

УДК 621.373.826

## КОНЦЕПЦИЯ И ДИЗАЙН КОМПАКТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

© 2020 г. В. Ф. Лебедев<sup>1,2</sup>, К. В. Павлов<sup>3</sup>, М. А. Федина<sup>4</sup>, А. В. Федин<sup>5</sup>. \*

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики”, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения”, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Общество с ограниченной ответственностью “Компания “АЗИМУТ ФОТОНИКС”, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский университет “Московский институт электронной техники”, Москва, Россия

<sup>5</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых”, Владимир, Россия

\*E-mail: a\_fedin@list.ru

Поступила в редакцию 20.09.2019 г.

После доработки 15.11.2019 г.

Принята к публикации 27.11.2019 г.

Предложена компактная лазерная система на основе Nd:YAG-лазера с самообращением волнового фронта для дистанционного анализа веществ методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии. Показана возможность создания надежной системы для дистанционной диагностики материалов в режиме реального времени.

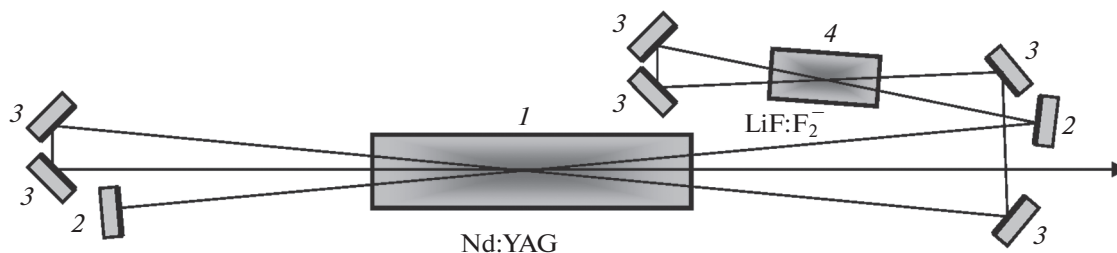
DOI: 10.31857/S0367676520030175

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 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 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  $\text{Nd}^{3+}$  на уровне 0.9 ат. %, восемь отражающих зеркал и ПЛЗ на основе кристалла  $\text{LiF:F}_2^-$  с начальным пропусканием, варьирующимся в диапазоне  $T_0 = 14\text{--}17\%$ . Поперечная накачка АЭ осуществляется шестнадцатью импульсными матри-



**Рис. 1.** Оптическая схема Nd:YAG лазера с самообращением волнового фронта: 1 – активный элемент; 2 – глухие зеркала; 3 – поворотные зеркала; 4 – пассивный лазерный затвор LiF:F<sub>2</sub><sup>-</sup>.

цами лазерных диодов типа СЛМ 3-2 с максимальной суммарной энергией излучения  $E_p = 14.5$  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.

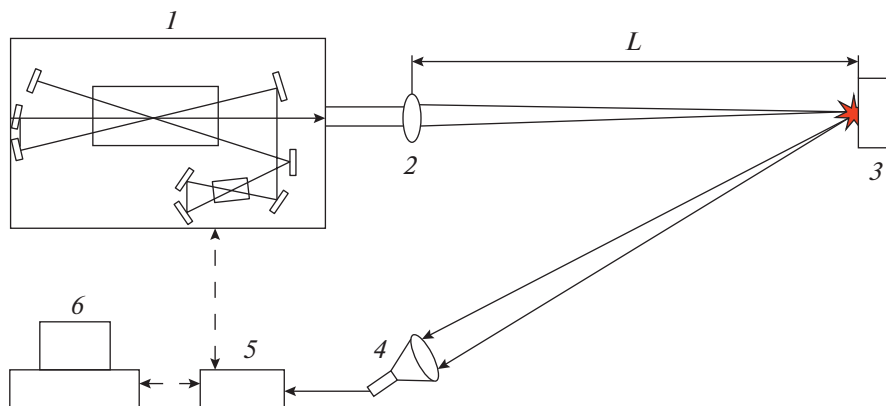
Энергетические параметры лазерной генерации измерялись с помощью пирозлектрического приемника Ophir PE50BF-DIV-V2, а временные – с помощью лавинного фотодиода Ophir FPS1 SENSOR ROHS и двухлучевого осциллографа LeCroy Wave Jet 352A (500 МГц). С увеличением энергии импульсов накачки с 7.7 до 14.5 Дж увеличивалось число импульсов в цуге с 1 до 11 и сокращался период их следования со 100 до 30 мкс, причем энергия и длительность отдельного лазерного импульса в цуге оставались неизменными величинами: 230 мДж и 11 нс 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 типа Veam Gage SP620U (Ophir-Spiricon).

Схема ЛИЭС-системы приведена на рис. 2. Оптическая система фокусировки излучения включа-

ла расширитель пучка с переменным увеличением IOBE03-2-12 (Standa) и длиннофокусную линзу с апертурами 50 мм. Излучение плазмы собиралось оптической системой, состоящей из фокусирующей линзы с апертурой 50 мм и коллимационной линзы COL-UV/VIS (Avantes), соединенной со спектрометром. Излучение передавалось по оптоволокну диаметром 600 мкм на входную апертуру спектрометра AvaSpec-ULS2048L-USB2 (Avantes) со спектральным разрешением 1 нм. 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 усредненному по серии импульсов. Это подтвердилось в процессе автоматического распознавания материалов в широком диапазоне изменений интенсивности излучения плазмы (до 100 раз) вследствие варьирования вре-



**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.

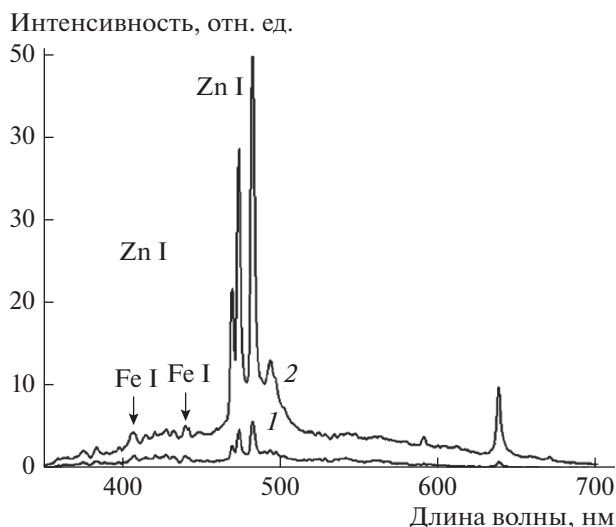
менных задержек открытия спектрометра относительно лазерного импульса [8]. Алгоритм был успешно применен и в режиме реального времени в задаче качественного определения коэффициента распределения лития между кристаллом и расплавом на примере лазерного кристалла форстерита Li, Cr–Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> [5].

Измерения с помощью предложенной ЛИЭС-системы проводились в двух различных режимах работы лазера: пассивной модуляции добротности в режиме генерации одиночного импульса или цуга из двух импульсов, а также самомодуляции добротности на внешнем плазменном зеркале. Была продемонстрирована возможность автоматического распознавания материалов на расстояниях до 10 м (наибольшее возможное расстояние в наших ла-

бораторных условиях). Алгоритм автоматической идентификации материала мишени и тип материала мишени (сталь, цинк, алюминий, бетон и другие) 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 [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 пропусканием 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 ве-



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

личина 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. et al.* // Appl. Spectrosc. 2017. V. 71. № 4. P. 1.
2. *Son J.-G., Li Y., Ko D.-K.* // Appl. Phys. Expr. 2018. V. 11. № 10. Art. № 102401.
3. *Musazzi S., Perini U.* Laser-induced breakdown spectroscopy: theory and applications. N.Y.: Springer, 2014. 565 p.
4. *Sun D., Su M., Dong C., Wen G.* // Plasma Sci. Technol. 2014. V. 16. № 4. P. 374.
5. *Бурковский Г.В., Федин А.В., Погода А.П., Бореjšо А.С.* // Квант. электрон. 2016. Т. 46. № 11. С. 976; *Burkovsky G.V., Fedin A.V., Pogoda A.P., Borejšo A.S.* // Quant. Electron. 2016. V. 46. № 11. P. 976.
6. *Lebedev V.F., Makarchuk P.S., Stepanov D.N.* // Spectrochim. Acta B. 2017. V. 137. P. 23.
7. *Лебедев В.Ф.* // Опт. журн. 2017. Т. 84. № 2. С. 19.
8. *Lebedev V.F., Shestakov A.A.* // Proc. SPIE. 2011. V. 7822. P. 78220.
9. *Першин С.М.* // Квант. электрон. 1989. Т. 16. № 12. С. 2518.