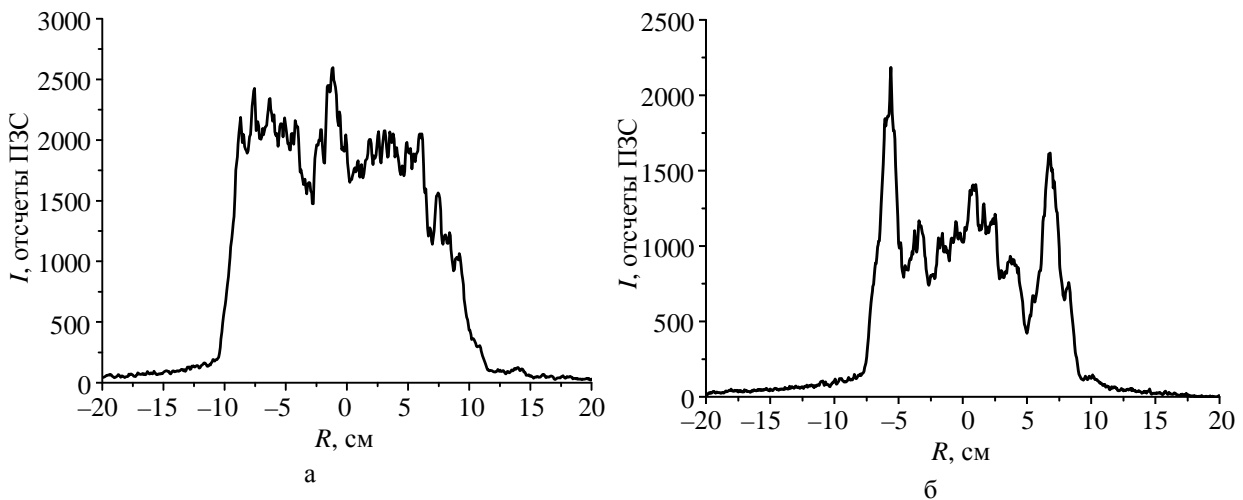


Рис. 9. Профили светимости I в сечении максимального размера L ПО, полученные при $p_0 = 1$ Торр (а) и $0,1$ Торр (б)

Исследование спектрально-временных характеристик плазменных образований

Как уже было отмечено, отличительной особенностью фотохронографов является сочетание высокого временного и пространственного разрешений. При этом пространственное разрешение может быть трансформировано в спектральное.

В развитие методов диагностики ПО на стенде МКВ-4 [5] установки «Искра-5» разработана и апробирована методика регистрации спектрального состава излучения лазерного ПО. Проведены исследования состава и временного характера излучения, возникающего при одноканальном

лазерном облучении плоской алюминиевой мишени, при различных давлениях фонового газа в камере взаимодействия. Диаметр пятна фокусировки лазерного излучения на мишени составлял ~ 3 мм при энергии первой гармоники ~ 200 Дж. Длительность лазерного импульса на полувысоте $\sim 0,5$ нс.

В экспериментах описываемый фотохронограф использован как регистрирующий элемент в оптической схеме, представленной на рис. 10.

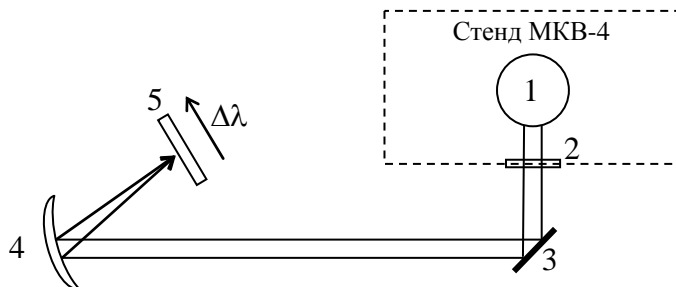


Рис. 10. Оптическая схема для диагностики спектрального состава ПО: 1 – область облучаемой мишени; 2 – диагностическое окно с установленной горизонтальной щелевой диафрагмой 0,5 см; 3 – поворотное алюминиевое зеркало; 4 – вогнутая дифракционная решетка; 5 – входная щель фотохронографа

В качестве спектрального анализатора использована вогнутая дифракционная решетка с радиусом кривизны 1 м. Размер решетки 3×4 см, количество штрихов 200 шт./мм. Входная щель хронографа расположена в фокусе решетки. В результате вдоль щели получено разложенное по спектру изображение области плазменной струи. Наблюдения проводились сбоку ПО при проецировании области торца мишени, как показано на рис. 11.

Измерения проводились в 1-м дифракционном порядке решетки. В этом случае поле зрения прибора по спектру ограничено размером фотокатода и составляет 200 нм. Оцененное по излучению ксеноновой лампы (с идентификацией линий) и лазерных монолиний спектральное разрешение методики составило 1,2 нм. Абсолютная привязка по спектру проводилась по излучению He-Ne-лазера ($\lambda = 633$ нм) и твердотельного лазера с удвоением частоты ($\lambda = 532$ нм).

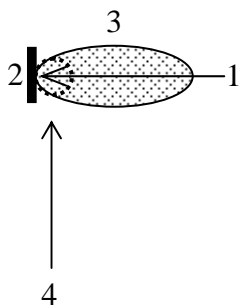


Рис. 11. Направление наблюдения плазменной струи: 1 – лазерное излучение; 2 – алюминиевая мишень; 3 – область ПО; 4 – направление наблюдения

Наблюдения в эксперименте проводились в диапазоне длин волн от 500 до 700 нм, временное разрешение составляло порядка 100 нс.

Первое измерение выполнено при остаточном давлении фонового газа в камере $P \approx 10^{-4}$ Торр. Зарегистрированная фотохронограмма показана на рис. 12.

Поскольку время жизни ПО сопоставимо с временным разрешением прибора, при анализе результата возможно привести только спектральный профиль на момент прихода лазерного импульса (рис. 13).

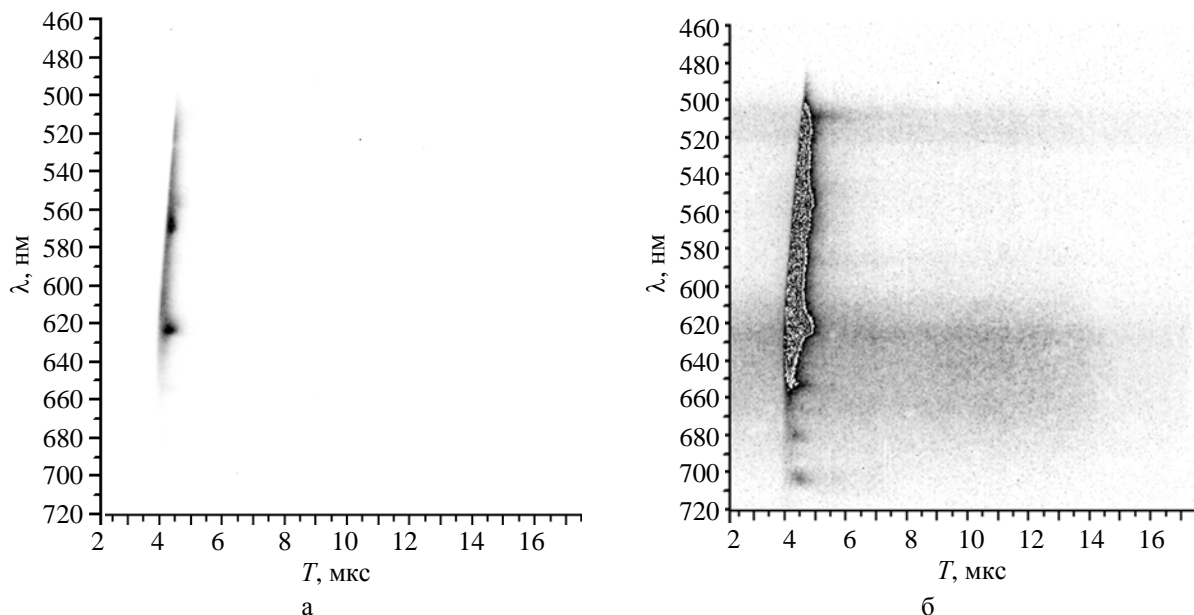


Рис. 12. Спектрально-временная хронограмма свечения ПО при давлении фоновых газа $P \approx 10^{-4}$ Торр: а и б с ранжированием по контрасту в два раза

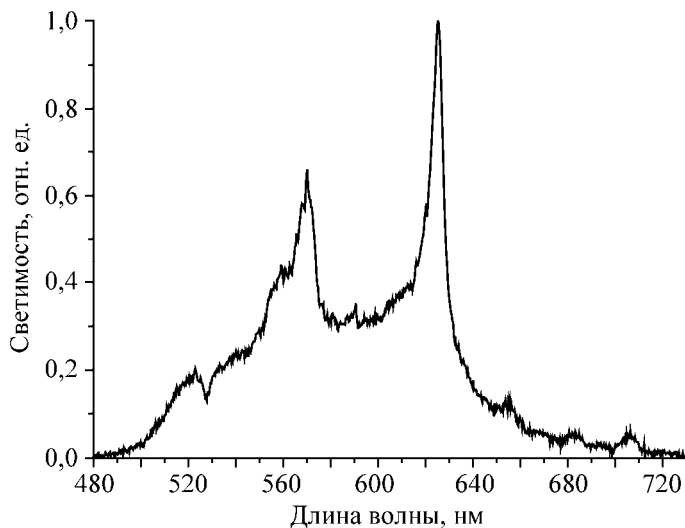


Рис. 13. Нормированный интегральный по времени спектральный профиль участка начала развития ПО

Второе измерение проведено при остаточном давлении фоновых газа в камере $P = 1$ Торр (рис. 14). Заметно увеличение времени свечения и спектрального состава ПО вследствие присутствия фоновых газа.

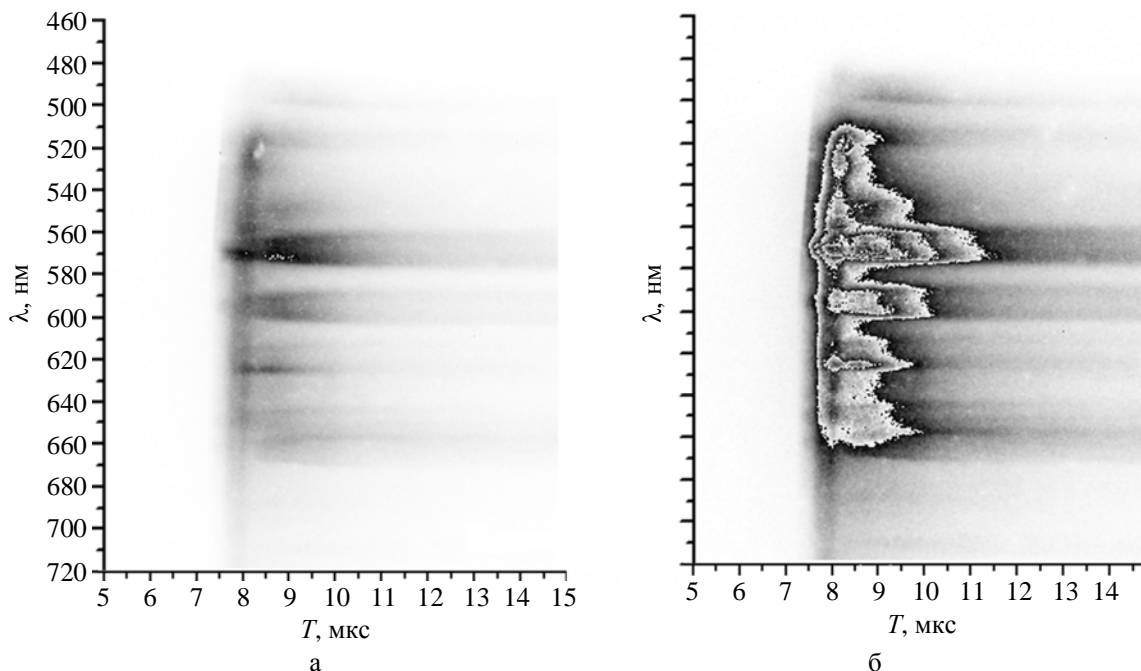


Рис. 14. Спектрально-временная хронограмма свечения ПО при давлении фонового газа $P \approx 1$ Торр: *a* и *б* – с ранжированием по контрасту в два раза

При развитии ПО в атмосфере фонового газа происходят расщепление, уширение и сдвиг линий свечения, что свидетельствует об изменении ионного состава плазменной струи при ее остывании. Для наглядности изменение спектрального состава излучения во времени показано на примере спектральных профилей, полученных в результате цифровой обработки хронограммы на различные моменты развития ПО (рис. 15).

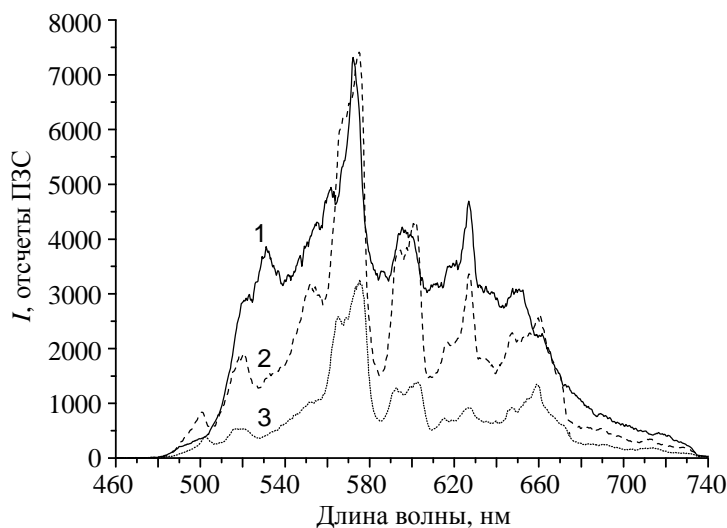


Рис. 15. Спектральные профили хронограммы, полученные при интегрировании: 1 – по фронту импульса, 2 – по спаду импульса, 3 – на конце спада импульса

Состав излучения можно оценить только качественно, поскольку на данный момент отсутствует возможность определения соотношения интенсивностей регистрируемых линий излучения вдоль наблюдаемого спектрального диапазона. В дальнейшем планируется калибровка сквозной спектральной чувствительности методики на эталонном источнике излучения, устанавливаемом в области ПО.

Заключение

Результаты проведенных исследований демонстрируют наглядность и многообразие применения фотохронографов при создании методик регистрации параметров плазмы в оптическом диапазоне.

Список литературы

1. Научно-производственная компания БИФО [Электронный ресурс]. – <http://www.bifocompany.com/rus/p-tub-pim112.php.htm>.
2. Научно-производственное предприятие «Силар» [Электронный ресурс]. – <http://www.silar.ru>.
3. Kirillov G. A., Murugov V. M., Punin V. T. et al. // Laser and Particle Beams. 1990. Vol. 8, N 4. P. 827.
4. Анненков А. И., Бессараб А. В., Галахов И. В. и др. // Квантовая электроника. 2010. Т. 40, № 10. С. 873.
5. Богуненко Ю. Д., Бессараб А. В., Бондаренко Г. А. и др. // Физика плазмы. 2005. Т. 31, № 7. С. 1.

Investigation of the Optical Characteristics of Laser Plasma by Photochronography Methods

A. G. Kravchenko, D. N. Litvin, V. V. Mis'ko, A. V. Senik, K. V. Starodubtsev,
V. M. Tarakanov

The results of photochronographic studies of spatiotemporal and spectral characteristics of laser plasma in the optical region, which were obtained at the Iskra-5 facility in different experiments, are presented. The plasma diagnostics was performed using a slit photochronographic streak camera, which is based on a PIM-112 streak tube with microsecond sweep durations.