

ЛАЗЕРНЫЙ АТОМНО-ЭМИССИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР С АХРОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Е. С. Воропай¹, И. М. Гулис¹, Д. С. Тарасов^{1,2*}, К. Ф. Ермалицкая¹, М. П. Самцов²,
А. Е. Радко², А. П. Зажогин¹, К. А. Шевченко², А. А. Кирсанов²

УДК 543.423

¹ Белорусский государственный университет,
220030, Минск, Беларусь; e-mail: voropay@bsu.by

² Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко
Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

(Поступила 24 марта 2021)

Разработан и изготовлен лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр (ЛАЭМС) с ахроматической оптической схемой для научно-исследовательских и учебных целей. Новый спектрометр отвечает всем требованиям, предъявляемым к аппаратуре для лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии, а также обладает рядом преимуществ, обусловленных особенностями конструкции и технических характеристик компонентов ЛАЭМС. В качестве источника возбуждения спектрометр включает в себя два YAG:Nd-лазера с накачкой полупроводниковыми матрицами лазерных диодов с регулируемой энергией (от 0 до 100 мДж) и интервалом между импульсами (от 1 до 100 мкс), средняя длительность импульсов ≈ 15 нс. ЛАЭМС позволяет проводить исследования с использованием как одноимпульсного, так и двухимпульсного режима лазерной абляции и возбуждения эмиссионных спектров. При двухимпульсной лазерной абляции на ЛАЭМС зарегистрировано значительное (до 10 раз) увеличение аналитического сигнала при незначительном (1.5–2 раза) увеличении деструкции поверхности.

Ключевые слова: лазерная абляция, лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия, сдвоенные лазерные импульсы, спектрометр.

We developed and manufactured a laser atomic emission multichannel spectrometer (LAEMS) with an achromatic optical scheme for research and educational purposes. The new spectrometer fits all the requirements for equipment for laser-induced breakdown spectroscopy and also has a number of advantages due to the design and technical characteristics of its components. As an excitation source, the spectrometer includes two Nd:YAG lasers pumped by semiconductor laser diode arrays, with adjustable energy (from 0 to 100 mJ) and pulse interval (from 1 to 100 μ s); the average pulse duration ≈ 15 ns. LAEMS permits to carry out studies using both single-pulse and double-pulse laser ablation and excitation of emission spectra. Using double pulse laser ablation on LAEMS, a significant (up to 10 times) increase in the analytical signal was recorded, with a slight (1.5–2 times) increase in the surface destruction.

Keywords: laser ablation, laser induced breakdown spectroscopy, double laser pulses, spectrometer.

Введение. Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия — один из наиболее быстро развивающихся и широко используемых методов элементного качественного и количественного анализа объектов в последние два десятилетия [1–3]. К преимуществам данного метода относятся применимость к широкому классу веществ, возможность анализа, в том числе дистанционного, как твердых образцов, так и объектов в жидкой фазе, малые количества вещества, необходимые для анализа (10^{-10} – 10^{-11} г), незначительная деструкция поверхности (диаметр кратера ≤ 100 мкм, толщина

LASER ATOMIC EMISSION SPECTROMETER WITH ACHROMATIC OPTICAL SYSTEM

E. S. Voropay¹, I. M. Gulis¹, D. S. Tarasau^{1,2*}, K. F. Ermalitskaia¹, M. P. Samtsov², A. E. Radko²,
A. P. Zajogin¹, K. A. Shevchenko², A. A. Kirsanov¹ (¹ Belarusian State University, Minsk, 220030, Belarus; e-mail: voropay@bsu.by; ² A. N. Sevchenko Institute for Applied Physical Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus)

испаряемого слоя — от десятых долей мкм), отсутствие предварительной механической и химической подготовки поверхности [1, 3—5]. Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия применяется для исследования биообъектов (растений, лишайников, образцов, биологических жидкостей и тканей человека и животных), промышленных изделий (анализ как сырья, так и готовой продукции), предметов искусства, ювелирных изделий, артефактов, строительных материалов [1—10]. На основании большого количества экспериментальных и теоретических работ определены оптимальные параметры лазерного излучения для проведения анализа различного рода объектов. Так, наиболее распространенными условиями, используемыми в аналитических целях в лазерно-атомно-эмиссионной спектроскопии, являются излучение YAG:Nd-лазера с $\lambda = 1064$ нм (реже 532 нм), длительностью лазерных импульсов 10—15 нс и энергией 20—100 мДж [1, 2, 5, 7].

Ряд научных исследований посвящен использованию в качестве источника лазерной абляции вещества и возбуждения спектров сдвоенных лазерных импульсов (СЛИ), разделенных микросекундными межимпульсными интервалами. Показано, что переход от одноимпульсной к двухимпульсной лазерной абляции при неизменной суммарной энергии и мощности излучения приводит к многократному увеличению аналитического сигнала, что позволяет снизить погрешность количественного анализа [4, 7, 11]. В [1, 2, 5] представлены экспериментальные исследования различных конфигураций СЛИ — схема с преабляционной искрой, ортогональная и коллинеарная конфигурации. Последняя является оптимальной, поскольку обеспечивает требуемый результат при наиболее простой технической реализации.

Несмотря на большое количество научных работ по лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии, значительная доля исследований проводится не с применением готовых спектрометров, а на основе собранных из отдельных узлов установок на базе научно-исследовательских лабораторий и научно-практических центров. Данные установки отвечают требованиям, которые предъявляются к спектрометрам, однако существенно ограничены для использования в учебных целях и для проведения большого объема измерительных работ разной направленности.

На кафедре лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ и в лаборатории спектроскопии НИИ прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ разработан и изготовлен лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр (ЛАЭМС) для научно-учебных целей. При разработке ЛАЭМС использованы принципиальные и схемные решения, призванные приблизить его к современным потребностям в такой аппаратуре в повседневной практике.

Принцип работы и особенности оптической схемы. Общий принцип получения спектров с использованием лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии — регистрация с помощью полихроматорного спектрометра свечения плазмы, которая образуется при взаимодействии лазерного импульса с поверхностью образца. В двухимпульсной ЛАЭМС каждый импульс из пары СЛИ имеет свое назначение. Первый импульс взаимодействует с поверхностью мишени; в результате образуется плазма, содержащая не только возбужденные атомы и ионы, но и частицы исследуемого вещества в жидкой и твердой фазах. Второй лазерный импульс взаимодействует с плазмой, дополнительно возбуждая ее и испаряя жидкие капли и твердые частицы. Образовавшееся под воздействием первого лазерного импульса парогазовое облако частично поглощает излучение второго импульса и до поверхности мишени доходит лишь доля его энергии.

Конструкция и функциональные особенности двухимпульсных ЛАЭМС определяются применяемой схемой пространственной комбинации СЛИ: ортогональная, с преабляционной лазерной искрой, коллинеарная. Проведенный анализ показал, что в ЛАЭМС для учебно-научных целей целесообразно использовать коллинеарную комбинацию СЛИ, которая отличается относительной простотой технической реализации и возможностью проведения анализа широкого класса объектов. Высокий уровень аналитического сигнала в такой комбинации обусловлен как увеличением лазерной абляции, так и дополнительным возбуждением образовавшейся плазмы вторым импульсом. При коллинеарной конфигурации оба импульса последовательно падают на образец. Рост интенсивностей спектральных линий при анализе растворов при этом обусловлен тем, что первый импульс формирует “кавитационный пузырек”, на котором фокусируется второй импульс перед образованием абляционной плазмы.

Оптическая схема спектрометра представлена на рис. 1. Ее разработка осуществлялась с учетом требований абберрационно-оптического и технико-технологического характера. В качестве источника возбуждения спектрометр оснащен двумя неодимовыми лазерами с накачкой полупроводниковыми матрицами лазерных диодов *I* (разработка Института физики НАН Беларуси). Использование накач-

ки полупроводниковыми матрицами лазерных диодов вместо накачки импульсными лампами позволяет существенно увеличить ресурс системы и стабильность выходных характеристик. Двухимпульсный лазер обеспечивает генерацию СЛИ длительностью ≤ 15 нс с $\lambda = 1064$ нм с варьируемым в пределах 1—100 мкс интервалом с энергиями до 100 мДж при частотах следования пар импульсов < 10 Гц.

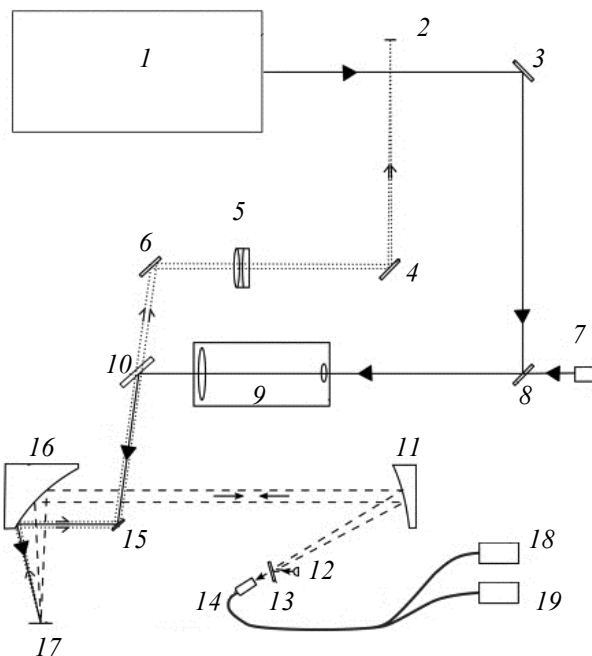


Рис. 1. Оптическая схема ЛАЭМС: 1 — двухимпульсный лазер; 2 — видеокамера; 3, 4, 6, 15 — неселективные плоские зеркала; 5 — изображающий объектив (наблюдательный канал); 7 — прицельный лазер; 8 — селективное плоское зеркало; 9 — телескоп; 10 — полупрозрачное плоское зеркало; 11 — параболическое зеркало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

Для обеспечения ахроматичности систем фокусировки лазерного излучения на объекте 17 и системы светосбора и ввода в оптоволоконный вход 14 полихроматоров-спектрометров 18, 19 излучения плазмы предложено вместо рефрактивных объективов использовать зеркальные — внеосевые параболоиды 11 и 16. Существенным недостатком традиционно используемых в приборах для ЛАЭМС рефрактивных объективов является сложность достижения приемлемого уровня ахроматизации в широком спектральном диапазоне, включающем в себя УФ-область (ограниченность выбора прозрачных материалов). В то же время наличие хроматической aberrации приводит к различиям в эффективности ввода излучения в оптоволоконный кабель для разных спектральных компонентов 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 с помощью вспомогательного плоского зеркала 15 с нормалью, ориентированной под углом 45° по отношению к указанной оси. Центр этого зеркала находится вблизи 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 по сравнению 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 %. 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 ~70 мм от защитного кварцевого стекла камеры образцов до поверхности образца.

Использование внеосевых параболических зеркал, работающих при внеосевых углах 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 1° 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 лазерного пучка от параллельности главной оси параболоида (путем наклона зеркала 15) позволяет получать фокальные пятна в виде астигматических фокалей (приблизненно эллиптической формы). Длина осей эллипса может составлять от единиц до сотен микрометров, что обеспечивает возможность варьирования формы и размеров фокальных пятен. Это может представлять интерес при работе с образцами со сложной неоднородной структурой поверхности, обеспечивая расширение выбора областей воздействия.

Для обеспечения требуемого диаметра пятна (≤ 70 мкм), сфокусированного на образце двухимпульсного лазерного источника с расходимостью ~2 мрад, пучок лазера пропускается через 5-кратный телескопический расширитель 9, снижающий расходимость до уровня ~0.5 мрад. Перед входом в оптоволоконно размещается поворотное вспомогательное 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 в себя параболическое зеркало 16 с внеосевым углом 90°, 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 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”, диапазон 190—800 нм, разрешение 0.1 нм при ширине одновременно регистрируемого спектрального интервала 150 нм), 19 — спектрометр оригинальной конструкции, описанный в [12].

Управление режимами работы лазерных источников, системами сканирования образца и системами регистрации спектров осуществляется с помощью оригинального программного обеспечения (ПО), которое обеспечивает одновременное управление всеми узлами ЛАЭМС и основные функции предварительной обработки, анализа и отображения спектральных данных. При разработке ПО средствами языка C++ в среде Microsoft Visual Studio 2005 использовано SDK контроллера систем регистрации фирмы ORMINS на основе CCD-датчиков. Управление дифракционной решеткой полихроматора выполняется вручную, показания микровинта используются в программном обеспечении ЛАЭМС для калибровки спектрального диапазона полихроматора с системой регистрации.

ПО предоставляет возможность регистрации спектров в четырех режимах: одиночный цикл регистрации спектра фонового сигнала, одиночный цикл регистрации спектра из одной точки, одиночный цикл регистрации спектров из распределенных по заданной площади точек и непрерывный цикл регистрации спектров из одной точки без сохранения данных. Оператор ПО ЛАЭМС имеет возможность задавать энергию импульсов и время задержки между СЛИ, просматривать и выполнять предварительную обработку полученных данных. Достоинство ПО ЛАЭМС — встроенная база данных спектральных линий, на основании которой могут быть созданы методики качественного и количественного элементного анализа образцов (количество определяемых химических элементов до 50).

Основные оптико-технические и аналитические характеристики ЛАЭМС. ЛАЭМС разрабатывался для учебно-научных задач на физическом факультете Белорусского государственного университета. Расчет оптической системы и подбор комплектующих спектрометра ЛАЭМС осуществля-

лись таким образом, чтобы обеспечить технический уровень, сопоставимый с современными отечественными и зарубежными аналогами. Основные аналитические параметры спектрометра указаны в табл. 1.

Основные спектральные характеристики ЛАЭМС подтверждены путем регистрации свечения источников света с известными параметрами. В диапазоне 253—811 нм использовалась ртутно-аргоновая лампа CAL-2000 (рис. 2, *а*), диапазоне 190—260 нм — ртутная лампа ПРК-2 при регистрации во втором порядке дифракции (рис. 2, *б*). Измерения показывают, что спектрометр обеспечивает работу в необходимом диапазоне при спектральном разрешении 0.09 нм (среднее значение).

Т а б л и ц а 1. Основные технические и аналитические характеристики спектрометра ЛАЭМС

Источник возбуждения	Двухимпульсный твердотельный YAG:Nd-лазер с накачкой матрицами лазерных диодов
Длина волны генерируемого излучения, нм	1064
Режимы работы	одиночные импульсы сдвоенные импульсы
Частота следования импульсов, Гц	до 10
Длительность импульсов, нс	~15
Диапазон изменения энергии импульсов, мДж	0—100
Диапазон изменения длительности задержки между сдвоенными лазерными импульсами, мкс	1—100
Полихроматор с системой регистрации	
Спектральный диапазон, нм	190—800
Спектральное разрешение (среднее значение), нм	0.09
Камера образцов и система визуального наблюдения	
Размеры анализируемых образцов, мм	до 200×200×200
Диаметр лазерного пучка на поверхности образца, мкм	~50
Механизм координатного перемещения держателя образца: координата X координата Y координата Z	с помощью ПО ручная с помощью ПО
Точность позиционирования на поверхности образца, мкм	100
Визуальный канал	Web-камера с объективом
Программное обеспечение ЛАЭМС разработано для управления лазерными источниками, системами сканирования образца и регистрации спектров, для анализа и обработки спектральных данных	Операционная система Windows XP/Vista/7/10
Режимы работы: одиночный цикл регистрации спектра фонового сигнала; одиночный цикл регистрации спектра из одной точки; одиночный цикл регистрации спектров из распределенных по заданной площади точек; непрерывный цикл регистрации спектров из одной точки без сохранения данных	
Количество определяемых химических элементов	50

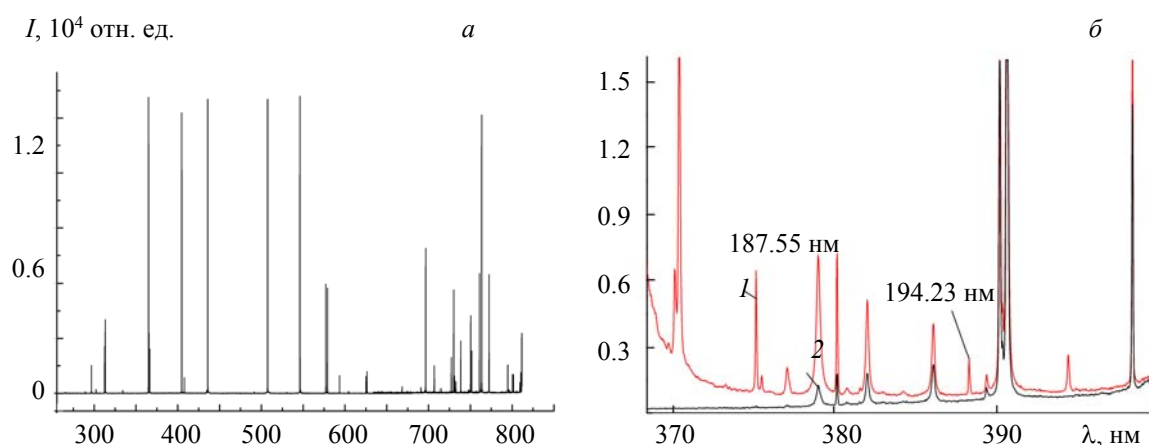


Рис. 2. Спектр ртутно-аргоновой лампы CAL-2000, полученный путем сшивки спектров, зарегистрированных с помощью спектрометра SDH-I ЛАЭМС в нескольких диапазонах (а), и спектр ртутной лампы ПРК-2 без светофильтра БС-4 (1) и при его введении (2), зарегистрированный с помощью спектрометра SDH-I ЛАЭМС (б)

Применение ЛАЭМС в научно-исследовательской деятельности. С использованием ЛАЭМС и микроинтерферометра Линника МИИ-4 исследованы взаимодействия одиночных импульсов и СЛИ с поверхностью образца, особенности формирования и распространения абляционной плазмы. Обнаружено, что для металлов переход от одиночных импульсов к СЛИ при фиксированной суммарной энергии и мощности приводит к значительному росту аналитического сигнала от 2 до 10 раз в зависимости от энергии лазерных импульсов и теплофизических свойств материала. Измерение деструкции поверхности с помощью микроинтерферометра МИИ-4 позволило определить, что диаметр кратера на поверхности металлов и сплавов при этом практически не изменяется, толщина испаряемого слоя увеличивается в 1.5—2.5 раза. Градуировочные графики для проведения количественного анализа многокомпонентных сплавов при этом остаются линейными (коэффициент корреляции $R^2 \sim 0.90—0.97$). Данное обстоятельство делает двухимпульсный режим ЛАЭМС предпочтительным для исследования готовой продукции, а также образцов, обладающих исторической ценностью. Переход от одиночных импульсов к СЛИ позволяет снизить количество импульсов в точку (в 2—10 раз) без увеличения погрешности анализа и с сохранением чувствительности обнаружения.

На базе ЛАЭМС разработаны методики качественного и количественного микроанализа артефактов и старинных монет, зарегистрированы эмиссионные спектры подлинных и фальшивых старинных монет, варварских имитаций римских имперских денариев, найденных на территории Беларуси и хранящихся в собрании нумизматического кабинета БГУ, в частных коллекциях; плакированных золотом римских монет, а также фрагментов ювелирных украшений, относящихся к I тыс. до н. э., найденных на территории современной Беларуси. Фотография полоцкого шиллинга со “следами деструкции” от СЛИ, фрагмент зарегистрированного с помощью ЛАЭМС спектра данной монеты, фотография серебряной монеты 16 в. со “следами деструкции”, увеличенная в 300 раз фотография кратера на поверхности серебряной монеты, бронзовое украшение I тыс. до н. э. в процессе анализа на ЛАЭМС, а также фотография бронзового украшения со “следами деструкции” приведены на рис. 3.

Разработанный ЛАЭМС отвечает требованиям, предъявляемым к спектрометрам для поверхностного, послойного и малодеструктивного анализа, а также в полной мере позволяет использовать все преимущества СЛИ для снижения деструкции поверхности образца без увеличения погрешности анализа.

На кафедре лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ разработан комплекс лабораторных работ по лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии для студентов и магистрантов, в том числе обучающихся на английском языке. Комплекс включает в себя шесть лабораторных работ, которые выполняются с использованием ЛАЭМС. Каждая лабораторная работа рассчитана на шесть академических часов и имеет выраженную научно-исследовательскую направленность.

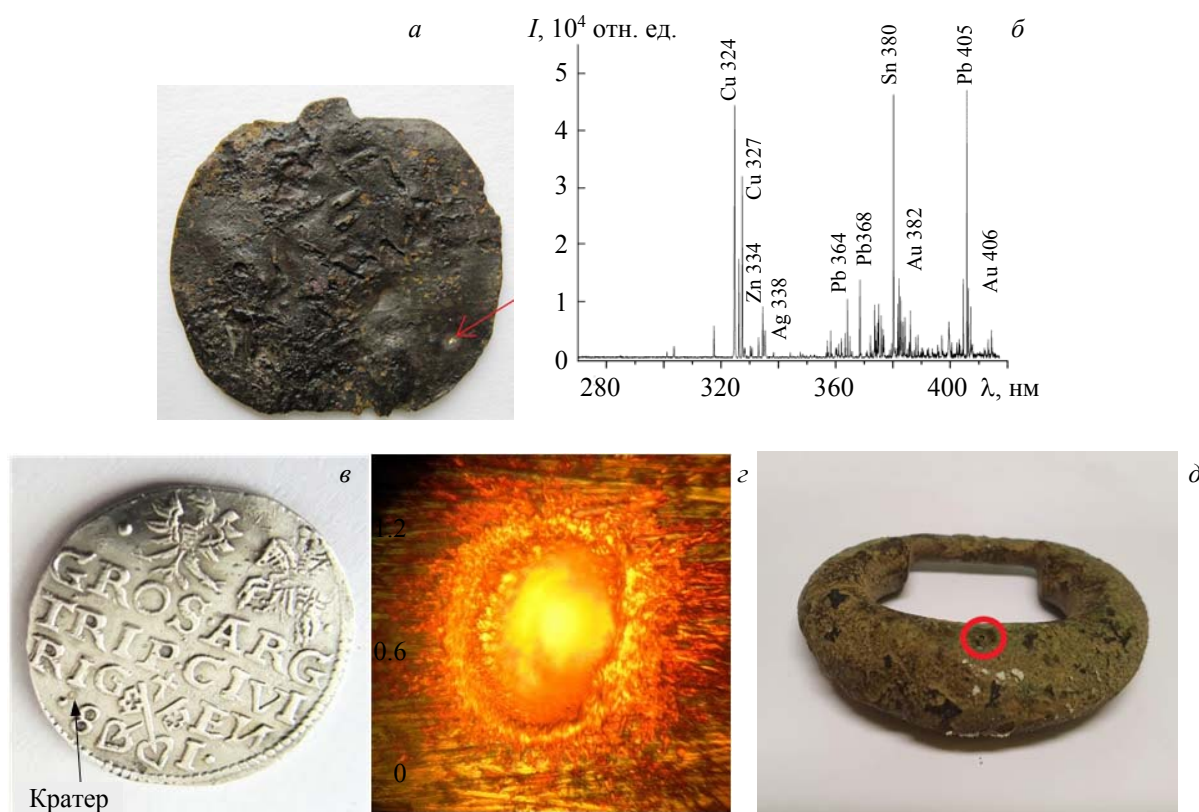


Рис. 3. Полоцкий шиллинг со “следами деструкции” от сдвоенных лазерных импульсов (а), фрагмент зарегистрированного с помощью ЛАЭМС спектра полоцкого шиллинга (б), серебряная монета 16 в. со “следами деструкции” (в), увеличенная в 300 раз фотография кратера на поверхности серебряной монеты (г), бронзовое украшение I тыс. до н. э. со “следами деструкции” (д)

Заключение. Разработана схема и создан образец лазерного атомно-эмиссионного многоканального спектрометра для исследований в области атомной спектроскопии. Использование двухимпульсного лазера с полупроводниковой накачкой вместо накачки импульсными лампами позволяет существенно увеличить ресурс системы и повысить стабильность выходных характеристик. Благодаря этому новый спектрометр становится доступным для использования в учебных практикумах. Используемый двухимпульсный лазер обеспечивает возможность независимой установки энергии сдвоенных импульсов. Такая возможность отсутствует в схемах с лазерами с ламповой накачкой. Другое принципиальное схемное решение лазерного атомно-эмиссионного многоканального спектрометра — использование зеркальных объективов (внеосевых параболоид) вместо рефрактивных. Это обеспечивает ахроматичность системы фокусировки лазерного излучения на объекте и системы светосбора и ввода излучения плазмы в оптоволоконный вход спектрометров.

Разработанный лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр активно используется в научно-исследовательской деятельности, а также в учебном процессе на кафедре лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ. Технические параметры разработанного спектрометра соответствуют характеристикам современных мировых установок для лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии с двухимпульсным возбуждением. Техническая реализация и сопутствующее программное обеспечение дают возможность не только проводить научные исследования одноимпульсной и двухимпульсной лазерной абляции, но и разрабатывать методики количественного и послыонного микроанализа широкого класса объектов, а также применять лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр в учебном процессе.

- [1] E. Grifoni, S. Legnaioli, M. Lezzerini, G. Lorenzetti, S. Pagnotta, V. Palleschi. *J. Spectrosc.* (2014) 849310(1—5)
- [2] W. Bauer, G.P. Perram, T. Haugan. *J. Appl. Phys.*, **123** (2018) 1—11
- [3] M. Corsi, G. Cristoforetti, M. Hildalgo, D. Iriatre, S. Legnaioli, V. Palleschi, A. Salvetti, E. Tognoni. *Appl. Spectrosc.*, **57**, N 6 (2003) 715—721
- [4] В. С. Бураков, А. Ф. Бохонов, М. И. Неделько, Н. В. Тарасенко. *Квант. электрон.*, **33**, № 12 (2003) 1065—1071
- [5] L. Radziemski, D. Cremers. *Spectrochim. Acta: At. Spectr.*, **87** (2013) 3—10
- [6] Е. С. Воропай, К. Ф. Ермалицкая, Ф. А. Ермалицкий. *Журн. прикл. спектр.*, **86**, № 2 (2019) 269—275 [E. S. Voropaу, K. F. Ermalitskaia, F. A. Ermalitskii. *J. Appl. Spectr.*, **86** (2019) 294—299]
- [7] L. Joliveta, M. Leprince, S. Moncaуo, L. Sorbier, C.-P. Lienemann, V. Motto-Ros. *Spectrochim. Acta: At. Spectr.*, **151** (2019) 41—53
- [8] X. Баззал, А. Р. Фадаиян, А. П. Зажогин. *Журн. Бел. гос. ун-та. Физика*, № 1 (2017) 34—42
- [9] М. П. Патапович, Ж. И. Булойчик, И. Д. Пашковская, Н. И. Нечипуренко, А. П. Зажогин. *Журн. Бел. гос. ун-та. Физика*, № 2 (2017) 27—33
- [10] Ж. И. Булойчик, А. П. Зажогин, Н. И. Нечипуренко, М. П. Патапович, И. Д. Пашковская. *Журн. Бел. гос. ун-та. Физика*, № 1 (2018) 9—17
- [11] К. Ф. Ермалицкая, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин. *Журн. прикл. спектр.*, **77**, № 2 (2010) 165—172 [K. F. Ermalitskaia, Y. S. Voropaу, A. P. Zajogin. *J. Appl. Spectr.*, **77** (2010) 153—159]
- [12] 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*, **4** (2016) 154—155