



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-40-48>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.373.826

ДВУЛУЧЕВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ

В.А. ЕМЕЛЬЯНОВ¹, Е.Б., ШЕРШНЕВ², С.И. СОКОЛОВ²

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

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

Поступила в редакцию 27 января 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В работе выполнено численное моделирование лазерной сепарации при воздействии лазерных пучков с длинами волн, равными 10,6 и 1,06 мкм, на кварцевое сырье, используемое в электронной промышленности при изготовлении фотошаблонов. Выполнено сравнение температурных полей, полученных при моделировании методом конечных элементов и с помощью аналитического решения. Распределение температуры до глубины 50 мкм практически совпадает при использовании обеих методик решения, при этом с увеличением глубины разница температур возрастает на 10 %, что позволяет использовать обе методики решения, так как на практике более важным является распределение температур в приповерхностных слоях, которое определяет формирование агломератов с примесными включениями. Выявлено, что эффективность сепарации кварцевого сырья зависит от скорости обработки и энергетических свойств лазерного излучения, что позволяет подобрать оптимальные параметры обработки, обеспечивающие эффективное образование агломератов, содержащих примесные включения. Проведены экспериментальные исследования двулучевой лазерной очистки кварцевого сырья, которые позволили определить оптимальные параметры обработки кварцевого сырья для эффективной очистки его от примесных включений, что обеспечивает возможность изготовления фотошаблонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками, применяемых при производстве микросхем.

Ключевые слова: лазерное излучение, сепарация, примесь, агломерат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Емельянов В.А., Шершнев Е.Б., Соколов С.И. Двулучевая лазерная очистка кварцевого сырья. Доклады БГУИР. 2021; 19(3): 40-48.

TWO-BEAM LASER PURIFICATION OF QUARTZ RAW MATERIAL

VICTOR A. EMEL'YANOV¹, EVGENY B. SHERSHNEV², SERGEY I. SOKOLOV²

¹JSC "INTEGRAL" – the managing company of the "Integral" holding (Minsk, Republic of Belarus)

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

Submitted 27 January 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The paper presents a numerical simulation of laser separation under the influence of laser beams with wavelengths of 10.6 microns and 1.06 microns on quartz raw material used in the electronics industry in the manufacture of photomasks. The temperature fields obtained by the finite element method and the analytical solution are compared. The temperature distribution to a depth of 50 microns is almost the same when using both methods of solution, while with increasing depth the temperature difference increases by 10 %, which allows using both methods of solution, since in practice the temperature distribution in the near-surface layers, which determines the formation of agglomerates with impurity inclusions, is more important. It is revealed that the efficiency of separation of quartz raw material depends on the processing speed and the energy properties of laser radiation, which allows to choose the optimal processing parameters that ensure the effective formation of agglomerates containing impurity inclusions. Experimental studies of bi-beam laser cleaning of quartz raw material were carried out, which allowed us to determine the optimal processing parameters of quartz raw material for effective cleaning of it from impurity inclusions, that make it possible to manufacture photomasks used in the production of microcircuits with improved performance characteristics.

Keywords: laser radiation, separation, impurity, agglomerate.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Emelyanov V.A., Shershnev E.B., Sokolov S.I. Two-beam laser purification of quartz raw material. Doklady BGUIR. 2021; 19(3): 40-48.

Введение

Фотошаблоны, используемые для производства микросхем, являются важной составляющей данного производства. При их изготовлении применяют такие материалы, как боросиликатное стекло, натриево-кальциево-силикатное стекло и кварцевое стекло. Кварцевое стекло характеризуется высокой твердостью и химической устойчивостью, устойчиво к воздействию воды, щелочных и кислых растворов. При уменьшении размеров транзисторов возникает необходимость применения лазерного излучения меньшей длины волны, что определяет целесообразность использования кварцевого стекла для изготовления фотошаблонов [1]. При этом чистота кварцевого сырья, используемого при изготовлении фотошаблонов, оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики микросхем [2].

Основными примесями, присутствующими в кварцевом сырье, являются различные полевые шпаты, слюда и сфен. На данный момент самыми распространенными методами очистки кварцевого сырья от примесей являются электрические, магнитные и химические методы. Однако эти методы не позволяют очистить кварцевое сырье от неизвлекаемых примесей, которые не доступны для химических реактивов и не чувствительны к магнитному и электрическому полям [3]. Поэтому актуальной задачей является исследование метода лазерной очистки кварцевого сырья, основанного на том, что примеси, не извлекаемые другими методами, можно очистить за счет воздействия на них лазерного излучения, которое не поглощается чистыми частицами кварцевого сырья [4, 5].

Теоретический анализ

Кварц практически не поглощает лазерное излучение с длиной волны 1,06 мкм, однако энергия лазерного излучения при этом поглощается примесями, входящими в состав кварцевого сырья. Лазерное излучение с длиной волны 10,6 мкм поглощается кварцем в приповерхностном слое малой толщины. YAG-лазер можно использовать в качестве источника излучения с длиной волны 1,06 мкм, а CO₂-лазер в качестве источника излучения с длиной волны 10,6 мкм. При проведении экспериментальных исследований применялась схема лазерной сепарации кварцевого сырья, которая состоит из этапов, приведенных в [4]. Для осуществления эффективной лазерной сепарации необходимо определить температурные поля, которые формируются в частицах кварцевого сырья при воздействии на него лазерного излучения. Для расчета температурных полей использовались метод конечно-элементного анализа и аналитическое решение [6, 7]. На рис. 1–5 представлены графики температур для различных параметров обработки, полученные с использованием аналитического решения, приведенного в [6].

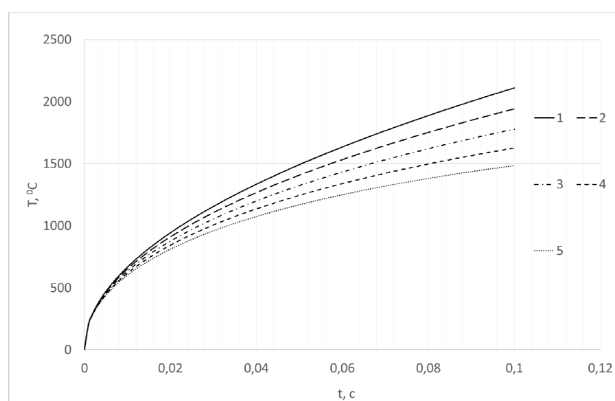


Рис. 1. Зависимость температуры в частице кварца от времени лазерной обработки на глубине: 1–0 мкм; 2–50 мкм; 3–100 мкм; 4–150 мкм; 5–200 мкм

Fig. 1. Dependence of the temperature in a quartz particle on the time of laser treatment at a depth of: 1–0 μm ; 2–50 μm ; 3–100 μm ; 4–150 μm ; 5–200 μm

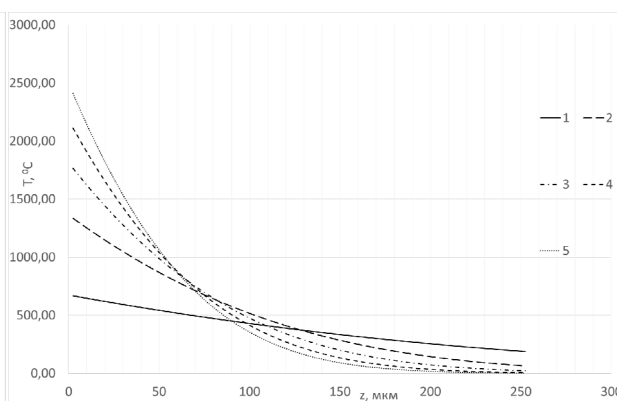


Рис. 2. Зависимость температуры от глубины в момент времени: 1–0,01 с; 2–0,04 с; 3–0,07 с; 4–0,1 с; 5–0,13 с

Fig. 2. Dependence of temperature on depth at the moment of time: 1– 0.01 s; 2–0.04 s; 3–0.07 s; 4–0.1 s; 5–0.13 s

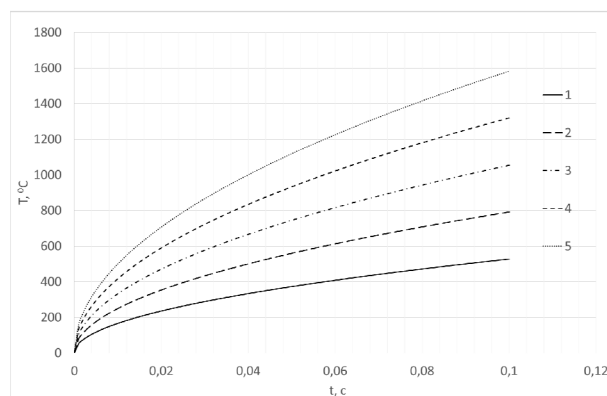


Рис. 3. Зависимость температуры на поверхности частицы кварца от времени при воздействии CO₂-лазера: 1–50 Вт; 2–100 Вт; 3–150 Вт; 4–200 Вт; 5–250 Вт

Fig. 3. Dependence of the temperature on the surface of a quartz particle on time when exposed to a CO₂ laser: 1–50 W; 2– 100 W; 3– 150 W; 4–200 W; 5– 250 W

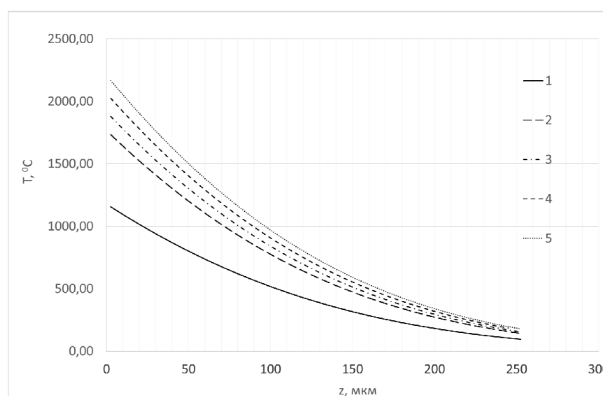


Рис. 4. Зависимость температуры по глубине частицы кварца от времени при: 1 – CO₂-лазер; 2 – CO₂-лазер + YAG-лазер 50 Вт; 3 – CO₂-лазер + YAG-лазер 100 Вт; 4 – CO₂-лазер + YAG-лазер 150 Вт; 5 – CO₂-лазер + YAG-лазер 200 Вт

Fig. 4. Dependence of the temperature over the depth of a quartz particle on time at: 1 – CO₂ laser; 2 – CO₂ laser + YAG laser 50 W; 3 – CO₂ laser + YAG laser 100 W; 4 – CO₂ laser + YAG laser 150 W; 5 – CO₂ laser + YAG laser 200 W

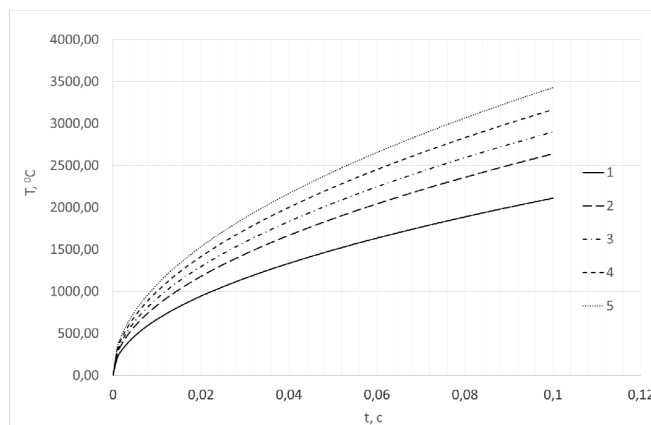


Рис. 5. Зависимость температуры частицы с примесью от времени при воздействии CO₂-лазера и YAG-лазера мощностью : 1–0 Вт; 2–50 Вт; 3–100 Вт; 4–150 Вт; 5–200 Вт

Fig. 5. Dependence of the temperature of a particle with an impurity on time when exposed to a CO₂ laser and a YAG laser with a power of: 1–0 W; 2–50 W; 3–100 W; 4–150 W; 5–200 W

Из рис. 1–5 видно, что длительность прогрева частиц кварца зависит от плотности мощности лазерного излучения. При этом достижение температуры плавления происходит в разные моменты времени для различных плотностей мощности лазерного излучения, что позволяет подобрать оптимальные параметры обработки, обеспечивающие эффективное образования агломератов. Для верификации полученных результатов была использована конечно-элементная модель нагрева частицы кварца с включением из примеси [6]. Расчетное распределение температур приведено на рис. 6. Было выполнено сравнение температурных полей, полученных двумя способами (рис. 7).

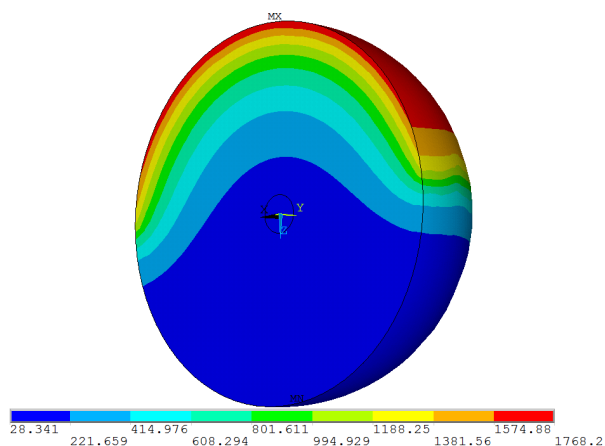


Рис. 6. Распределение температурных полей в частице кварцевого сырья

Fig. 6. Distribution of temperature fields in a particle of quartz raw material

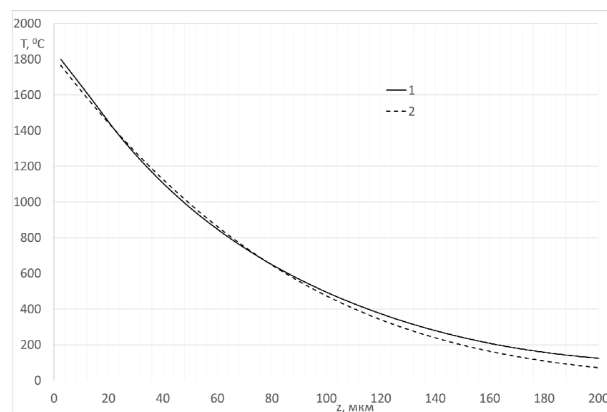


Рис. 7. Распределение температуры в частице кварцевого сырья при обработке лазерным излучением CO₂-лазера с плотностью мощности 100 Вт/мм²: 1 – решение методом конечно-элементного анализа; 2 – аналитическое решение

Fig. 7. Temperature distribution in a particle of quartz raw material during processing by laser radiation of a CO₂ laser with a power density of 100 W/mm²: 1 – solution by the method of finite element analysis; 2 – analytical solution

Как видно из рис. 7, распределение температуры до глубины 50 мкм практически совпадает при использовании обеих методик решения, при этом с увеличением глубины разница температур возрастает на 10 %. Однако на практике более важным является распределение температур в приповерхностных слоях, которое определяет формирование агломератов.

Следует отметить, что использование аналитического решения позволяет рассчитать распределение температур с меньшими временными затратами по сравнению с конечно-элементным моделированием, что дает возможность использовать это решение для экспресс-оценки параметров обработки.

Экспериментальные исследования

Для проведения эксперимента по сепарации кварцевого сырья разработана установка (рис. 8), схема которой приведена на рис. 9.

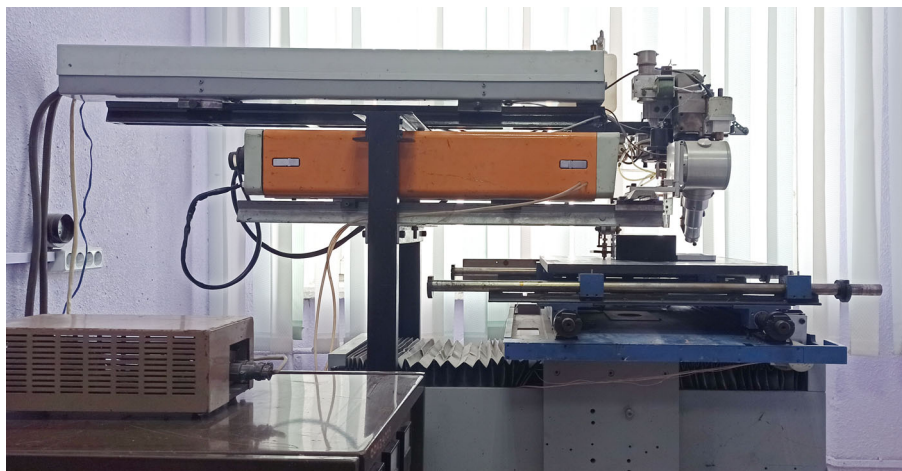


Рис. 8. Установка для лазерной сепарации кварцевого сырья
Fig. 8. Installation for laser separation of quartz raw material

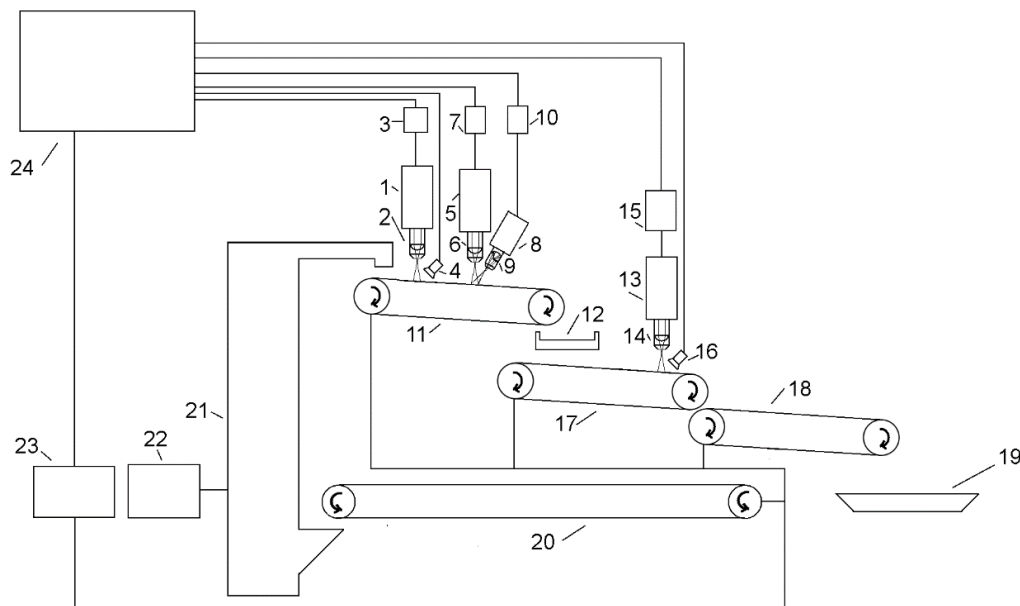


Рис. 9. Схема сепарации кварцевого сырья:

1 – низкоинтенсивный YAG-лазер; 2 – фокусирующий объектив; 3 – блок управления лазером 1; 4 – устройство измерения температурного поля; 5 – YAG-лазер; 6 – фокусирующий объектив; 7 – блок управления лазером 5; 8 – CO₂-лазер; 9 – фокусирующий объектив; 10 – блок управления CO₂-лазером 8; 11 – конвейерная лента, на которой находится кварцевое сырье при обработке ее лазерами 1 и 5, а также источником полихроматического излучения 8; 12 – сито; 13 – YAG-лазер; 14 – фокусирующий объектив; 15 – блок управления лазером 13; 16 – устройство измерения температурного поля; 17 – конвейерная лента; 18 – конвейерная лента; 19 – емкость для очищенного кварцевого сырья; 20 – конвейерная лента; 21 – устройство перемещения; 22 – блок управления устройством 21; 23 – блок управления конвейерными лентами 11, 17 и 18; 24 – компьютер

Fig. 9. Scheme of separation of quartz raw material:

1 – low-intensity YAG laser; 2 – focusing lens; 3 – laser control unit 1; 4 – device for measuring the temperature field; 5 – YAG laser; 6 – focusing lens; 7 – laser control unit 5; 8 – CO₂ laser; 9 – focusing lens; 10 – CO₂ laser control unit 8; 11 – conveyor belt, which contains quartz raw material when processed by lasers 1 and 5, as well as a source of polychromatic radiation 8; 12 – sieve; 13 – YAG laser; 14 – focusing lens; 15 – laser control unit 13; 16 – device for measuring the temperature field; 17 – conveyor belt; 18 – conveyor belt; 19 – container for purified quartz raw material; 20 – conveyor belt; 21 – moving device; 22 – device control unit 21; 23 – control unit for conveyor belts 11, 17 and 18; 24 – computer

При проведении исследований кварцевое сырье располагалось на конвейерной ленте. Далее осуществлялся нагрев сырья низкоинтенсивным YAG-лазером, при этом лазерное излучение было сфокусировано в виде полосы по ширине конвейерной ленты. Сырье перемещалось к устройству измерения температурного поля с последующим анализом полученных данных и определением количества и размера примесных включений в нем. Затем сырье перемещалось по конвейерной ленте в зону воздействия CO₂-лазера и YAG-лазера. При этом определялась плотность мощности лазерного излучения, необходимая для плавления примесных включений. В результате нагрева частицы кварцевого сырья, содержащие примесные включения, расплавлились и вокруг них образовывались агломераты (рис. 10).



Рис. 10. Частица примеси в сырье: *a* – до обработки; *b* – после обработки

Fig. 10. A particle of impurity in the raw material: *a* – before processing; *b* – after processing

Далее конвейерная лента перемещала кварцевое сырье для его сепарации. Очищенное от агломератов сырье повторно перемещали по конвейерной ленте в зону нагрева низкоинтенсивным YAG-лазером. Цикл обработки повторяли до тех пор, пока сырье не достигало необходимого уровня очистки.

В работе проведены экспериментальные исследования, определяющие параметры, необходимые для эффективной сепарации кварцевого концентрата RQ-3K, произведенного ООО «Русский кварц» и используемого на ОАО «КОРАЛЛ» [<http://russianquartz.com/produktsiya/>].

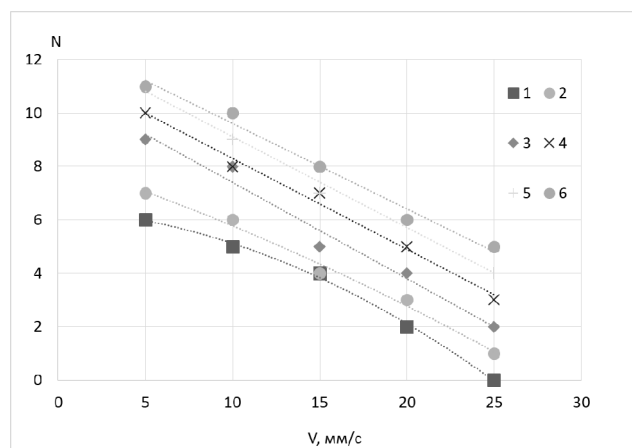


Рис. 11. Зависимость количества агломератов на 10 г сырья от скорости перемещения конвейерной ленты при мощности CO₂-лазера 50 Вт и мощности YAG-лазера: 1 – 50 Вт; 2 – 60 Вт; 3 – 70 Вт; 4 – 80 Вт; 5 – 90 Вт; 6 – 100 Вт

Fig. 11. Dependence of the number of agglomerates per 10 g of raw material on the speed of the conveyor belt at a CO₂ laser power of 50 W and a YAG laser power: 1 – 50 W; 2 – 60 W; 3 – 70 W; 4 – 80 W; 5 – 90 W; 6 – 100 W

Как видно из рис. 11, при увеличении скорости перемещения конвейерной ленты количество образовавшихся агломератов снижается и при скорости 25 мм/с практически достигает нуля, что свидетельствует о том, что при данной скорости обработки сырье не успевает прогреваться до необходимой температуры. При этом увеличение мощности YAG-лазера обеспечивает увеличение количества агломератов.

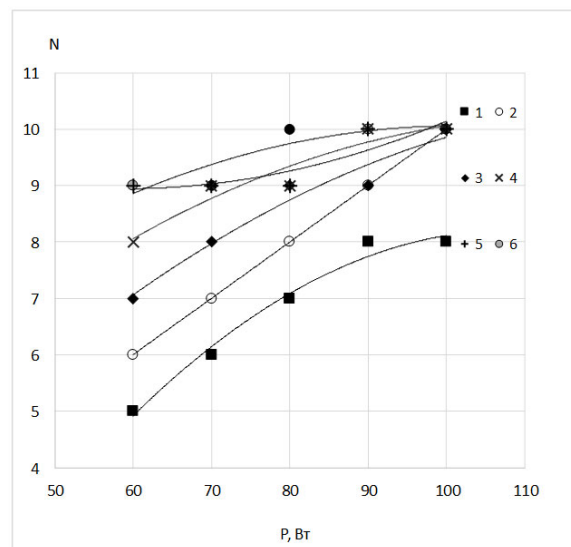


Рис. 12. Зависимость количества агломератов на 10 г сырья при скорости перемещения конвейерной ленты 5 мм/с и мощности YAG-лазера 50 Вт от мощности CO₂-лазера: 1 – 50 Вт; 2 – 60 Вт; 3 – 70 Вт; 4 – 80 Вт; 5 – 90 Вт; 6 – 100 Вт

Fig. 12. Dependence of the number of agglomerates per 10 g of raw material at a conveyor belt speed of 5 mm/s and a YAG laser power of 50 W on the CO₂ laser power: 1 – 50 W; 2 – 60 W; 3 – 70 W; 4 – 80 W; 5 – 90 W; 6 – 100 W

Как видно из рис. 12, при увеличении мощности CO₂-лазера количество агломератов растет до 10 штук. При этом дальнейшее увеличение мощности не приводит к увеличению производительности, а при больших значениях мощности CO₂-лазера приводит к переплавлению сырья и излишним потерям материала, что согласуется с приведенными ранее расчетами.

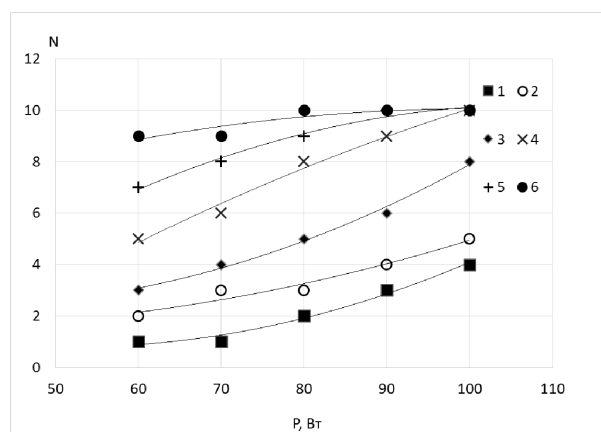


Рис. 13. Зависимость количества агломератов на 10 г сырья при мощности CO₂-лазера 50 Вт и скорости перемещения конвейерной ленты 5 мм/с от мощности YAG-лазера: 1 – 50 Вт; 2 – 60 Вт; 3 – 70 Вт; 4 – 80 Вт; 5 – 90 Вт; 6 – 100 Вт

Fig. 13. Dependence of the number of agglomerates per 10 g of raw material at a CO₂ laser power of 50 W and a conveyor belt speed of 5 mm/s on the YAG laser power: 1 – 50 W; 2 – 60 W; 3 – 70 W; 4 – 80 W; 5 – 90 W; 6 – 100 W

Анализ рис. 13 показывает, что увеличение мощности YAG-лазера целесообразно до количества агломератов, равного 10, так как ее дальнейшее увеличение не приводит к росту количества агломератов.

Заключение

Разработана математическая модель процесса нагрева кварцевого сырья для определения температурных полей при лазерной сепарации. Выполнено сравнение температурных полей, полученных при моделировании методом конечных элементов и с помощью аналитического решения. Распределение температуры до глубины 50 мкм практически совпадает при использовании обеих методик расчета, при этом с увеличением глубины разница температур возрастает на 10 %. Экспериментальные исследования выявили влияние мощности лазерного излучения и скорости обработки на эффективность очистки сырья от примесей. Для эффективной очистки кварцевого сырья от примесей мощности CO₂-лазера и YAG-лазера следует выбирать с условием достижения в зоне обработки плотности мощности порядка $80\text{--}100 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ в зависимости от скорости перемещения сырья в пределах $5\text{--}10 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$. Фотошаблоны, полученные из сырья, очищенного с помощью лазерной обработки, уменьшают количество брака на 10–15 % за счет исключения примесных частиц в исходном сырье.

Список литературы

1. Бокарев В., Горнев Е. Контактная литография в нанотехнологии. *Наноиндустрия*. 2010;5:22-25.
2. Аваков С., Овчинников В., Карпович С., Титко Е., Трапашко Г. Оптико-механические комплексы для бездефектного изготовления фотошаблонов 0,35 мкм и 90 нм. *Фотоника*. 2007;6:35-39.
3. Иванов Г.А., Первадчук В.П. *Технология производства и свойства кварцевых оптических волокон: учебное пособие*. Пермь: Изд-во Пермского нац. исслед. политехнического университета; 2011.
4. Шершнева Е.Б., Никитюк Ю.В., Соколов С.И., Баевич Г.А. Моделирование двулучевой лазерной сепарации кварцевого сырья. *Известия ГГУ им. Ф.Скорины*. 2013;6:216-220.
5. Шершнева Е.Б., Свиридова В.В., Астахов П.В., Соколов С.И. Использование метода конечных элементов для оптимизации режимов лазерной сепарации кварцевого сырья. *Международный научно-практический журнал. Чрезвычайные ситуации: образование и наука*. 2012;7(2):8-13.
6. Григорьянц А.Г., Соколов А.А. *Лазерная техника и технология: в 7 кн. Кн. 4. Лазерная обработка неметаллических материалов: учебное пособие для вузов*. Москва: Высшая школа; 1988.
7. Шабров Н.Н. *Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей*. Ленинград: Машиностроение; 1983.

References

1. Bokarev V., Gornev E. [Contact lithography in nanotechnology]. *Nanoindustry*. 2010;5:22-25. (In Russ.)
2. Avakov S., Ovchinnikov V., Karpovich S., Titko E., Trapashko G. [Optical and mechanical complexes for defect-free production of photomasks 0.35 microns and 90 nm]. *Photonics*. 2007;6:35-39. (In Russ.)
3. Ivanov G.A., Pervadchuk V.P. [*Production technology and properties of quartz optical fibers: textbook. Allowance*]. Perm: Publishing house of Perm. nat. issled. Polytechnic University; 2011. (In Russ.)
4. Shershnev E.B., Nikityuk Yu.V., Sokolov S.I., Baevich G.A. [Simulation of double-beam laser separation of quartz raw materials]. *Izvestia GSU im. F. Skorina*. 2013;6:216-220. (In Russ.)
5. Shershnev E.B., Sviridova V.V., Astakhov P.V., Sokolov S.I. [Using the finite element method to optimize the modes of laser separation of quartz raw materials]. *International scientific and practical journal. Emergencies: Education and Science*. 2012;7(2):8-13. (In Russ.)
6. Grigoryants A.G., Sokolov A.A. [*Laser technology and technology: in 7 books. Book. 4. Laser processing of non-metallic materials: Textbook, manual for universities*]. Moscow: Vysshaya shkola; 1988. (In Russ.)
7. Shabrov N.N. [*Finite element method in calculations of heat engine parts*]. Leningrad: Mashinostroyeniye; 1983. (In Russ.)

Вклад авторов

Емельянов В.А. разработал методику эксперимента и провел анализ данных экспериментальных исследований.

Шершнева Е.Б. и Соколов С.И. осуществили подготовку и проведение экспериментов, выполнили анализ полученных результатов, оформили рукопись статьи.

Authors' contribution

Emelyanov V.A. developed an experimental technique and analyzed the data of experimental studies.

Shershnev E.B. and Sokolov S.I. carried out the preparation and conduct of experiments, performed an analysis of the results obtained and prepared the manuscript of the article.

Сведения об авторах

Емельянов В.А., д.т.н., профессор, член-корр. Национальной академии наук Беларуси, член Международного института инженеров по электротехнике и электронике, заслуженный изобретатель Республики Беларусь.

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

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

Information about the authors

Emelyanov V.A., D.Sc., Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Member of the International Institute of Electrical and Electronic Engineers, Honored Inventor of the Republic of Belarus.

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

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

Адрес для корреспонденции

246019, Республика Беларусь,
г. Гомель, ул. Советская, 104,
Гомельский государственный
университет им. Франциска Скорины;
тел. 8-0232-50-38-17;
e-mail: sokolov@gsu.by
Соколов Сергей Иванович

Address for correspondence

246019, Republic of Belarus,
Gomel, Sovietskaya str., 104,
Francisk Skorina Gomel State University;
tel. 8-0232-50-38-17;
e-mail: sokolov@gsu.by
Sokolov Sergey Ivanovich