

change of the electronic bandgap with temperature and it is normally positive. These two factors compete with each other giving positive or negative values of dn/dT . Therefore, the positive dn/dT coefficients of the Er:GYSO crystal are due to the fact that the contribution of the $(dn/dT)_{bg}$ term is dominant over the $(dn/dT)_{tec}$ one.

The anisotropy of the TOCs is characterized by $dn_p/dT > dn_g/dT > dn_m/dT$. Thermal coefficients of the natural birefringence are $\Delta_p = |dn_m/dT - dn_g/dT| = 1.5$ for $k//N_p$ (N_p -cut crystal), $\Delta_m = |dn_p/dT - dn_g/dT| = 2.0$ for $k//N_m$ (N_m -cut crystal), and $\Delta_g = |dn_p/dT - dn_m/dT| = 3.5$ (10^{-6} K^{-1}) for $k//N_g$ (N_g -cut crystal). The values of Δ are relatively small, the maximum variation occurs for the N_g -cut Er:GYSO. For comparison, the monoclinic YSO, $\text{Ca}_4\text{YO}(\text{BO}_3)_3$, $\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$, $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ have similar values of $\Delta_p = 1.03, 1.2, 1.1, 3.5$, $\Delta_m = 2.32, 1.3, 0.1, 2.2$ and $\Delta_g = 3.35, 2.5, 1.0, 5.7$ (10^{-6} K^{-1}), respectively [34, 39, 40].

The TCOP values are positive for all directions of the light propagation $k // N_p, N_m, N_g$. This means that the sign of the thermal lens, which is directly related to the TCOP value, will also be positive, and the positive

thermal lens is then expected for N_p -, N_m -, and N_g -cut Er:GYSO. The differences in the TCOP values for the same crystal cutting and the orthogonal light polarizations (1.9, 2.1, 3.2 for p-, m-, and g-cut crystals, respectively) are close to the corresponding values of the thermal coefficients of the natural birefringence Δ .

References

1. Mechanical properties and lattice parameters of $\text{Lu}_{2x}\text{Gd}_{2(1-x)}\text{SiO}_5:\text{Ce}$ scintillation crystals / V. Maksimchuka [et al.] // Acta Phys. Pol. A. – 2010. – Vol. 117 (1). – P. 146–149.
2. Growth, spectroscopy and lasing of the Yb-doped monoclinic Gd_2SiO_5 in the prospect of hydrogen laser cooling with Lyman- α radiation / L. Cabaret [et al.] // Optical Materials. – 2016. – Vol. 62. – P. 597–603.
3. A ground-state depleted laser in neodymium doped yttrium orthosilicate / R. Beach [et al.] // in Proc. SPIE. – 1990. – Vol. 1223. P. 160–180.
4. Thermo-optic coefficients of monoclinic $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ / S. Vatik [et al.] // Appl. Phys. B. – 2009. – Vol. 95 (4). – P. 653–656.
5. Utsu, T. Growth and applications of $\text{Gd}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ scintillators / T. Utsu, S. Akiyama // J. Crystal Growth. – 1991. – Vol. 109. – P. 385–391.

УДК 621.373.826

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ ЗАДАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Алексеев В.А.¹, Усольцева А.В.¹, Усольцев В.П.¹, Юран С.И.²

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

²Ижевская государственная сельскохозяйственная академия
Ижевск, Российская Федерация

Аннотация. Для обоснованного выбора режимов лазерной обработки материалов проведены исследования параметров профиля поверхности материала в зависимости от мощности лазерного излучения. Исследования показали, что задание и управление режимами лазерной обработки материалов необходимо производить на основании измеренных в реальном масштабе времени физико-механических характеристик материалов в условиях действия помех и неоднозначности существующих моделей динамики механических воздействий. Поскольку технология лазерной обработки материалов носит вероятностно-временной характер, при ее разработке следует учитывать корреляционные связи между состоянием поверхности (шероховатость, твердость и др.), и условиями (режимами) формирования поверхности (мощность лазерного излучения, скорость перемещения лазерного луча, частота импульсов, диаметр сфокусированного лазерного луча и др.).

Ключевые слова: Микронеровности, коэффициент корреляции, мощность лазера, состояние поверхности.

INVESTIGATION OF CORRELATIONS WHEN SETTING TECHNOLOGICAL MODES OF LASER PROCESSING OF MATERIALS

Alekseev V.¹, Usoltseva A.¹, Usoltsev V.¹, Yuran S.²

¹Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov

²Izhevsk State Agricultural Academy
Izhevsk, Russian Federation

Abstract. To make a reasonable choice of the modes of laser processing of materials, studies of the parameters of the surface profile of the material depending on the power of laser radiation were carried out. Studies have shown that the assignment and control of laser processing modes of materials must be carried out on the basis of the physical and mechanical characteristics of materials measured in real time under conditions of interference and the ambiguity of existing models of the dynamics of mechanical influences. Since the technology of laser processing of materials is of a probabilistic-temporal nature, its development should take into account correlations between the state of the surface (roughness, hardness, etc.), and the conditions (modes) of surface formation (laser radiation power, speed of movement of the laser beam, pulse frequency, diameter of the focused laser beam, etc.).

Key words: micro-dimensions, correlation coefficient, laser power, surface state.

Адрес для переписки: Юран С.И., ул. Студенческая, 11, Ижевск, Российская Федерация
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Во многих производственных процессах лазеры являются или единственным, или наиболее эффективным инструментом. Поэтому понимание основных принципов воздействия лазерного излучения на материал и знание алгоритма задания параметров лазера для решения определенных производственных задач является насущной потребностью производства.

Основной проблемой применения лазерной обработки в промышленности и декоративно-прикладном искусстве является отсутствие научно обоснованной информации о режимах обработки различных материалов. Особенно остро эта проблема стоит при обработке комбинированных материалов, когда художественно-промышленное изделие состоит из нескольких материалов, например, дерева, кожи, кости, оргстекла и т. д., а изображение наносится общее. При использовании одинаковых режимов для различных материалов происходит перерасход энергии, времени и понижение качества продукции.

До настоящего времени режимы обработки недостаточно отработаны, поэтому встречаются художественно-промышленные изделия, выполненные при неподходящем для данного материала режимах. Они имеют низкие технические и эстетические показатели. Экономическая эффективность лазерной обработки значительно повышается при априорном выборе оптимальных режимов за счет повышения качества обрабатываемой поверхности, минимального расхода энергии, времени и расходных материалов.

В процессе взаимодействия лазерного излучения с веществом происходит процесс плавления, испарения или абляции, обычно данные процессы сопровождаются разлетом частиц и капель исходного вещества. При низкой мощности излучения вещество испаряется или сублимируется в виде свободных молекул, атомов и ионов, над облучаемой поверхностью образуется слабая плазма, обычно, темная, не светящаяся. При повышении плотности мощности происходит микровзрыв с образованием кратера на поверхности образца и светящейся плазмы вместе с разлетающимися твердыми и жидкими частицами.

Указанные процессы носят нелинейный характер, поэтому, проведя даже несколько экспериментов, трудно предсказать итоговый результат.

В литературе по лазерным технологиям нет аналитических выражений, позволяющих рассчитать величину микронеровностей поверхности в зависимости от режимов работы лазерной установки. Приводимые в эксплуатационной документации на лазерные установки рекомендации по выбору технологических режимов носят рекомендательный характер и не показывают, какая шероховатость может быть достигнута.

Большинство рекомендаций по выбору режимов лазерной обработки предназначены для

подбора режимов опытным путем. Наиболее распространен метод получения необходимой производительности процесса и минимизации риска порчи изделия на начальных этапах следует делать пробы, желательно в незаметных местах изделия, или на схожем по составу материале [1].

Рассматривая поверхность материала как границу между материалом и окружающей средой, состояние поверхности представлено моделью поверхности, содержащей множество параметров (шероховатость, волнистость, пористость, фактура, рельеф, твердость и т. д.), связанных с природой материала и условиями (режимами) образования поверхности, полученной после обработки.

В качестве параметров исследования выбраны: Ra – среднее арифметическое значение отклонения профиля, Rz – высота неровностей профиля, снятая в 10 точках.

Варьируемым фактором, при изменении которого меняются значения параметров, выбрана мощность лазера. Использованы образцы из наиболее распространенных в декоративно-прикладном искусстве материалов – дерева, кожи, кости, оргстекла и т. д.

Для примера рассмотрена среднее значение микронеровностей при обработке прозрачного бесцветного органического стекла, натуральной и искусственной кожи, кости и древесины. Для этого по аналогии с полутонным клином по ГОСТ 24.930-81 «Клин полутонной для факсимильной аппаратуры» воспроизводилась линейка с 15 ступенями изменения мощности лазерного излучения, от 0,64 Вт до 9,6 Вт, с другими постоянными параметрами (скорость движения лазерного луча 18 см/сек, разрешающая способность 500 dpi, частота импульсов 1000 Гц, диаметр сфокусированного лазерного луча на материале 0,1 мм, отклонение угла падения лазерного луча 0^0). На полученных образцах на каждой ступени измерена величина микронеровностей с использованием микроинтерферометра МИИ 4 и по известным формулам рассчитаны коэффициенты корреляции между соседними ступенями, при ступенчатом изменении мощности.

Произведена оценка связи между соседними ступенями путем вычисления коэффициентов корреляции. Расчеты показали, что корреляционная связь между соседними ячейками практически отсутствует, даже при незначительном изменении мощности и смещения лазерного излучения. Поэтому сложно предположить, какая величина микронеровностей будет получена.

Таким образом, исследования показали, что задание и управление режимами лазерной обработки материалов необходимо производить на основании измеренных в реальном масштабе времени физико-механических характеристик материалов в условиях действия помех и неоднозначности существующих моделей динамики механических

воздействий [2, 3]. Для обоснованного задания технологических режимов лазерной обработки материалов необходимо с помощью разработанных теоретических и методических основ учитывать также фоновые значения, связанные с природой материала (микроструктура, химический состав, физико-механические характеристики).

Следует сказать, что технология лазерной обработки материалов носит вероятностно-временной характер, поэтому при ее разработке необходимо учитывать корреляционные связи между состоянием поверхности (шероховатость, волнистость, пористость, фактура, рельеф, твердость и т. д.), и условиями (режимами) формирования поверхности, полученной после обработки (мощность лазерного излучения, скорость перемещения лазерного луча,

разрешающая способность, частота импульсов, диаметр сфокусированного лазерного луча, направление луча на материал), тренд их изменения.

Литература

1. Otto, A. Multiphysical simulation of laser material processing / A. Otto, H. Koch, G. Vasquez // *Physics Procedia*. – 2012. – № 39. – P. 843–852.
2. Исследование влияния режимов лазерной обработки на качество поверхности материалов в приборостроении / В. А. Алексеев [и др.] // *Приборостроение-2019 : мат-лы 12-й Международной научно-технической конф.* – Минск : БНТУ, 2019. – С.433–435.
3. Исследование состояния поверхности биоткани при лазерной абляции / В. А. Алексеев [и др.] // *Прикладная оптика-2018: Сб. трудов Международной конф., СПб, 2018.* – Том 2. – С. 40–43.

УДК 528.854

МЕТОД МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ПУТЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО СПЕКТРАЛЬНОМУ СОСТАВУ

Антонов Е.А.¹, Куприянов А.А.², Калугин А.И.¹, Зарипов М.Р.¹

¹Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН

²Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова
Ижевск, Российская Федерация

Аннотация. В данной работе был проведен обзор основных методов получения мультиспектральных изображений и были выявлены основные недостатки этих методов. Был предложен альтернативный метод мультиспектральной съемки, рассмотрены его преимущества перед существующими методами, а также его недостатки.

Ключевые слова: мультиспектральная съемка, мультиспектральная камера.

METHOD OF MULTISPECTRAL IMAGING BY SPATIAL SEPARATION OF IMAGES DEPENDING ON THEIR SPECTRAL COMPOSITION

Antonov E.¹, Kupriyanov A.², Kalugin A.¹, Zaripov M.¹

¹Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

²Kalashnikov Izhevsk State Technical University
Izhevsk, Russian Federation

Abstract. The review of common methods of multispectral imaging is performed. Disadvantages of these methods are revealed. Alternative method of multispectral imaging is proposed and its advantages and disadvantages are considered.

Keywords: multispectral imaging, multispectral camera.

Адрес для переписки: Антонов Е.А., ул. Т. Барамзиной, 34, Ижевск 426067, Российская Федерация
e-mail: slick25@mail.ru

Все большую актуальность в последнее время набирают мультиспектральные способы съемки объектов, позволяющие определять различия в спектральных коэффициентах яркости и отражения объектов и сред. Благодаря этому, возможно дистанционно определить, например, различия состава объектов, неразличимых при наблюдении человеческим глазом. Вместе с этим, остро встает задача разработки новых устройств, способных, будучи компактными, реализовать данный процесс с достаточным про-

странственным, временным и спектральным разрешением. К таким устройствам относятся мультиспектральные камеры, находящие все больше применений в различных сферах жизни, от аэрофотосъемки и спектрометрирования ландшафта до дистанционного определения сорняков и больших растений на полях.

На сегодняшний день применяются следующие методы мультиспектральной съемки [1]:

– применение двух и более независимых камер, захватывающих свой спектральный диапа-