

НЕПРЕРЫВНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ЛАЗЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ МОДИФИКАЦИИ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.А. Фираго, Н.В. Левкович, О.Р. Людчик, С.Г. Славинский
*Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, firago@bsu.by*

Рассматриваются особенности применения современной малогабаритной спектральной техники в устройствах непрерывного контроля импульсной лазерной обработки прозрачных материалов. Показано, что при организации непрерывного контроля целесообразно применение миниспектрофотометров Hamamatsu C12880MA и C11708MA. Оснащение их микропроцессором STM32 позволит поддерживать по спектру светового излучения, формирующегося в области воздействия мощного лазерного пучка, условия проводимого процесса обработки в заданных пределах.

Ключевые слова: лазерная обработка; стекло; наносекундное облучение; спектрометр.

CONTINUOUS SPECTRAL CONTROL OF LASER PROCESSES OF MODIFICATION OF TRANSPARENT MATERIALS

V.A. Firago, N.V. Levkovich, O.R. Lyudchik, S.G. Slavinsky
Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, firago@bsu.by

The features of the use of modern small-scale spectral technology in devices for continuous control of pulsed laser processing of transparent materials are considered. It is shown that when organizing continuous monitoring, it is advisable to use Hamamatsu C12880MA and C11708MA mini spectrophotometers. Equipping them with an STM32 microprocessor will make it possible to maintain, according to the spectrum of light radiation formed in the area of influence of a powerful laser beam, the conditions of pulsed laser processing within the specified limits.

Keywords: laser treatment; glass; nanosecond irradiation; spectrometer.

Введение

Лазерная обработка различных материалов по мере развития лазерной техники и повышения ее надежности все шире внедряется в технологические процессы современного производства. В процессе длительной эксплуатации мощной лазерной техники неизбежно возникает деградация используемых источников накачки и оптических элементов (фокусирующих линз, сканирующих зеркал и т.д.), поэтому для поддержания качества лазерной обработки изделий необходима аппаратура для осуществления непрерывного контроля. Обсуждение проблем, с которыми приходится сталкиваться при организации непрерывного контроля лазерных процессов, можно найти в обзоре [1]. К сожалению, там отсутствуют конкретные указания о составе требуемой аппаратуры и методах бесконтактного контроля, которые пригодны при непрерывном контроле.

Авторы исследований [2-4] рассмотрели возможности использования современной видеотехники и спектральной аппаратуры при организации контроля лазерных процессов обработки тугоплавких конструкционных материалов.

Показано, что при наладке лазерных процессов закалки, наплавки, сварки и т.д. применима тепловизионная техника на основе матриц кремниевых фотоприемников, которая регистрирует тепловое излучение, формирующееся в области воздействия мощного пучка лазерного излучения на обрабатываемую поверхность [2, 3]. К сожалению, при проведении непрерывного контроля тепловизионная техника требует создания быстрых алгоритмов обработки поступающего потока видеосигналов, которые были бы работоспособны в случаях возникновения различных нештатных ситуаций. Это оказалось непростой задачей, поэтому до сих пор не налажен серийный выпуск тепло-

визионных устройств непрерывного контроля.

Применение для непрерывного контроля спектральной техники [4], которая использует вогнутые дифракционные решетки и линейки фотоприемников, позволяет примерно на три порядка по сравнению с тепловизионной техникой снизить поток обрабатываемых данных, формируемых в области контроля с площадью поля несколько квадратных сантиметров [2, 3]. Применяемые решения и алгоритмы позволяют микропроцессору спектрометра непрерывно рассчитывать два наиболее информативных для петли обратной связи системы управления лазерной установкой параметра: 1) эффективную температуру $T_{\text{э}}$ в области воздействия, 2) смещение линеаризованной зависимости a , которое связано с эффективной площадью нагрева $S_{\text{э}}$ поверхности лазерным пучком. Предлагаемое решение позволяет оптимизировать параметры проводимого технологического процесса и составлять его технологическую карту, поддерживать $T_{\text{э}}$ и $S_{\text{э}}$ в заданных пределах путем подстройки необходимых параметров лазерной установки с петлей обратной связи.

Существует целая группа лазерных технологий, предназначенная для модификации свойств прозрачных однородных конденсированных сред: долговечная запись информации в прозрачных материалах, лазерный отжиг и т. д.

В докладе рассматриваются особенности проведения контроля процессов воздействия мощного импульсного лазерного излучения на прозрачные однородные среды, при которых формируется пробой среды с кратковременным возникновением в точке фокусировки микроплазменного облака. Такие процессы наиболее проблемные при проведении непрерывного контроля вследствие их кратковременности и сильного влияния пространственной неоднородности распределения примесей по объему обрабатываемого образца.

Результаты и их обсуждение

При пробое и возникновении плазменной

области часть энергии лазерного пучка преобразуется в световую энергию свечения плазмы. При помощи микроспектрометра C12880MA Hamamatsu авторами доклада регистрировался спектр свечения этой плазмы, что позволяет ввести один из параметров контроля – коэффициент $k_{\text{пр}}$, соответствующего доли энергии лазерного пучка преобразованной в излучение плазмы. Средняя мощность излучения плазмы определяется простым выражением $\bar{\Phi}_{\text{пл}} = k_{\text{пр}} E_{\text{ли}} / T_{\text{сл}}$, где $E_{\text{ли}}$ – энергия импульса лазерного излучения, $T_{\text{сл}}$ – период следования этих импульсов. Излучение микроплазменной области можно рассматривать как излучение точечного источника, поэтому средняя освещенность им поверхности сферы с радиусом r определяется отношением $\bar{E}_{\text{пл}} = \bar{\Phi}_{\text{пл}} / (4\pi r^2)$. Световой поток от плазмы $\bar{\Phi}_{\text{сп}}$, попадающий на щель спектрометра, зависит от r и площади щели спектрометра $S_{\text{щ}} = h \cdot l$, где h – ширина щели, составляющая для C12880MA 50 мкм, а l – высота щели, равная 500 мкм, т. е. $\bar{\Phi}_{\text{сп}} = \bar{E}_{\text{сп}} S_{\text{щ}}$. Отметим, что при градуировке спектрометра по яркости свечения $L(\lambda)$ модели абсолютно черного тела обычно используют абсолютную спектральную чувствительность спектрометра по плотности яркости L_{λ} , т. е. $S_{L\lambda}(\lambda_i) = [D(\lambda_i)/\tau] / L_{\lambda}(\lambda_i)$, где $D(\lambda_i)$ – цифровые отсчеты на выходе спектрометра, соответствующие i -му элементу линейки фотоприемников спектрометра, с шириной элементарного участка $\Delta\lambda_i$, а τ – используемое время экспозиции. Это позволяет определять спектральную плотность яркость свечения протяженного источника $L_{\lambda}(\lambda_i)$, излучение от которого в телесном угле $\Omega_{\text{сп}}$ попадает через входную щель в спектрометр. Значение $\Omega_{\text{сп}} = h^2 / l_{\text{сп}}^2$ определяется числовой апертурой используемого спектрометра, которая для C12880MA составляет $NA = \sin(\Theta/2) = 0.22$, где Θ – плоский угол при вершине пирамиды собираемых лучей от протяженного излучателя, тогда высота этой пирамиды $l_{\text{сп}} \approx (h/2)/NA$. При применении

градуировки по спектральной плотности потока $\Phi_\lambda(\lambda_i)$, попадающего от модели АЧТ в спектрометр в телесном угле $\Omega_{\text{сп}}$, необходимо учитывать, что $\Phi_\lambda(\lambda_i) = L_\lambda(\lambda_i) \times S_{\text{щ}} \Omega_{\text{сп}}$. Тогда абсолютная чувствительность спектрофотометра по спектральной плотности потока имеет вид $S_{\Phi\lambda}(\lambda_i) = [D(\lambda_i)/\tau]/\Phi_\lambda(\lambda_i) = S_{L\lambda}(\lambda_i)/(S_{\text{щ}}\Omega_{\text{сп}})$. Это позволяет оценить средний интегральный (по видимой области спектра) поток излучения плазмы, проходящего на щель спектрометра

$$\Phi_{\Sigma\nu} = \sum_{i=1}^{N_\nu} \frac{D(\lambda_i)/\tau}{S_{\Phi\lambda}(\lambda_i)} \Delta\lambda_i = \sum_{i=1}^{N_\nu} \frac{D(\lambda_i)/\tau}{S_{L\lambda}(\lambda_i)} S_{\text{щ}} \Omega_{\text{сп}} \Delta\lambda_i.$$

Умножая $\Phi_{\Sigma\nu}$ на длительность периода следования лазерных импульсов $\tau_{\text{сл}}$ и отношение площади сферы с радиусом r к площади входной щели спектрометра $k_S = 4\pi r^2/S_{\text{щ}}$, получаем энергию светового излучения, которая формируется микроплазменным облаком в видимой области спектра $E_{\text{пл}} = k_S \tau_{\text{сл}} \Phi_{\Sigma\nu}$. Это позволяет рассчитать коэффициент преобразования энергии лазерного пучка $E_{\text{ли}}$ в энергию светового излучения $k_{\text{пр}} = E_{\text{пл}}/E_{\text{ли}}$, которое формируется в области воздействия лазерного пучка.

На рис. 1 приведены зарегистрированные зависимости спектральных потоков от микроплазменных областей, возникающих при формировании мультидефектов в образце стекла, которые попадают на входную щель используемого спектрофотометра на основе C12880MA.

На спектральных зависимостях видны локальные максимумы на длинах волн 383 нм, 425 нм и 504 нм, формируемые за счёт линий излучения дважды ионизированного кремния Si^{2+} , которые уширены давлением и температурой. Ионы Si с большей ионизацией имеют существенно меньшую амплитуду излучения. Линии излучения ионов кислорода, а также однократно ионизированного кремния не попадают в окно прозрачности стекла или имеют малую интенсивность и поэтому не видны, а

спектр теплового равновесного излучения в области воздействия мал. Это указывает на целесообразность проведения контроля процесса формирования дефектов по интенсивности линий излучения, составляющих плазмы.

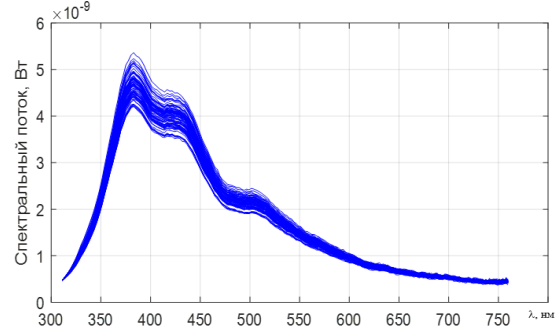


Рис. 1. Семейство спектральных потоков, зарегистрированных при свечении плазмы в области воздействия импульсного лазерного излучения с $\lambda = 1060$ нм, частотой следования 50 Гц и средней энергией 7.6 мДж

Заключение

Продemonстрирована возможность проведения непрерывного контроля спектральных свойств излучения, формирующегося в области воздействия импульсного лазерного излучения. Исследования выполнены в рамках задания 1.16. ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» (№ ГР 20212701).

Библиографические ссылки

1. Stavridis J., Papacharalampopoulos A., Stavropoulos P. Quality assessment in laser welding: a critical review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2017; 94: 1825-1847.
2. Firago V.A., [et al.]. Monitoring of Laser Processing of Structural Materials Using Thermal Imaging and Spectral. *J. of Applied Spectroscopy* 2022; 89(4): 731-741.
3. Wójcik W., [et al.]. Multispectral High Temperature Thermography. *Sensors* 2022; 22: 742-764.
4. Firago V.A., Levkovich N.V., Shuliko K.I. Diffuse Reflectance Spectrophotometers Based on C12880MA and C11708MA Mini-Spectrometers Hamamatsu. *Devices and Methods of Measurements* 2022; 13(2): 50-59.