



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-8-34-41>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.373.826, 621.38

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВУХЛУЧЕВОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ

В. А. ЕМЕЛЬЯНОВ¹, Е. Б. ШЕРШНЕВ², Ю. В. НИКИТЮК², С. И. СОКОЛОВ²,
И. Ю. АУШЕВ³

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины (г. Гомель, Республика Беларусь)

³Университет гражданской защиты МЧС Беларуси (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 16.09.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Аннотация. При помощи численного моделирования установлены значения технологических параметров, обеспечивающих эффективную двухлучевую лазерную очистку кварцевого сырья. Выполнена оптимизация двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья с использованием генетического алгоритма MOGA в программе ANSYS Workbench. С применением гранецентрированного варианта центрального композиционного плана эксперимента получена регрессионная модель двухлучевой очистки кварцевого сырья. В качестве варьируемых факторов принимали плотность мощности лазера с длиной волны излучения 10,60 мкм, плотность мощности лазера с длиной волны излучения 1,06 мкм, радиус частицы кварца, радиус частицы примеси и время обработки. В качестве откликов – максимальные температуры кварцевых частиц с примесью и без примеси. Проведена проверка регрессионной модели. Полученные результаты позволяют сделать вывод о наличии необходимого соответствия регрессионной модели данным конечно-элементного анализа. Выполнена оценка влияния параметров обработки на максимальные значения температуры кварцевых частиц. Оптимизацию двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья осуществляли по критерию минимума времени обработки при достижении значений максимальных температур кварцевых частиц с примесью температуры плавления и при ограничении значений максимальных температур кварцевых частиц без примеси значениями ниже температуры плавления. Оптимизацию выполняли для двух комбинаций размеров кварцевых частиц и частиц примеси. Проведено сравнение параметров, полученных в результате оптимизации, и параметров, полученных при конечно-элементном моделировании. Максимальная относительная погрешность данных, рассчитанных с использованием алгоритма MOGA, не превысила 2,5 % при определении максимальных температур. В результате моделирования установлены параметры обработки, использование которых обеспечит повышение производительности двухлучевой очистки кварцевого сырья.

Ключевые слова: лазерное излучение, сепарация, примесь, оптимизация, MOGA, ANSYS.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Оптимизация параметров двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья / В. А. Емельянов [и др.] // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20, № 8. С. 34–41. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-8-34-41>.

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF TWO-BEAM LASER TWELDING OF QUARTZ RAW MATERIALS

VICTOR A. EMELYANOV¹, EVGENY B. SHERSHNEV², YURI V. NIKITJUK²,
SERGEY I. SOKOLOV², IGOR Y. AUSHEV³

¹JSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

²Francisk Skorina Gomel State University (Gomel, Republic of Belarus)

³University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 16.09.2022

Abstract. In the work, with the help of numerical simulation, the values of technological parameters are established, which provide effective two-beam laser cleaning of quartz raw materials. The optimization of two-beam laser cleaning of quartz raw materials was performed using the MOGA genetic algorithm in the ANSYS Workbench program. Using the face-centered version of the central compositional plan of the experiment, a regression model of two-beam cleaning of quartz raw materials was obtained. The power density of a laser with the wavelength of 10.6 μm , the power density of a laser with the wavelength of 1.06 μm , the radius of a quartz particle, the radius of an impurity particle, and the processing time were used as variable factors. The maximum temperatures of quartz particles with impurities and quartz particles without impurities were used as responses. The regression model was tested. The results obtained allow us to conclude that there is a necessary correspondence between the regression model and the finite element analysis data. An assessment of the influence of processing parameters on the maximum values of the temperature of quartz particles was made. Optimization of two-beam laser cleaning of quartz raw materials was carried out according to the criterion of minimum processing time when reaching the maximum temperatures of quartz particles with an admixture of the melting temperature and limiting the maximum temperatures of quartz particles without an admixture to values below the melting temperature. Optimization was performed for two combinations of quartz and impurity particle sizes. The parameters obtained as a result of optimization and the parameters obtained as a result of finite element modeling are compared. The maximum relative error of the results obtained using the MOGA algorithm did not exceed 2.5 % when determining the maximum temperatures. As a result of the simulation, processing parameters have been established, the use of which will provide an increase in the productivity of two-beam purification of quartz raw materials.

Keywords: laser radiation, separation, impurity, optimization, MOGA, ANSYS.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflicts of interest.

For citation. Emelyanov V. A., Shershnev E. B., Nikitjuk Y. V., Sokolov S. I., Aushev I. Y. (2022) Optimization of Parameters of Two-Beam Laser Twelding of Quartz Raw Materials. *Doklady BGUIR*. 20 (8), 34–41. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-8-34-41> (in Russian).

Введение

Фотошаблоны являются важной составляющей производства микросхем. При их изготовлении широко используется кварцевое стекло, которое устойчиво к воздействию воды, щелочных и кислых растворов. Необходимость применения лазерного излучения меньшей длины волны при уменьшении размеров транзисторов так же определяет целесообразность применения кварцевого стекла для изготовления фотошаблонов [1].

Чистота кварцевого сырья, применяемого при изготовлении фотошаблонов, оказывает значительное влияние на эксплуатационные параметры микросхем [2]. В настоящее время используются электрические, магнитные и химические методы очистки кварцевого сырья от примесей [3]. Недостатки вышеперечисленных методов в ряде случаев удается преодолеть за счет применения двухлучевого способа лазерной очистки кварцевого сырья [4–6].

Оптимизация параметров лазерной очистки кварцевого сырья – важная задача. Примеры повышения эффективности лазерных технологий в результате оптимизации соответствующих технологических параметров с использованием генетических алгоритмов приведены в [7, 8].

Один из эффективных генетических алгоритмов – алгоритм MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) [9, 10]. Результаты оптимизации параметров конструкций и технологических процессов с использованием MOGA, реализованного в модуле DesignXplorer программы ANSYS Workbench, представлены в [7, 8, 10, 11]. Решение задачи определения параметров обработки с помощью MOGA в модуле DesignXplorer обеспечит эффективную реализацию двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья.

Конечно-элементный анализ

Расчет температурных полей, формируемых при двухлучевой лазерной очистке кварцевого сырья, выполняли с использованием программы на языке программирования APDL (ANSYS Parametric Design Language) в комплексе конечно-элементного анализа ANSYS [12]. Для моделирования сформировали сферическую конечно-элементную модель частицы кварца с включением примеси, состоящую из 183 643 элементов Solid 87. При расчетах использовали свойства кварца и слюды, как основных видов примесей, содержащихся в кварцевом сырье [13, 14]. При моделировании учитывали, что кварц практически не поглощает лазерное излучение с длиной волны 1,06 мкм, а излучение с длиной волны 10,60 мкм поглощается в тонком поверхностном слое кварца. При этом энергия лазерного излучения с длиной волны 10,60 мкм поглощается примесями, входящими в состав кварцевого сырья.

В табл. 1 приведены параметры двухлучевого лазерного воздействия на кварцевое сырье, использованные при конечно-элементном расчете температурных полей.

Таблица 1. Параметры двухлучевого воздействия на кварцевое сырье
Table 1. Parameters of two-beam exposure to quartz raw materials

Параметр / Parameter	Значение / Value
Плотность мощности пучка с длиной волны 10,60 мкм P_1 , Вт/м ²	$0,5 \cdot 10^6$
Плотность мощности пучка с длиной волны 1,06 мкм P_2 , Вт/м ²	$2 \cdot 10^6$
Радиус частицы кварца R_1 , м	$3,5 \cdot 10^{-4}$
Радиус примеси R_2 , м	$3,5 \cdot 10^{-5}$
Время обработки t , с	1

На рис. 1 представлено полученное в результате моделирования распределение температурных полей при двухлучевом воздействии на частицы кварца с включениями примеси и без нее. В обоих случаях распределение температурных полей характеризуется наличием области высоких температур на поверхности кварцевой частицы, сформированной в результате воздействия лазерного излучения с длиной волны 10,60 мкм. При этом присутствие примеси обуславливает повышение температур в месте ее локализации из-за поглощения лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм, и приводит к дополнительному повышению температуры на поверхности частицы кварца [2].

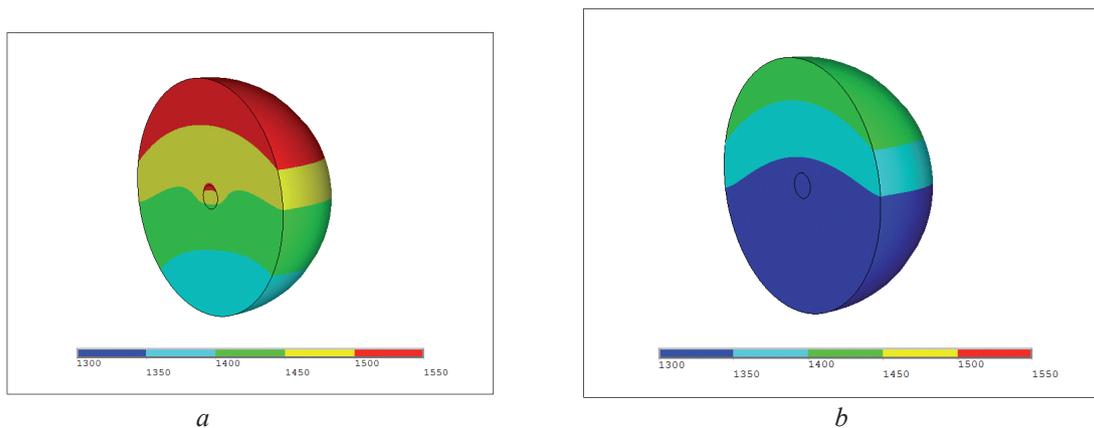


Рис. 1. Распределение температурного поля при двухлучевом воздействии на частицы кварца, К:
 a – с примесью; b – без примеси

Fig. 1. Distribution of the temperature field under two-beam exposure in a quartz particle, K:
 a – with an impurity; b – without impurities

Определение оптимальных параметров процесса двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья

Оптимизацию параметров лазерной очистки кварцевого сырья выполняли в модуле DesignXplorer расчетной среды Ansys Workbench и осуществляли в соответствии с последовательностью действий, представленных в [7]. В модуле DesignXplorer был сформирован гранично-центрированный вариант центрального композиционного плана эксперимента для пяти факторов P_1 – P_5 [15], где P_1 – плотность мощности пучка с длиной волны 10,60 мкм P_1 ; P_2 – плотность мощности пучка с длиной волны 1,06 мкм P_2 ; P_3 – радиус частицы кварца R_1 ; P_4 – радиус примеси R_2 ; P_5 – время обработки t . В соответствии с планом эксперимента выполнены расчеты для 27 комбинаций входных параметров. При этом определяли следующие выходные параметры: максимальную температуру частицы кварца с примесью T_1 и без примеси T_2 . Таким образом, моделью объекта исследования являлись функции отклика, связывающие выходные параметры T_1, T_2 с факторами P_1, P_2, R_1, R_2, t .

Уравнения регрессии, полученные с использованием модуля DesignXplorer программы ANSYS Workbench, имеют следующий вид:

$$Y_1 = 8,2 + 3,9 \cdot 10^{-6} VPP_1 - 1,1 \cdot 10^4 R_1 + 3,6t - 8,0 \cdot 10^{-13} P_1^2 + 1,2 \cdot 10^7 R_1^2 - 8,1 \cdot 10^{-1} t^2 - 7,0 \cdot 10^{-14} P_1 P_2 - 3,5 \cdot 10^{-3} P_1 R_2 - 3,6 \cdot 10^{-4} P_2 R_1 + 5,6 \cdot 10^{-3} P_2 R_2 + 7,8 \cdot 10^{-8} P_2 t - 2,3 \cdot 10^7 R_1 R_2 - 1,4 \cdot 10^3 R_1 t + 6,9 \cdot 10^3 R_2 t; \quad (1)$$

$$T_1 = (Y_1 0,075 + 1)^{1/0,075} - 1; \quad (2)$$

$$Y_2 = 6,2 + 2,2 \cdot 10^{-6} P_1 - 5,7 \cdot 10^3 R_1 + 2,2t - 5,5 \cdot 10^{-13} P_1^2 + 5,0 \cdot 10^6 R_1^2 - 5,1 \cdot 10^{-1} t^2 - 4,0 \cdot 10^2 R_1 t; \quad (3)$$

$$T_2 = e^{Y_2} - 1, \quad (4)$$

где e – число Эйлера.

Для оценки полученных регрессионных моделей использовали следующие критерии:

– коэффициент детерминации

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}; \quad (5)$$

– среднюю абсолютную ошибку (англ. Mean Absolute Error, MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i - y_i|; \quad (6)$$

– среднюю квадратичную ошибку (Root Mean Square Error, RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2}; \quad (7)$$

– среднюю абсолютную процентную ошибку (Mean Absolute Percentage Error, MAPE)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{d_i - y_i}{d_i} \right| \cdot 100, \quad (8)$$

где d_i, y_i – значения, определенные методом конечных элементов и с использованием регрессионных моделей соответственно.

На тестовом наборе данных (табл. 2) провели проверку регрессионной модели. Значения критериев, используемых для оценки регрессионной модели, представлены в табл. 3. Полученные данные позволяют сделать вывод о наличии необходимого соответствия регрессионной модели результатам конечно-элементного анализа.

Таблица 2. Тестовый набор параметров
Table 2. Test set of parameters

P_1 $P_1, \text{Вт/м}^2$	P_2 $P_2, \text{Вт/м}^2$	P_3 $R_1, \text{м}$	P_4 $R_2, \text{м}$	P_5 $t, \text{с}$	$T_1, \text{К}$	$T_2, \text{К}$
750000	1500000	0,0003	0,00003	0,75	1949	1881
750000	2500000	0,0003	0,00004	1,25	3384	3043
1250000	2500000	0,0003	0,00003	0,75	3236	3121
1250000	1500000	0,0004	0,00004	1,25	3998	3913
750000	2500000	0,0004	0,00004	0,75	1567	1482

Таблица 3. Результаты оценки регрессионной модели
Table 3. Results of the evaluation of the regression model

Критерий / Criterion	Набор данных / Data set			
	центрального композиционного плана		тестовый	
	T_1	T_2	T_1	T_2
MAE	62	11	68	44
RMSE	87	17	102	53
MAPE	2,1	0,4	2,5	2,1
R_2	0,9989	0,9999	0,9877	0,9964

Проводили оценку влияния входных параметров на выходные. Установлено, что на значения максимальных температур кварцевых частиц с примесью оказывают влияние все варьируемые факторы, при этом наибольшее – плотность мощности лазера с длиной волны излучения 10,60 мкм, размеры кварцевой частицы и время воздействия лазерного излучения (рис. 2–4). При оптимизации параметров процесса двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья с использованием многокритериального генетического алгоритма MOGA число индивидов начальной популяции и число индивидов за итерацию были равны соответственно 5000 и 1000.

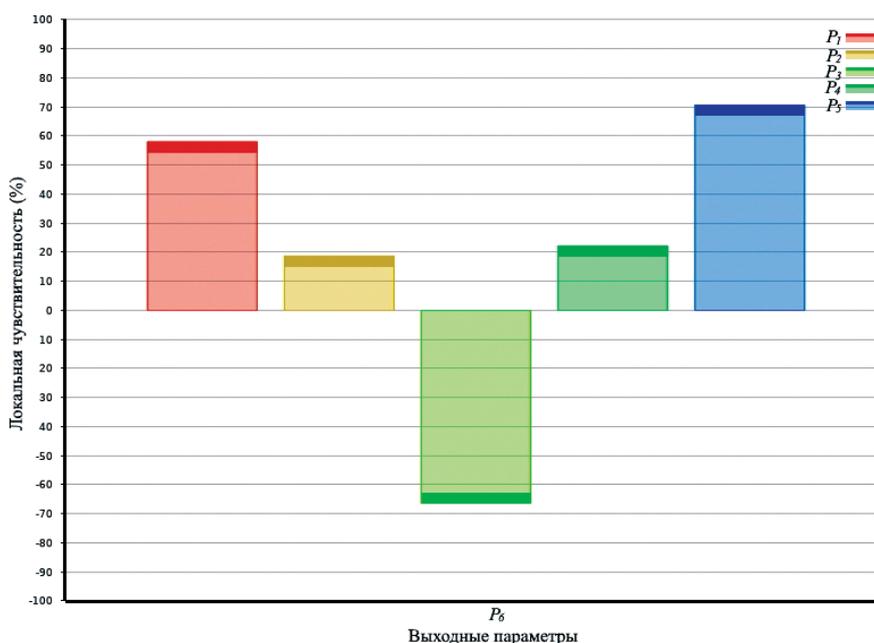


Рис. 2. Диаграмма чувствительности оптимизируемых параметров:
 $P_1 - P_1, P_2 - P_2, P_3 - R_1, P_4 - R_2, P_5 - t, P_6 - T_1$

Fig. 2. Sensitivity diagram of optimized parameters: $P_1 - P_1, P_2 - P_2, P_3 - R_1, P_4 - R_2, P_5 - t, P_6 - T_1$

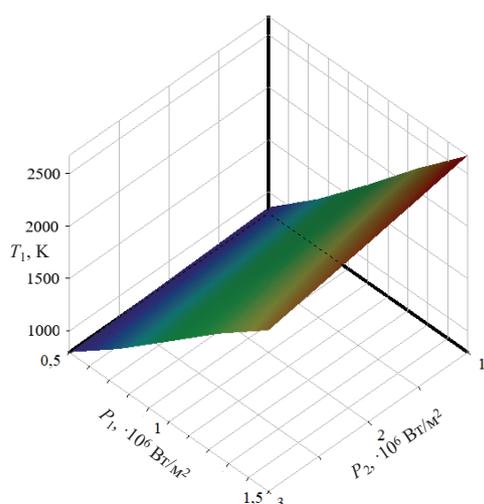


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры T_1 от параметров обработки $P = P_1, P_2 = P_2$
Fig. 3. Dependence of the maximum temperature T_1 on the processing parameters $P = P_1, P_2 = P_2$

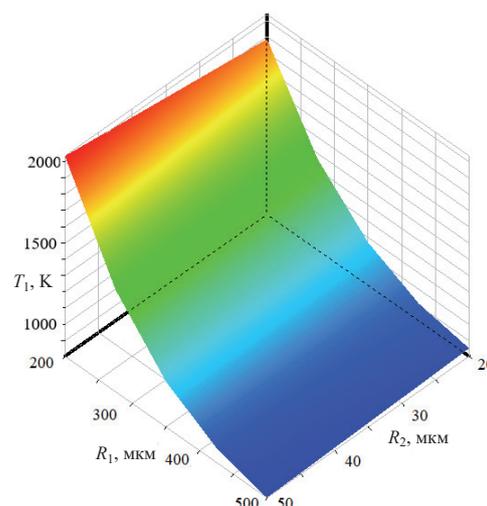


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры T_1 от параметров обработки $P_3 = R_1, P_4 = R_2$
Fig. 4. Dependence of the maximum temperature T_1 on the processing parameters $P_3 = R_1, P_4 = R_2$

Оптимизацию выполняли для двух комбинаций размеров кварцевых частиц и частиц примеси: $R_1 = 3 \cdot 10^{-4}$ м, $R_2 = 3 \cdot 10^{-5}$ м и $R_1 = 4 \cdot 10^{-4}$ м, $R_2 = 4 \cdot 10^{-5}$ м. Отметим, что нет принципиальной сложности для проведения оптимизации параметров двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья с другими размерами кварцевых частиц и частиц примеси. Результаты оптимизации приведены в табл. 4. При определении T_1 и T_2 максимальная относительная погрешность результатов, полученных с использованием алгоритма MOGA, не превысила 2,5 % (в скобках указаны значения T_1 и T_2 , найденные при конечно-элементном моделировании).

Таблица 4. Результаты оптимизации
Table 4. Optimization results

$P_1 - P_1$, Вт/м ²	$P_2 - P_2$, Вт/м ²	$P_3 - R_1$, м	$P_4 - R_2$, м	$P_5 - t$, с	T_1 , К	T_2 , К
$1,1 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	0,5	2009 (2052)	1936 (1973)
$1,4 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$	0,5	2013 (2054)	1948 (1991)

Заключение

Показана возможность оптимизации параметров лазерной двухлучевой очистки кварцевого сырья с использованием генетического алгоритма MOGA, встроенного в модуль DesignXplorer программы ANSYS Workbench. С применением гранецентрированного варианта центрального композиционного плана эксперимента получена регрессионная модель двухлучевой очистки кварцевого сырья. Установлено наличие необходимого соответствия регрессионной модели результатам конечно-элементного анализа. С помощью численного эксперимента определены оптимальные параметры двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья, обеспечивающие максимальную производительность процесса.

Список литературы

1. Бокарев, В. Контактная литография в нанотехнологии / В. Бокарев, Е. Горнев // Наноиндустрия. 2010. № 5. С. 22–25.
2. Оптико-механические комплексы для бездефектного изготовления фотошаблонов 0,35 мкм и 90 нм / С. Аваков [и др.] // Фотоника. 2007. № 6. С. 35–39.
3. Иванов, Г. А. Технология производства и свойства кварцевых оптических волокон / Г. А. Иванов, В. П. Первадчук. Пермь: Изд-во Пермского нац. исслед. политехн. ун-та, 2011.
4. Установка для обогащения жильного кварца: пат. 9675 Респ. Беларусь, МПК (2006) С 03В 1/00 / Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов.

5. Емельянов, В. А. Двухлучевая лазерная очистка кварцевого сырья / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершневу, С. И. Соколов // Доклады БГУИР. 2021. Т. 19, № 3. С. 40–48. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-40-48>.
6. Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / А. П. Достанко [и др.]; под ред. А. П. Достанко. Минск: Беларус. навука, 2020. 260 с.
7. Nikityuk, Y. V. Optimization of Two-Beam Laser Cleavage of Silicate Glass / Y. V. Nikityuk, A. N. Serdyukov, I. Y. Aushev // *J. Opt. Technol.* 2022. No 89. P. 121–125.
8. Никитюк, Ю. В. Оптимизация параметров лазерного раскалывания кварцевого стекла / Ю. В. Никитюк, А. Н. Сердюков, И. Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. 2021. Т. 49, № 4. С. 21–28.
9. Fonseca, C. Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation Discussion and Generalization / C. Fonseca, P. Flemingz // In Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms. CA, USA. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993. P. 416–423.
10. Красновская, С. В. Обзор возможностей оптимизационных алгоритмов при моделировании конструкций компрессорно-конденсаторных агрегатов методом конечных элементов / С. В. Красновская, В. В. Напрасников // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2016. № 2. С. 92–98.
11. Multi-Objective Optimization of Microstructure of Gravure Cell Based on Response Surface Method / S. Wu [et al.] // *Processes*. 2021. Vol. 9, No 2. P. 1–15.
12. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера: практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.
13. Корицкий, Ю. В. Справочник по электротехническим материалам / Ю. В. Корицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. Л.: Энергоатомиздат, 1988. Т. 3. 728 с.
14. Книпович, Ю. Н. Анализ минерального сырья / Ю. Н. Книпович, Ю. В. Морачевский. Л.: ГХИ, 1959. 1055 с.
15. Моргунов, А. П. Планирование и анализ результатов эксперимента / А. П. Моргунов, И. В. Ревина. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 343 с.

References

1. Bokarev V., Gornev E. (2010) Contact lithography in Nanotechnology. *Nanoindustry*. (5), 22–25 (in Russian).
2. Avakov S., Ovchinnikov V., Karpovich S., Titko E., Trapashko G. (2007) Optical-Mechanical Complexes for Defect-Free Production of Photomasks 0.35 μm and 90 nm. *Photonics*. (6), 35–39 (in Russian).
3. Ivanov G. A., Pervadchuk V. P. (2011) *Production Technology and Properties of Quartz Optical Fibers*. Perm, Publish. House of the Perm Nat. Research Polytechnic University (in Russian).
4. Shershnev E. B., Nikityuk Yu. V., Sokolov S. I. (2006) *Installation for the Enrichment of Vein Quartz*. Patent 9675 Rep. Belarus, IPC C 03B 1/00 (in Russian).
5. Emelyanov V. A., Shershnev E. B., Sokolov S. I. (2021) Double-Beam Laser Cleaning of Quartz Raw Materials. *Doklady BGUIR*. 19 (3), 40–48. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-40-48> (in Russian).
6. Dostanko A. P. [et al.] (2020) *Innovative Technologies and Equipment for Submicron Electronics*. Minsk, Belarusian Science Publ. 260 (in Russian).
7. Nikityuk Y. V., Serdyukov A. N., Aushev I. Y. (2022) Optimization of Two-Beam Laser Cleavage of Silicate Glass. *J. Opt. Technol.* (89), 121–125.
8. Nikityuk Yu. V., Serdyukov A. N., Aushev I. Y. (2021) Optimization of the Parameters of Laser Cracking of Quartz Glass. *Problems of Physics, Mathematics and Technology*. 49 (4), 21–28 (in Russian).
9. Fonseca C., Flemingz P. (1993) Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation Discussion and Generalization. In *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms. CA, USA*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc. 416–423.
10. Krasnovskaya S. V., Naprasnikov V. V. (2016) A Review of the Possibilities of Optimization Algorithms in Modeling the Structures of Compressor-Condensing Units by the Finite Element Method. *Vesti National Academy of Sciences of Belarus. Gray Physics and Technical Sciences*. (2), 92–98 (in Russian).
11. Wu S. [et al.] (2021) Multi-Objective Optimization of Microstructure of Gravure Cell Based on Response Surface Method. *Processes*. 9 (2), 1–15 (in Russian).
12. Kaplun A. B., Morozov E. M., Olferyev M. A. (2003) *ANSYS in the Hands of an Engineer: a Practical Guide*. Moscow, Editorial URSS Publ. 272 (in Russian).
13. Koritsky Yu. V., Pasyнков V. V., Tareev B. M. (1988) *Reference Book on Electrotechnical Materials*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 3, 728 (in Russian).
14. Knipovich Yu. N., Morachevsky Yu. V. (1959) *Analysis of Mineral Raw Materials*. Leningrad, GHI Publ. 1055 (in Russian).
15. Morgunov A. P., Revina I. V. (2014) *Planning and Analysis of the Results of the Experiment*. Omsk, Publishing House of OmGTU. 343 (in Russian).

Вклад авторов

Емельянов В. А., Шершнев Е. Б. разработали модель процесса двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья.

Никитюк Ю. В, Соколов С. И., Аушев И. Ю. провели численный эксперимент с использованием модели процесса двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья и выполнили оптимизацию соответствующих параметров.

Authors' contribution

Emelyanov V. A., Shershnev E. B. developed a model for the process of two-beam laser cleaning of quartz raw materials.

Nikitjuk Y. V., Sokolov S. I., Aushev I. Y. carried out a numerical experiment using a model of the process of two-beam laser cleaning of quartz raw materials and performed the optimization of the corresponding parameters.

Сведения об авторах

Емельянов В. А., д.т.н., профессор, член-кор. Национальной академии наук Беларуси, член Международного института инженеров по электротехнике и электронике.

Шершнев Е. Б., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой общей физики Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины.

Никитюк Ю. В., к.ф.-м.н., доцент, проректор по учебной работе Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины.

Соколов С. И., старший преподаватель кафедры общей физики Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины.

Аушев И. Ю., к.т.н., доцент, профессор кафедры промышленной безопасности Университета гражданской защиты МЧС Беларуси.

Адрес для корреспонденции

246019, Республика Беларусь,
г. Гомель, ул. Советская, 104
Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины
Тел. +375 0232 50-38-17
E-mail: sokolov@gsu.by
Соколов Сергей Иванович

Information about the authors

Emelyanov V. A., Dr. of Sci., Professor, Corr. Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Member of the International Institute of Electrical and Electronic Engineers.

Shershnev E. B., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of General Physics of Francisk Skorina Gomel State University.

Nikitjuk Y. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Vice Rector for Academic Affairs of Francisk Skorina Gomel State University.

Sokolov S. I., Senior Lecturer at the Department of General Physics of Francisk Skorina Gomel State University.

Aushev I. Y., Cand. of Sci., Associate Professor, Professor at the Department of Industrial Safety of the University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus.

Address for correspondence

246019, Republic of Belarus,
Gomel, Sovietskaya St., 104
Francisk Skorina
Gomel State University
Tel. +375 0232 50-38-17
E-mail: sokolov@gsu.by
Sokolov Sergey Ivanovich