

09;15

Компактная лазерная система для дистанционных измерений методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии на основе Nd:YAG-лазера с самообращением волнового фронта

© В.Ф. Лебедев^{1,2}, К.В. Павлов¹, Г.В. Бурковский³, А.В. Федин³¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия³ Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия
E-mail: lebedev@oi.ifmo.ru

Поступило в Редакцию 24 декабря 2018 г.

В окончательной редакции 24 декабря 2018 г.

Принято к публикации 7 февраля 2019 г.

Предложена компактная лазерная система на основе Nd:YAG-лазера с самообращением волнового фронта для дистанционного анализа веществ методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии на расстоянии не менее 10 м.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.09.47705.17654

Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия (ЛИЭС) является одним из наиболее перспективных методов дистанционного химического анализа веществ в любом агрегатном состоянии. В лазерной системе для проведения измерений методом ЛИЭС (ЛИЭС-система) в качестве источника излучения обычно используется коммерческий лазер с ламповой накачкой и линейным резонатором [1,2]. В ряде работ продемонстрировано существенное увеличение интенсивности излучения плазмы исследуемого вещества и, как следствие, получение более интенсивного аналитического сигнала в виде линейчатого спектра излучения плазмы при использовании парных лазерных импульсов с подстраиваемой задержкой между ними [3,4]. Подобные ЛИЭС-системы наиболее часто создаются по двухканальной схеме с использованием двух отдельных лазеров, работающих в режиме активной модуляции добротности. Это существенно усложняет ЛИЭС-систему, приводит к увеличению ее массогабаритных параметров и делает более сложным применение метода в полевых условиях и в режиме реального времени. Для получения парных лазерных импульсов может быть успешно применен Nd:YAG-лазер, работающий в режиме пассивной модуляции добротности. В этом случае варьирование величин задержек между импульсами излучения не является произвольным, однако схема лазера упрощается из-за отсутствия высоковольтной электронной системы управления оптическим затвором.

В настоящей работе впервые предлагается ЛИЭС-система с высокими энергетическими и пространственными характеристиками лазерного излучения на основе малогабаритного импульсного Nd:YAG-лазера с самообращением волнового фронта при многоволновом взаимодействии в активной (усиливающей) среде и пассивном лазерном затворе (ПЛЗ).

Оптическая схема разработанного лазера включала один активный элемент (АЭ) на основе кристалла Nd:YAG размером $\varnothing 8 \times 180$ мм с концентрацией ионов Nd^{3+} на уровне 0.9 at.%, восемь отражающих зеркал и ПЛЗ на основе кристалла LiF:F_2^- с начальным пропусканием, варьирующимся в диапазоне $T_0 = 14\text{--}17\%$. Поперечная накачка АЭ осуществлялась шестнадцатью импульсными матрицами лазерных диодов типа СЛМ 3-2 с максимальной суммарной энергией излучения $E_{\text{pump}} = 14.5$ Дж и частотой следования импульсов до 10 Гц. Матрицы лазерных диодов располагались вдоль АЭ в четыре ряда (по четыре матрицы в каждом ряду). Габаритный размер резонатора вдоль оси распространения выходного луча лазера составил 0.6 м [5].

Лазерная генерация начинается с возникающего в АЭ шумового излучения и формирования с помощью системы отражающих зеркал внутрирезонаторных пучков, пересекающихся в АЭ и ПЛЗ (рис. 1). В процессе развития генерации усиливающиеся внутрирезонаторные пучки записывают в АЭ и ПЛЗ динамические пропускающие решетки коэффициента усиления и показателя преломления соответственно, формируя динамически самоподстраивающийся резонатор лазера. На образовавшихся решетках происходит перераспределение поля излучения в резонаторе и обращение его волнового фронта. Динамические решетки производят селекцию пространственных, спектральных и поляризационных характеристик излучения, а ПЛЗ позволяет получить одномодовое излучение в виде цуга импульсов наносекундной длительности.

Энергетические параметры лазерной генерации измерялись с помощью пирозлектрического приемника Ophir PE50BF-DIV-V2, а временные — с помощью лавинного фотодиода Ophir FPS1 SENSOR ROHS и двухлучевого осциллографа LeCroy WaveJet 352A (500 МГц). С увели-

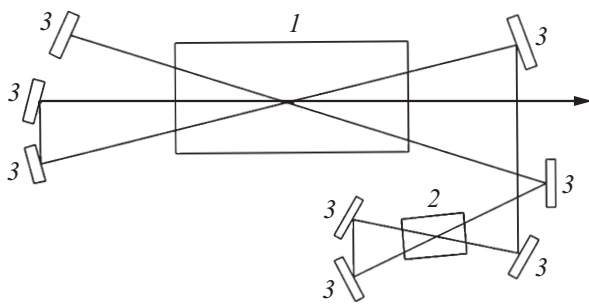


Рис. 1. Схема импульсного Nd:YAG-лазера с самообращением волнового фронта. 1 — активный элемент, 2 — пассивный затвор (кристалл LiF:F_2^-), 3 — отражающие зеркала.

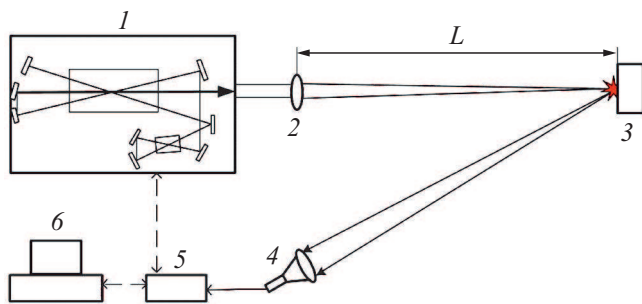


Рис. 2. Лазерная система для измерений методом ЛИЭС. 1 — Nd:YAG-лазер с самообращением волнового фронта, 2 — фокусирующая система, 3 — исследуемый образец, 4 — система приема излучения, 5 — спектрометр, 6 — компьютер. L — расстояние до мишени.

чением энергии импульсов накачки с 7.7 до 14.5 J увеличивалось число импульсов в цуге с 1 до 11 и сокращался период их следования со 100 до 30 μs , причем энергия и длительность отдельного лазерного импульса в цуге оставались неизменными величинами: 230 mJ и 11 ns соответственно. Измеренное методом ножа Фуко в двух ортогональных направлениях значение параметра качества пучка не превышало $M^2 \leq 1.2$. Качество лазерного пучка контролировалось также с помощью CCD-камеры BeamGage SP620U (Ophir-Spiricon).

Схема ЛИЭС-системы приведена на рис. 2. Оптическая система фокусировки излучения включала расширитель пучка с переменным увеличением 10BE03-2-12 (Standa) и длиннофокусную линзу с апертурами 50 mm. Излучение плазмы собиралось оптической системой, состоящей из фокусирующей линзы 4 с апертурой 50 mm и коллимационной линзы COL-UV/VIS (Avantes), соединенной со спектрометром 5. Излучение передавалось по оптоволокну диаметром 600 μm на входную апертуру спектрометра AvaSpec-ULS2048L-USB2 (Avantes) со спектральным разрешением 1 nm. Запуск лазера, синхронизация его работы со спектрометром, регистрация и обработка спектров плазмы осуществлялись с помощью собственного программного обеспечения [6].

Использованный в предлагаемой ЛИЭС-системе лазер может переходить в режим генерации коротких импульсов с помощью внешнего плазменного зеркала, образованного лазерной плазмой исследуемого материала. В этом случае формируется цуг коротких лазерных импульсов, но с достаточно нестабильными энергетическими и временными параметрами; однако и в таком режиме генерации автоматическая идентификация материалов методом ЛИЭС была успешно продемонстрирована [7].

Важно отметить, что эффективность работы ЛИЭС-системы в этом случае также обеспечивалась соответствующим алгоритмом обработки спектров излучения плазмы, устойчивым к изменению интенсивности излучения плазмы от импульса к импульсу [6]. Важной математической процедурой современных алгоритмов обработки спектров излучения плазмы является их нормализация, т.е. вычисление относительного вклада полосы излучения исследуемого химического элемента в полный спектр излучения плазмы. При этом надежность работы алгоритма выше, если процедура нормализации применяется к спектру плазмы, полученному после каждого лазерного импульса, а не к осредненному по серии импульсов. Это подтвердилось в процессе автоматического распознавания материалов в широком диапазоне изменений интенсивности излучения плазмы (до 100 раз) вследствие варьирования временных задержек открытия спектрометра относительно лазерного импульса [8]. Алгоритм был успешно применен и в режиме реального времени в задаче качественного определения коэффициента распределения лития между кристаллом и расплавом на примере лазерного кристалла форстерита $\text{Li, Cr-Mg}_2\text{SiO}_4$ [6].

Измерения с помощью предложенной ЛИЭС-системы проводились при двух различных режимах работы лазера: пассивной модуляции добротности в режиме генерации одиночного импульса или цуга из двух импульсов, а также самомодуляции добротности на внеш-

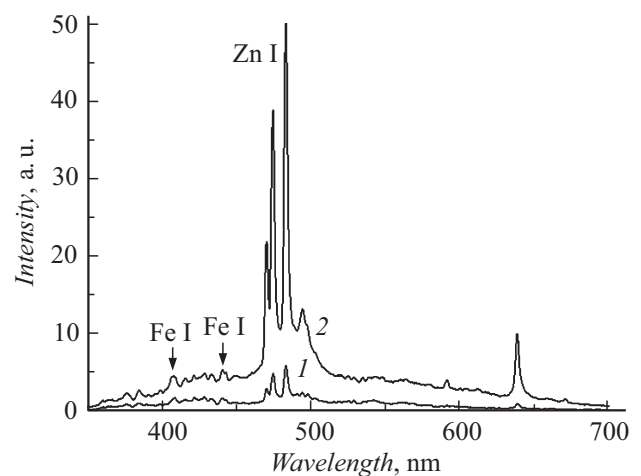


Рис. 3. ЛИЭС-спектр при двухимпульсном воздействии на образец оцинкованной стали. $L = 5$ m. 1 — один импульс, 2 — два импульса.

нем плазменном зеркале. Была продемонстрирована возможность автоматического распознавания материалов на расстояниях до 10 м (наибольшее возможное расстояние в наших лабораторных условиях). Алгоритм автоматической идентификации материала мишеней и тип материала мишеней (сталь, цинк, алюминий, бетон и т.д.) были аналогичны приведенным в работе [8]. В результате предварительных экспериментов регистрировались характерные ЛИЭС-спектры интересующих материалов и составлялась соответствующая база данных. Применявшаяся ранее процедура обработки спектров [8] была дополнена рядом процедур, необходимых для компенсации фонового излучения, увеличения отношения сигнал/шум, выделения полос излучения и их идентификации, увеличения спектрального разрешения и т.д. [6].

В экспериментах по автоматической идентификации веществ использовался двухимпульсный режим работы лазера, причем в этом случае наблюдался не менее чем шестикратный рост аналитического сигнала. В частности, при суммарной энергии двух лазерных импульсов 50 мДж амплитуда аналитического сигнала на расстоянии 5 м до мишени уже достигала величины насыщения приемника излучения (рис. 3). Период следования импульсов, определяемый начальным пропуском ПЛЗ, подбирался в интервале от 30 до 100 мкс и в итоге устанавливался равным не более 30 мкс. Уменьшение числа импульсов в цуге обеспечивалось уменьшением длительности импульса тока накачки. Возможное объяснение физического механизма увеличения аналитического сигнала при подобном двухимпульсном лазерном воздействии на исследуемый материал приведено в работе [9].

Анализ результатов измерений интенсивности ЛИЭС-сигнала в зависимости от расстояния при двухимпульсном лазерном воздействии на мишень позволил получить оценку предельного расстояния ($L = 12.5$ м) для измерений с помощью предложенной ЛИЭС-системы. Следует отметить, что эта величина далека от реальных возможностей системы, поскольку апертура приемного телескопа составляла всего 50 мм (рис. 2).

Таким образом, использование импульсного Nd:YAG-лазера с самообращением волнового фронта обеспечивает возможность создания простой, компактной и, как следствие, надежной системы для дистанционной диагностики материалов методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии, в том числе и в режиме реального времени.

Список литературы

- [1] Yang C.S.-C., Jin F., Trivedi S.B., Brown E.E., Hommerich U., Tripathi A., Samuels A.C. // *Appl. Spectroscopy*. 2017. V. 71. N 4. P. 1–7.
- [2] Son J.-G., Li Y., Ko D.-K. // *Appl. Phys. Express*. 2018. V. 11. N 10. P. 102401 (1–5).
- [3] *Laser-induced breakdown spectroscopy: theory and applications* / Eds S. Musazzi, U. Perini. N.Y.: Springer, 2014. 565 p.
- [4] Sun D., Su M., Dong C., Wen G. // *Plasma Sci. Technol.* 2014. V. 16. N 4. P. 374–379.
- [5] Бурковский Г.В., Федин А.В., Погода А.П., Борейшо А.С. // *Квантовая электроника*. 2016. Т. 46. № 11. С. 976–978.
- [6] Lebedev V.F., Makarchuk P.S., Stepanov D.N. // *Spectrochim. Acta B*. 2017. V. 137. P. 23–27.
- [7] Лебедев В.Ф. // *Опт. журн.* 2017. Т. 84. В. 2. С. 19–27.
- [8] Lebedev V.F., Shestakov A.A. // *Proc. of SPIE*. 2011. V. 7822. P. 78220V (1–6).
- [9] Першин С.М. // *Квантовая электроника*. 1989. Т. 16. № 12. С. 2518–2520.