

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Объект авторского права
УДК 621.373.826

СОКОЛОВ
Сергей Иванович

**ДВУХЛУЧЕВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА КВАРЦА
ДЛЯ РЕЗОНАТОРОВ И ФОТОШАБЛОНОВ СУБМИКРОННЫХ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Минск 2023

Научная работа выполнена в учреждении образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины» и учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научные руководители:

Емельянов Виктор Андреевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, главный специалист управления персонала ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Шершнёв Евгений Борисович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой общей физики учреждения образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»

Официальные оппоненты:

Толстопятов Евгений Максимович, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник отдела «Физика и механика композиционных систем» государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси»

Голубев Валерий Сергеевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией лазерной обработки материалов государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая организация

Белорусский национальный технический университет

Защита состоится «18» 05 2023 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. 293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики радиоэлектроники».

Автореферат разослан «18» 05 2023 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций Д 02.15.03

кандидат технических наук, доцент



Г. А. Пискун

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения развития и конкурентоспособности предприятий Республики Беларусь необходимо улучшать качество выпускаемых устройств с уникальными эксплуатационными свойствами. Это можно реализовать за счет улучшения характеристик уже существующих материалов или разработки новых способов обработки изделий, используемых в электронной технике.

В настоящее время одним из материалов, применяемых в резонаторах и фотошаблонах для субмикронных интегральных микросхем, является кварц. Это обусловлено тем, что кварцевое стекло обладает широкой спектральной областью прозрачности, низким коэффициентом линейного температурного расширения $0,54 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и высокой теплопроводностью $1,38 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. При производстве интегральных микросхем по нормам проектирования меньше $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ чистота кварцевых фотошаблонов определяет качество полученных изделий. Кроме того, возникает необходимость обработки испорченных фотошаблонов в фотошаблоны меньших типоразмеров. Частотно-температурные характеристики резонаторов, полученных из кристаллического кварца, определяются точностью среза пластин.

Исследованию по данной тематике посвящено большое количество работ, в частности, по обработке кристаллического кварца и кварцевого стекла в которых решен ряд частных задач теории теплопроводности и термоупругости как в нелинейной постановке, так и с использованием усредненных значений физических характеристик, а также результаты математического моделирования с применением методов компьютерного моделирования и конечных элементов, приведены результаты экспериментальных исследований.

Однако для технологических процессов лазерной обработки кварца характерен ряд особенностей, затрудняющих их широкое промышленное внедрение из-за высокой термостойкости кварцевого стекла. Особый интерес вызывает применение двух лазерных лучей, которые обладают разной поглощательной способностью. За счет применения лазерных излучений с различной длиной волны появляется возможность регулировать распределение температурных полей и полей термоупругих напряжений, возникающих в кварце при его лазерной обработке. В связи с этим актуальным является проведение углубленных исследований в области лазерной обработки кварца, применяемого при производстве субмикронных интегральных микросхем и резонаторов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации утверждена приказом ректора учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» № 309-о от 30.11.2021 г. и уточнена по результатам предварительной экспертизы диссертации (заключение утверждено ректором учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» 18.01.2023) и соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021 – 2025 годы, утвержденных Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156 (п. 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы») («Микро-, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика»).

Результаты исследований, представленные в диссертации, использованы при выполнении следующих научно-исследовательских работ:

1) «Разработка и исследование новых эффективных двухволновых лазерных технологий получения и обработки аморфного и поликристаллического кварца» ГПНИ «Функциональные и машиностроительные материалы и технологии, наноматериалы и нанотехнологии в современной технике» на 2011 – 2013 гг. (№ госрегистрации 20112844);

2) «Разработка процессов лазерной обработки кристаллического кварца и кристаллов алмаза» ГПНИ «Высокоэнергетические технологии» на 2014 – 2015 гг. (№ госрегистрации 20140964);

3) «Разработка методов лазерного микро- и макроформообразования кристаллов алмаза, применяемых в микро- и оптоэлектронике» ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» на 2016 – 2020 гг. (№ госрегистрации 20160673).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью диссертационного исследования является разработка в рамках теории термоупругости и теплопроводности моделей процессов лазерной двухлучевой обработки кристаллического кварца и кварцевого стекла, установление закономерностей лазерного раскалывания кварцевого стекла и кристаллического кварца, используемых при изготовлении подложек фотошаблонов и кварцевых резонаторов, создание технологии двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья для получения кварцевых фотошаблонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Для достижения поставленной цели будут решены следующие задачи:

– изучить процесс лазерного воздействия на кварцевое стекло в рамках теории линейной механики разрушения;

- исследовать процесс лазерной обработки кристаллического кварца, учитывающий анизотропию теплофизических и упругих свойств кварца;
- разработать новые двухлучевые способы лазерного термораскалывания кварцевого стекла и кристаллического кварца, полировки и сварки кварцевого стекла, а также очистки кварцевого сырья;
- провести экспериментальные исследования процессов двухлучевой лазерной обработки кварцевого стекла и кристаллического кварца и очистки кварцевого сырья.

Объект исследования – кварцевое стекло и кристаллический кварц, используемые при изготовлении подложек фотошаблонов и кварцевых резонаторов.

Предмет исследования – распределение температурных полей и полей термоупругих напряжений, а также закономерности процессов, возникающих в кварцевом стекле и кристаллическом кварце при их двухлучевой лазерной обработке.

Научная новизна

1. Определено значение длины стартового дефекта $(0,75 - 1,5) \cdot 10^{-3}$ м при скорости обработки $15 \cdot 10^{-3}$ м/с эллиптическим лазерным пучком с большой осью $6 \cdot 10^{-3}$ м и малой осью $2 \cdot 10^{-3}$ м и мощности лазерного излучения 30 Вт, при которой максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений составляют $(0,79 - 0,94) \cdot 10^6$ Па·м^{1/2}, что больше критического значения коэффициента интенсивности равного $0,7 \cdot 10^6$ Па·м^{1/2}, который инициирует микротрещину при лазерном термораскалывании.

2. Впервые установлено, что управляемое термораскалывание кварцевого стекла осуществимо, если после нагрева лазерным пучком и охлаждения подачей хладагента при относительном перемещении лазерного пучка и материала вдоль линии термораскалывания образуется зона остаточных напряжений, в которой разность хода прямого и преломленного лучей составляет $(11 - 30) \cdot 10^{-9}$ м.

3. Установлено, что при учете только анизотропии теплопроводности при определении величины напряжений растяжения в зоне обработки изменение напряжения составляет 34,2 %, в случае учета только анизотропии теплового расширения изменение – 46,4 %, а при учете только анизотропии упругих свойств изменение величины напряжения – 62,5 % по отношению к случаю расчета величины напряжений растяжения без их учета. При выборе параметров лазерного термораскалывания кварцевых пластин АТ- и ВТ-срезов учет анизотропии свойств кристаллов кварца, приводит к изменению максимальных значений растягивающих напряжений на 35 %.

4. Определены оптимальные значения технологических параметров лазерной полировки кварцевого стекла CO₂-лазером: при скорости обработки $5 \cdot 10^{-3}$ м/с, радиусе лазерного пучка $1,2 \cdot 10^{-3}$ м и мощности лазерного излучения 22 Вт достигается температура плавления 2004 К, что позволяет полировать кварцевое стекло, при этом внутренние напряжения составляют $45 \cdot 10^6$ Па, что меньше прочности на разрыв для кварцевого стекла равной $300 \cdot 10^6$ Па.

5. Установлено, что при расчете технологических режимов лазерной сварки в случае учета зависимостей теплофизических свойств кварцевого стекла (плотность, теплопроводность, теплоемкость, коэффициент линейного термического расширения) от температуры максимальная температура в зоне обработки в 1,5 – 1,7 раза меньше, чем без учета такой зависимости. Выявлено, что двухлучевая суперпозиционная сварка позволяет увеличить глубину проплавления на 25 % по сравнению с традиционной однолучевой сваркой, а также что параллельная двухлучевая сварка позволяет избежать перегрева материалов толщиной до $1,5 \cdot 10^{-3}$ м и при сварке материалов различной толщины.

Положения, выносимые на защиту

1. Механизм удаления примесей из кварцевого сырья двухлучевой обработкой CO₂-лазером и YAG-лазером при плотности мощности в зоне обработки $(8,0 - 10,0) \cdot 10^7$ Вт/м² и скорости перемещения сырья в пределах $(5 - 10) \cdot 10^{-3}$ м/с с нагревом кварцевого сырья CO₂-лазером до температуры 2273 К и одновременном расплавлении частиц кварца с примесями за счет преимущественного поглощения примесями излучения YAG-лазера, которое прозрачно для чистых частиц, что снижает содержание примесей с $(3 - 3,5) \cdot 10^{-4}$ % до $(1 - 1,5) \cdot 10^{-4}$ % и количество брака кварцевых фотошаблонов на 12 – 15 %.

2. Модель лазерного управляемого термораскалывания кварцевого стекла для фотошаблонов при одновременном воздействии на него двух пучков лазерного излучения инфракрасного диапазона различной геометрии: с максимальной интенсивностью в центре и с нулевой интенсивностью в центре, которая позволила рассчитать термоупругие напряжения по глубине стекла, необходимые для формирования микротрещины, что дало возможность увеличить скорость термораскалывания на (20 – 30) %.

3. Установленная закономерность термораскалывания кварцевого стекла для фотошаблонов, заключающаяся в предварительном воздействии нагрева и охлаждения и относительном перемещении лазерного пучка и кварцевого стекла вдоль линии термораскалывания, в результате которого образуется зона остаточных напряжений, которая вызывает разность хода прямого и преломленного лучей $(11 - 30) \cdot 10^{-9}$ м, а удельный энерговклад

$(2 - 3) \cdot 10^9$ Дж/м³ оптимален для получения глубины разделяющей микротрещины $(0,18 - 0,22) \cdot 10^{-3}$ м, что позволяет исключить растрескивание кромки кварцевого фотошаблона за счет уменьшения остаточных напряжений до значений ниже прочности на разрыв.

4. Экспериментально установленные режимы лазерного термораскалывания кристаллов кварца X, Y и Z-срезов: в различных направлениях относительно главной оптической оси кристалла термораскалывание осуществляется дифференцированным нагревом, обеспечивающим формирование термоупругих напряжений $(30 - 40) \cdot 10^6$ Па, необходимых для создания лазерно-индуцированной трещины, при мощности лазерного излучения 25 – 35 Вт в направлении, параллельном оси симметрии третьего порядка – скорость резки $(13 - 17) \cdot 10^{-3}$ м/с, а в направлении, когда линия реза перпендикулярна оси симметрии третьего порядка: $(6 - 8) \cdot 10^{-3}$ м/с, когда линия реза находится в плоскости, перпендикулярной оси симметрии третьего порядка, и $(5 - 7) \cdot 10^{-3}$ м/с в случае, если линия реза находится в плоскости, параллельной оси симметрии третьего порядка.

Личный вклад соискателя ученой степени

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в обосновании выбора режимов обработки кварцевого стекла и кристаллического кварца, построении математической модели процессов двухлучевой лазерной обработки. В совместных работах соискатель принимал непосредственное участие в разработке моделей и проведении экспериментальных исследований, разработке технологических схем лазерной обработки, написании научных работ.

Постановка задач, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились совместно с научными руководителями д-м техн. наук В. А. Емельяновым и канд. техн. наук Е. Б. Шершнёвым. В части построения моделей процесса лазерной обработки кварцевого стекла и кристаллического кварца оказывали помощь канд. физ.-мат. наук Ю. В. Никитюк, канд. техн. наук И. Ю. Аушев и канд. техн. наук А. Н. Купо. Вклад остальных авторов – д-ра физ.-мат. наук А. Н. Сердюкова, канд. физ.-мат. наук В.Ф. Шолоха, А. С. Побяха, А. Е. Шершнёва связан с обсуждением промежуточных результатов, изготовлением установки для лазерной обработки. На совместно опубликованные работы с авторами приведены ссылки. Результаты, полученные без вклада соискателя, в работу не вошли.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы доклады-

вались и обсуждались на следующих конференциях: Юбилейная научно-практическая конференция УО «ГГУ имени Ф. Скорины» (Гомель, 2009); Гомельский научный семинар по теоретической физике, посвященный 100-летию со дня рождения Ф. И. Федорова (Гомель, 2011); III Международная научная конференция «Проблемы взаимодействия излучения с веществом» (Гомель, 2011); IX Международная научная конференция «Лазерная физика и оптические технологии» (Гродно, 2012); Научный семинар по оптике и теоретической физике, посвященный 70-летию со дня рождения А. Н. Сердюкова (Гомель, 2014); IV Республиканская научная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения Б. В. Бокутя (Гомель, 2016); Конференция, посвященная 110-летию со дня рождения Ф. И. Федорова (Гомель, 2021); The 19th International Conference on Global Research and Education (Gomel, 2021).

Результаты диссертационной работы использованы на предприятии ОАО «Коралл» в процессе удаления примесей из кварцевого сырья при производстве кварцевых труб, штабиков и фотошаблонов, а также внедрены в учебный процесс УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины» в качестве лекционного материала для студентов специальностей 1-31 04 03 «Физическая электроника» и 1-31 04 01-02 «Физика (производственная деятельность)» факультета физики и информационных технологий.

Опубликованность результатов диссертации

По результатам выполненных исследований опубликовано 34 печатные работы общим объемом 12,6 авторского листа. Из них 1 монография в соавторстве объемом 1,5 авторского листа, 12 статей объемом 5,5 авторского листа, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, 1 статья в материалах международной конференции объемом 0,3 авторского листа, 7 тезисов докладов на международных научно-технических конференциях объемом 0,8 авторского листа, 1 патент Российской Федерации объемом 0,3 авторского листа, 12 патентов Республики Беларусь объемом 4,2 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, общей характеристики, 4 глав, заключения, списка использованных источников, 4 приложений. Список использованных источников включает библиографический список из 107 наименований и список публикаций соискателя ученой степени из 34 наименований. Общий объем – 133 страницы, в том числе 77 рисунков на 38 страницах, 19 таблиц на 8 страницах, 4 приложения на 4 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая глава посвящена анализу литературы по лазерной обработке кварца. Выявлено, что на скорость термораскалывания существенное влияние оказывает плотность мощности лазерного пучка и его форма. Показано, что скорость возрастает пропорционально отношению длины волны эллиптического пучка к диаметру круглого пятна. Помимо этого, важную роль играет состав хладагента и место его подачи в зону нагрева. Для каждого режима термораскалывания существует максимальное и оптимальное расстояние от лазерного пучка до области подачи хладагента.

При полировке кварцевого стекла с помощью CO_2 -лазера возможно появление остаточных напряжений после термообработки, которые могут привести к растрескиванию материала. Использование второго лазера с длиной волны, соответствующей объемному поглощению, позволяет избежать этого.

Определено, что при уменьшении размеров транзисторов возникает необходимость применения лазерного излучения меньшей длины волны, что определяет целесообразность использования кварцевого стекла для изготовления фотошаблонов. Определены основные примеси, присутствующие в кварцевом сырье, от которых невозможно избавиться электрическими, магнитными и химическими методами.

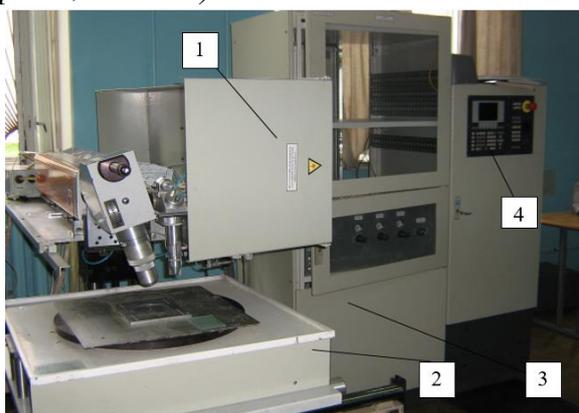
Во **второй главе** приведены оборудование и методика проведения экспериментальных исследований по лазерной обработке кварца.

Для осуществления процессов лазерной обработки кварца использована экспериментальная установка для лазерной обработки кварца (рисунок 1). В установку входит координатный стол и система ЧПУ *SINUMERIK 802S (Siemens, Германия)*, которая представляет собой микропроцессорную систему числового программного управления с приводами на шаговых двигателях. В установке для лазерной обработки используется газовый лазер CO_2 -лазер *ИЛГН-802 (НПП «Исток», Россия)* и ND:YAG-лазер *ЛТИ-502 (ООО «Фтоил», Россия)*.

Для определения линейных размеров пучка лазерного излучения измерялись параметры видимого следа, оставленного лазерным излучением на оргстекле при нагревании его в течение 1 с при излучении с длиной волны $10,6 \cdot 10^{-6}$ м, и по видимому следу окисления на поверхности стали при излучении с длиной волны $1,06 \cdot 10^{-6}$ м.

При длине волны лазерного излучения $10,6 \cdot 10^{-6}$ м для формирования на поверхности обрабатываемого материала пучка круглого сечения применялись выпуклые и двояковыпуклые сферические фокусирующие линзы из монокристалла хлорида натрия с различным фокусным расстоянием. С помощью комбинированной сферическо-цилиндрической оптики на поверхности материала получали лазерный пучок эллиптической формы.

Для оценки эффектов взаимодействия лазерного излучения со стеклом производились измерения геометрических размеров микротрещины с использованием микроскопов типа МБС-2 («ЛОМО», СССР), ММУ-3 («ЛОМО», СССР). Оценка остаточных напряжений в стекле производилась с помощью серийного полярископа-поляриметра ПКС-125 («ЗОМЗ», СССР) по компенсационному методу Сенармона. Для определения параметров шероховатости R_a и R_z использовался измеритель шероховатости SURTRONIC 25 («Taylor Hobson», Великобритания). Для определения распределения температурных полей в зоне лазерной обработки использовался тепловизор ИТ-3СМ (НПК «Аурис», Россия).



1 – защитный кожух;
 2 – координатный стол;
 3 – силовой шкаф;
 4 – ЧПУ SINUMERIK 802S
 Рисунок 1 – Экспериментальная установка

В третьей главе приведены результаты моделирования двухлучевой лазерной обработки кварца.

Выявлено, что для начала развития термоиндуцированной трещины в соответствии с критериями механики разрушения необходимо определить критическое состояние в обрабатываемом материале, при этом одним из наиболее важных параметров, характеризующих распределение напряжений около трещин в упругих телах, является коэффициент интенсивности напряжений. Для роста термоиндуцированной трещины в кварцевом стекле, используемого для изготовления фотошаблонов, необходимы следующие условия:

- 1) напряжения в вершине трещины должны быть растягивающими;
- 2) коэффициент интенсивности напряжений K_I в вершине трещины должен превышать критический коэффициент интенсивности напряжений кварцевого стекла $K_{IC} = 0,7 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Для проведения расчетов технологических режимов лазерного термораскалывания кварцевых стекол с учетом параметров стартового дефекта при моделировании процесса формирования термоиндуцированной трещины в рамках теории термоупругости и линейной механики разрушения использовалась техника перестроения конечно-элементной сетки.

За счет увеличения длины стартового дефекта увеличивается вероятность инициализации микротрещины: при длине стартового дефекта $L = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений составляют $K_I = 0,79 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}^{1/2}$, при $L = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – $K_I = 0,86 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}^{1/2}$, а при $L = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – $K_I = 0,94 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}^{1/2}$ (рисунки 2, 3).

При разделении кристаллического кварца методом лазерного термораскалывания определяются параметры резки с учетом выбора направления резки относительно кристаллографической ориентации исходного образца. Проведенные расчеты позволяют утверждать, что при моделировании управляемого лазерного термораскалывания кристаллов кварца принципиально важно учитывать анизотропию всех его свойств, оказывающих влияние на формирование термоупругих полей в образце. В случае учета только анизотропии теплопроводности при определении величины напряжений растяжения в зоне обработки для анализируемых режимов изменение температур достигает 34,2 %, в случае учета только анизотропии теплового расширения изменение достигает 46,4 %, а в случае учета только анизотропии упругих свойств изменение составляет 62,5 %. При этом, необходимо учитывать при определении интенсивности нагрева в направлении резки значения этих коэффициентов.

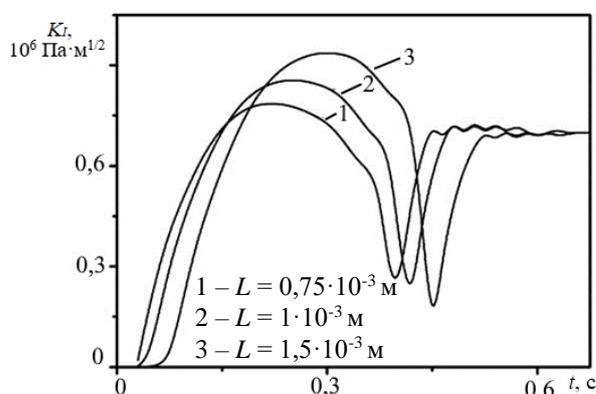


Рисунок 2 – Расчетные значения коэффициента интенсивности напряжений K_I в вершине трещины

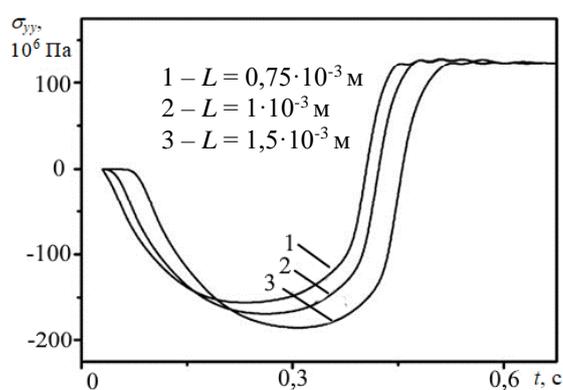


Рисунок 3 – Расчетные значения упругих напряжений σ_{yy} в вершине трещины

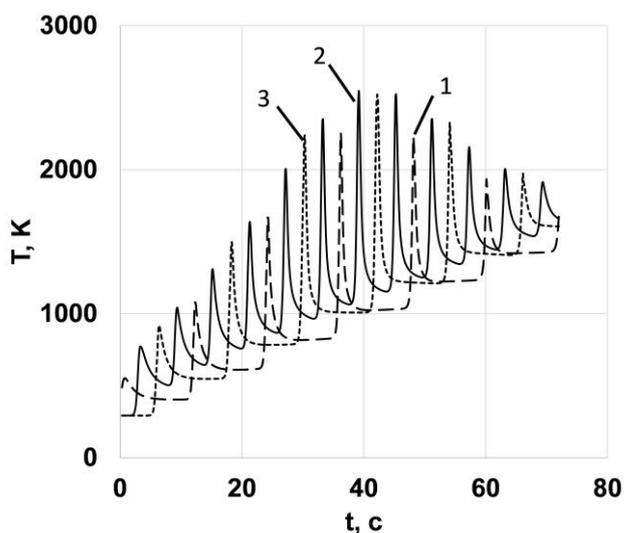
Таблица 1 – Расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия в зоне обработки

Вариант обработки	Максимальные напряжения в зоне обработки, 10^6 Па	$h = 0,75 \cdot 10^{-3}$ м		$h = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м	
		$v = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с	$v = 15 \cdot 10^{-3}$ м/с	$v = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с	$v = 15 \cdot 10^{-3}$ м/с
I	Растяжения	83,8	31,8	42,9	23,5
	Сжатия	641,9	328,4	414,2	262,5
II	Растяжения	63,5	21,1	33,2	26,5
	Сжатия	512,7	287,6	355,9	244,1
III	Растяжения	85,1	38,8	56,2	43,2
	Сжатия	607,3	388,4	459,1	335,2
IV	Растяжения	93,1	42,4	73,0	55,1
	Сжатия	628,5	377,3	480,8	355,3
V	Растяжения	65,7	22,7	34,3	26,3
	Сжатия	520,9	292,9	356,0	245,4

Проведен анализ термоупругих полей, формируемых в кварцевой пластине при различных перемещениях лазерного луча (таблица 1): I – анализ среза zy в направлении оси X; II – анализ среза yx в направлении оси X; III – анализ среза yx в направлении оси Z; IV – анализ среза xu в направлении оси Z; V – анализ среза xu в направлении оси Y. Рассчитано распределение термоупругих полей, формируемых в кристаллах кварца АТ- и ВТ- срезов при управляемом лазерном термораскалывании для различных толщин h .

При проведении полного факторного эксперимента двухлучевой лазерной полировки кварцевого стекла первого порядка с двухуровневым варьированием факторов сформирован план для пяти факторов: скорость обработки v , радиус первого лазерного пучка r_1 , радиус второго лазерного пучка r_2 , мощность первого пучка P_1 , мощность второго пучка P_2 . При этом определялись следующие выходные параметры: глубина проплавления z и максимальная температура в зоне обработки T .

Таким образом, моделью объекта исследования являлись функции отклика (z) и (T), связывающие выходные параметры с факторами (v, r_1, r_2, P_1, P_2), которые менялись в заданных пределах при проведении опытов. В результате численного эксперимента определены оптимальные параметры лазерной сварки кварцевых изделий, обеспечивающие максимальную глубину проплавления при заданном диапазоне значений температуры в зоне воздействия лазерного излучения: $v = 3 \cdot 10^{-3}$ м/с, $r_1 = 1,25 \cdot 10^{-3}$ м, $r_2 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м, $P_1 = 35$ Вт, $P_2 = 35$ Вт.



1 – в начале линии сканирования;
 2 – в середине линии сканирования;
 3 – в конце линии сканирования
 Рисунок 4 – Расчетные значения температуры от времени сканирования при шаге сканирования $0,5 \cdot 10^{-3}$ м

Моделирование лазерной полировки кварцевого стекла выполнялось с учетом зависимости теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры. Полученные значения температур в различных точках поверхности обрабатываемой пластины представлены на рисунке 4. Моделирование позволяет определить мощность лазерного излучения, размеры лазерного пучка и скорость относительного перемещения, при которых на поверхности кварцевого стекла достигается температура размягчения более 2000 К, при этом температура остальной

части материала не превышает температуру размягчения.

С использованием метода перебора проведена оптимизация параметров лазерной полировки кварцевого стекла, при которых на поверхности достигается температура размягчения с минимальными остаточными механическими напряжениями: скорость обработки $v = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с, радиус лазерного пучка $r = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м, плотность мощности лазерного излучения $P = 22 \cdot 10^6$ Вт/м².

Построены регрессионные модели, определяющие зависимости T и σ_1 от параметров обработки (уравнения (1)–(2)), согласно которым наибольшее влияние оказывает радиус лазерного пучка.

$$T = 2098,5 \cdot r - 163,25 \cdot v - (r - 1,5) \cdot (237,5 \cdot v - 712,5) + 159,75 \quad (1)$$

$$\sigma_1 = 104615000 \cdot r + 19697500 \cdot v + (r - 1,5) \cdot (38505000 \cdot v - 115515000) + 156272500 \quad (2)$$

Разработан механизм очистки кварцевого сырья, который заключается в следующем:

- 1) кварцевое сырье помещается на конвейерную ленту;
- 2) частицы кварцевого сырья нагреваются лазерным излучением CO₂-лазера с длиной волны $10,6 \cdot 10^{-6}$ м, которое сфокусировано в виде полосы, до температуры близкой к температуре плавления;
- 3) одновременно на частицы кварцевого сырья направляется излучение YAG-лазера с длиной волны $1,06 \cdot 10^{-6}$ м, сфокусированное в виде полосы. В результате этого происходит нагрев частиц сырья с поглощающими включениями до температур выше температуры плавления кварца;
- 4) далее перегретые частицы кварцевого сырья с примесями контактируют с частицами без примесей, и в результате этого образуются конгломераты из нескольких частиц;
- 5) обработанное сырье механически сепарируется для удаления конгломератов, содержащих примеси;
- 6) после сепарации обработанное сырье возвращается на конвейерную ленту и снова подвергается воздействию YAG-лазера с длиной волны $1,06 \cdot 10^{-6}$ м с низкой интенсивностью излучения;
- 7) при движении обработанного сырья анализируется температурное поле кварцевого сырья с помощью тепловизора, и в случае обнаружения локального нагрева сырье направляется на повторную обработку до тех пор, пока локальные зоны нагрева не исчезнут.

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 использовался метод конечных элементов и аналитическое решение. Распределение температуры до глубины $50 \cdot 10^{-6}$ м 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.

В четвертой главе приведены результаты экспериментов по двухлучевой лазерной обработке кварца. Экспериментальные исследования процессов лазерного термораскалывания кристаллов кварца были проведены на пластинах кристаллического кварца размерами $20 \times 10 \times 1,5 \cdot 10^{-3}$ м. Мощность лазерного излучения составляла 30 Вт, пучок был сфокусирован в виде круглого пятна радиусом $1,5 \cdot 10^{-3}$ м. Термораскалывание проводилось по трем основным срезам кристалла кварца, результаты которого приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований процессов лазерного термораскалывания кристаллов кварца

Ориентация реза	Скорость обработки	
	$6 \cdot 10^{-3}$ м/с	$15 \cdot 10^{-3}$ м/с
1. Вдоль оси симметрии третьего порядка, при этом линия реза лежит в плоскости параллельной оси симметрии третьего порядка		
2. Перпендикулярно оси симметрии третьего порядка, при этом линия реза лежит в плоскости параллельной оси симметрии третьего порядка		Нет реза
3. Перпендикулярно оси симметрии третьего порядка, при этом линия реза лежит в плоскости перпендикулярной оси симметрии третьего порядка		Нет реза

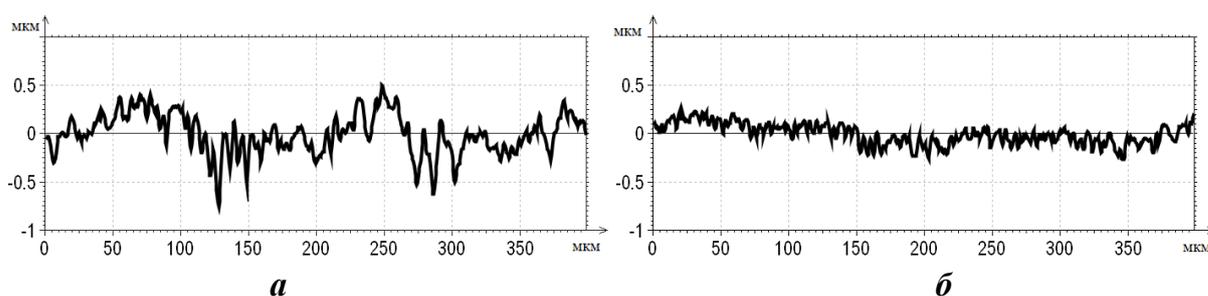
В соответствии с полученными экспериментальными данными при одинаковых параметрах обработки лазерное термораскалывание более устойчиво протекает в случае лазерного термораскалывания кристаллического кварца вдоль оси симметрии третьего порядка, при этом линия реза лежит в плоскости

параллельной оси симметрии третьего порядка, что соответствует напряжениям растяжения σ_{zz} , равным $86,8 \cdot 10^6$ Па.

Если термораскалывание осуществляется перпендикулярно оси симметрии третьего порядка, при этом линия реза лежит в плоскости, параллельной оси симметрии третьего порядка, то $\sigma_{zz} = 55,5 \cdot 10^6$ Па. В случае лазерного термораскалывания кристаллического кварца перпендикулярно оси симметрии третьего порядка, при этом линия реза лежит в плоскости, перпендикулярной оси симметрии третьего порядка, то $\sigma_{zz} = 46,1 \cdot 10^6$ Па. То есть при скорости обработки $6 \cdot 10^{-3}$ м/с термораскалывание наблюдается во всех случаях, а при скорости $15 \cdot 10^{-3}$ м/с термораскалывание наблюдается только в случае 1, так как в случаях 2 и 3 возникающих растягивающих напряжений σ_{zz} недостаточно для возникновения трещины (таблица 2). Полученные результаты можно использовать при лазерной резке кварцевых пластин, используемых при производстве кварцевых резонаторов.

Экспериментальные исследования процесса лазерной полировки кварцевых стекол были выполнены на установке для лазерной обработки материалов. В качестве образцов использовались кварцевые пластины различного типоразмера. Скорость обработки варьировалась от $1,25 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ м/с. Шаг смещения лазерного пучка после одного прохода в направлении оси Y составлял $0,25 \cdot 10^{-3}$ м.

Качество обработки поверхности кварцевого стекла оценивалось по параметрам шероховатости R_a и R_z . Полученные экспериментальные результаты представлены на рисунке 5 и в таблице 3. В результате лазерной полировки поверхности кварцевого стекла параметр R_a уменьшался в 5–8 раз, а параметр R_z – в 8–12 раз.



а – до лазерной полировки; б – после лазерной полировки
Рисунок 5 – Профилограмма пластины из кварцевого стекла

Таблица 3 – Результаты эксперимента по полировке кварцевого стекла

$v, 10^{-3}$ м/с	До полировки		После полировки	
	$R_z, 10^{-6}$ м	$R_a, 10^{-6}$ м	$R_z, 10^{-6}$ м	$R_a, 10^{-6}$ м
1,25	4,58	0,333	0,49	0,0645
2,5	2,71	0,278	0,220	0,0374
5	4,07	0,547	0,460	0,0812

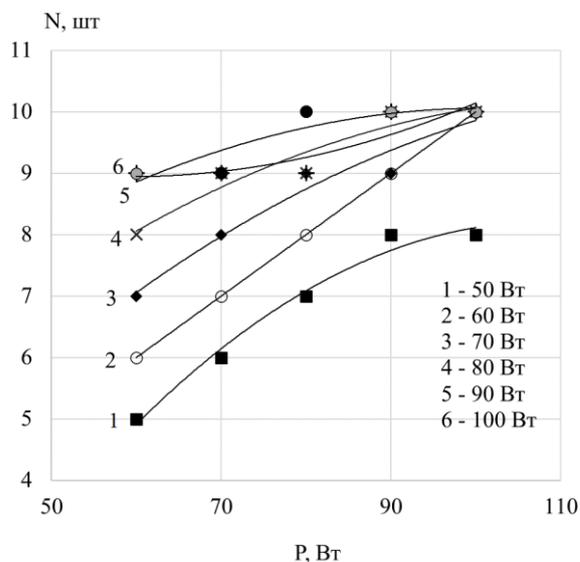


Рисунок 6 – Зависимость количества агломератов на $10 \cdot 10^{-3}$ кг сырья при скорости перемещения конвейерной ленты $5 \cdot 10^{-3}$ м/с и мощности YAG-лазера 50 Вт от мощности CO₂-лазера

Проведены экспериментальные исследования двухлучевой лазерной очистки кварцевого концентрата RQ-3К, произведенного ООО «Русский кварц» и используемого на ОАО «Коралл» (рисунок 6). При увеличении мощности CO₂-лазера количество агломератов растет до определенного уровня. 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. Для эффективной очистки кварцевого сырья от примесей мощности CO₂-лазера и YAG-

лазера следует выбирать с условием достижения в зоне обработки плотности мощности порядка $(8,0 - 10,0) \cdot 10^7$ Вт/м², в зависимости от скорости перемещения сырья в пределах $(5 - 10) \cdot 10^{-3}$ м/с. Фотошаблоны, полученные из сырья, очищенного с помощью лазерной обработки, уменьшают количество брака на 12 – 15 % за счет исключения примесных частиц в исходном сырье.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Установлена и обоснована необходимость учета анизотропии свойств кристаллов кварца при выборе параметров обработки на основании конечно-элементного моделирования процесса управляемого термораскалывания кристаллического кварца. При термораскалывании в различных направлениях относительно главной оптической оси кристалла следует осуществлять дифференцированный нагрев, обеспечивающий формирование необходимых для создания лазерно-индуцированной трещины термоупругих напряжений в каждом направлении ориентации. Это может быть обеспечено либо за счет увеличения скорости резки вдоль оси симметрии третьего порядка в 1,6 – 1,8 раза в сравнении с вариантом резки перпендикулярно оси симметрии третьего порядка, либо соответствующим изменением мощности лазерного излучения.

Введение второго луча в процесс лазерного термораскалывания позволяет увеличить максимальные растягивающие напряжения при небольшом увеличении максимальной температуры. Это позволяет повысить стабильность процесса, не превышая температуру плавления кристалла кварца [1–А; 4–А; 8–А; 16–А; 17–А; 26–А; 27–А; 29–А; 30–А].

2. Определены режимы лазерного термораскалывания кварца в рамках линейной механики разрушения. Показано, что условием роста термо-индуцированной трещины являются напряжения в вершине трещины, которые должны быть растягивающими; при этом расчетный коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины должен превышать критический коэффициент интенсивности напряжений. Выявлено заметное влияние длины стартового дефекта на величину термоупругих напряжений и коэффициентов интенсивности напряжения в вершине трещины: при длине стартового дефекта $L = (0,75 - 1,5) \cdot 10^{-3}$ м максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений составляют $K_I = (0,79 - 0,94) \cdot 10^6$ Па \cdot м $^{1/2}$, что является больше критического значения коэффициента интенсивности, равного $0,7 \cdot 10^6$ Па \cdot м $^{1/2}$, при скорости обработки $15 \cdot 10^{-3}$ м/с, большой оси $6 \cdot 10^{-3}$ м и малой оси $2 \cdot 10^{-3}$ м эллиптического лазерного пучка, мощности лазерного излучения 30 Вт. [2–А; 3–А; 6–А; 11–А; 14–А; 15–А; 18–А; 19–А; 20–А; 22–А; 24–А; 25–А; 28–А].

3. Определены режимы двухлучевой суперпозиционной лазерной сварки кварцевого стекла, в которой использовалось два луча с различной дифракционной расходимостью, которое показало, что по сравнению с однолучевой сваркой при одинаковой мощности, глубина проплавления увеличилась на 25 %. Максимальная глубина проплавления при двухлучевой суперпозиционной лазерной сварке достигается при следующих параметрах обработки: скорость $v = (2,8 - 3,2) \cdot 10^{-3}$ м/с, радиус первого лазерного пучка $r_1 = (1,15 - 1,35) \cdot 10^{-3}$ м, радиус второго лазерного пучка $r_2 = (1,4 - 1,6) \cdot 10^{-3}$ м, мощность первого лазерного пучка $P_1 = 32 - 38$ Вт и мощность второго лазерного пучка $P_2 = 33 - 37$ Вт [5–А; 32–А].

4. Определены закономерности пространственной локализации температурных полей при полировке кварцевого стекла излучением CO₂-лазера. Составлена регрессионная модель полировки кварцевого стекла излучением лазера с учетом вычисленных значащих факторов с помощью дисперсионного анализа. При скорости обработки $(4 - 6) \cdot 10^{-3}$ м/с и радиусе лазерного пучка $(1,1 - 1,3) \cdot 10^{-3}$ м достигается оптимальная температура полировки 2000 К, при этом остаточные механические напряжения не превышают предел прочности кварцевого стекла. Полученное уравнение адекватно экспериментальным данным [9–А; 12–А; 21–А; 34–А].

5. Определены экспериментально обоснованные режимы процесса двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья. Выявлено, что распределение

температурных полей в случае нагрева чистой частицы и частицы с примесью характеризуется наличием зоны температур, близких к 2000 К в верхней области частиц кварца, сформированной воздействием лазерного излучения с длиной волны $10,6 \cdot 10^{-6}$ м. При этом наблюдается локальное увеличение температур в месте расположения примеси, возникающее в результате поглощения лазерного излучения с длиной волны $1,06 \cdot 10^{-6}$ м материалом примеси. Воздействие лазерного излучения с длиной волны $1,06 \cdot 10^{-6}$ м обуславливает также и увеличение значений температуры в верхней области частицы с примесью, которое составляет порядка 100 К по сравнению со случаем обработки беспримесной частицы. С увеличением размера частицы кварца от $250 \cdot 10^{-6}$ до $500 \cdot 10^{-6}$ м и пропорциональным увеличением размера примеси от $25 \cdot 10^{-6}$ до $50 \cdot 10^{-6}$ м плотность мощности лазерного излучения с длиной волны $10,6 \cdot 10^{-6}$ м, необходимая для оплавления частицы кварца, практически линейно растет с $0,457 \cdot 10^6$ до $0,933 \cdot 10^6$ Вт/м². При этом увеличение размера частицы примеси с $20 \cdot 10^{-6}$ до $100 \cdot 10^{-6}$ м при неизменном размере частицы кварца $400 \cdot 10^{-6}$ м приводит к снижению значений плотности мощности лазерного излучения с длиной волны $10,6 \cdot 10^{-6}$ м, необходимой для оплавления частицы кварца, с $0,743 \cdot 10^6$ до $0,530 \cdot 10^6$ Вт/м² [7–А; 10–А; 13–А; 23–А; 31–А; 33–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Представленные в работе результаты позволяют уменьшить размеры и концентрацию примесей до $(1 - 1,5) \cdot 10^{-4}$ % в кварцевых фотошаблонах, применяемых при производстве интегральных микросхем по субмикронным технологиям.

2. Результаты диссертационной работы позволяют уменьшить количество времени таких технологических операций при производстве кварцевых резонаторов, как шлифовка и резка пластин за счет двухлучевой лазерной резки кристаллов кварца различных срезов (X, Y – срезы, а также AT, BT – срезы) и размеров, применяемых при производстве кварцевых резонаторов.

3. Результаты внедрены в учебный процесс УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины» в качестве лекционного материала для студентов специальностей 1-31 04 03 «Физическая электроника» и 1-31 04 01-02 «Физика (производственная деятельность)» факультета физики и информационных технологий.

4. Результаты работы использовались на ОАО «Коралл» в процессе удаления примесей из кварцевого сырья при производстве кварцевых труб, штабиков и фотошаблонов с 2008 по 2021 г. Стоимость продукции, выпущенной с помощью технологии двухлучевой лазерной обработки кварца за указанный период, составила 1 508 тыс. дол. США.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Монографии

1–А. Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / А. П. Достанко С. М. Аваков, Д. А. Голосов, В. В. Емельянов, С. М. Завадский, В. В. Колос, В. Л. Ланин, С. И. Мадвейко, С. Н. Мельников, Ю. В. Никитюк, А. Н. Петлицкий, И. Б. Петухов, В. А. Пилипенко, В. И. Плебанович, В. А. Солодуха, С. И. Соколов, Е. В. Телеш, Е. Б. Шершнёв; под ред. А. П. Достанко. – Минск : Беларус. навука, 2019. – 260 с.

Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

2–А. Шершнёв, Е. Б. Моделирование, эксперимент и оборудование для лазерного термораскалывания кварцевого стекла / Е. Б. Шершнёв, В. В. Свиридова, С. И. Соколов // *Материалы. Технологии. Инструменты.* – 2008. – Т. 13, № 1. – С. 12–16.

3–А. Шершнёв, Е. Б. Математическое моделирование процессов лазерного управляемого термораскалывания листового стекла / Е. Б. Шершнёв, С. В. Шалупаев, С. И. Соколов // *Изв. ГГУ им. Ф. Скорины.* – 2009. – № 4. – Ч. 2. – С. 204–212.

4–А. Особенности управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кварца / А. Н. Сердюков, Е. Б. Шершнёв, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, В. Ф. Шолох // *Кристаллография.* – 2012. – Т. 57, № 6. – С. 879–885.

5–А. Распределение температурных полей при двухлучевой сварке кварцевого стекла / Е. Б. Шершнёв, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, А. Е. Шершнёв // *Изв. ГГУ им. Ф. Скорины.* – 2012. – № 6. – С. 105–109.

6–А. Шершнёв, Е. Б. Особенности лазерного термораскалывания кварцевого стекла / Е. Б. Шершнёв, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов // *Проблемы физики, математики и техники.* – 2013. – № 3. – С. 39–44.

7–А. Шершнёв, Е. Б. Моделирование двухлучевой лазерной сепарации кварцевого сырья / Е. Б. Шершнёв, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов // *Изв. ГГУ им. Ф. Скорины.* – 2013. – № 6. – С. 216–220.

8–А. Шершнёв, Е. Б. Особенности лазерного раскалывания кристаллического кварца АТ- и ВТ-срезов / Е. Б. Шершнёв, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов // *Известия ГГУ им. Ф. Скорины.* – 2014. – № 6. – С. 220–224.

9–А. Исследование процесса лазерной полировки кварцевого стекла / Е. Б. Шершнёв, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, А. Е. Шершнёв // *Проблемы физики, математики и техники.* – 2015. – № 4. – С. 45–49.

10–А. Емельянов, В. А. Двухлучевая лазерная очистка кварцевого сырья / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнёв, С. И. Соколов // Докл. БГУИР. – 2021. – Т.19, № 3. – С. 40–48.

11–А. Моделирование температурного поля и расчет механических напряжений при двухлучевом лазерном управляемом термораскалывании кварцевого стекла / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнёв, С. И. Соколов, А. Н. Купо // Докл. БГУИР. – 2021. – Т.19, № 7. – С. 80–88.

12–А. Оптимизация лазерной полировки кварцевого стекла с использованием метода планирования вычислительных экспериментов / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнёв, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, И. Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 2 (51). – С. 26–30.

13–А. Определение параметров двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья с применением искусственных нейронных сетей и метода конечных элементов / Ю. В. Никитюк, Е. Б. Шершнёв, С. И. Соколов, И. Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 3 (52). – С. 37–41.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

14–А. Моделирование процесса лазерного термораскалывания кварцевого стекла в рамках линейной механики разрушения / А. Н. Сердюков, Е. Б. Шершнёв, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов // Лазерная физика и оптические технологии : материалы IX Междунар. науч. конф. (Гродно, 30 мая – 2 июня 2012 г.). В 2 ч. : НАН Беларуси; редкол.: С. А. Маскевич (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2012. – Ч. 2. – С. 191–194.

Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций

15–А. Шершнёв, Е. Б. Лазерное управляемое термораскалывание с использованием ультразвукового диспергирования хладагента / Е. Б. Шершнёв, С. И. Соколов // Юбилейная науч.-практ. конф. посвящ. 40-летию Гом. гос. ун-та им. Ф. Скорины, Гомель, 11 июня 2009 г. : материалы науч.-практ. конф. : в 4 ч. / ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол. : О. М. Демиденко (отв. ред.) [и др.]. – Гомель, 2009. – Ч. 4. – С. 90–92.

16–А. Шершнёв, Е. Б. Лазерное управляемое термораскалывание кристаллического кварца / Е. Б. Шершнёв, Ю. В. Никитюк, В. Ф. Шолох, С. И. Соколов // Гомельский научный семинар по теоретической физике, посвященный 100-летию со дня рождения Ф. И. Федорова, 20–22 июня 2011 г. : материалы науч. семинара / ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол.: А. В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2011. – С. 261–265.

17–А. Сердюков, А. Н. Конечный элементный анализ процесса лазерного термораскалывания кристаллического кварца / А. Н. Сердюков, Е. Б. Шершнёв, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, В. Ф. Шолох // Проблемы взаимодействия

излучения с веществом : материалы III Междунар. науч. конфер., посвящ. 85-летию со дня рождения Б. В. Бокутя, Гомель, 9–11 ноября 2011 г. : в 2 ч. / ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол.: А. В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2011. – Ч. 2. – С. 124–128.

18–А. Сердюков, А. Н. Моделирование процесса лазерного термораскалывания кварцевого стекла в рамках линейной механики разрушения / А. Н. Сердюков, Е. Б. Шершнёв, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов // Лазерная физика и оптические технологии : сбор. тез. IX междунар. науч. конф. (Гродно, 30 мая – 2 июня 2021 г.) : в 2 ч. / ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол.: С. А. Маскевич [и др.]. – Гродно, 2012. – Ч. 2. – С. 278.

19–А. Шершнёв, Е. Б. Повышение эффективности лазерного управляемого термораскалывания силикатных стекол / Е. Б. Шершнёв, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, А. Е. Шершнёв // Научный семинар по оптике и теоретической физике, посвященный 70-летию со дня рождения А. Н. Сердюкова : материалы науч. семинара, Гомель, 21 мая 2014 г. / ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол.: А. В. Рогачев [и др.]. – Гомель, 2014. – С. 251–253.

20–А. Шершнёв, Е. Б. Исследование лазерного макро- и микро-формообразования хрупких неметаллических материалов методом полного факторного эксперимента [Электронный ресурс] / Е. Б. Шершнёв, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, А. Е. Шершнёв // Проблемы взаимодействия излучения с веществом : материалы IV Респ. науч. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения Б. В. Бокутя, Гомель, 9–11 ноября 2016 г. : электрон. опт. диск в 2 ч. / ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол.: С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2016. – Ч. 2. – С. 193–196.

21–А. Емельянов, В.А. Численное моделирование лазерной полировки кварцевого стекла с использованием метода планирования вычислительных экспериментов / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнёв, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов // Научная конференция, посвященная 110-летию со дня рождения Ф. И. Федорова : материалы науч. конф., Гомель, 25 июня 2021 г. / ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол.: С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2021. – С. 317–320.

Патенты

22–А. Установка для лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов : полез. модель ВУ 4625 / Е. Б. Шершнёв, С. И. Соколов, А. С. Побияха. – Опубл. 30.08.2008.

23–А. Установка для обогащения жильного кварца : полез. модель ВУ 5147 / Е. Б. Шершнёв, С. И. Соколов, А. С. Побияха. – Опубл. 30.04.2009.

24–А. Установка для лазерного термораскалывания хрупкого неметаллического материала по замкнутому криволинейному контуру : полез. модель ВУ 6567 / Е. Б. Шершнёв, С. И. Соколов. – Оpubл. 30.10.2010.

25–А. Установка для разделения хрупкого неметаллического материала под действием термоупругих напряжений по криволинейной траектории : полез. модель ВУ 7086 / Е. Б. Шершнёв, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк. – Оpubл. 28.02.2011.

26–А. Способ лазерного управляемого термораскалывания хрупкого неметаллического материала : пат. ВУ 14622 / Е. Б. Шершнёв, С. И. Соколов. – Оpubл. 30.08.2011.

27–А. Установка для лазерной резки хрупкого неметаллического материала : полез. модель ВУ 7557 / Е. Б. Шершнёв, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк. – Оpubл. 30.08.2011.

28–А. Установка для лазерной резки хрупкого неметаллического материала : полез. модель ВУ 7590 / Е. Б. Шершнёв, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк. – Оpubл. 30.10.2011.

29–А. Способ разделения резкой кристаллического кварца под действием термоупругих напряжений : пат. ВУ 16478 / Е. Б. Шершнёв, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк, В. Ф. Шолох. – Оpubл. 30.10.2012.

30–А. Способ разделения резкой кристаллического кварца под действием термоупругих напряжений : пат. RU 2478083 / Е. Б. Шершнёв, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк, В. Ф. Шолох. – Оpubл. 27.03.2013.

31–А. Установка для обогащения жильного кварца : полез. модель ВУ 9675 / Е. Б. Шершнёв, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк. – Оpubл. 30.10.2013.

32–А. Установка для двухлучевой лазерной сварки кварцевого стекла: полез. модель ВУ 9962 / Е. Б. Шершнёв, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк. – Оpubл. 28.02.2014.

33–А. Способ обогащения кварцевой крупки : пат. ВУ 21228 / Е. Б. Шершнёв, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк. – Оpubл. 30.08.2017.

34–А. Установка для двухлучевой лазерной полировки изделий из хрупких неметаллических материалов : полез. модель ВУ 12062 / Е. Б. Шершнёв, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк. – Оpubл. 30.08.2018.



РЭЗІЮМЭ

Сакалоў Сяргей Іванавіч

Двухпрамянёвая лазерная апрацоўка кварцу для рэзанатараў і фоташаблонаў субмікронных інтэгральных мікрасхем

Ключавыя словы: лазернае выпраменьванне, тэрмарасколванне, мадэляванне, зварка, кварц, кварцавае шкло.

Мэта працы: распрацоўка ў рамках тэорыі тэрмапругкасці і цеплаправоднасці мадэлей працэсаў лазернай двухпрамянёвай апрацоўкі крышталічнага кварцу і кварцавага шкла, устанаўленне заканамернасцей лазернага расколвання кварцавага шкла і крышталічнага кварцу, які выкарыстоўваецца пры вырабе падложак фоташаблонаў і кварцавых рэзанатараў, стварэнне тэхналогіі двухпрамянёвай лазернай ачысткі кварцавай сыравіны для атрымання кварцавых фоташаблонаў з палепшанымі эксплуатацыйнымі характарыстыкамі.

Метады даследавання: метады канечных элементаў для рашэння задач тэрмапругкасці ў квазістатычнай пастаноўцы; прафілаграфічны метады даследавання шурпатасці паверхняў; метады поўнага фактарнага эксперыменту; для правядзення эксперыментальных даследаванняў працэсаў лазернага тэрмарасколвання крокхіх неметалічных матэрыялаў выкарыстаны лазерны тэхналагічны комплекс.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: вызначаны механізм выдалення прымесей з кварцавай сыравіны двухпрамянёвай апрацоўкай CO₂-лазерам і YAG-лазерам, які дазваляе знізіць колькасць прымесей з $(3 - 3,5) \cdot 10^{-4} \%$ да $(1 - 1,5) \cdot 10^{-4} \%$ і колькасць браку кварцавых фоташаблонаў на $(12 - 15) \%$; распрацавана мадэль лазернага кіраванага тэрмарасколвання кварцавага шкла для фоташаблонаў пры адначасовым уздзеянні на яго двух пучкоў лазернага выпраменьвання інфрачырвонага дыяпазону рознай геаметрыі: з максімальнай інтэнсіўнасцю ў цэнтры і з нулявой інтэнсіўнасцю ў цэнтры, якая дазволіла разлічыць тэрмапругія напружанні па глыбіні шкла, неабходныя для фарміравання мікратрэшчыны, што дало магчымасць павялічыць хуткасць тэрмарасколвання на $(20 - 30) \%$; устаноўлена заканамернасць тэрмарасколвання кварцавага шкла для фоташаблонаў, якая дазваляе выключыць растрэскванне кромкі кварцавага фоташаблону за кошт памяншэння астатковых напружанняў да значэнняў ніжэй трываласці на разрыў.

Вобласць ужывання вынікаў: тэхналогія вытворчасці вырабаў электроннай тэхнікі.

РЕЗЮМЕ

Соколов Сергей Иванович

Двухлучевая лазерная обработка кварца для резонаторов и фотошаблонов субмикронных интегральных микросхем

Ключевые слова: лазерное излучение, термораскалывание, моделирование, сварка, кварц, кварцевое стекло.

Цель работы: разработка в рамках теории термоупругости и теплопроводности моделей процессов лазерной двухлучевой обработки кристаллического кварца и кварцевого стекла, установление закономерностей лазерного раскалывания кварцевого стекла и кристаллического кварца, используемого при изготовлении подложек фотошаблонов и кварцевых резонаторов, создание технологии двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья для получения кварцевых фотошаблонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Методы исследования: метод конечных элементов для решения задач термоупругости в квазистатической постановке; профилографический метод исследования шероховатости поверхностей; метод полного факторного эксперимента; для проведения экспериментальных исследований процессов лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов использован лазерный технологический комплекс.

Полученные результаты и их новизна: определен механизм удаления примесей из кварцевого сырья двухлучевой обработкой CO_2 -лазером и YAG-лазером, который позволяет снизить содержание примесей с $(3 - 3,5) \cdot 10^{-4} \%$ до $(1 - 1,5) \cdot 10^{-4} \%$ и количество брака кварцевых фотошаблонов на $(12 - 15) \%$; разработана модель лазерного управляемого термораскалывания кварцевого стекла для фотошаблонов при одновременном воздействии на него двух пучков лазерного излучения инфракрасного диапазона различной геометрии: с максимальной интенсивностью в центре и с нулевой интенсивностью в центре, которая позволила рассчитать термоупругие напряжения по глубине стекла, необходимые для формирования микротрещины, что дало возможность увеличить скорость термораскалывания на $(20 - 30) \%$; установлена закономерность термораскалывания кварцевого стекла для фотошаблонов, которая позволяет исключить растрескивание кромки кварцевого фотошаблона за счет уменьшения остаточных напряжений до значений ниже прочности на разрыв.

Рекомендации по использованию и область применения: технология производства изделий электронной техники.

SUMMARY

Sokolov Sergey Ivanovich

Two-beam laser treatment of quartz for resonators and photomask of submicron integrated circuits

Key words: laser radiation, thermal splitting, modeling, welding, quartz, quartz glass.

Purpose of work: development, within the framework of the theory of thermoelasticity and thermal conductivity, of models for the processes of laser double-beam processing of crystalline quartz and quartz glass, the establishment of patterns of laser cleavage of quartz glass and crystalline quartz used in the manufacture of photomask substrates and quartz resonators, the creation of a technology for double-beam laser cleaning of quartz raw materials to obtention of quartz photomasks with improved operational characteristics.

Research methods: finite element method for solving problems of thermoelasticity in a quasi-static formulation; profilographic method for studying surface roughness; full factorial experiment method; a laser technological complex was used to conduct experimental studies of the processes of laser thermal cracking of brittle non-metallic materials.

The results obtained and their novelty: the mechanism for removing impurities from quartz raw materials by two-beam treatment with a CO₂ laser and a YAG laser has been determined, which makes it possible to reduce the content of impurities from $(3 - 3.5) \cdot 10^{-4} \%$ to $(1 - 1.5) \cdot 10^{-4} \%$ and the amount of marriage of quartz photomasks by $(12 - 15)\%$; a model was developed for laser-controlled thermal cracking of quartz glass for photomasks under the simultaneous action of two beams of laser radiation of the infrared range of different geometry: with maximum intensity in the center and with zero intensity in the center, which made it possible to calculate the thermoelastic stresses along the glass depth, necessary for formation of a microcrack, which made it possible to increase the rate of thermal cracking by $(20 - 30) \%$; the regularity of thermal cracking of quartz glass for photomasks was established, which makes it possible to exclude cracking of the edge of a quartz photomask by reducing residual stresses to values below the tensile strength.

Recommendations for use and scope: production technology of electronic equipment.