

лазера для времени экспозиции 6,25 мс. Эти импульсы поступают непосредственно на схему стабилизации тока. При этом устройство обеспечивает плавную регулировку частот в диапазоне от 80 до 120 Гц, а также время экспозиции от 31,25 мкс до постоянного свечения с регулировкой интенсивности во всём диапазоне.

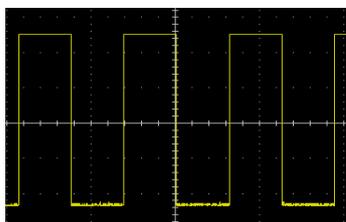


Рисунок 2 – Оциллограмма импульсов управления

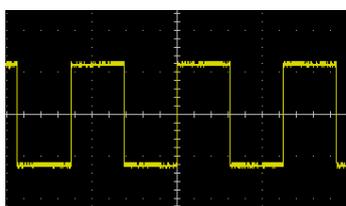


Рисунок 3 – Оциллограмма тока на шунте

На рисунке 3 представлена осциллограмма изменения тока на лазерном диоде с мощностью излучения 50 мВт при том же времени экспозиции.

Как можно видеть из рисунка, схема обеспечивает высокую степень стабилизации тока без высокочастотных шумов и токовых выбросов.

Дальнейшей задачей является лабораторное исследование влияния УФ излучения с длиной волны 405 нм в различных режимах на биологические образцы. Кроме того планируются исследования различных материалов оптических элементов для получения минимальных потерь мощности и равномерного облучения обрабатываемой поверхности.

Литература

1. Генина Э.А. Методы биофотоники: фототерапия. Учебное пособие. – Саратов: Новый ветер, 2012. – 119 с.
2. Доувер Дж.С. Лазеро- и светолечение. Под ред. Арндта К.А., пер. с англ. Под общ. Ред. Виссарионова В.А. – Москва: Рид Элсивер, Том 2., 2010. – 152 с.
3. Неворотин А. И. Введение в лазерную хирургию. Учебное пособие. – Спб.: СпецЛит, 2000. – 175 с.
4. Goldman L., Blaney D.J., Kindel D.J. et al. Effect of the laser beam on the skin: preliminary report. J Invest Dermatol, 1963. – С. 121–122.

УДК 681.785.554

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.

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 обеспечи-

вает 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 аберрации приводит к различиям в эффективности ввода излучения в оптоволоконный кабель для различных спектральных компонент излучения плазмы, что может выступать в качестве ис-

точника 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 нормалью, 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, вносимого элементами держателя малого зеркала, не превышает 10 %.

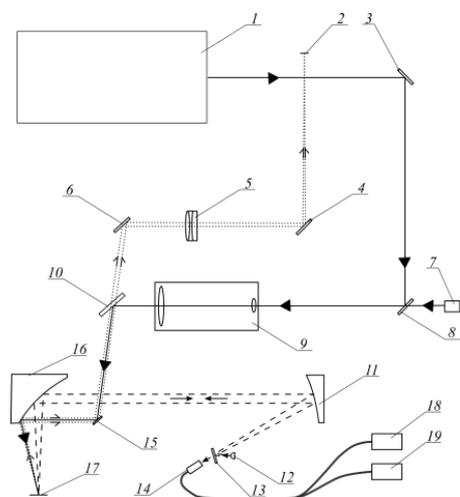


Рисунок 1 – Схема ЛАЭМС:

- 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 оптоволоконного кабеля (с спектрометром); 16 – параболическое зеркало (внеосевой угол 90°); 17 – объект; 18, 19 – спектрометры

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 (приблизненно 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 возможности 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 оптоволокно размещается поворотное вспомогательное зеркало 13, при введении которого в световой пучок вход в оптоволокно 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 полупрозрачное (10) плоские зеркала, а также видеокамеру 2.

Образец размещается на столе, перемещаемом вдоль луча с использованием линейной низкопрофильной позиционируемой площадки (ручное пе-

ремещение), 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-индуци-

рованной 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. 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.

УДК 681.785.57

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ СПЕКТРАЛЬНО-ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ В СПЕКТРОСКОПИИ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Гулис И.М., Купреев А.Г.

*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Единовременная мультиспектральная съемка (EMCC, snapshot multispectral imaging [1]) интенсивно развивается благодаря наличию элементной базы (компактные оптические устройства и элементы для спектральной селекции, матричные фотодетекторы большого размера и разрешения) и обширности областей приложения (оперативное получение информации о протяженных пространственных областях, регистрация информации о нестационарных процессах). Существующие решения EMCC для спектральной селекции используют, как правило, дисперсионные системы и устройства на основе перестраиваемых полосовых фильтров [2]. Интерферометр Фабри-Перо (ИФП) обладает уникальными качествами – высокой спектральной селективностью, простотой и компактностью, – которые делают его перспективным спектральным селектором для EMCC.

В существующих подходах ИФП используется скорее как вариант перестраиваемого фильтра [3]. Для единовременного получения на детекторе набора сечений пространственно-спектрального куба данных $I(x, y, \lambda)$ предлагается использовать ИФП, работающий в коллимированных пучках существенно наклонно к оптической оси системы (к примеру, установка перед изображающим объективом для работы с удаленным объектом, либо между коллиматорным и камерным объективами). На входе системы

необходим фильтр для устранения сигнала из других спектральных полос. На детекторе формируется изображение, пересеченное интерференционными полосами (кольцами) – периферийной частью интерференционной картины. Таким образом, каждый разрешаемый пространственный элемент отображается на детекторе, если попадает в полосу пропускания ИФП. Иными словами, на детекторе отображается вариант наклонного сечения куба данных (рисунок 1, а). Для сравнения приведено единовременное сечение куба данных для дисперсионного pushbroom-спектрометра, а также разработанных авторами многоцелевого изображающего спектрометра [4] и полихроматора изображения [5] (рисунки 1, б, в и г соответственно).

При любом подходе EMCC регистрируемая на детекторе информация представляет собой неполную проекцию куба данных, степень неполноты определяется, главным образом, используемым вариантом построения проекции и характеристиками пространственно-спектрального селектора. В предлагаемом подходе регистрируемая проекция задается отображением аппаратной функции ИФП (функция Эйри) на плоскость изображения (изочастотные кольца). Такой подход особенно эффективен для регистрации нешироких спектральных интервалов, приблизительно соответствующих области свободной дисперсии ИФП. Существенное преимущество перед другими