

Были получены аналитических выражений, позволяющие рассчитать предельные значения обсуждаемой амплитуды в зависимости от геометрических параметров детали и инструмента [2]. Теоретическую оценку качества двусторонней обработки линз выполняли следующим образом: выбирали диаметрально сечение линзы с максимальной величиной абсолютной погрешности путей резания  $\Delta l = l_{\max} - l_{\min}$  после ее поворота на угол  $\psi_{\max} = 4200$  рад, при котором  $\Delta l$  достигало минимальной величины ( $l_{\max}$  и  $l_{\min}$  – соответственно максимальное и минимальное значения путей резания в выбранном диаметрально сечении линзы). Разделив это  $\Delta l$  на максимальное значение путей резания  $l$  в выбранном сечении, получим  $\Delta l_{\text{отн}}$ , которое пропорционально погрешности детали в данном сечении  $\Delta l_{\text{отн}} = \Delta l / l$ .

В итоге получили следующие границы изменения отмеченных наладочных параметров: частота вращения линзы  $\omega_l = 2-10 \text{ с}^{-1}$ ; диаметр инструмента  $d_n = 70-94$  мм; величина амплитуды возвратно-вращательного движения инструмента  $L = 45-58$  мм; частота вращения входного звена исполнительного механизма станка  $\omega_2 = 0,5-8,5 \text{ с}^{-1}$ ; коэффициент  $k = \omega_n / \omega_l = 0,72-0,88$ .

Далее проводились теоретические и экспериментальные исследования процесса обработки выпуклой поверхности линзы радиусом кривизны 120,85 мм на этапе основного шлифования и на стадии полирования. Использовались полировально-доводочные станки мод. 6ПД200 (отдельно для шлифования и полирования). В качестве инструментов служили чугунный шлифовальный и пенополиуретановый полировальный (пенополиуретановая пленка толщиной 1 мм, наклеенная на металлический корпус).

**Выводы.** 1. Проведенные численные исследования обработки сферических поверхностей оптических деталей по методу свободного притирания позволили выявить, что при управлении процессом формообразования посредством изменения частот вращения линзы  $\omega_l$  и входного звена

исполнительного механизма станка  $\omega_2$  достичь высокой точности исполнительной поверхности детали не представляется возможным, особенно в случае  $\omega_2 = \omega_l$  при любых их значениях.

2. Выполненные расчеты показали, что наивысшая точность обработки достигается при максимальных значениях амплитуды колебательного движения инструмента, его диаметра и частоты вращения линзы и минимальных значениях частоты вращения входного звена исполнительного механизма станка и отношения частоты вращения инструмента к частоте вращения линзы. А поскольку такие значения данных наладочных параметров приводят к усиленному съему припуска в краевой зоне заготовки, то при обработке выпуклой поверхности линзы ее радиус кривизны на каждой предшествующей операции должен быть больше по сравнению с радиусом кривизны, который необходимо получить на последующих операциях. Для вогнутой поверхности должна соблюдаться обратная закономерность значений радиуса кривизны.

3. В результате проведенных экспериментальных исследований влияния динамической составляющей погрешности обработки линз на рычажных шлифовально-полировальных станках установлено, что с увеличением диаметра детали допустимая частота вращения шпинделя станка с закрепленной на нем заготовкой, независимо от величины его биения, уменьшается.

#### Литература

1. Бардин А.Н. Технология оптического стекла / А.Н. Бардин. – М.: Высшая школа, 1963. – 519 с.
2. Исследование влияния наладочных параметров станка на производительность и качество процесса одновременной двусторонней обработки линз / А.С. Козерук [и др.] // Наука и техника. 2018. – Т. 17. – № 5. – С. 390–400.
3. Исследование кинематических закономерностей процесса двусторонней обработки двояковыпуклых оптических деталей / А.С. Козерук [и др.] // Вест. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2008. – № 2. – С. 26–31.

УДК 681

### РАСЧЕТ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ Юхновская А.В., Юхновская О.В.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Цветовая координатная система CIE XYZ является базой для всех разработанных цветовых моделей и наиболее часто используется при определении цветовых координат свечения. Цветовые координаты излучения представляют собой три числа, которые являются количествами основных цветов в смеси, цвет которой зрительно неотличим от данного цвета.

Экспериментально определены функции цветового соответствия, для стандартного наблюдателя, которые показывают нужное количество трёх основных цветов для уравнения любого монохроматического излучения мощностью один ватт. Основными цветами системы являлись чистые спектральные цвета, соответствующие монохроматическому излучению с длинами волн

700,0 (красный), 546,1 (зелёный) и 435,8 нм (синий). Для удобства расчетов функции были математически преобразованы в систему CIE XYZ к виду, представленному на рисунке 1.

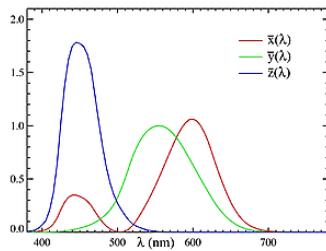


Рисунок 1 – Функции цветового соответствия в системе CIE XYZ

Цветовые координаты свечения находятся интегрированием произведения интенсивности излучения  $I(\lambda)$  на три функции соответствия:

$$X = \int_{360}^{840} I(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda, Y = \int_{360}^{840} I(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda,$$

$Z = \int_{360}^{840} I(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda$ , где  $X, Y, Z$  – цветовые координаты,  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$  – функции соответствия.

Кривая  $\bar{y}$  совпадает с кривой спектральной световой эффективности дневного зрения человека, поэтому величина  $Y$  определяет светлоту цвета.

Таблица 1 – Цветовые характеристики свечения образцов:  $x, y$  – цветовые координаты

| Образец   | {x,y}       |
|---|-------------|
| Возбуждение стоксовой люминесценции на длине волны 355 нм |             |
| Исходное стекло   | 0.224,0.203 |
| 800°C/6 ч.  | 0.16,0.048  |
| 900°C/6 ч.  | 0.178,0.098 |
| 1000°C/6 ч.   | 0.612,0.384 |
| Возбуждение АКЛ на длине волны 960 нм                     |             |
| Исходное стекло   | 0.224,0.203 |
| 720°C/6 ч.  | 0.196,0.157 |

Для определения цветовой составляющей удобно использовать систему  $Yxy$ . Оси  $x$  и  $y$  – оси цветности, а ось  $Y$  – ось светлоты. Цветовая координатная система  $Yxy$  вычисляется следующим образом:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, y = \frac{Y}{X+Y+Z}.$$

Координата  $z$  не является независимой ( $z = 1 - x - y$ ), и может не определяться. Рассчитанные координаты цветности люминесценции исследуемых материалов, а также ряда коммерческих люминофоров, приведены в таблице 1. На рисунке 2 представлена хроматическая диаграмма цветности, соответствующая цветовой координатной системе  $Yxy$  CIE 1931. Область ограничена линией спектральных цветностей по бокам и линией пурпурных цветностей снизу. Черной кривой соответствует линия цветностей черного тела при различных значениях цветовой температуры.

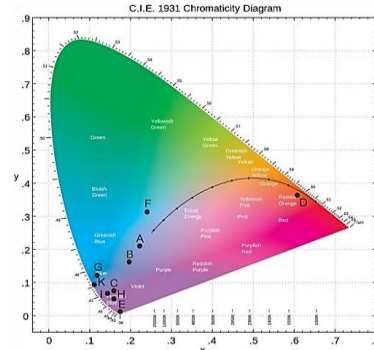


Рисунок 2 – Координаты цветности свечения исследуемых образцов стекол при возбуждении стоксовой люминесценции на длине волны 355 нм, исходное стекло (точка A), 800°C/6 ч (точка B), 900°C/6 ч (точка C), 1000°C/6 ч (точка D), при возбуждении АКЛ на длине волны 960 нм, исходное стекло (точка A), 720°C/6 ч (точка E), а также коммерческих люминофоров. Кривая соответствует цвету свечения абсолютно чёрного тела, нагретого до разных температур

Таблица 2 – Цветовые характеристики свечения коммерческих люминофоров

| Точка на рис. 4.2 | Формула                         | x     | y     | Цвет               |
|-------------------|---------------------------------|-------|-------|--------------------|
| F                 | $YAlO_3:Tm^{3+}$                | 0.236 | 0.306 | голубовато-зеленый |
| G                 | $SiO_2-Ta_2O_5:Tm^{3+}/Yb^{3+}$ | 0.115 | 0.108 | голубой            |
| H                 | $NaSrPO_4:Tm^{3+}$              | 0.153 | 0.043 | багряный           |
| I                 | $KMgBO_3:Tm^{3+}$               | 0.146 | 0.062 | багряный           |
| K                 | $CaMoO_4:Tm^{3+}/Yb^{3+}$       | 0.116 | 0.085 | голубой            |

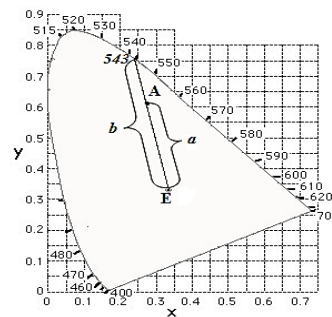


Рисунок 3 – Определение доминантной длины волны и чистоты цвета

Используя диаграмму цветности  $Yxy$  можно определить также некоторые характеристики цвета свечения. Точка E (рис. 3) с координатами  $x=y=1/3$  является точкой цветности равноэнергетического белого цвета. Если через точку E и точку, соответствующую координатам цветности исследуемого свечения (точка A), провести прямую, то точка пересечения полученной прямой и линией спектральных цветностей позволяет определить доминантную длину волны  $\lambda_d$  излучения. Значение чистоты цвета  $p_e$  излучения задается отношением длин отрезков:  $p_e = a/b$ , где  $a$  соответствует расстоянию от точки равных энергий до точки выбранного цвета,  $b$  – рассто-

яние от точки равных энергий до линии спектральных цветностей.

Значения доминантной длины волны свечения и чистоты цвета, определенные с помощью диаграммы цветности, представлены для каждого исследуемого образца в таблице 3.

На основе рассчитанных цветовых характеристик свечения исследуемых материалов можно заключить, что образцы исходного стекла и образцы содержащие Т-фазу  $\text{YNbO}_4$ , соактивированные ионами  $\text{Tm}^{3+}$ , очень близки по цветовым характеристикам люминесценции к коммерческим люминофорам.

Таблица 3 – Цветовые характеристики свечения образцов:  $\lambda_d$  – доминантная длина волны,  $p_e$  – чистота цвета

| Образец   | $\lambda_d$ , нм | $p_e$ |
|---|------------------|-------|
| Возбуждение стоксовой люминесценции на длине волны 355 нм |                  |       |
| Исходное стекло   | 473              | 0.50  |
| 800°C/6 ч.  | 457              | 0.92  |
| 900°C/6 ч.  | 464              | 0.79  |
| 1000°C/6 ч.   | 597              | 0.98  |
| Возбуждение АКЛ на длине волны 960 нм                     |                  |       |
| Исходное стекло   | 473              | 0.50  |
| 720°C/6 ч.  | 471              | 0.65  |

UDC 621

## THERMAL LENSING PROPERTIES OF ALEXANDRITE LASER CRYSTAL

Loiko P.<sup>1</sup>, Ghanbari S.<sup>2</sup>, Matrosov V.<sup>3</sup>, Yumashev K.<sup>4</sup>, Major A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ITMO University

Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Department of Electrical and Computer Engineering, University of Manitoba, Canada

<sup>3</sup>Solix Ltd., Minsk, Belarus

<sup>4</sup>Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University Minsk, Belarus

Alexandrite ( $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ ) is a well-known crystal for tunable lasers [1–3] which have relevant applications in medicine, space LIDAR technologies, spectroscopy [4] and can replace Ti:Sapphire lasers in nonlinear microscopy. However, thermo lensing properties of alexandrite have not been studied in detail to date.

In the present paper, we aimed to measure the thermal lens in a laser alexandrite ( $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ ) element under lasing conditions.

Alexandrite is orthorhombic (sp. gr.  $Pnma$ ) and thus optically biaxial. Its optical properties are characterized in the frame of the optical indicatrix. The optical indicatrix axes are mutually orthogonal and they coincide with the crystallographic axes  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$ .

Thermal lensing was studied in a  $c$ -cut 0.16 at. %  $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$  oriented for the  $\mathbf{E} \parallel \mathbf{b}$  laser polarization when placed at Brewster angle. The optical power of the thermal lens  $D$  (inverse of the focal length,  $D = 1/f$ ) was calculated from the measured radii of the output laser mode. For this, a ray transfer matrix formalism (ABCD law) was used and the  $M^2$  parameter of the laser beam was accounted for. The thermal lens was considered as a thin astigmatic lens located in the center of the crystal. The radii of the laser mode were measured along the horizontal ( $x$ ) and vertical ( $y$ ) directions using a beam profiler.

The schematic of the CW Alexandrite laser is shown in Fig. 1(a). The slab-shaped laser crystal was oriented at a Brewster angle ( $\theta_B$ ). Its dimensions were  $3 \times 5 \times 7 \text{ mm}^3$  (height  $\times$  width  $\times$  length). It was mounted in an Al-holder and passively cooled from 4 sides. A typical four-mirror laser cavity [5] was designed in such a way that the size of the output laser mode was sensitive to the thermal lens in the crystal. The cavity

consisted of a highly-reflective (HR, at  $0.75 \mu\text{m}$ ) plane mirror M1, two HR concave folding mirrors R1 and R2 (radius of curvature,  $R_{oc}$ : 100 mm), and a plane output coupler (OC) with a transmission of 5 % at the laser wavelength. The mirror R1 which served as a pump mirror was coated for high transmission (HT) at  $0.532 \mu\text{m}$ . The laser crystal was pumped by a CW green  $2\omega$  Nd:YVO<sub>4</sub> laser (Finesse, Laser Quantum) emitting up to 6 W at  $0.532 \mu\text{m}$  (a diffraction-limited output, TEM<sub>00</sub> mode). The pump was focused into the Alexandrite crystal by a 150 mm lens. At the focus the pump spot diameter  $2w_p$  was  $\sim 25 \mu\text{m}$  in the vertical direction and  $\sim 44 \mu\text{m}$  in the horizontal one (due to the Brewster-angle oriented crystal). The crystal was pumped in a single-pass and about 85 % of the pump was absorbed.

For the measurements of the laser beam radius, a 150 mm spherical lens placed at 34.8 cm after the OC, a cut-off filter for the green ( $0.532 \mu\text{m}$ ) and a beam profiler were used as shown in Fig. 1(b).

We started with characterization of the CW laser regime. The Alexandrite laser, Fig. 1(a), operated at  $0.7509 \mu\text{m}$  (fractional quantum defect for the pump and laser photons,  $\eta_q = 1 - \lambda_p/\lambda_L = 29.2 \%$ ). The laser output was linearly polarized ( $\mathbf{E} \parallel \mathbf{b}$ ). The maximum output power reached 1.11 W with a slope efficiency of 26.8 % (with respect to the absorbed pump power  $P_{abs}$ ). The optical-to-optical efficiency with respect to the incident pump power ( $P_{inc}$ ) was  $\sim 18\%$ .

In Fig. 2, we show the spatial profiles of the output mode from the Alexandrite laser corresponding to various levels of output power. Close to the laser threshold, the beam profile was nearly circular. At higher pump powers, the beam was distorted and became elliptic with its major semi-axis