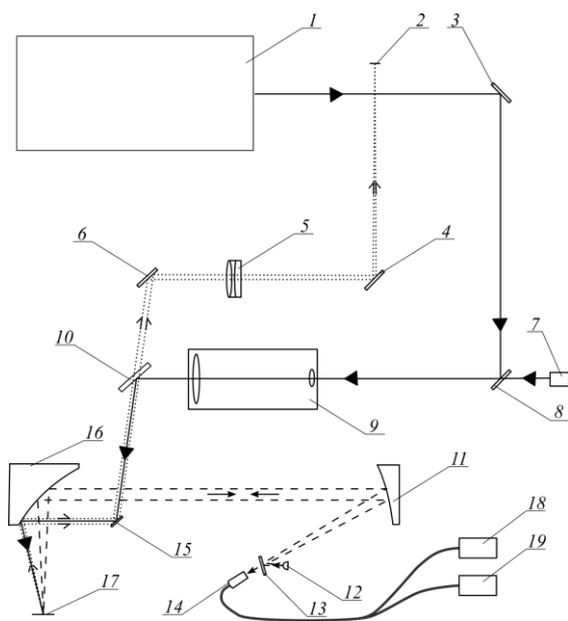


## ЛАЗЕРНЫЙ АТОМНО-ЭМИССИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР С АХРОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Воропай Е.С., Гулис И.М., Зажогин А.П., Шевченко К.А., Радько А.Е., Кирсанов А.А.,  
Купреев А.Г., Самцов М.П., Тарасов Д.С.  
Белорусский государственный университет  
Минск, Республика Беларусь

Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия обеспечивает высокую чувствительность, оперативность и возможность проведения исследования образцов с пространственным разрешением, лимитируемым размером сфокусированного лазерного пучка на образце [1]. На кафедре лазерной физики и в лаборатории спектроскопии НИИ Прикладных физических проблем БГУ разработан и изготовлен лазерный атомно-эмиссионный спектрометр (ЛАЭМС), в котором использованы принципиальные и схемные решения, позволяющие повысить его эксплуатационные характеристики. Оптическая схема прибора представлена на рисунке 1.



1 – двухимпульсный лазер, 2 – видеокамера,  
3,4,6,15 – неселективные плоские зеркала,  
5 – изображающий объектив (наблюдательный канал),  
7 – прицельный лазер, 8 – селективное плоское  
зеркало, 9 – телескоп, 10 – полупрозрачное плоское  
зеркало, 11 – параболическое зеркало (внеосевой угол  
30°), 12 – светодиод подсветки, 13 – плоское зеркало  
(нормально убрано, ставится при необходимости  
подсветки объекта), 14 – вход оптоволоконна (к  
спектрометру), 16 – параболическое зеркало  
(внеосевой угол 90°), 17 – объект,  
18, 19 – спектрометры.

Рисунок 1 – Схема ЛАЭМС

В качестве источника возбуждения использован твердотельный лазер 1 с полупроводниковой накачкой (разработка Института физики НАН Беларуси). Использование полупроводниковой накачки вместо накачки импульсными лампами позволяет существенно увеличить ресурс системы и повысить стабильность выходных характеристик. Лазер содержит два излучателя и обеспечивает генерацию сдвоенных импульсов длительностью не более 15 нс с длиной волны 1064 нм с варьируемым в пределах 1-100 мкс интервалом с энергиями до 100 мДж при частотах следования пар до 10 Гц.

Для обеспечения ахроматичности систем фокусировки лазерного излучения на объекте 17 и системы светосбора и ввода в оптоволоконный вход 14 полихроматоров 18, 19 излучения плазмы предложено вместо рефрактивных объективов использовать зеркальные – внеосевые параболоиды 16, 11. Существенным недостатком традиционно используемых в приборах для ЛАЭМС рефрактивных объективов является сложность достижения приемлемого уровня ахроматизации в широком спектральном диапазоне, включающем УФ-область (ограниченность выбора прозрачных материалов). В то же время наличие хроматической aberrации приводит к различиям в эффективности ввода излучения в оптоволоконный кабель для различных спектральных компонент излучения плазмы, что может выступать в качестве источника погрешностей в измерениях относительных интенсивностей линий. Обращенный к объекту 17 зеркальный объектив 16 выполняет функции фокусировки возбуждающего пучка и распространяющегося соосно ему пучка полупроводникового прицельного лазера 7 ( $\lambda=650$  нм), а также обеспечивает светосбор излучения плазмы и формирует расширенный параллельный пучок, который затем фокусируется на вход оптоволоконного кабеля зеркальным объективом 11. Ввод лазерного пучка в объектив 16 осуществляется параллельно главной оптической оси параболоида при помощи вспомогательного плоского зеркала 15 с нормально, ориентированной под углом 45° по отношению к указанной оси. Центр этого зеркала находится

на центральной оси зеркала *16*, что обеспечивает неизменность положения центра пятна сфокусированного лазерного пучка на поверхности образца (мишени) при перемещении образца вдоль оси лазерного пучка (например, с целью изменения плотности энергии на мишени). Зеркало *15* имеет световой диаметр 10 мм – малый в сравнении с диаметром параболического объектива (50 мм), поэтому виньетирование собираемого параболическим объективом эмиссионного излучения плазмы с учетом затенения, внесенного элементами держателя малого зеркала, не превышает 10%.

Как компромисс между компоновочными требованиями и необходимостью фокусировки излучения лазера в пятно диаметром 50-100 мкм, фокусные расстояния объективов выбраны близкими к 100 мм. Благодаря большому внеосевому углу зеркала *16* обеспечивается расстояние около 70 мм от защитного кварцевого стекла камеры образцов до поверхности образца.

Использование внеосевых параболических зеркал, работающих при значениях внеосевых углов 90° (зеркало *16*, эффективное фокусное расстояние 101,6 мм) и 30° (зеркало *11*, эффективное фокусное расстояние 136,1 мм), предъявляет требования к параллельности фокусируемого лазерного пучка главным осям параболических зеркал. Отклонение от указанной параллельности на градус и более приводит, согласно проведенным расчетам и предварительным экспериментам, к неприемлемому астигматизму как в сфокусированном пятне на поверхности образца, так и в изображении этого пятна на входе оптоволоконного кабеля *14*. С использованием простых автоколлимационных юстировочных процедур требование параллельности легко удовлетворяется. В то же время намеренное отклонение с лазерного пучка от параллельности главной оси параболоида (путем наклона зеркала *15*) позволяет получать фокальные пятна в виде астигматических фокалей (приближенно эллиптической формы) с варьируемыми длинами и ориентациями осей, при этом короткая ось может составлять единицы микрометров, а длинная – сотни. Такие формы пятен могут представлять интерес при работе с образцами со сложной неоднородной структурой поверхности, обеспечивая расширение возможностей выбора областей воздействия.

Для обеспечения требуемого диаметра сфокусированного на образце пятна (не более 70 мкм) при расходимости двухимпульсного лазерного источника (около 2 мрад) пучок лазера пропускается через 5-кратный телескопический расширитель *9*, снижающий расходимость до уровня примерно 0,5 мрад. Перед входом в оптоволоконно размещается поворотное вспомога-

тельное зеркало *13*, при введении которого в световой пучок вход в оптоволоконно перекрывается, а в оптическую систему, образованную двумя параболическими зеркалами, направляется излучение от зеленого светодиода *12* для подсветки поверхности мишени. Система, формирующая изображение поверхности, включает параболическое зеркало с внеосевым углом 90° (*16*), длиннофокусный (300 мм) низкосветосильный объектив *5*, глухие (*4,6,15*), и полупрозрачные (*10*) плоские зеркала, а также видеочкамеру *2*.

Образец размещается на столе, перемещаемом вдоль луча с использованием линейной низкопрофильной позиционируемой площадки (ручное перемещение), а в двух направлениях, перпендикулярных лучу – с помощью линейных моторизованных позиционируемых площадок, что обеспечивает возможность компьютерно-управляемого сканирования поверхности образца.

Для регистрации спектров плазмы используются спектрометры с регистрацией на ПЗС-линейке: *18* – на основе полихроматора SDH-1 (ЗАО «СОЛАР Лазерные Системы», спектральный диапазон 190-800 нм, разрешение 0,1 нм при ширине одновременно регистрируемого спектрального интервала 130 нм) и *19* – решеточный спектрометр оригинальной конструкции, описанный в [2]. Спектральный диапазон регистрации 400–1060 нм; для базового диапазона 400–590 нм спектральное разрешение составляет 0,5 нм. Особенностью спектрометра является возможность регистрации спектров испускания с временным разрешением, что позволяет получать информацию о динамике процессов в лазерно-индуцированной плазме. Рабочие диапазоны временных измерений – 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 мкс; минимальное временное разрешение 20 нс.

Управление режимами работы лазерных источников, системами сканирования образца и системами регистрации спектров осуществляется с использованием оригинального программного обеспечения.

#### Литература

1. Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). Fundamentals and Applications / Eds. A.W. Miziolek, V. Palleschi, I. Schechter. – Cambridge University Press, 2006. – 620 p.
2. Воропай, Е.С. Многоканальный регистратор кинетики свечений в диапазоне 0.05–1000 мкс для атомно-эмиссионной спектроскопии / Е.С. Воропай, И. М. Гулис, К. Ф. Ермалицкая, Ф. А. Ермалицкий, К. Н. Каплевский, А. Е. Радько, К. А. Шевченко // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – № 4. – С. 154–155.

