

**М.І. Дзюбенко<sup>1,2</sup>, А.В. Дегтярьов<sup>1</sup>, С.М. Колпаков<sup>1</sup>, О.О. Приймко<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України  
12, вул. Акад. Проскури, 61085, Україна<sup>2</sup> Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна  
4, пл. Свободи, Харків, 61022, Україна  
E-mail: mid41@ukr.net

## Часові параметри оптимальної реєстрації емісійного спектра при використанні мілісекундних лазерних імпульсів

**Предмет і мета роботи.** Отримані емісійні спектри сплавів міді і срібла з різними тривалостями реєстрації. Випромінювання, що потрапляє на фотоприймач спектрометра, складається з відбитого випромінювання лазера та лінійчастих спектрів парів досліджуваної речовини і розігрітого матеріалу в конденсованій фазі. При збільшенні часу реєстрації спектра його фонова складова різко зростає. Мета роботи – вивчення умов взаємодії лазерних імпульсів мілісекундної тривалості з металами та визначення часових параметрів реєстрації оптичного сигналу випромінювання, які забезпечують оптимальну реєстрацію емісійного спектра в діапазоні 400...800 нм.

**Методи і методологія роботи.** Основною проблемою при реєстрації емісійного спектра є наявність суцільної теплової компоненти. Теоретично розраховано форму лазерного імпульсу для оптимальної реєстрації емісійного спектра. Показано, що чистота емісійного спектра залежить від тривалості його реєстрації. Процес мінімізації безперервної компоненти лазерного емісійного аналізу полягає у формуванні оптимальної форми лазерного імпульсу і підтримці її в процесі роботи. Емпірично встановлено, що оптимальний час реєстрації емісійного спектра при тривалості лазерного імпульсу 5 нс становить 1...3 нс.

**Результати роботи.** Встановлено, що основними факторами, які впливають на співвідношення інтенсивностей безперервного і лінійчастого спектрів, є теплофізичні властивості металу і форма імпульсу лазерного випромінювання, особливо крутизна його заднього фронту. При використанні в лазерному емісійному аналізі лазерів з квазіоптимальною формою імпульсу можна збільшити максимальну частоту оптимальної реєстрації емісійного спектра. Для тривалості імпульсу 3 нс і енергії 10 Дж максимальна частота лазера, за якої можливий лазерний емісійний аналіз, може скласти 70...75 Гц.

**Висновок.** Процес оптимізації лазерного емісійного аналізу полягає у формуванні оптимальної форми лазерного імпульсу і підтриманні її в процесі роботи. Іл. 6. Бібліогр.: 13 назв.

**Ключові слова:** лазерне зварювання, лазерне різання, лазерний імпульс, емісійний спектр, тривалість, форма імпульсу.

Світовий обсяг продажів технологічних лазерів і лазерного обладнання за останнє десятиліття, зріс більш ніж удвічі і, за даними *Strategies Unlimited*, у 2018 році досяг 13,06 млрд. дол. [1]. Збільшення доходів лазерної промисловості триває в автомобільному, аерокосмічному, енергетичному секторах.

Провідними виробниками лазерів і лазерного обладнання в 2018 році були, як і в попередні роки, фірми *Trumpf* (ФРН, Дітцинген), *IPG* (США, Оксфорд), *Han's Laser* (КНР,

Шеньжень), *Coherent* (США, Санта-Клара). Існуюча конкуренція на ринку лазерного обладнання вимагає від його виробників підвищення якості і швидкості обробки матеріалів.

Оброблювані матеріали (у 90 % випадках – метали), як правило, неоднорідні за складом у межах зони дії лазерного випромінювання. Це об'єм порядку 0,2...1,0 мм<sup>3</sup>. Одним з напрямків, який може вирішити задачу підвищення якості обробки, є забезпечення оптимальних параметрів лазерного випромінювання (потуж-

ність, тривалість і форма імпульсу) для кожної області взаємодії променя з поверхнею. Вихідні дані для оптимізації можна отримати з аналізу емісійного спектра факела, що виникає в результаті взаємодії потужного лазерного випромінювання з металами.

Лазерний емісійний спектральний аналіз *LIBS* (*Laser-induced breakdown spectroscopy*) заснований на тому, що аналізований об'єкт сфокусованим променем лазера переводиться в атомарний стан, після розігріву переходить у плазму. В оптичному випромінюванні плазми містяться спектральні лінії, відповідні до аналізованого матеріалу. Співвідношення інтенсивності спектральних ліній служить мірою кількісного співвідношення елементів у складі аналізованого матеріалу.

Зараз багато фірм випускають *LIBS*-спектрометри. У них використовуються лазери з тривалістю імпульсів випромінювання від одиниць пікосекунд до 100 нс. Чим коротша тривалість імпульсу, тим «чистіший» виходить емісійний спектр на оптичному приймачі.

Це пов'язано з наступним. Випромінювання, що потрапляє на фотоприймач спектрометра, містить:

- відбите випромінювання лазера;
- лінійчастий спектр парів речовини, що досліджується;
- суцільний спектр розігрітого матеріалу конденсованої фази.

Для виключення впливу на емісійний спектр відбитого випромінювання лазера використовують фільтри. Найпоширенішим діапазоном аналізу емісійного спектра є діапазон 400...800 нм. Це пов'язано з тим, що в якості приймачів використовують недорогі *CCD*-лінійки, що працюють у цьому діапазоні, наприклад *TCD1304* (рис. 1). Для збудження емісійного спектра зазвичай використовують лазери з довжиною хвилі 1064 нм, тому не виникає складнощів з фільтрацією цього випромінювання.

Фільтрація безперервного спектра є набагато складнішим завданням. Як правило, вона вирішується шляхом вибору відповідних часових рамок для реєстрації сигналу, дотримання яких необхідне для зменшення безперервного фону і виділення спектральних ліній достатньої інтенсивності. Методики вирішення цього завдання для тривалості лазерних імпульсів до

десятків наносекунд добре вивчені і широко застосовуються на практиці [2–4].

У лазерному обладнанні для обробки металів використовують як безперервний, так і імпульсний режими роботи лазерів. Найбільш поширене застосування мілісекундних тривалостей імпульсів, наприклад, для лазерного зварювання і наплавлення. Процес зварювання передбачає нагрів матеріалу до температур вище точки плавлення та утворення спільної ванни розплаву для деталей, що зварюються, на місці якої формується зварне з'єднання.

Часові еволюції лінійчастого емісійного і безперервного спектрів для мілісекундних та наносекундних тривалостей лазерного імпульсу відрізняються одна від одної.

Застосування мілісекундних імпульсів у *LIBS* описане у літературі набагато менше, ніж питання використання наносекундних імпульсів [5–8]. Найімовірніше, це пов'язано з двома факторами:

- 1) раніше не було гострої необхідності у проведенні емісійного спектрального аналізу в процесі лазерної обробки металів;
- 2) лазери, що випускалися раніше, не мали можливості з високою швидкістю керувати потужністю і тривалістю імпульсу.

Мета статті – вибір часових параметрів реєстрації оптичного сигналу випромінювання, що виникає під час взаємодії лазерних імпульсів мілісекундної тривалості з металами, для оптимальної реєстрації емісійного спектра в діапазоні 400...800 нм.

Основною проблемою при реєстрації емісійного спектра є наявність суцільної теплової компоненти спектра. Вона виникає в результаті нагрівання металу в конденсованому стані ла-

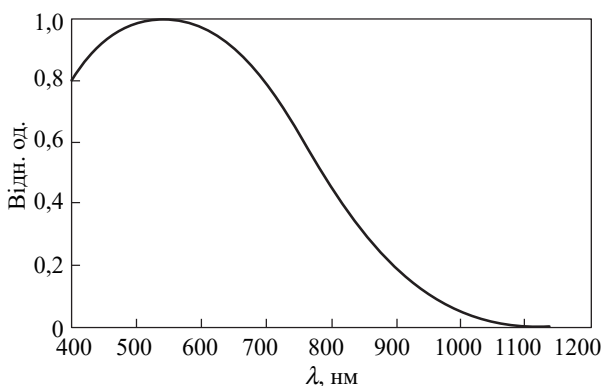


Рис. 1. Спектральна чутливість *CCD*-лінійки *TCD1304*

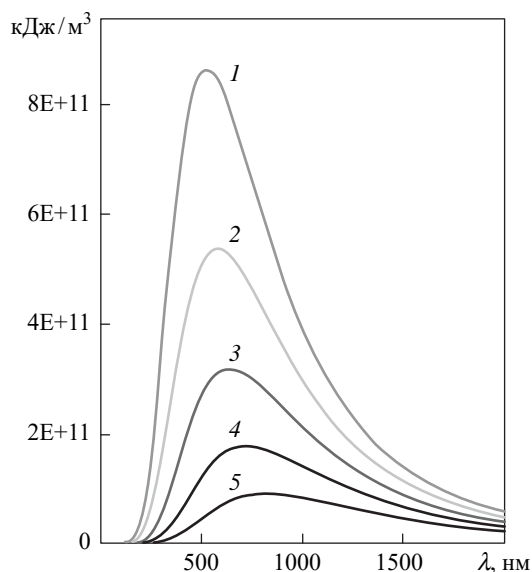


Рис. 2. Спектр теплового випромінювання абсолютно чорного тіла [9]: 1 – 5500 К; 2 – 5000 К; 3 – 4500 К; 4 – 4000 К; 5 – 3500 К

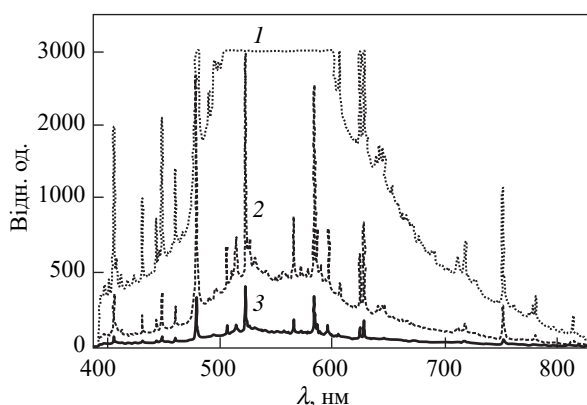


Рис. 3. Емісійний спектр для деяких значень тривалості реєстрації: 1 –  $t = 5$  мс; 2 –  $t = 3$  мс; 3 –  $t = 1$  мс

зерним імпульсом. Випромінювання суцільної компоненти може бути описане законом Планка для абсолютно чорного тіла [9]:

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}, \quad (1)$$

де  $T$  – температура;  $\nu$  – частота.

Довжина хвилі, за якої енергія випромінювання в цьому випадку максимальна, визначається законом Віна:

$$\lambda_{\max} = \frac{0,0028999}{T}. \quad (2)$$

Спектр випромінювання чорного тіла для різних температур нагріву наведений на рис. 2.

Наприклад, температура кипіння заліза 2862 °С. У цьому випадку довжина хвилі, за якої енергія випромінювання максимальна, дорівнює 1 мкм. Енергія теплового випромінювання на довжині хвилі 400 нм відповідає приблизно 1/7 від максимальної, а на 800 нм – 1/5. Таким чином, теплове випромінювання є фоновим у всьому діапазоні реєстрації емісійного спектра.

Експерименти показали, що вигляд емісійного спектра дуже сильно залежить від тривалості реєстрації (рис. 3) [10]. Це пов'язано з тим, що часові еволюції емісійного і теплового спектрів різні. З цієї причини максимуми інтенсивності цих спектрів рознесені в часі.

Використання в якості приймачів *CCD*-лінійок потребує компромісу між великим часом реєстрації, вимогами до чутливості і можливістю мінімізувати вплив безперервного спектра. На практиці, як правило, цей компроміс досягається емпіричним шляхом – методом добору оптимального часу початку реєстрації емісійного спектра (щодо моменту початку взаємодії випромінювання з речовиною) і тривалості його реєстрації.

Крім цього, на якість реєстрації емісійного спектра впливають характеристики оптичної системи, яка проектує факел плазми на вхідну щілину спектрометра. У цьому випадку теж вирішується оптимізаційна задача між збільшенням поля зору оптичної системи для збільшення енергії, яка подається на фотоприймач, і тепловим засвіченням емісійного спектра. Емісійний спектр у просторі обмежений діаметром падаючого променя лазера на поверхню речовини, який, як правило, становить 0,05...0,7 мм. Діаметр нагрітої лазерним імпульсом поверхні металу може досягати 10 мм і більше. Теоретично можливо розрахувати параметри оптичної системи, яка прийматиме сигнал з ділянки поверхні, де енергія емісійного спектра набагато перевищує енергію безперервного спектра. Однак на практиці це реалізувати дуже складно через такі фактори:

- просторова нестабільність променя лазера;
- енергетична нестабільність імпульсів лазера;
- неоднорідність матеріалу;
- турбулентність, яка з'являється через різку зміну температури поверхні;

- вібрація, яка виникає внаслідок зміщення поверхні під час технологічного процесу.

**1. Діаметр зони з максимальною енергією емісійного спектра** дорівнює розміру поверхні, з якої відбувається випаровування речовини. Внаслідок фокусування випромінювання на поверхні в матеріалі утворюється заглиблення. Зміна геометричних розмірів у часі визначається рівнянням світлового конуса [11]:

$$r(t) = r_0 + h(t) \operatorname{tg} \gamma, \quad (3)$$

де  $r(t)$  – змінений за час лазерного імпульсу діаметр заглиблення;  $r_0$  – діаметр променя лазера у фокусі об'єктива;  $2\gamma$  – кут зведення променя лазера при фокусуванні;  $h(t)$  – змінна за час лазерного імпульсу глибина заглиблення.

Якщо фокусна відстань об'єктива дорівнює 100 мм, діаметр падаючого на об'єктів променя лазера – 30 мм, тривалість імпульсу – 10 мс, енергія імпульсу – 20 Дж, то глибина заглиблення в металі становить  $\approx 1$  мм. Діаметр фокальної плями дорівнює 50...80 мкм. З урахуванням другого доданка в (1), діаметр заглиблення становить 95 мкм, що добре узгоджується з реальними діаметрами. Отже, щоб оптимально зареєструвати енергетичний спектр, необхідно оптичну систему розрахувати таким чином, щоб на вхідну щілину спектрографа була спроектована ділянка поверхні діаметром  $\approx 0,1$  мм.

**2. Тривалість емісійного спектра.** Під час взаємодії з поверхнею металу випромінювання частково відбивається, а частково поглинається матеріалом і досить швидко переходить у тепло. Протягом тривалості лазерного імпульсу інтенсивність випромінювання зростає. Коли інтенсивність випромінювання досягає певного значення, починається плавлення металу. У результаті виникає область рідкого металу. Поверхня, що розділяє області рідкого і твердого металу, у міру поглинання енергії лазерного імпульсу переміщується в глиб матеріалу. При цьому площа поверхні розплаву збільшується.

Якщо інтенсивність випромінювання протягом лазерного імпульсу збільшується, одночасно з плавленням відбувається випаровування (кипіння) матеріалу. Частина речовини перетворюється на пару, внаслідок чого на поверхні металу виникає заглиблення. Коли інтенсивність випромінювання в імпульсі досягає критичного значення, випромінювання лазера

почне сильно іонізувати пари металу, перетворюючи їх на плазму. Цей момент фактично є початком виникнення емісійного спектра. Лазерне випромінювання дуже сильно поглинається плазмою, і одночасно ця ж плазма екранує теплове випромінювання нагрітого металу. У цей момент в емісійному спектрі спостерігається мінімальний рівень безперервного спектра.

Час закінчення емісійного спектра визначається тривалістю лазерного імпульсу, формою імпульсу, його енергією і теплофізичними властивостями металу. Залежно від співвідношення цих параметрів, закінчення емісійного спектра обумовлене такими чинниками: 1) закінченням зростання інтенсивності випромінювання в імпульсі; 2) якщо швидкість зменшення концентрації випарованої речовини в зоні взаємодії перевищить швидкість зростання інтенсивності в імпульсі, тоді виникне момент, коли іонізованої речовини в зоні взаємодії практично не залишиться. Цей момент є моментом закінчення емісійного спектра.

Основним фактором, що впливає на часову еволюцію плазми, є відбиття випромінювання від поверхні металу. Незважаючи на велику кількість робіт, які описують процес відбиття, багато пов'язаних з цим процесом питань мають дискусійний характер. Справа в тому, що відбиття випромінювання від поверхні металу залежить від багатьох факторів: потужності, тривалості, просторової однорідності лазерного імпульсу, хімічного складу поверхні і навколишнього середовища. У багатьох випадках неможливість контролю експериментальних умов у кінцевому підсумку призводила до неоднозначності результатів та їх інтерпретації. Одні з перших теоретичних робіт [11, 12], що описують вторинне випромінювання при лазерному збудженні мілісекундними імпульсами, ґрунтувалися на припущенні, що сам процес збудження близький до рівноважного, а вторинне випромінювання близьке до планківського випромінювання.

На цьому етапі метал переходить в атомарний стан, потім атомні пари розігріваються і переходять у плазму.

Покладемо, що лазерний промінь має гауссівський просторовий розподіл інтенсивності. Тоді температура, як функція відстані  $r$  від центру плями, яку нагрівають, глибини  $z$  від

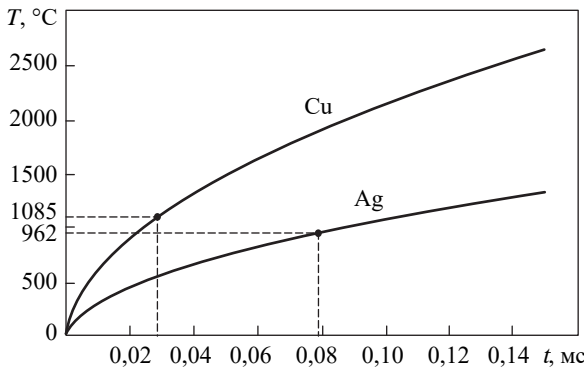


Рис. 4. Швидкість нагрівання матеріалу на глибині 50 мкм

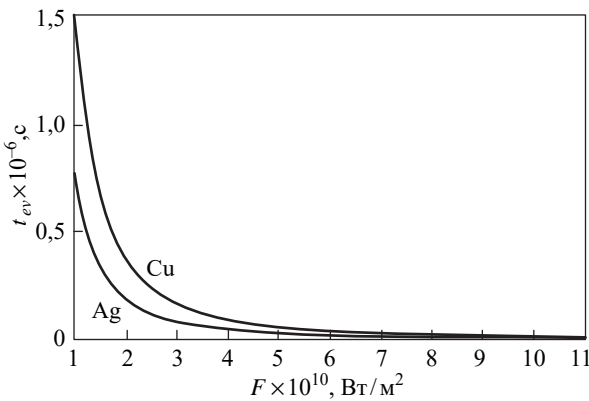


Рис. 5. Час нагрівання матеріалу від температури плавлення до випаровування

поверхні і часу  $t$  визначається формулою [13]:

$$T(r, z, t) = \frac{d^2 F}{K} \sqrt{\frac{\chi}{\pi}} \times \int_0^t \frac{\exp(-z^2 / [4\chi h]) \exp(-r^2 / [4\chi h + d^2])}{(4\chi h + d^2) \sqrt{h}} dh, \quad (4)$$

де  $d$  – діаметр променя;  $K$  – коефіцієнт теплопровідності;  $F$  – густина потоку лазерного випромінювання;  $\chi$  – коефіцієнт температуропровідності ( $\chi = K / c\rho$ , де  $c$  – питома теплоємність,  $\rho$  – густина речовини);  $z$  – глибина;  $r$  – відстань від центру плями, яку нагрівають.

У формулі (4) густина потоку випромінювання  $F$  вважається сталою. Практично ж, вона є функцією часу і залежить від параметрів імпульсу накачування активного елемента лазера. Одним з варіантів такої залежності, отриманої емпірично, є залежність:

$$F(t) = 3 \cdot 10^{11} \sqrt{t}. \quad (5)$$

На рис. 4 наведено залежності швидкості нагрівання міді і срібла на глибині 50 мкм, розраховані з (2) і (3). Точками позначено температури плавлення, після яких коефіцієнт теплопровідності змінюється і процес нагрівання йде за іншим законом.

Якщо щільність випромінювання на матеріалі досягає  $10^{10} \dots 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>, теплопровідність «не встигає» відводити енергію від поверхні, яка поглинає лазерне випромінювання, і починається випаровування матеріалу. Час нагрівання матеріалу до температури випаровування визначається виразом [9]:

$$t_{ev} = \frac{\pi K c \rho}{4 F^2} (T_{ev} - T_{mel})^2, \quad (6)$$

де  $\rho$  – густина речовини;  $T_{ev}$  – температура випаровування речовини;  $T_{mel}$  – температура плавлення.

Оскільки випаровування речовини починається після її розплавлення, коефіцієнт теплопровідності в цьому випадку необхідно брати для рідкої фази металу. Графіки залежності часу нагрівання металу до температури випаровування  $t$  від густини потоку  $F$  лазерного випромінювання, які побудовані на підставі (4) (рис. 5), показують, що випаровування металу дуже сильно залежить від густини потоку. Після початку випаровування оптичне випромінювання починає поглинатися і розсіюватися. Таким чином, оптимальна тривалість імпульсу лазерного випромінювання  $\tau$ , для реалізації оптимального процесу емісійного аналізу, визначається з виразу:

$$\tau = t_{ev} + t_{mel}. \quad (7)$$

Енергія випромінювання, що потрапляє на матеріал після цього часу, спрямовується на плавлення матеріалу, що створює перешкоду у вигляді теплового спектра. Швидкість зростання густини потоку  $F$  в імпульсі після температури кипіння повинна бути максимальною, а після початку випаровування вплив на матеріал має бути припинено. Теоретичний аналіз і експерименти показали, що для отримання оптимального лазерного емісійного спектра необхідно сформулювати імпульс лазерного випромінювання такого вигляду, як показано на рис. 6. Залежно від матеріалу, буде змінюватися і форма імпульсу  $F(t)$ . Це означає, що основним

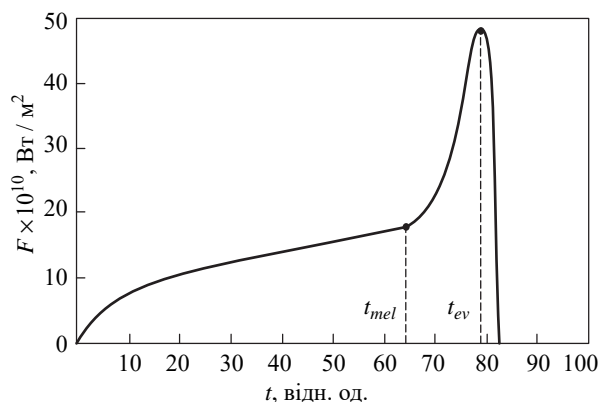
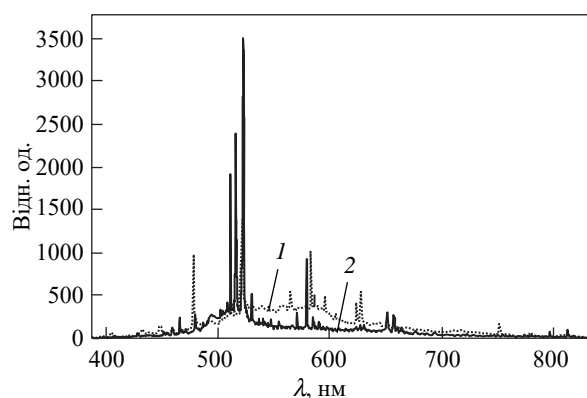


Рис. 6. Форма імпульсу

Рис. 7. Емісійний спектр сплаву міді та срібла: крива 1 –  $t = 3$  мс; крива 2 –  $t = 1$  мс

завданням керування лазерною системою є підтримка такої форми лазерного імпульсу  $F(t)$ , яка мінімізує вплив теплового спектра випромінювання на емісійний спектр.

**3. Експериментальна перевірка результатів розрахунку.** Для дослідження емісійних спектрів використовувався спектрометр на основі дифракційної решітки і лінійка з зарядовим зв'язком типу TCD1304, що має 3648 елементів розміром  $8 \times 200$  мкм. У спектрометрі використано решітку, яка має 100 пікс./мм, що забезпечило робочий діапазон 360...840 нм і спектральне розділення 1 А/пікс. Випромінювання в спектрометр вводилося за допомогою кварцового світловоду через об'єktiv. В якості зразка для досліджень був обраний сплав міді з сріблом.

Основним критерієм вибору часу реєстрації спектра було максимальне використання динамічного діапазону спектрометра. Реєструвальна лінійка працювала в режимі накопичення сигналу за часом.

Експерименти підтвердили, що у випадку збільшення часу реєстрації спектра фонові складова спектра різко зростає. Якщо час реєстрації перевищує 30 мс, це призводить до насичення ПЗС (приладу із зарядовим зв'язком) і втрати корисного сигналу. Для зменшення похибок квантування сигналу і впливу власного шуму лінійки інтенсивність випромінювання ліній повинна бути якомога більшою. З часом реєстрації до 0,5 мс інтенсивність більшості ліній є порівнянною за величиною з власним шумом лінійки, а тому емісійні спектри, отримані за цей інтервал часу, не придатні для подальшого аналізу. Емпірично визначено, що оптимальний час реєстрації емісійного спектра при мілісекундній тривалості лазерного імпульсу становить 1...3 мс (за тривалості імпульсу 5 мс).

На рис. 7 показані емісійні спектри сплаву міді та срібла. Час реєстрації 1 мс і 3 мс (триплет міді 521,1 нм–515,3 нм–510,5 нм і дуплет срібла 546,5 нм–520,9 нм).

**Висновок.** На підставі проведеного аналізу взаємодії лазерного випромінювання зі сплавом міді і срібла встановлено, що основними факторами, які впливають на співвідношення інтенсивності безперервного теплового і лінійчастого спектрів, є теплофізичні властивості металу та форма імпульсу взаємодії, особливо крутизна його заднього фронту.

Процес оптимізації лазерного емісійного аналізу полягає у формуванні оптимальної форми лазерного імпульсу і підтриманні її в процесі роботи. Алгоритм регулювання може бути такий:

1. У систему керування вводяться параметри, що характеризують теплофізичні властивості матеріалу (коефіцієнт теплопровідності, теплоємність, густина, температури плавлення і кипіння).

2. На підставі формул (1) і (3) розраховуються орієнтовні часові інтервали нагрівання матеріалу до температур плавлення та кипіння для заданої глибини і тривалості імпульсу.

3. На підставі технічних характеристик лазера формується квазіоптимальна форма імпульсу.

Часові параметри реєстрації оптичного сигналу випромінювання, що виникає під час взаємодії лазерних імпульсів мілісекундної тривалості з металами, для оптимальної реєстра-

ції емісійного спектра в діапазоні 400...800 нм такі:

- початок реєстрації через  $t_1 = 0,7\tau$  від моменту початку взаємодії лазерного імпульсу з поверхнею металу, де  $\tau$  – тривалість імпульсу;
- закінчення реєстрації через  $t_2 = t_1 + 0,7\tau$ , де  $\tau$  – тривалість імпульсу;
- максимальна частота лазера, за якої можливий лазерний емісійний аналіз, від  $F_{\max} = 1 / (t_2 + 10\tau)$  до  $F_{\max} = 1 / (t_2 + 5\tau)$ . Наприклад, експериментально встановлено, що для тривалості імпульсу 3 мс (енергія 10 Дж) максимальна частота 15...18 Гц.

У випадку використання в лазерному емісійному аналізі лазерів з квазіоптимальною фор-

мою імпульсу (рис. 5) можна збільшити максимальну частоту оптимальної реєстрації емісійного спектра. Це можливо через те, що нагрів матеріалу проводиться тільки переднім фронтом імпульсу. Після цього практично весь нагрітий матеріал випаровується, що відповідає часу формування факела, який складається з емісійних ліній спектра. Після припинення імпульсу максимум теплового спектра відповідає довжинам хвиль близько 1 мкм, що практично не впливає на характеристики спектроаналізатора. Теоретична максимальна частота лазера, за якої можливий лазерний емісійний аналіз, може скласти 70...75 Гц за тривалості імпульсу 3 мс і енергії 10 Дж в імпульсі.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Kinkade K., Noguee A., Overton G., Belforte D., Holton C. Annual Laser Market Review & Forecast: Lasers enabling lasers. *Laser Focus World*. 2018. Vol. 54, Iss. 1. P. 42–67.
2. Портативный LIBS-спектрометр Rigaku Katana. URL: <http://ccsservices.ru/catalog/libs-spektrometry/portativnyy-libs-spektrometr-rigaku-katana/>
3. Лазерный анализатор элементного состава NanoLIBS-Q. URL: <https://www.czl.ru/catalog/spektr/libs-spectrometers/nanolibs-q-spektrometr.html>
4. Портативный лазерный спектрометр (LIBS) металлов, почв, руд, песков, удобрений и т. п. URL: <https://www.iskroline.ru/spectrometers/sciapslibs/>
5. Каюков С.В. Обработка металлов импульсным лазерным излучением миллисекундной длительности. *Изв. Самарского научного центра РАН*. 1999. № 1. С. 39–50.
6. Афанасьева О.В., Лалазарова Н.А., Федоренко Е.П. Использование лазеров малой мощности в промышленных технологиях. *Радиотехника: науч.-техн. сб. ХНУРЭ*. Харьков, 2013. Вып. 175. С. 63–67.
7. Кривцун И.В., Семёнов И.Л., Демченко В.Ф. Численный анализ процессов нагрева и конвективного испарения металла при обработке излучением импульсного лазера. *Автоматическая сварка*. 2010. № 1. С. 5–10.
8. Воробьев В.С. Плазма, возникающая при взаимодействии лазерного излучения с твердыми мишенями. *Успехи физ. наук*. 1993. Т. 163, № 12. С. 51–82.
9. Демтредер В. *Лазерная спектроскопия. Основные принципы и техника эксперимента*. Пер. с англ. под ред. И.И. Собельмана. Москва: Наука, 1985. 608 с.
10. Развитие и применение квазиоптических и оптических методов и способов в радиофизических исследованиях в тергерцевой области спектра: отчет о НИР «Оплот». Ин-т радиофизики и электрон. им. А.Я. Усикова НАН Украины; рук. М.И. Дзюбенко, В.К. Киселев. Харьков, 2011. Кн. 3. 268 с. № ГР 0107U001081.
11. Kushida T. Laser Induced Temperature Radiation. *Jap. J. Appl. Phys.* 1965. Vol. 4, Iss. 1. P. 73–84.
12. Рывкин С.М., Салманов В.М., Ярошецкий И.Д. Тепловое излучение кремния под действием лазерного излучения. *Физика твердого тела*. 1968. Т. 10. С. 1052–1060.
13. Рэди Дж. *Действие мощного лазерного излучения*. Пер. с англ. Москва: Мир, 1974. 470 с.

Стаття надійшла 12.05.2020

#### REFERENCES

1. Kinkade, K., Noguee, A., Overton, G., Belforte, D., Holton, C., 2018. Annual Laser Market Review & Forecast: Lasers enabling lasers. *Laser Focus World*, 54(1), pp. 42–67.
2. Portable LIBS-spectrometer Rigaku Katana. Available at: <http://ccsservices.ru/catalog/libs-spektrometry/portativnyy-libs-spektrometr-rigaku-katana/>
3. Laser Analyzer elemental composition NanoLIBS-Q. Available at: <https://www.czl.ru/catalog/spektr/libs-spectrometers/nanolibs-q-spektrometr.html>
4. Portable Laser Spectrometer (LIBS) for metals, soils, ores, sands, fertilizers, etc. Available at: <https://www.iskroline.ru/spectrometers/sciapslibs/>
5. Kayukov, S.V., 1999. Processing of metals by pulse laser radiation of millisecond range of duration. *Bull. Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 1, pp. 39–50 (in Russian).
6. Afanasyev, O.V., Lalazarova, N.A., Fedorenko, E.P., 2013. Use of low-power lasers in industrial technology. In: *Radiotekhnika*. Kharkov: NURE Publ. 175, pp. 63–67 (in Russian).

7. Krivtsun, I.V., Semenov, I.L., Demchenko, V.F., 2010. Numerical analysis of the processes of heating and convective evaporation of metal in pulse laser treatment. *The Paton Welding J.*, 1, pp. 2–6.
8. Vorob'ev, V.S., 1993. Plasma Arising from the Interaction of Laser Radiation with Solid Targets. *Usp. Fiz. Nauk*, **163**(12), pp. 51–82 (in Russian).
9. Demtroder, W., 1985. *Laser spectroscopy*. Translated from English and ed. by I.I. Sobel'man. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
10. Dzyubenko, M.I., Kiselev, V.K. heads of R&D, 2011. *Development and Application of Quasi-Optical and Optical Methods and Techniques in Radiophysical Research in the Terahertz Region of Spectrum*: report on R&D "Oplot". O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NASU, Kharkov, Ukraine. Book 3. GR No. 0107U001081 (in Russian).
11. Kushida, T., 1965. Laser Induced Temperature Radiation. *Jap. J. Appl. Phys.*, **4**(1), pp. 73–84.
12. Ryvkin, S.M., Salmanov, V.M., Yaroshetsky, I.D., 1968. Thermal radiation of silicon under the action of laser radiation. *Phys. Solid State*, **10**, pp. 1052–1060 (in Russian).
13. Ready, J.F., 1974. *Effects of High-Power Laser Radiation*. Translated from English. Moscow: Mir Publ. (in Russian).

Received 12.05.2020

M.I. Dzyubenko<sup>1,2</sup>, A.V. Dehtiarov<sup>1</sup>, S.N. Kolpakov<sup>1</sup>, A.A. Priyomko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NASU

12, Acad. Proskura St., Kharkov, 61085, Ukraine

<sup>2</sup>V.N. Karazin Kharkiv National University

4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

#### TIME PARAMETERS OF OPTIMAL EMISSION SPECTRUM REGISTRATION USING MILLISECOND LASER PULSES

**Subject and Purpose.** Emission spectra of copper-silver alloys are examined for various recording durations. The radiation coming to the photodetector of the spectrometer consists of the reflected laser radiation and the line spectra of vapors formed by the test substance and the heated material in condensed phase. As the spectrum recording time increases, the background component builds up substantially. The purpose of the work is to study the interaction conditions of millisecond laser pulses with the metals and determine recording time parameters of the optical radiation signal in an effort to achieve an optimal recording of the emission spectrum in the range 400...800 nm.

**Methods and Methodology.** The main problem with emission spectrum recording is a persistent thermal component. The laser pulse shape for the optimal recording of the emission spectrum is theoretically calculated. The purity of the emission spectrum depends on its recording duration. The matter of persistent thermal component minimization in laser emission analysis implies the optimal shaping of the laser pulse and its maintenance during the operation. Empirical guidelines exist that the optimal time of the emission spectrum recording is 1...3 ms at a laser pulse duration of 5 ms.

**Results.** It has been found that the main factors affecting the intensity ratio of the continuous and line spectra are thermophysical properties of the metal and a laser pulse shape, especially the value of its trailing edge steepness. Lasers with quasi-optimal pulse shape enable us to increase a maximum frequency of optimal emission-spectrum recording in laser emission analysis. For a 3 ms duration and a 10 J energy of the pulse, the maximum laser frequency at which the laser emission analysis is still possible can be 70...75 Hz.

**Conclusion.** The process of laser emission analysis optimization consists in optimal laser pulse shaping and its maintenance during the operation.

**Key words:** laser welding, laser cutting, laser pulse, emission spectrum, duration, pulse shape.