

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЭМИССИОННЫХ СПЕКТРОВ СПЛАВОВ ПРИ ДВУХИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Е. С. Воропай, К. Ф. Ермалицкая*, Ф. А. Ермалицкий

УДК 533.9.082, 533.922, 533.924, 535.243.2

Белорусский государственный университет,

220030, Минск, просп. Независимости, 4, Беларусь; e-mail: ermalitskaia@gmail.com

(Поступила 12 ноября 2018)

Разработан спектрально-кинетический регистратор, работающий в специальном режиме временно-стробирования, для последовательного с микросекундным шагом измерения разрешенных во времени спектров и изменений интенсивности спектральных линий при атомно-эмиссионном анализе. Проведена регистрация временных изменений интенсивности спектральных линий меди, цинка, олова и свинца при двухимпульсной лазерной абляции образцов чистых металлов и многокомпонентных сплавов. Определено, что для чистых металлов временные зависимости интенсивности спектральных линий могут быть с высокой точностью аппроксимированы экспоненциальными зависимостями, при абляции же многокомпонентных образцов экспоненциальное затухание аналитического сигнала имело место лишь при межимпульсных лазерных интервалах < 3 мкс.

Ключевые слова: лазерная абляция, сдвоенные лазерные импульсы, временные зависимости интенсивности, лазерная плазма, лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия.

A spectral-kinetic recorder operating in a special time-gating mode has been developed for time-shifted measurement of time-resolved spectra and the kinetics of the spectral line emission in atomic emission analysis. The luminescence kinetics of copper, zinc, tin, and lead spectral lines were recorded in the case of two-pulse laser ablation of samples of pure metals and multicomponent alloys. It was determined that the luminescence kinetics of spectral lines can be approximated by exponential dependences with high accuracy for pure metals, while for multicomponent samples, the exponential decay of the analytical signal occurred only at interpulse laser intervals < 3 μ s.

Keywords: laser ablation, double laser pulses, intensity kinetics, laser plasma, laser induced breakdown spectroscopy.

Введение. Из трех основных оптических характеристик свечений — спектров, кинетики и поляризации — как в молекулярной, так и в атомно-эмиссионной спектроскопии (АЭС) большая часть исследований исторически сконцентрирована на регистрации спектров. Такое положение дел обусловлено, с одной стороны, широким распространением более простых чисто спектральных приборов, а с другой — более сложной технологией временных и поляризационных измерений. Для АЭС эти сложности усугублены исходно неравновесным характером детектируемого плазменного разряда, что исключает использование большинства временных методик. Это относится и к такому разделу АЭС, как лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия (ЛАЭС) (laser induced breakdown spectroscopy). Существующие методики измерения кинетики свечения с помощью ФЭУ не позволяют проводить одновременно регистрировать изменения интенсивности нескольких спектральных линий, в том числе относящихся к разным элементам, а также регистрировать разрешенные во времени спектры.

Регистрация эволюции неравновесного плазменного разряда во времени, безусловно, дает много дополнительной информации о физических механизмах ее возникновения и существования. В ЛАЭС сформировался целый раздел — времяразрешенная атомно-эмиссионная спектроскопия (ВРАЭС)

TIME DEPENDENCE MEASUREMENT OF ALLOY EMISSION SPECTRA AT DOUBLE PULSE LASER ABLATION

E. S. Voropay, K. F. Ermalitskaia*, F. A. Ermalitski (Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Prosp., Minsk, 220030, Belarus; e-mail: ermalitskaia@gmail.com)

(time resolved laser induced breakdown spectrometry) [1]. Тематика работ по ВРАЭС достаточно разнообразна. Большинство посвящено определению наиболее информационного временного “окна” (интервала) регистрации излучения искрового разряда с целью исключения вклада в измеряемый сигнал спектральных помех от квазинепрерывного континуума, состоящего в большей мере из тормозного и рекомбинационного свечений [1, 2]. В части работ рассмотрена визуализация пространственной эволюции плазмы в различные моменты времени после ее возникновения [3, 4], и лишь некоторые исследования относятся к классическому “временному” направлению — изучению временных характеристик отдельных спектральных линий и времяразрешенных спектров [5].

Измерение временных характеристик атомно-эмиссионных линий сопряжено с принципиальными и методическими трудностями, вызванными, с одной стороны, малой частотой следования возбуждающих лазерных импульсов (10 Гц у наиболее распространенного Nd⁺-лазера), а с другой — низкой интенсивностью регистрируемых оптических сигналов. По мере развития детекторов и электронной базы времяизмерительные системы эволюционировали от стрик-камер и вращающихся зеркал к быстродействующим вакуумным и твердотельным детекторам с устройствами стробирования и интегрирования (в том числе с усилителями яркости) [3—6]. Малая частота повторения возбуждающих сигналов затрудняет использование высокочувствительных систем счета фотонов во времякоррелированном варианте [7], хотя для ЛАЭС на базе спектрографов с несколькими детекторами возможно применение синхронного счета фотонов [7], который позволяет детектировать временные изменения интенсивности слабых спектральных линий с необходимой погрешностью за счет многократного накопления отсчетов.

Эксперимент. Для одновременного измерения разрешенных во времени спектров и кинетики свечения при атомно-эмиссионном анализе в БГУ разработан и создан спектрально-кинетический регистратор, работающий в специальном режиме временного стробирования. Для измерения кинетики свечения лазерной плазмы регистрируется серия спектров с увеличивающимся временным сдвигом начала регистрации. Принцип работы регистратора основан на последовательных измерениях (строб-выборках) спектрально разделенных M кривых высвечивания исследуемого образца фотодетектором на базе многоэлементной ПЗС-линейки с M фоточувствительными элементами. Для преодоления ограничений по ее быстродействию (стандартная длительность единичного цикла измерения/считывание ~ 10 мс) за одну вспышку лазера формируется только одна строб-выборка; за последующие вспышки последовательно формируются единичные строб-выборки с заданным временным шагом. В итоге после N вспышек лазера в регистраторе накапливается временной профиль M кривых высвечивания атомно-эмиссионной плазмы, каждый из которых состоит из N точек. Для уменьшения статистической погрешности измерений возможно последовательное суммирование спектральных и кинетических кривых. Данный регистратор реализован как дополнительный измерительный канал к серийному лазерному атомно-эмиссионному спектрометру LSS-1 (LOTIS ТП, Беларусь—Япония) [8]. Он может быть использован в составе и других лазерных, искровых или дуговых атомно-эмиссионных спектрометров для анализа различных объектов.

Регистратор представляет собой оптико-электронный блок, обеспечивающий прием анализируемого излучения через волоконно-оптический световод, разложение излучения в линейный спектр с помощью дифракционного полихроматора и последующее детектирование спектра линейным многоэлементным ПЗС-фотоприемником (рис. 1). Исследуемое излучение из оптического волокна проходит через двухлинзовый конденсор, светофильтр и попадает на входную щель полихроматора SDH-1, оптическая схема которого реализована в конфигурации Черни—Тернера. При этом проводится интегральный сбор излучения под углом 90° к оси разряда.

В состав прибора входят следующие оптико-электронные элементы.

1. Компактный полихроматор, собранный по схеме Черни—Тернера. На входе полихроматора установлены оптический разъем для подключения световода и регулируемая оптическая щель, которая обеспечивает формирование линейного изображения поступающего по световоду излучения анализируемого объекта. Полихроматор включает в себя фокусирующую линзу, два вогнутых зеркала и плоскую дифракционную решетку размером 70×70 мм с 600 штр./мм.

2. 3648-Элементный кремниевый линейный ПЗС-фотоприемник с размером единичного фоточувствительного элемента 8×200 мкм и рабочим диапазоном $280—1060$ нм.

3. Микроэлектронный контроллер, обеспечивающий специальный режим временного стробирования при работе ПЗС-фотоприемника, обработку его сигналов на 12-разрядном АЦП и передачу данных на компьютер. Шаг стробирования программно задается в интервале от 12.5 нс до 1000 мкс;

верхний предел стробирования обусловлен необходимостью исключить возможное наложение временных кривых от следующих друг за другом с периодом 100 мс лазерных импульсов.

4. USB-канал связи с компьютером. Функционирование регистратора обеспечивается пакетом прикладных программ. Регистратор позволяет измерять эмиссионные спектры исследуемых объектов через заданные интервалы времени от начала (окончания) лазерного импульса. Для любой выбранной части спектральной линии измеряется форма кривой высвечивания во времени и вычисляются константы затухания в одно- или двухэкспоненциальном приближениях.

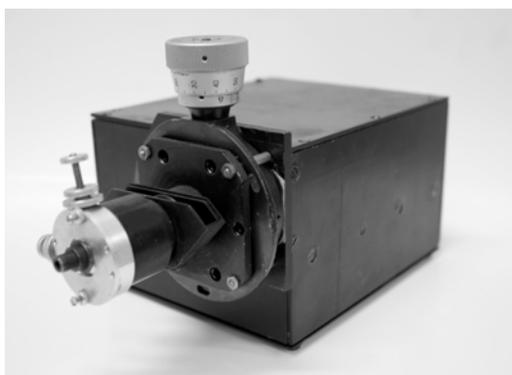


Рис. 1. Спектрально-кинетический регистратор, работающий в специальном режиме временного стробирования

Технические характеристики регистратора. Диапазоны временных измерений: 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 мкс; максимальная частота регистрируемых сигналов 100 Гц (определяется длительностью рабочего цикла используемой ПЗС-линейки); минимальное разрешение во времени 20 нс. Полный спектральный диапазон регистрации 400—1060 нм; для диапазона 400—590 нм, в котором расположено большое количество линий металлов, спектральное разрешение 0.5 нм. Размеры регистратора без регулируемой входной щели 145×125×90 мм. Питание от сети 220 В/50 Гц, потребляемая мощность 15 Вт, масса 1.4 кг.

Результаты и их обсуждение. При создании методик количественного анализа многокомпонентных сплавов необходимо выбрать аналитические спектральные линии элементов с учетом ряда факторов: выбранная линия должна иметь достаточно высокую интенсивность, не накладываться на линии других компонентов исследуемого сплава, не быть резонансной, чтобы избежать самопоглощения, особенно при определении содержания элементов с высокой концентрацией. В АЭС как с электрическим, так и с лазерным возбуждением часто имеет место взаимное влияние элементов на поступление в эрозионную плазму, что приводит к необходимости использования относительных координат при построении градуировочных графиков. Однако механизм данного влияния не очевиден. Исследование временных изменений интенсивности спектральных линий элементов позволит сделать выводы о процессе пространственной эволюции и распространения многокомпонентной абляционной плазмы, выявить оптимальные аналитические линии для определения концентрации и таким образом снизить погрешность количественного анализа.

Объекты исследования — распространенные в промышленности сплавы: специальная латунь ЛС (медь 66.37 %, цинк 29.20 %, свинец 1.85 %, олово 0.35 %), оловянистая бронза (медь 85.29 %, олово 11.80 %, цинк 0.42 %, свинец 0.15 %), припой ПОС-40 (свинец 60 %, олово 40 %), а также чистые металлы — медь, цинк, олово, свинец. Перед измерением поверхность образцов зачищалась с помощью наждачной бумаги. При регистрации спектров не проводилась запись сигнала от первой пары сдвоенных импульсов, испаряющих слой вещества толщиной 3 мкм, что позволило исключить из рассмотрения плазму от поверхностного слоя, содержащего окислы и загрязнения.

Источником испарения вещества и возбуждения плазмы служил двухимпульсный YAG:Nd-лазер с длиной волны 1064 нм, длительностью импульсов 15 нс, частотой повторения 10 Гц. Энергия каждого из сдвоенных импульсов 70 мДж, межимпульсный интервал 0 мкс (два импульса воздействуют на поверхность одновременно), 1, 3, 5 и 10 мкс. Регистрация временных изменений спектральных линий начиналась спустя 1 мкс после второго импульса из сдвоенных, чтобы избежать регистрации

свечения переднего фронта плазмы, расширяющейся со сверхзвуковыми скоростями в воздухе. Измерения проводились в атмосфере воздуха при нормальном давлении.

Проведена регистрация временных изменений интенсивности спектральных линий меди, цинка, олова и свинца в диапазоне 400—590 нм. Для элементного анализа медных сплавов измерения проводятся чаще в УФ диапазоне (300—490 нм), однако, поскольку цель работы — изучение процессов, происходящих в абляционной плазме, нами зарегистрированы временные изменения интенсивности линий, параметры которых обычно используются для оценки температуры и других термодинамических параметров плазмы. Основные характеристики данных линий (длина волны λ , вероятность спонтанных переходов A_{ki} , статистический вес уровня g_k , энергия уровня E_k) приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Основные характеристики аналитических спектральных линий меди, цинка, олова и свинца

λ , нм	$A_{ki} \cdot 10^7$, с ⁻¹	g_k	E_k , см ⁻¹	λ , нм	$A_{ki} \cdot 10^7$, с ⁻¹	g_k	E_k , см ⁻¹
Медь				Свинец			
510.554	0.2	4	30 783	405.780	9.0	3	35 287
515.324	6	4	49 935	416.803	12.0	5	45 443
521.820	7.5	6	49 942	520.143	1.4	3	48 686
Цинк				Олово			
468.014	1.55	3	53 719	452.473	2.6	3	39 257
472.215	4.58	3	53 719	533.233	9.9	4	90 241
481.053	7.0	3	53 719	579.886	7.7	8	89 288

Т а б л и ц а 2. Квадрат коэффициента детерминации экспоненциальной аппроксимации временной зависимости интенсивности спектральных линий металлов и времена затухания

Элемент	λ , нм	Межимпульсный интервал, мкс									
		0		1		3		5		10	
		R^2	τ , мкс	R^2	τ , мкс	R^2	τ , мкс	R^2	τ , мкс	R^2	τ , мкс
Медь	510.6	0.63	9.92	0.84	7.76	0.85	8.44	0.71	8.89	0.69	9.31
	515.3	0.69	9.54	0.87	7.34	0.85	8.32	0.76	8.48	0.71	9.23
	521.8	0.71	9.02	0.92	7.02	0.89	7.89	0.78	8.34	0.72	9.01
Цинк	468.0	0.84	8.05	0.94	4.81	0.92	6.02	0.83	6.76	0.79	7.79
	472.2	0.79	8.44	0.94	5.34	0.91	6.18	0.81	7.05	0.78	7.84
	481.0	0.76	8.13	0.93	5.88	0.85	6.25	0.81	7.13	0.78	7.92
Свинец	405.8	0.72	5.02	0.92	3.13	0.88	3.78	0.84	4.16	0.81	4.97
	416.8	0.71	5.17	0.91	3.56	0.87	3.99	0.82	4.21	0.74	5.13
	520.1	0.69	5.34	0.93	3.38	0.88	4.01	0.79	4.56	0.78	5.26
Олово	452.5	0.81	6.34	0.97	3.34	0.92	4.89	0.87	5.23	0.82	6.01
	533.2	0.75	8.01	0.94	5.38	0.87	6.01	0.83	6.78	0.76	6.89
	579.9	0.74	8.23	0.89	5.23	0.87	6.93	0.83	6.75	0.71	7.56

Исследования показывают, что при двухимпульсной лазерной абляции чистых металлов временные изменения интенсивности рассматриваемых линий могут быть описаны экспоненциальной зависимостью, причем наиболее высокие коэффициенты детерминации такой аппроксимации, а также минимальные времена затухания интенсивности имеют место при межимпульсном интервале 1 мкс (табл. 2). При увеличении межимпульсного интервала до 10 мкс времена затухания интенсивности линий возрастают до уровня, наблюдаемого при одноимпульсной лазерной абляции, однако одновременно происходит отклонение зависимости от экспоненциального вида.

Временная зависимость интенсивности спектральной линии Zn 481 нм при двухимпульсной абляции чистого металла двоякими лазерными импульсами с энергией 70 мДж и межимпульсным интервалом 1 и 3 мкс при начале регистрации через 1 мкс после второго импульса с шагом 3 мкс приведена на рис. 2.

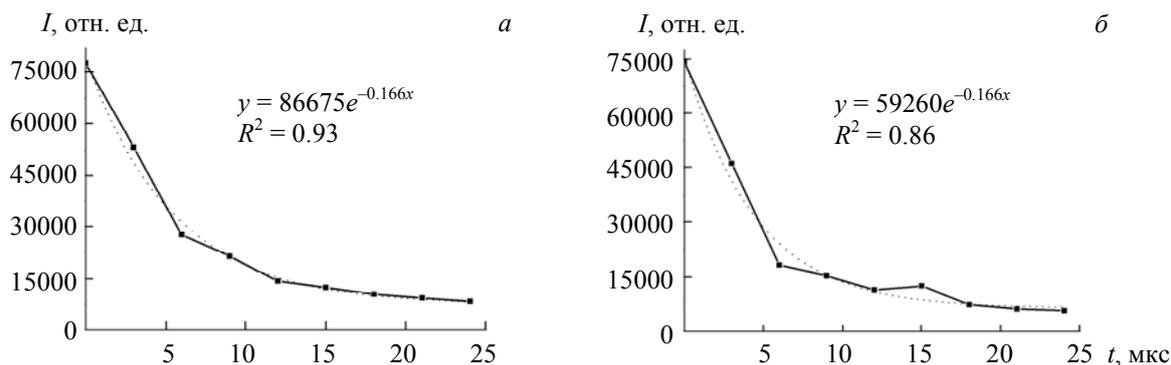


Рис. 2. Временная зависимость интенсивности спектральной линии Zn 481 нм при двухимпульсной абляции чистого металла сдвоенными лазерными импульсами с энергией 70 мДж и межимпульсным интервалом 1 (а) и 3 мкс (б)

Аналогичное исследование временной зависимости интенсивности аналитических спектральных линий проведено при двухимпульсной лазерной абляции многокомпонентных сплавов (табл. 3). При одноимпульсной абляции (нулевой межимпульсный интервал) латуни, бронзы и припоя ПОС-40 временные изменения интенсивности также могут быть описаны экспоненциальной зависимостью, однако в этом случае коэффициенты детерминации ниже, чем при абляции чистых металлов. Данное обстоятельство указывает на то, что на скорость затухания интенсивности спектральных линий элемента существенное влияние может оказать взаимодействие его возбужденных атомов с другими компонентами плазмы. Тем не менее общие закономерности временных изменений интенсивности линий элементов остаются неизменными. При переходе к двухимпульсной лазерной абляции дополнительное возбуждение вторым импульсом расширяющегося эрозионного облака приводит к увеличению пространственной неоднородности плазмы, причем в данном случае под пространственной неоднородностью следует понимать несоответствие концентрации элементов в разных частях плазмы их содержанию в исходном образце (пространственно-компонентная неоднородность). Исходя из данных табл. 3 можно предположить, что если бы соотношение концентраций элементов в каждом бесконечно малом объеме плазмы сохранялось, как в исходном образце, то временная зависимость интенсивности линий различных компонентов была аналогична. Например, при двухимпульсной абляции бронзы с межимпульсным интервалом 10 мкс экспоненциальный вид временной зависимости наблюдался бы для всех компонентов, а не только для легкоплавких свинца и олова либо для всех рассматриваемых спектральных линий имел бы место значительный разброс точек, что указывало на существенное увеличение количества безызлучательных переходов при дополнительном возбуждении вторым лазерным импульсом. Однако для свинца и олова переход от одноимпульсной абляции к двухимпульсной приводит лишь к незначительному снижению коэффициента детерминации экспоненциальной аппроксимации временной зависимости интенсивности, что при одновременном значительном (до 10 раз) увеличении аналитического сигнала делает двухимпульсную лазерную абляцию с межимпульсными интервалами вплоть до 10 мкс предпочтительным методом микроанализа образцов, сходных по составу с ПОС-40. Однако при элементном анализе медных сплавов использование межимпульсных интервалов >3 мкс нежелательно, так как различный вид временных зависимостей интенсивности линий разных компонентов и особенно отсутствие экспоненциальной зависимости только у основных компонентов, но не у “третьих элементов” указывают на то, что взаимодействие разных элементов в эрозионном облаке со вторым лазерным импульсом происходит по “разным сценариям”. Это выражается в неодинаковом влиянии безызлучательных переходов на интенсивность линий меди, цинка, свинца и олова. Одной из вероятных причин такого различия может быть тот факт, что энергия второго импульса преимущественно поглощается в областях эрозионного облака, где концентрация элементов отличается, например, находятся в основном легкоплавкие свинец и олово, т. е. имеет место пространственно-компонентная неоднородность.

Временная зависимость интенсивности линий Sb 452 нм и Pb 40 нм припоя ПОС-40 при двухимпульсной лазерной абляции с межимпульсными интервалами 0 и 10 мкс приведена на рис. 3.

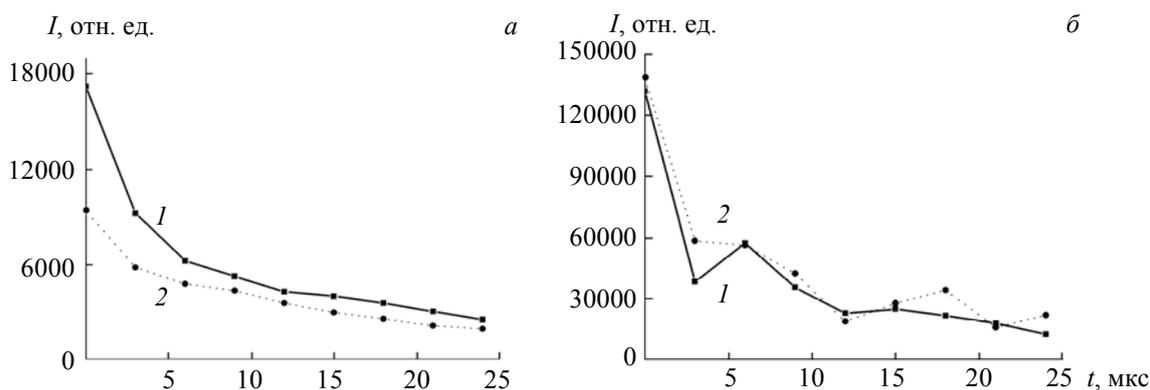


Рис. 3. Временная зависимость интенсивности спектральных линий Sn 452 нм (а) и Pb 405 нм (б) при двухимпульсной лазерной абляции припой ПСО-40, межимпульсный интервал 0 (1) и 10 мкс (2)

Т а б л и ц а 3. Квадрат коэффициента детерминации экспоненциальной аппроксимации временной зависимости интенсивности спектральных линий элементов и времена затухания при двухимпульсной лазерной абляции многокомпонентных сплавов

Элемент	λ , нм	Межимпульсный интервал, мкс									
		0		1		3		5		10	
		R^2	τ , мкс	R^2	τ , мкс	R^2	τ , мкс	R^2	τ , мкс	R^2	τ , мкс
Медь (латунь)	510.6	—	—	0.61	10.28	0.61	10.64	—	—	—	—
	515.3	0.59	11.02	0.68	9.95	0.56	10.54	—	—	—	—
	521.8	0.62	10.92	0.72	9.34	0.70	9.87	0.61	10.77	—	—
Медь (бронза)	510.6	0.54	11.08	0.75	9.02	0.63	9.56	—	—	—	—
	515.3	0.68	10.56	0.76	8.94	0.69	9.37	—	—	—	—
	521.8	0.69	10.12	0.78	8.61	0.72	8.92	0.59	9.96	—	—
Цинк (латунь)	468.0	0.84	8.05	0.84	6.87	0.83	7.82	0.71	8.76	0.79	7.79
	472.2	0.79	8.44	0.85	7.39	0.80	7.98	—	—	—	—
	481.0	0.76	8.13	0.72	7.98	0.78	7.65	—	—	—	—
Цинк (бронза)	468.0	0.79	8.05	0.72	5.01	0.82	5.95	0.64	7.52	—	—
	472.2	0.75	8.48	0.79	5.75	0.81	6.07	0.72	7.89	—	—
	481.0	0.72	8.15	0.78	5.96	0.78	6.35	—	—	—	—
Свинец (латунь)	405.8	0.72	4.78	0.90	2.97	0.78	3.68	0.62	4.02	0.81	4.97
	416.8	0.71	5.05	0.87	3.13	0.75	3.45	0.61	4.11	0.74	5.13
	520.1	0.69	5.21	0.85	3.24	0.72	3.72	0.68	4.22	0.78	5.26
Свинец (бронза)	405.8	0.64	4.53	0.86	3.05	0.73	3.78	0.64	4.01	0.61	4.24
	416.8	0.58	4.24	0.81	3.21	0.70	3.99	0.71	4.09	0.58	5.07
	520.1	0.61	4.83	0.84	3.17	0.75	4.01	0.69	4.21	0.58	5.12
Свинец (припой)	405.8	0.62	4.35	0.97	3.01	0.88	3.51	0.72	4.03	0.61	4.61
	416.8	0.59	4.54	0.89	3.24	0.87	3.80	0.71	4.05	0.58	4.92
	520.1	0.61	4.73	0.78	3.17	0.88	3.43	0.64	4.17	0.55	4.91
Олово (латунь)	452.5	0.61	4.32	0.86	2.75	0.73	3.35	0.67	3.83	0.56	4.04
	533.2	0.65	6.41	0.82	4.32	0.73	4.31	0.68	4.73	0.66	5.24
	579.9	0.62	6.29	0.86	3.83	0.76	4.25	0.62	4.83	0.59	5.05
Олово (бронза)	452.5	0.78	6.13	0.93	3.13	0.88	4.56	0.72	5.01	0.64	5.94
	533.2	0.63	7.24	0.91	4.89	0.81	5.37	0.70	6.37	0.62	6.86
	579.9	0.61	7.08	0.78	4.56	0.72	5.74	0.71	6.24	0.67	6.48
Олово (припой)	452.5	0.81	6.04	0.92	4.84	0.87	4.05	0.87	5.01	0.72	5.24
	533.2	0.75	7.31	0.90	5.15	0.84	5.24	0.83	6.14	0.65	6.54
	579.9	0.74	7.32	0.91	5.01	0.81	6.25	0.83	6.25	0.71	6.87

Для определения возможных причин отклонения временных зависимостей интенсивности линий элементов от экспоненциального вида при двухимпульсной лазерной абляции найдем температуру плазмы T спектральными методами, исходя из предположения локального термодинамического равновесия и с использованием формулы Орнштейна:

$$T = \frac{0.625(E_1 - E_2)}{\ln(g_1 A_1 / g_2 A_2) - \ln(\lambda_1 / \lambda_2) - \ln(I_1 / I_2)}$$

Величины взяты из табл. 1 и зарегистрированных спектров. Максимальные температуры абляционной плазмы имеют место при абляции чистых металлов с межимпульсным интервалом 1 мкс: 4200 К для Cu, 5600 К для Zn, 8100 К для Sn и 9200 К для Pb. При увеличении межимпульсного интервала температура плазмы снижается и при 10 мкс достигает в среднем в 1.5—1.8 раза меньших значений, чем при 1 мкс, что сопоставимо с температурой при одноимпульсном воздействии. Отметим, что снижение температуры плазмы с увеличением межимпульсного интервала для рассмотренных элементов аппроксимируется экспоненциальной зависимостью ($R^2 = 0.91—0.93$). При двухимпульсной лазерной абляции многокомпонентных сплавов температуры плазмы одного и того же образца, рассчитанные по парам спектральных линий разных компонентов, различаются, причем эта разница увеличивается с ростом межимпульсного интервала, а температура снижается. Различием температур подтверждается существование пространственно-компонентной неоднородности: более легкоплавкие элементы (Sn и Pb) оказываются преимущественно в более горячих областях плазмы, хотя температура парогазового облака многокомпонентных сплавов в среднем на 500—800 К ниже, чем при абляции чистых олова и свинца. Временные изменения температуры при двухимпульсной абляции многокомпонентных сплавов не могут быть аппроксимированы экспоненциальной зависимостью.

Заключение. Представленный спектрально-кинетический регистратор, работающий в специальном режиме временного стробирования, позволяет одновременно измерять разрешенные во времени спектры и изменения интенсивности спектральных линий при проведении атомно-эмиссионного анализа. Использование спектрально-кинетического регистратора в совокупности с двухимпульсным лазерным спектрометром LSS-1 позволяет оценить временную зависимость интенсивности аналитических спектральных линий при абляции чистых металлов и многокомпонентных сплавов. Обнаружено, что в многокомпонентной плазме при увеличении межимпульсного интервала более чем на 3 мкс временная зависимость интенсивности не может быть описана экспонентой. Это указывает на существующее взаимодействие компонентов плазмы, которое может дополнительно увеличивать пространственно-компонентную неоднородность эрозионного облака, что в свою очередь приведет к увеличению погрешности количественного анализа. При малых межимпульсных интервалах (~1 мкс) к моменту прихода второго импульса распределение элементов в плазме сравнительно равномерное и соответствует исходному образцу, поэтому кинетика интенсивности спектральных линий различных компонентов схожа. Полученные результаты указывают на необходимость проводить аналитические измерения при небольших межимпульсных интервалах (1—3 мкс), несмотря на то что при двухимпульсной лазерной абляции металлов максимальная интенсивность спектральных линий имеет место при 10 мкс.

[1] Ph. L. Dudragne, A. Amouroux. *J. Appl. Spectr.*, **52**, N 10 (1998) 1321—1327

[2] E. Grifoni, S. Legnaioli, M. Lezzerini, G. Lorenzetti, S. Pagnotta, V. Palleschi. *J. Spectrosc.*, **2014** (2014) ID 849310

[3] W. Bauer, G. P. Perram, T. Haugan. *J. Appl. Phys.*, **123** (2018) 095304

[4] M. Corsi, G. Cristoforetti, M. Hildalgo, D. Iriatre, S. Legnaioli, V. Palleschi, A. Salvetti, E. Tognoni. *Appl. Spectrosc.*, **57**, N 6 (2003) 715—721

[5] N. Farid, S. S. Harilal, H. Ding, A. Hassanein. *J. Appl. Phys.*, **115** (2014) 033107

[6] G. Galbács, N. Jedlinszki, K. Herrera, N. Omenetto, B. W. Smith, J. D. Winefordner. *Appl. Spectrosc.*, **64**, N 2 (2010) 161—172

[7] Л. Н. Василевич, Ф. А. Ермалицкий, С. В. Суханин, Д. В. Липский. ПТЭ, № 4 (2002) 163—164

[8] Е. С. Воропай, И. М. Гулис, К. Ф. Ермалицкая, Ф. А. Ермалицкий, К. Н. Каплевский, А. Е. Радько, К. А. Шевченко. ПТЭ, № 4 (2016) 154—155