

УДК 533.9.082

## ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ, ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

© 2020 г. С. М. Аракелян<sup>1</sup>, С. В. Жирнова<sup>1</sup> \*, А. Ф. Галкин<sup>1</sup>, Д. А. Кочув<sup>1</sup>,  
Е. Л. Шаманская<sup>1</sup>, К. С. Хорьков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Владимирский государственный университет Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых”,  
Владимир, Россия

\*E-mail: svetlanna\_vik@mail.ru

Поступила в редакцию 20.09.2019 г.

После доработки 15.11.2019 г.

Принята к публикации 27.11.2019 г.

Измерена температура плазмы в среде аргона и азота при различных значениях давления двумя методами: с применением микропирометра и по относительной интенсивности спектральных линий. Полученные данные могут быть использованы для расчетов параметров плазмы: концентрации электронов, частоты столкновений с атомами и молекулами.

DOI: 10.31857/S0367676520030060

### ВВЕДЕНИЕ

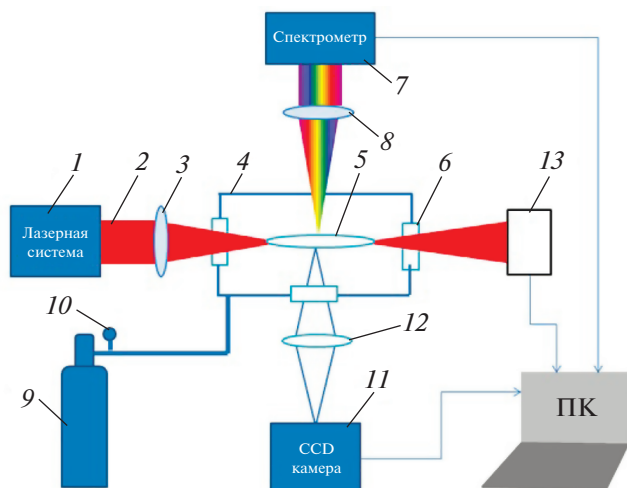
В последнее время значительное внимание уделяется исследованию взаимодействия оптически прозрачных сред с ультракороткими (фемтосекундными) импульсами, в результате которого начинает развиваться филаментация. Явление филаментации состоит в пространственной и временной локализации энергии в мощном лазерном фемтосекундном импульсе. Благодаря высокой интенсивности таких импульсов в среде возникают нелинейные эффекты. Филаментация фемтосекундного лазерного импульса сопровождается множеством различных процессов, например, формируются плазменные каналы, происходит генерация излучения суперконтинуума (т. н. “белого света”) и конечной эмиссии.

Одним из практических приложений явления филаментации является прецизионная обработка материалов. Актуальным является вопрос изучения методов управления пространственным распределением филаментов, что позволит получать упорядоченные структуры при обработке материалов в режиме филаментации. Для увеличения эффективности получения наночастиц при абляции с поверхности под воздействием лазерного излучения используется энергия транспортируемая по электрической дуге [1–4]. При этом эффективная коррекция параметров электрической дуги может быть осуществлена с помощью оптического разряда (ОР). Для оптимизации ОР необходимо, в частности знать характеристики плазмы разряда, такие, как концентрация электронов,

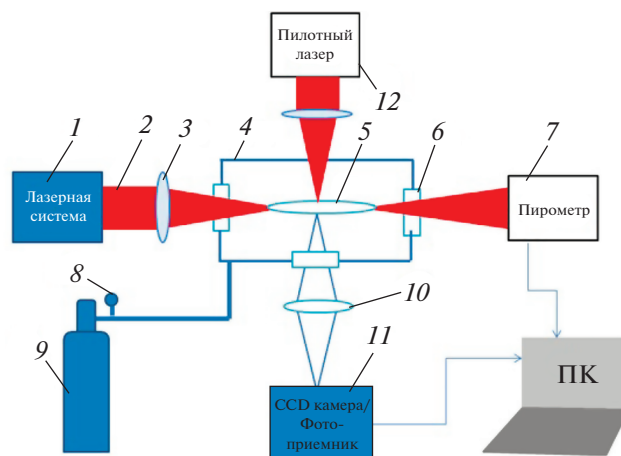
температура плазмы, а также ее проводимость. Поэтому измерения электронной температуры лазерно-индуцированных плазменных каналов представляют практический интерес. В работе для измерения температуры использовали два подхода: измерение по относительной интенсивности спектральных линий и прямые измерения при помощи микропирометра.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Спектральная диагностика занимает особое место среди других методов исследования плазмы, так как она обеспечивает бесконтактные и быстрые измерения. Для измерения электронной температуры лазерно-индуцированных плазменных каналов в средах аргона и азота при различных давлениях по относительным интенсивностям спектральных линий использовали установку, схема которой представлена на рис. 1. Лазерное излучение 2 фемтосекундной лазерной системы фокусировали во внутренний измерительной емкости 4 с помощью фокусирующей линзы с фокусным расстоянием 150 мм. В фокальной плоскости линзы формируется оптический пробой. Геометрические характеристики и яркость свечения регистрировали CCD-камерой. Емкость заполняли газом из баллона, давления контролировали при помощи редуктора, оснащенного запорной и измерительной аппаратурой. Спектр выходного излучения измеряли при помощи спектрометра 7. Экспериментальные данные со спектрометра и CCD-камеры в



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – фемтосекундная лазерная система; 2 – лазерное излучение; 3, 12, 8 – фокусирующая линза; 4 – измерительная емкость; 5 – область оптического пробоя и образования плазменного канала; 6 – входные и выходные окна емкости; 7 – спектрометр; 9 – баллон с газом; 10 – редуктор; 11 – CCD-камера; 13 – измеритель мощности.



**Рис. 2.** Схема эксперимента: 1 – фемтосекундная лазерная система; 2 – лазерное излучение; 3, 10 – фокусирующая линза; 4 – измерительная емкость; 5 – область оптического пробоя и образования плазменного канала; 6 – входные и выходные окна емкости; 7 – пирометр высокотемпературный; 8 – редуктор; 9 – баллон с газом; 11 – CCD-камера/фотоприемник; 12 – пробный лазер.

процессе проведения измерений сохранялись на персональном компьютере.

В результате измерений были получены спектры излучения плазмы при различных значениях давления. Время экспозиции составило 2 с. Длительное время экспозиции необходимо для накопления и усреднения регистрируемого сигнала. Параметры съемки спектров были аналогичными для всех проведенных экспериментов.

Расчет электронной температуры проводили по методике, описанной в [5]. Формула для расчета электронной температуры имеет вид:

$$T_e = \frac{-\Delta E}{\left( \ln \left( \frac{I_2}{I_1} \right) - \ln \left( \frac{g_2 f_2 \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^3}{g_1 f_1} \right) \right) k}, \quad (1)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – длина волны спектральной линии (для расчетов удобно использовать наиболее разнесенные пары линий, например, для аргона использовали линии 415.85 и 852.14 нм, для азота – 746.83 и 493.50 нм),  $I$  – интенсивности спектральных линий, измеренные спектрометром,  $\Delta E$  – разность энергий возбуждения исследуемых линий,  $f$  – сила осциллятора,  $g$  – статистический вес уровня.

Для измерения электронной температуры лазерно-индуцированных плазменных каналов в средах аргона и азота при различных давлениях методом фотопиromетрии использовали схему, показанную на рис. 2. В качестве источника использовали импульсную лазерную систему 1, со следующими характеристиками: длительность импульса – 280 фс, частота следования импуль-

сов – 10 кГц, энергия в импульсе – 150 мкДж, длина волны излучения – 1030 нм. Лазерное излучение фокусировали в измерительную емкость плоско-выпуклой линзой с фокусным расстоянием 150 мм. Излучение лазерно-индуцированной плазмы 5 с помощью линзы собирали в коллимированный пучок, который направляли через дихроичное зеркало в объектив микропиromетра. Дихроичное зеркало использовали для отсечения излучения основной длины волны, которое могло повредить фотодетектор. Показания фотодетектора поступали на компьютер. Данные обрабатывали про помощи специализированного программного обеспечения.

С помощью данной схемы была также измерена степень поглощения лазерного излучения плазмой (степень черноты). Лазерное излучение пробного полупроводникового лазера 12 с длиной волны 650 нм фокусировали плоско-выпуклой линзой с фокусным расстоянием 150 мм на область лазерно-индуцированной плазмы 5. Далее излучения попадало на измерительную головку фотоприемника. Фиксировали значения мощности при условии когда через лазерную плазму проходит основное фемтосекундное и пробное излучение, и когда проходит только излучение пробного лазера.

При различном давлении положение плазменного канала меняется, что, вероятно, связано с флуктуациями плотности. При измерении коэффициента поглощения важным фактором является условие прохождения пробного излучения строго через плазменный канал. Для точного по-

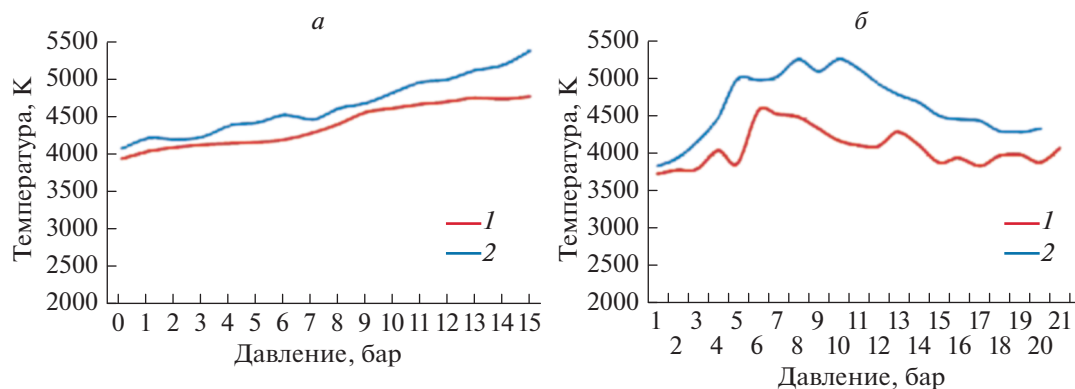


Рис. 3. Графики зависимости температуры плазменных каналов от давления азота (а) и аргона (б); 1 – измерения методом относительной интенсивности спектральных линий; 2 – пирометрические измерения.

зиционирования и лазера был использован прецизионная трехкоординатная подвижка.

Для измерения температуры лазерно-индуцированной плазмы использовали высокотемпературный микропирометр МП-1001. Прибор позволяет измерять яркостную температуру в диапазоне от 1500 до 5000 К. Пересчет яркостной температуры  $T_{я}$  в истинное значение температуры  $T_{ист}$  выполняли в соответствии с формулой [6, 7]:

$$T_{ист} = \frac{T_{я} C_2}{C_2 + \lambda T_{я} \ln \alpha}, \quad (2)$$

где  $\lambda = 650$  нм опорная (калиброванная) длина волны,  $C_2 = 0.014388$  м · К – вторая постоянная Планка,  $\alpha$  – степень черноты (коэффициент поглощения), измеренная по вышеописанной методике.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 3 представлены графики зависимости температуры плазменных каналов от величины давления, полученные с использованием двух различных методов (рис. 3а – в среде азота; рис. 3б – в среде аргона). Наблюдается увеличение значений температуры при повышении давления. Значения температуры, полученные двумя различными способами, хорошо соотносятся друг с другом. Разница в значениях не превышает 10% по абсолютной величине. Температура плазмы, измеренная обоими способами, составляет ~4000–5000 К в зависимости от давления. Для азота в указанном диапазоне температур наблюдается ее монотонное возрастание при увеличении давления до 15 бар, а для аргона имеется максимум при давлениях порядка 7–9 бар.

Как показывают оценки, характерное время теплообмена электронов с тяжелыми частицами

составляет доли микросекунды (быстрая релаксация), а межимпульсный период – 100 мкс, таким образом, определенная за время измерения электронная температура соответствует газовой температуре. Другими словами, реализуется локальное термодинамическое равновесие.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерена электронная температура плазмы, индуцированной фемтосекундным лазерным излучением в среде аргона и азота, при разных значениях давления двумя методами: по относительной интенсивности спектральных линий, и с использованием микропирометра. Полученные результаты могут быть востребованы при расчете таких параметров плазмы, как концентрация электронов и частота столкновений между атомами и молекулами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ivashenko A.V., Koshuev D.A., Chkalov R.V. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1164. Art. № 012021.*
2. *Ivashenko A.V., Koshuev D.A., Chkalov R.V. // LIEES Mater. Today. Proc. 2019. № 11. P. 465.*
3. *Галкин А.Ф., Кочуев Д.А. // Тез. Всеросс. науч.-практ. конф. XII Столетовские чтения. (Владимир, 2019). С. 18.*
4. *Галкин А.Ф., Журнова С.В. // Тез. Всеросс. науч.-практ. конф. XII Столетовские чтения. (Владимир, 2019). С. 14.*
5. *Лукьянов С.Ю. Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. М.: Наука, 1975. 408 с.*
6. *Магунов А.Н. // Научн. приборостр. 2010. Т. 20. № 3. С. 22.*
7. *Аракелян С.М., Галкин А.Ф., Журнова С.В., Осипов А.В. // Динам. сложн. сист. 2015. Т. 9. № 1. С. 48.*