

## Моделирование двулучевой лазерной сепарации кварцевого сырья

Е.Б. ШЕРШНЕВ, Ю.В. НИКИТЮК, С.И. СОКОЛОВ, Г.А. БАЕВИЧ

В работе предложен метод двулучевой лазерной очистки кварцевого сырья для промышленности, позволяющий повысить степень его чистоты. Использован метод конечных элементов для моделирования режимов двулучевой лазерной очистки кварцевого сырья, позволяющий определить параметры обработки для эффективной двулучевой лазерной сепарации.

**Ключевые слова:** лазерное излучение, примесь, плавление, сепарация.

In work the method of two-beam laser clearing of the quartz raw materials, allowing to raise degree of cleanliness of quartz raw materials used in the industry is offered. The method of final elements for modeling of modes of two-beam laser clearing of the quartz raw materials is used, allowing definition of parameters of processing for effective two-beam laser separation.

**Keywords:** laser radiation, an impurity, fusion, separation.

Кварцевые изделия, обладая уникальным сочетанием ряда физико-химических свойств, широко применяются в электронной, стекольной и авиационной промышленности [1, с. 11]. Важной задачей является получение чистого, не содержащего примесей кварцевого сырья [2, с. 4]. В настоящее время наиболее распространенными способами очистки кварцевого сырья от примесей являются химические, электрические и магнитные методы [3, с. 5]. Однако эти методы не позволяют очистить кварцевое сырье от химически стабильных примесей, а также примесей, невосприимчивых к магнитному и электрическому взаимодействию.

Лазерный метод очистки кварцевого сырья является уникальным. Он позволяет извлекать примеси, которые невозможно удалить другими известными способами обогащения природного кварцевого сырья. Метод основан на селективности поглощения лазерного излучения кристаллическим кварцевым сырьем.

Известно, что поглощение излучения ближнего инфракрасного диапазона с длиной волны 1,06 мкм кварцем практически не происходит, при этом энергия лазерного излучения интенсивно поглощается примесями. В то же время излучение с длиной волны 10,6 мкм поглощается в тонком поверхностном слое кварца. Данные особенности воздействия излучения YAG-лазера с длиной волны 1,06 мкм и CO<sub>2</sub>-лазера с длиной волны 10,6 мкм обеспечили возможность создания метода обогащения кварцевого сырья, суть которого заключается в следующем:

- 1) частицы кварцевого сырья нагреваются лазерным излучением CO<sub>2</sub>-лазера с длиной волны 10,6 мкм до температуры, близкой к температуре плавления;
- 2) одновременно на частицы кварцевого сырья направляется излучение YAG-лазера с длиной волны 1,06 мкм в результате чего происходит нагрев частиц сырья с поглощающими включениями до температур выше температуры плавления кварца;
- 3) далее перегретые частицы кварцевого сырья с примесями контактируют с частицами без примесей, и в результате этого образуются конгломераты из нескольких частиц;
- 4) обработанное сырье механически сепарируется для удаления конгломератов, содержащих примеси.

Рассмотрим случай нагрева частиц, считая их сферическими и расположенными в один слой (рисунок 1).

В результате воздействия излучения CO<sub>2</sub>-лазера частицы кварца нагреваются до температуры, близкой к температуре плавления  $T_{пл}$ . При этом происходит оплавление частицы 1 вследствие нагрева примеси 3 излучением YAG-лазера. После оплавления частицы 1 обеспечивается контакт с частицей 2 в точке 4. В результате частица 2 получает дополнительное тепло, необходимое для частичного оплавления поверхностного слоя. При контакте оплавленных

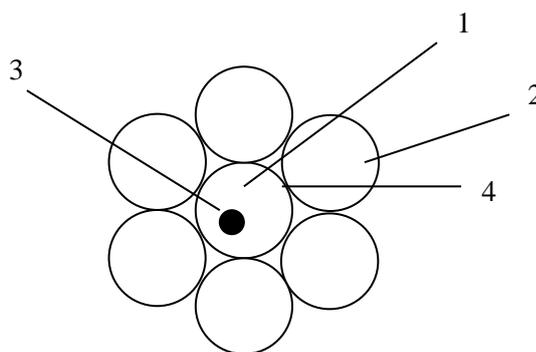


Рисунок 1 – 1. частица кварца с включением из примеси; 2. частица кварца без примеси; 3. примесь; 4. место контакта частиц кварца.  
Слой частиц кварцевого сырья.

частиц образуется конгломерат из оплавленной частицы с примесью и окружающих ее частиц кварцевого сырья. Схему очистки кварцевого сырья можно представить следующим образом (рисунок 2):

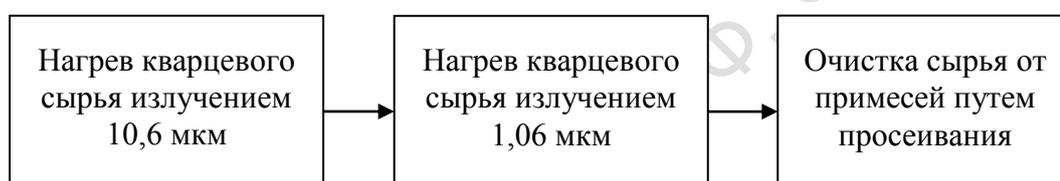


Рисунок 2 – Схема очистки кварцевого сырья от примесей

Нужно отметить, что для увеличения производительности очистки кварцевого сырья от примесей целесообразно использовать наклонный вибростол. Принципиальная схема установки для очистки кварцевого стекла выглядит следующим образом (рисунок 3) [4, с. 4]:

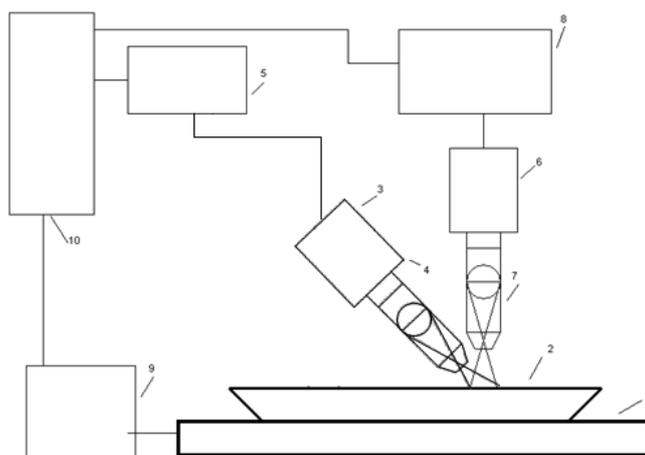


Рисунок 3 – 1. – координатный стол; 2. – средство для подачи сырья; 3. – лазер для нагрева и плавления примесей и включений с длиной волны 1,06 мкм; 4. – фокусирующий объектив для лазера 3; 5. – блок управления лазером 3; 6. – лазер для прогрева кварцевого сырья с длиной волны 10,6 мкм; 7. – фокусирующий объектив для лазера 6; 8. – блок управления лазером 6; 9. – блок управления координатным столом; 10. – блок управления установкой.

Принципиальная схема установки очистки кварцевого сырья

Для оптимизации режимов сепарации кварцевого сырья в системе конечно-элементного анализа ANSYS построена модель нагрева частицы кварца с включением из примеси. В модели частица кварца считалась сферической, как и примесь внутри её (рисунок 4).

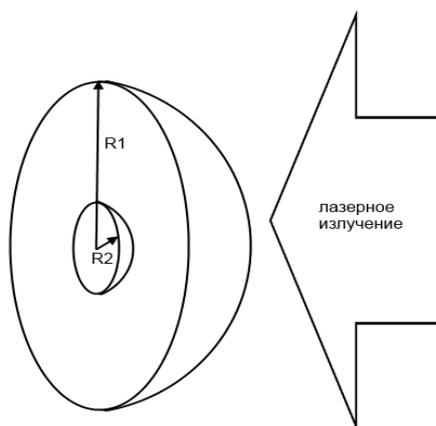


Рисунок 4 – Схема воздействия лазерного излучения на частицу из кварца в модели, где R1 – радиус частицы, R2 – радиус примеси

Параметры обработки кварцевого сырья выбирались исходя из следующих технических характеристик оборудования:

- мощности используемых лазеров равны 100 Вт;
- используемая оптическая система позволяет сформировать лазерный пучок размером 25х2 мм.

При моделировании использовались следующие допущения:

- размеры кварцевых частиц не превышают 1 мм;
- начальная температура частицы равна 20 °С;
- время обработки, необходимое для прогрева всей частицы составляет 1 с.

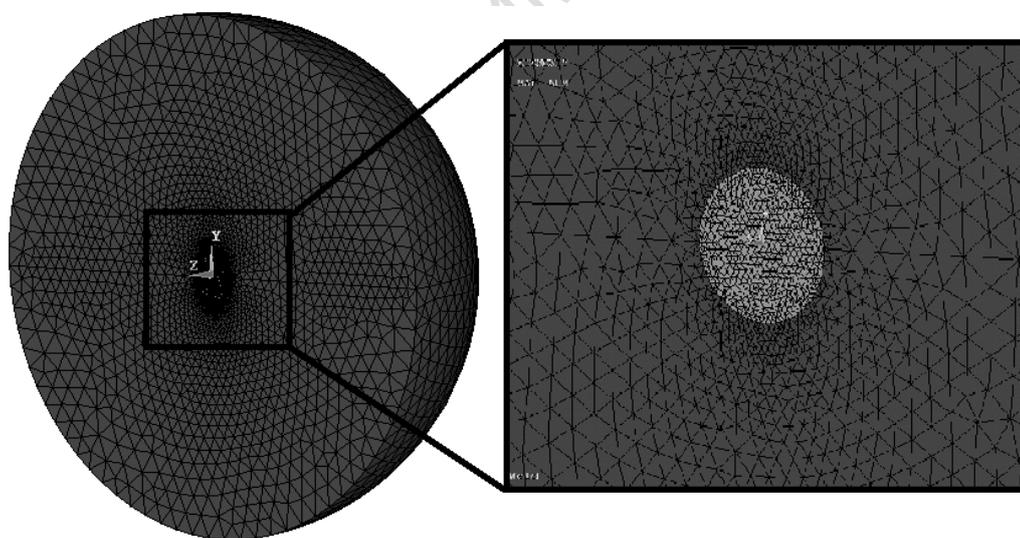


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель частицы кварца с включением

При моделировании были использованы следующие физические свойства кварца и примесей [5, с. 582]:

- плотность кварца – 2206 кг/м<sup>3</sup>;
- коэффициент теплопроводности кварца – 1,34 Вт/(м·К);
- теплоемкость кварца – 732 Дж/(кг·К);
- плотность примеси – 2750 кг/м<sup>3</sup>;
- коэффициент теплопроводности примеси – 0,52 Вт/(м·К);
- теплоемкость примеси – 840 Дж/(кг·К).

При этом свойства примеси выбирались исходя из свойств слюды как основного вида примеси, содержащейся в кварцевом сырье [6, с. 73].

На рисунке 6 представлено характерное распределение температурных полей в случае двулучевого нагрева частицы кварца с примесью (рисунок 6 а) и в случае нагрева частицы кварца без примеси (рисунок 6 б). Распределение температурных полей в обоих случаях характеризуется наличием зоны больших температур в верхней области частиц кварца, сформированной воздействием лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм. При этом нужно отметить локальное увеличение температур в месте расположения примеси, возникающее в результате поглощения лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм материалом примеси. Отметим, что воздействие лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм обуславливает также и увеличение значений температуры в верхней области частицы с примесью, которое составляет порядка 100 °К по сравнению со случаем обработки беспримесной частицы. При больших размерах примеси это увеличение может достигать 600 °К.

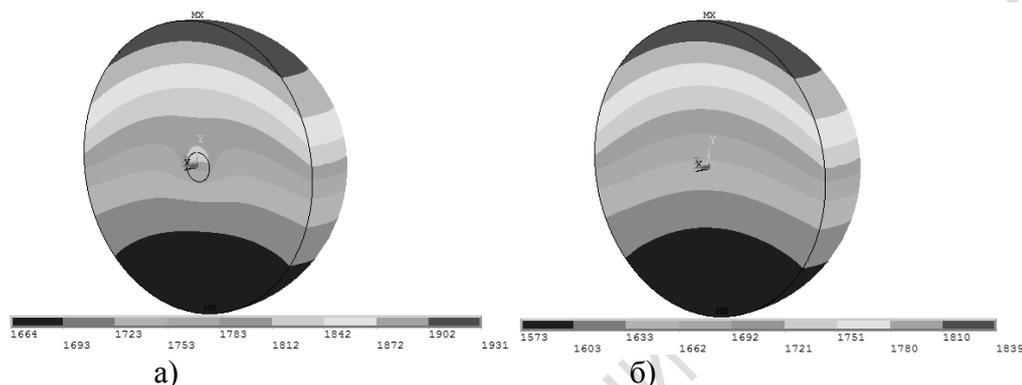


Рисунок 6 – Распределение температурных полей при воздействии лазерного излучения на частицу кварца с включением

В работе были определены значения плотности мощности CO<sub>2</sub>-лазера, при которых обеспечивается нагрев кварцевых частиц различного размера до температуры плавления. При этом варьировались как размеры частиц кварца, так и размеры частиц примеси (см. таблица 1), а также проводились расчеты при фиксированном размере частиц кварца и различных размерах частиц примеси (рисунок 7).

В расчетах, представленных в таблицах 1 и на рисунке 7, плотность мощности излучения YAG-лазера составила  $2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. В расчетах, представленных на рисунке 8, размер частицы кварца оставался постоянным и равным 400 мкм, плотность мощности YAG-лазера составила  $2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

Таблица 1 – Плотность мощности излучения CO<sub>2</sub>-лазера, необходимая для оплавления частицы кварца при различных размерах частицы и размерах примеси

Размер частицы кварца, мкм	Размер включения, мкм	Плотность мощности излучения CO <sub>2</sub> -лазера с длиной волны 10,6 мкм, 10 <sup>6</sup> Вт/м <sup>2</sup>
250	25	0,457
300	30	0,548
350	35	0,635
400	40	0,717
450	45	0,795
500	50	0,867
550	55	0,933

Анализ результатов моделирования, приведенных в таблице 1, показал, что с увеличением размера частицы кварца и пропорциональным увеличением размера примеси плотность мощности лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм, необходимая для оплавления частицы кварца, практически линейно растет. При этом увеличение размера частицы примеси

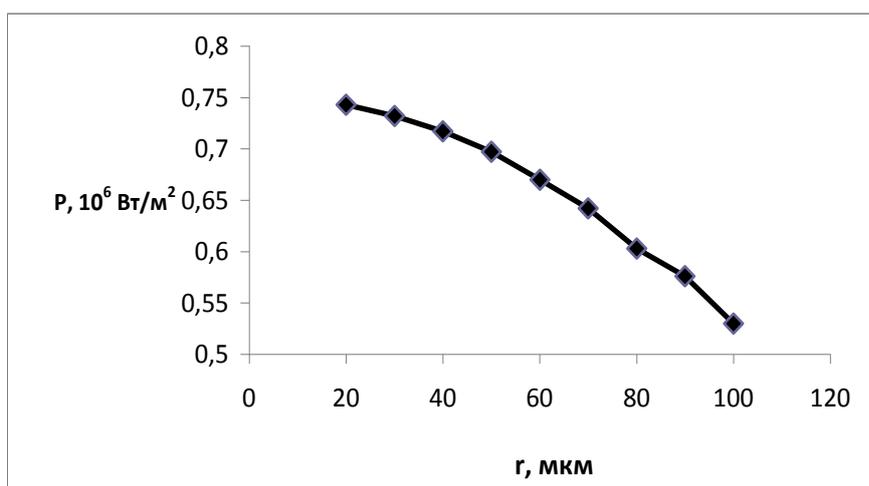


Рисунок 7 – Зависимость плотности мощности излучения СО<sub>2</sub>-лазера, необходимой для оплавления частицы кварца размером 400 мкм при различных размерах примеси

при неизменном размере частицы кварца приводит к снижению значений плотности мощности лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм, необходимой для оплавления частицы кварца (рисунок 7). Это объясняется тем, что с увеличением размера частицы примеси увеличивается вклад лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм в нагрев частицы кварца за счет поглощения этого излучения частицей примеси.

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет моделировать процесс двулучевой лазерной сепарации кварцевого сырья и получать информацию о распределении температурных полей в системе «кварцевая частица – примесь». Полученные данные можно использовать для оптимизации технологических режимов лазерной сепарации кварцевого сырья.

### Литература

1. Петров, Г.Н. Рынок полупроводникового кремния: от сырья до электронных систем / Г.Н. Петров, Т.М. Ткачева // *Материалы электронной техники*. – 1999. – № 4. – С. 11–15.
2. Бурьян, Ю.И. Современные требования к производству и потреблению кварцевого сырья / Ю.И. Бурьян // *Разведка и охрана недр*. – 1999. – № 3. – С. 4–5.
3. Новая концепция обогащения сырья для производства особо чистого кварца / Е.Н. Гулин [и др.] // *Разведка и охрана недр*. – 1999. – № 3. – С. 5–7.
4. Установка для обогащения жильного кварца : пат. 5147 Респ. Беларусь, МПК(2006) С 03В 33/00 / Е.Б. Шершневу, С.И. Соколов, А.С. Побияха; заявитель Гомель. гос. ун-т. им. Ф.Скорины – № u 20080615; заявл. 30.07.08 ; опубл. 30.06.04 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтра інтэлектуал. уласнасці*. – 2008. – № 5. – С. 88.
5. Корицкий, Ю.В. Справочник по электротехническим материалам / Ю.В. Корицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3. – 728 с.
6. Книпович, Ю.Н. Анализ минерального сырья / Ю.Н. Книпович, Ю.В. Морачевский. – Ленинград : ГХИ, 1959. – 1055 с.