

КОМПЛЕКСНАЯ ДИАГНОСТИКА ДИНАМИКИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Васильев С. В., Иванов А. Ю., Недолугов В. И.

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, ул. Ожешко 22,
230023 Гродно, Беларусь, ion_pe@mail.ru

Воздействие излучения мощных лазеров на поглощающие материалы представляет значительный интерес. В то же время в ряде случаев излучение мощных лазеров характеризуется недостаточной стабильностью выходных параметров, что делает и лазерный эрозионный плазменный факел (ЛЭПФ) плоховоспроизводимым объектом. Исследование динамики развития такого объекта во времени может быть проведено только в ходе единичного эксперимента.

Схема использовавшейся экспериментальной установки приведена на рисунке 1. Излучение лазера 1, пройдя через фокусирующую систему 2, попадало на образец 3, находящийся в вакуумной камере. В качестве фокусирующих применялись как однолинзовые, так и двухлинзовые системы, которые позволяли строить изображение диафрагмы 4 на поверхности образца 3. Наиболее однородное пятно фокусировки излучения диаметром 3 мм с резкими границами формировалось при использовании двухлинзовой системы с 12-кратным уменьшением и диафрагмы диаметром 40 мм. Часть излучения рожкового лазера передней гранью клина 5 направлялась в измеритель энергии ИМ0-2Н 6, входное окно которого располагалось в задней фокальной плоскости линзы 7. Отраженное задней гранью клина 5 излучение попадало на коаксиальный фотоэлемент ФЭК-14 8 и использовалось для регистрации временной формы импульса лазерного излучения запоминающим осциллографом С8-13 9. Вакуумная камера с образцом помещалась в одно из плеч голографического интерферометра Маха – Цендера 10. Длины плеч интерферометра были выровнены с точностью 1 – 2 мм. В качестве зондирующего использовалось излучение рубинового лазера 11, работающего в режиме свободной генерации, с длительностью импульса ~ 300 мкс. Зондирующее излучение заводилось в коллиматор 12, формирующий параллельный пучок диаметром 40 мм, который освещал интерферометр 10. Такие поперечные размеры зондирующего пучка позволяли исследовать не только ЛЭПФ с характерными размерами в осевом направлении ~ 20 мм, но и поведение ударных волн за его пределами. Интерферометр был состыкован с камерой СФР-1М 13, работающей в режиме лупы времени с двухрядной линзовой вставкой.

Описанная схема позволяла регистрировать развернутые во времени голограммы сфокусированного изображения ЛЭПФ. Полученные отдельные кадры голограмм обеспечивали временное разрешение не хуже 0,8 мкс (время экспозиции одного кадра).

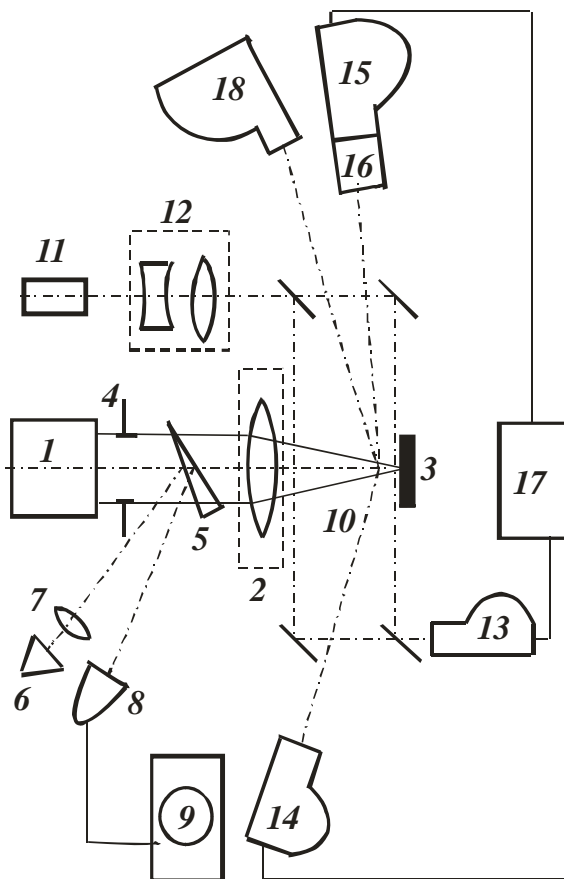


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Для контроля достоверности результатов, полученных с помощью скоростной голографической киносъемки, экспериментальная установка позволяла исследовать лазерную плазму и традиционными методами. Скорость движения фронта светящегося плазменного образования определялась по щелевым фоторазверткам, зарегистрированным камерой СФР-1М 14, работающей в режиме фоторегистратора. При этом в плоскости фотопленки строилось изображение приосевой зоны ЛЭПФ. Камера СФР-1М 15, работающая в режиме лупы времени и состыкованная со спектральной приставкой 16, позволяла регистрировать спектры испускания плазмы с временным разрешением ~ 2 мкс. Синхронизация работы трех камер СФР осуществлялась блоком коммутации 17. Интегральные спектры испускания плазмы регистрировались

спектрографом ИСП-51 18, вдоль щели которого строилось изображение осевой зоны ЛЭПФ.

Таким образом, описанная экспериментальная установка позволяла исследовать в единичном эксперименте динамику процесса, происходящего у поверхности металлического образца при действии на него мощного лазерного импульса. По восстановленным с голограмм в стационарных условиях теньвым картинам была исследована структура ЛЭПФ, измерена скорость движения плазменного фронта и фронта ударной волны. По восстановленным интерференционным картинам были получены пространственные распределения электронной плотности лазерной плазмы на разных стадиях ее развития. Достоверность полученных результатов контролировалась традиционными спектроскопическими измерениями и данными щелевых фоторазверток.

Для уточнения значений электронной плотности с учетом влияния на рефракцию тяжелых частиц были проведены исследования ЛЭПФ с помощью скоростной двухдлинноволновой голографической киносъемки. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2. Она отличается от схемы, изображенной на рисунке 1 тем, что в нее добавлены второй источник зондирующего излучения IV, включающий в себя лазер на красителе 8 и коллиматор 9, и второе устройство для киносъемки голограмм V, состоящее из камеры СФР-1М 10, работающей в режиме лупы времени с двухрядной линзовой вставкой, и объектива 11, осуществляющего сопряжение плоскости фотопленки в камере с центральным сечением исследуемого ЛЭПФ. Длительность импульса генерации лазера 8 составляла 30 – 40 мкс. При использовании такой оптической схемы одновременно регистрировались две серии сдвинутых во времени голограмм ЛЭПФ камерами СФР. Одна серия голограмм регистрировалась камерой СФР-1М 7 в свете излучения рубинового лазера ($\lambda_{11} = 0,69$ мкм), вторая – камерой СФР-1М 10 в свете излучения лазера на красителе ($\lambda_{12} = 0,58$ мкм). Для этого перед обеими камерами помещались соответствующие светофильтры.

С помощью скоростной двухдлинноволновой голографической киносъемки исследовалась лазерная эрозионная плазма, возникающая, под действием излучения мощного лазера на красителе у поверхности образца как при атмосферном, так и при пониженном (10^{-2} мм рт. ст.) давлении окружающего мишень воздуха. Средняя плотность потока воздействующего лазерного излучения на поверхности образца варьировалась в пределах 5 – 30 МВт/см². При плотностях частиц, наблюдаемых в лазерной плазме при таких условиях эксперимента, можно считать, что показатель преломления плазмы является аддитивной величиной и обусловлен наличием в ЛЭПФ различных компонент.

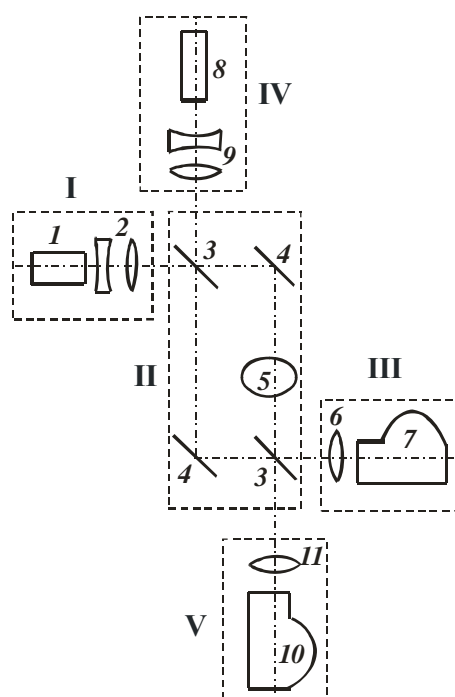


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки для двухдлинноволновой скоростной голографической кино съемки

Чтобы исключить вклад в рефракцию молекул атмосферных газов, были проведены исследования лазерной плазмы, возникающей у поверхности образца при пониженном давлении (10^{-2} мм рт.ст.) окружающего его воздуха. Результаты экспериментов показали, что различие в смещении полос на интерферограммах, обусловленное различием длин волн зондирующего излучения ($\lambda_{11} = 0,69$ мкм и $\lambda_{12} = 0,58$ мкм), находится в пределах относительной погрешности измерений, которая составляла 10%. Это подтверждает предположение, что при таких условиях лазерного воздействия из-за незначительной концентрации атомов и ионов материала образца в эрозионной плазме их вклад в рефракцию значительно меньше, чем вклад электронов.

Изучение ЛЭПФ при атмосферном давлении окружающего воздуха при тех же параметрах воздействующего излучения с помощью скоростной двухдлинноволновой голографической кино съемки позволило разделить вклад в рефракцию плазмы молекул воздуха и электронов в предположении малости вклада тяжелых частиц материала мишени. В результате совместной обработки восстановленных с голограмм интерференционных картин были получены продольные (по оси факела) распределения средних по диаметру сечения факела концентраций электронов и молекул воздуха.