

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Объект авторского права  
УДК 621.373.826

**ШЕРШНЕВ**  
**Евгений Борисович**

**ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ  
ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ИЗ АМОРФНЫХ  
И КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

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

Минск 2024

Научная работа выполнена в учреждении образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».

Научный консультант **Емельянов Виктор Андреевич**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, главный специалист по науке научно-технического управления ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Официальные оппоненты: **Толстопятов Евгений Максимович**, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник отдела «Физика и механика композиционных систем» ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси»

**Воропай Евгений Семенович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии Белорусского государственного университета

**Мухуров Николай Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией микро- и наносенсорики ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси

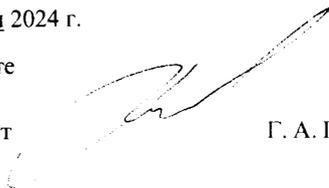
Оппонирующая организация ГНПО «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

Защита состоится «22» февраля 2024 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 розслан «22» января 2024 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций Д 02.15.03  
кандидат технических наук, доцент



Г. А. Пискун

## ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение конкурентоспособности микроэлектронных устройств и приборов, выпускаемых предприятиями Республики Беларусь, неразрывно связано с продвижением новых и оптимизацией традиционных способов и методов обработки изделий электронной техники. Это достигается за счет разработки принципиально новых, научно обоснованных технологий, и созданного на их основе исследовательского и промышленного оборудования.

В настоящее время одним из перспективных материалов электронной промышленности является кварц, как в кристаллической, так и в аморфной модификациях. Этот материал обладает низким коэффициентом температурного расширения  $0,54 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , а с другой стороны – высокой теплопроводностью  $1,38 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , что принципиально важно для производства резонаторов и фотошаблонов субмикронных интегральных микросхем. Аморфный кварц пропускает электромагнитное излучение в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной области спектра, изделия из этого материала нашли свое применение в качестве смотровых окон, защитных экранов, поверхностей для нанесения функциональных покрытий.

Кроме фотошаблонов из обогащенного сырья получают высококачественные трубы и штабики для кварцевой оснастки с низким газовыделением при термической обработке изделий электронной техники. В изготовлении активных элементов кварцевых резонаторов перспективным представляется разработка высокопроизводительного метода лазерного управляемого термораскалывания кристаллического кварца.

Формирование компонентов для устройств отображения информации на основе жидкокристаллических экранов и электронно-оптических систем с использованием лазерных технологий термораскалывания и нанесения прозрачных токопроводящих покрытий является актуальной задачей, и позволяет создать высокопроизводительное оборудование и высокоточные технологии.

Алмаз используется в качестве теплоотводящих оснований для изделий высокотемпературной электронной техники, преобразователей УФ-излучения, подложки для эпитаксиального наращивания полупроводниковых монокристаллических слоев для СВЧ-транзисторов, оптических окон для источников мощного излучения, звукопроводов акустоэлектронных устройств. Разработка и внедрение высокоэффективной технологии и оборудования для обработки алмазов лазерным излучением в производстве компонентов электронной техники требуют изучения закономерностей влияния излучения на изотропную и анизотропную модификации углерода (в частности, алмаз и графит) методами математического моделирования и

экспериментальными исследованиями. При этом в процессах лазерной обработки существует вероятность неуправляемого раскалывания кристаллов, поэтому установление связи между особенностями дефектно-примесного состава кристаллов алмаза и вероятностью их разрушения при лазерном воздействии является актуальной задачей. Кроме того, представляет интерес проведение исследований процессов лазерно-активированных термохимических реакций формирования компонентов электронной техники с прецизионной топологией поверхности алмаза за счет удаления твердой фазы углерода путем его перевода в газообразную.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг., утвержденным 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»)).

Часть результатов исследований, представленных в диссертации, использована при выполнении следующих научно-исследовательских работ:

1) «Разработать бесконтактную лазерную технологию обработки полуфабрикатов из материалов с высокой твердостью» ГНТП «Алмазы» на 1999–2000 гг. (№ госрегистрации 19993872);

2) «Разработать и создать технологический комплекс лазерной обработки материалов и освоить его производство» ГНТП «Лазерные системы» на 2002–2004 гг. (№ госрегистрации 2002508);

3) «Разработать и внедрить на РАУП «Гомельское ПО «Кристалл» технологию лазерной групповой обработки алмазов» ГНТП «Алмазы» на 2004–2005 гг. (№ госрегистрации 2004713);

4) «Разработать, изготовить и передать для эксплуатации на РАУП «Гомельское ПО «Кристалл» опытный образец установки для лазерной микромаркировки рундиста монокристаллов из сверхтвердого материала «Алмазот»» ГНТП «Алмазы» на 2005–2006 гг. (№ госрегистрации 20051345);

5) «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);

6) «Разработка процессов лазерной обработки кристаллического

кварца и кристаллов алмаза» ГПНИ «Высокоэнергетические технологии» на 2014–2015 гг. (№ госрегистрации 20140964);

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

8) «Исследование физико-химических поверхностных нанопроцессов при формообразовании синтетических алмазов в условиях квазистационарного лазерного воздействия» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 гг. (№ госрегистрации 20211627).

### **Цель, задачи, объект и предмет исследования**

Целью диссертационного исследования является комплексное решение проблемы формирования компонентов изделий электронной техники из аморфного и кристаллического кварца, многокомпонентного стекла, синтетических и природных алмазов для снижения трудоемкости процессов их изготовления на основе разработки и внедрения лазерных технологических процессов и оборудования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить процессы лазерного воздействия на аморфный и кристаллический кварц;
- изучить процессы и разработать способы лазерного воздействия на многокомпонентные стекла;
- разработать двухлучевые способы лазерного термораскалывания аморфного и кристаллического кварца, полировки и сварки аморфного кварца, а также обогащения кварцевого сырья;
- провести экспериментальные исследования процессов двухлучевой лазерной обработки аморфного и кристаллического кварца и обогащения кварцевого сырья;
- разработать нестационарную трехмерную нелинейную математическую модель лазерной обработки алмаза при учете температурных зависимостей теплофизических свойств материала и анизотропных свойств образующегося в процессе обработки графита;
- разработать нестационарную трехмерную нелинейную математическую модель тепломассопереноса в системе «водород – металл – алмаз», учитывающую температурные зависимости теплофизических свойств и коэффициентов диффузии при нагреве металла лазерным лучом;
- провести численные исследования лазерной резки и

термохимической обработки с лазерным ассистированием для установления технологических режимов данных процессов;

– провести экспериментальные исследования по воздействию лазерного излучения на синтетические и природные алмазы и установить технологические характеристики процесса;

– разработать и внедрить технологии и оборудование для лазерной обработки синтетических и природных алмазов.

*Объект исследования* – аморфный и кристаллический кварц, многокомпонентное стекло, синтетические и природные алмазы, используемые при изготовлении компонентов изделий электронной техники, таких как фотошаблоны, активные элементы кварцевых резонаторов, электронно-оптические системы, теплоотводы, однокристалльный и однолезвийный инструмент.

*Предмет исследования* – закономерности распределения температурных полей и полей термоупругих напряжений, а также физико-химических процессов в зоне лазерного воздействия на кристаллические и аморфные материалы.

### **Научная новизна**

1. Определены значения технологических параметров лазерной полировки аморфного кварца СО<sub>2</sub>-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 аморфный кварц, при этом внутренние напряжения составляют  $45 \cdot 10^6$  Па, что меньше прочности на разрыв для аморфного кварца, равной  $300 \cdot 10^6$  Па.

2. Установлено, что при расчете технологических режимов лазерной сварки, в случае учета зависимостей теплофизических свойств аморфного кварца (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.

3. Выполнено компьютерное моделирование процесса формирования лунок при обработке кристаллов алмазов под действием лазерного излучения с длиной волны 532 нм. Выявлено, что расчетная форма лунки, образующейся при обработке вдоль оси  $L_4$ , обладает четко выраженной

асимметричностью относительно линии воздействия лазерного пучка. Проведены эксперименты по обработке синтетических кристаллов алмаза «Алмазот» лазерным излучением с длиной волны 532 нм.

4. Выполнено компьютерное моделирование процесса лазерной обработки кристаллов алмазов под действием лазерного излучения с длинами волн 1064, 532 и 266 нм. Наибольших значений напряжения достигают при обработке алмаза лазерным излучением с длинами 532 и 266 нм и соответственно равны 129 и 126 МПа в случае напряжений растяжения, 140 и 145 МПа – в случае напряжений сжатия. Данные значения напряжений не достигают критических значений, соответствующих пределу прочности алмаза.

5. В трехмерной постановке численным методом решена задача теплопроводности двухслойной системы «графит – алмаз» с учетом анизотропной теплопроводности графита и температурной зависимости теплофизических параметров.

6. Из численного моделирования лазерного воздействия с учетом анизотропии, условий теплопроводности и ориентировки графита на поверхности алмаза относительно его кристаллографических плоскостей спрогнозировано различие в производительности лазерной размерной обработки в разных кристаллографических направлениях.

7. В трехмерной постановке решена задача тепломассопереноса трехслойной системы «водород – металл – алмаз» с учетом температурных зависимостей теплофизических свойств и коэффициентов диффузии.

8. Установлен существенно нестационарный характер распространения тепла и массы в системе «водород – металл – алмаз» при термохимической обработке с лазерным ассистированием.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Феноменологическая модель лазерного управляемого термораскалывания аморфного кварца для компонентов электронной техники в линейной постановке задачи термоупругости, описывающей двухлучевое воздействие движущимися лазерными пучками: эллиптической формы с нулевой интенсивностью в центре и пучком с гауссовым распределением интенсивности при условиях симметричного и асимметричного нагрева траектории луча лазерного излучения 10,6 мкм и 1,06 мкм соответственно, с учетом объемного поглощения и теплоотдачи с поверхности, что позволило рассчитать значения 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 в кварце составляют  $(0,79-0,94) \cdot 10^6$  Па·м<sup>1/2</sup>, что больше критического значения коэффициента, равного  $0,7 \cdot 10^6$  Па·м<sup>1/2</sup>, при котором инициируется микротрещина, а время экспозиции для нанесения стартового надреза не превышает 2,2–2,8 с.

2. Экспериментально установленные режимы лазерного управляемого термораскалывания кристаллического кварца непрерывным лазерным излучением с длиной волны 10,6 мкм, мощностью (25–40) Вт, скоростью относительного перемещения луча  $(5-17) \cdot 10^{-3}$  м/с, термоупругими напряжениями  $(3,0-4,0) \cdot 10^7$  Па, обеспечивающие увеличение скорости разделения материала в 5–7 раз и его экономию до (20–25) % за счет снижения отходов при значениях удельного энергозатрата, обусловленного анизотропией, в кристаллографических плоскостях: (100) –  $(0,60-0,85) \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>, (010) –  $(0,25-0,32) \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup> и (001) –  $(0,53-0,71) \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>.

3. Закономерность процесса лазерной резки кристаллов алмаза, заключающаяся в учете анизотропии тепловых свойств кристаллов за счет образования слоя графита, что вызывает рост термоупругих напряжений в кристалле: вдоль оси симметрии второго порядка на 18 %, вдоль осей симметрии третьего и четвертого порядка до 45 и 14 % соответственно, и установление различий в величинах максимальных напряжений, формируемых при обработке вдоль различных осей симметрии от 8 до 42 %, в результате чего предложено осуществлять дифференцированный нагрев, обеспечивающий формирование термоупругих напряжений ниже предела прочности в каждом направлении, что обеспечивается либо увеличением скорости резки, либо соответствующим уменьшением мощности лазерного излучения.

4. Нестационарная трехмерная нелинейная математическая модель лазерной резки кристаллов алмаза для компонентов высокотемпературной электроники излучением квазинепрерывного лазера с длиной волны излучения 1064 нм и частотой следования импульсов 3–7 кГц посредством сканирования и перефокусировки лазерного излучения и послойного удаления материала толщиной  $(4-6) \cdot 10^{-4}$  м с учетом температурных зависимостей теплофизических свойств материала, анизотропных свойств образующегося в процессе графита, на основании которой установлены оптимальные параметры процесса резки: плотность мощности лазерного излучения  $(5-7) \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>, скорость относительного перемещения материала  $(7-9) \cdot 10^{-3}$  м/с, шаг перефокусировки  $(4-6) \cdot 10^{-4}$  м, которые согласуются с экспериментальными данными с погрешностью (7–10) %.

5. Закономерность резки алмаза ультрафиолетовым, видимым и инфракрасным лазерным излучением с длиной волны 266, 532 и 1064 нм, которая заключается в том, что при энергии импульса  $(1,5-2,0) \cdot 10^{-2}$  Дж в

случае лазерного излучения с длиной волны 266 нм происходит удаление материала в зоне лазерного воздействия без наличия сколов за счет поглощения излучения в поверхностном слое, в отличие от объемного характера поглощения лазерного излучения с длиной волны 532 и 1064 нм, что вызывает изменение показателя преломления и дефокусировку излучения с образованием графитизированного слоя.

б. Нестационарная трехмерная нелинейная математическая модель тепломассопереноса в системе «водород – металл – алмаз», учитывающая температурные зависимости теплофизических свойств и коэффициентов диффузии при воздействии на поверхность металла лазерным излучением, что позволило управлять процессом термохимической обработки при создании непрерывного канала термодиффузии в процессе формирования топологии на компонентах высокотемпературной электроники за счет перехода кристаллического углерода в газовую фазу в зоне лазерной обработки при скорости удаления алмаза  $(1,2-1,8) \cdot 10^{-10}$  кг/(м<sup>2</sup>·с) с точностью  $(1,0-3,0) \cdot 10^{-5}$  м.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в построении математических моделей процессов лазерного воздействия на материалы, проведении экспериментальных исследований и обосновании выбора режимов обработки аморфного и кристаллического кварца, природных и синтетических алмазов. В совместных исследованиях соискатель принимал непосредственное участие в построении математических моделей, проведении экспериментов, разработке технологических схем лазерной обработки и написании научных работ.

Обсуждение и обобщение полученных результатов проводилось совместно с научным консультантом доктором техн. наук В. А. Емельяновым. В части построения моделей процесса лазерной обработки аморфного кварца, кристаллического кварца, алмаза оказывали помощь канд. физ.-мат. наук С. В. Шалупаев, канд. физ.-мат. наук Ю. В. Никитюк, канд. физ.-мат. наук В. В. Свиридова, канд. физ.-мат. наук П. В. Астахов, канд. техн. наук И. Ю. Аушев, канд. техн. наук Н. Н. Федосенко, канд. техн. наук А. С. Танасейчук, канд. техн. наук А. Н. Купо, доктор техн. наук А. А. Хмыль, канд. техн. наук С. И. Соколов, А. А. Середя, В. П. Морозов. Вклад доктора физ.-мат. наук А. Н. Сердюкова, канд. физ.-мат. наук В. Ф. Шолоха, А. С. Побияха, А. Е. Шершнёва связан с обсуждением промежуточных результатов, изготовлением установки для лазерной обработки. Часть работ проводилась в сотрудничестве с НП ООО «Прецизионные технологические системы» концерна «Планар», ГНУ «Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа» НАН

Беларуси, Институтом физики НАН Беларуси, Институтом механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси. Помощь в подготовке части образцов, проведении отдельных измерений и обработке результатов оказывали Н. М. Лапчук, А. Р. Филипп, Ю. А. Драенков, Г. Е. Ретюхин, А. Г. Кошечев, И. В. Файн, канд. физ.-мат. наук А. Н. Ходинский участвовали в разработке технологии и оборудования. 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 диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 15th International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (St. Peterburg, 1995); 2-я международная конференция «Передовые технологии в производстве материалов и восстановлении изношенных поверхностей» (Минск, 1997); IV Международная конференция по лазерной физике и спектроскопии «Лазерная физика и спектроскопия» (Гродно, 1999); Международная научно-техническая конференция (научные чтения, посвященные 105 годовщине со дня рождения Павла Осиповича Сухого) «Современные проблемы машиноведения» (Гомель, 2000); Международная научно-техническая конференция «Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применение» (Киев, 2001); International Conference «Problems of Interaction of Radiation with Matter» (Gomel, 2001); Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (Москва, 2004); V Международная научно-техническая конференция «Квантовая электроника» (Минск, 2004); XLIII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» (Витебск, 2004); Международная конференция «ВИИТ 2005» (Минск, 2005); 4-я международная научно-техническая конференция «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств» (Новополоцк, 2006); 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); VI Конгресс физиков Беларуси (Минск, 2017); Международная научная конференция, посвященная академику Б. В. Бокутю (Гомель, 2018); Конференция, посвященная 110-летию со дня рождения Ф. И. Федорова (Гомель, 2021); The 19th International Conference on Global Research and Education (Gomel, 2021); V Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и преподавателей «Прикладные вопросы точных наук» (Армавир, 2022).

Разработана и внедрена в серийное производство технология лазерной размерной резки заготовок для фотошаблонов из аморфного кварца. Разработаны и внедрены в серийное производство электронно-лучевых трубок (ЭЛТ) лазерная установка для резки колец для плоской ножки электронно-оптической системы (ЭОС) В2.М3.104.012; лазерная установка для разгерметизации В2.М3.104.013; лазерный технологический модуль для резки и оплавления штенгелей ЭОС В2.М3.104.014.

В производстве компонентов электронной техники из природных и синтетических алмазов разработаны и внедрены: установка для размерной обработки по заданному контуру алмазов ЭМ-260 БРАС. 442169.004; установка ЭМ-280 для лазерного распиливания (резки) алмазного сырья и сверхтвердых материалов (СТМ) БРАС. 442169.011; комплект документов на типовой технологический процесс раскалывания 00226773.02232.20634 (раскалывание заготовок наконечников для игл из СТМ с применением лазерного модуля); технологический процесс КРЮП.02 278.20008 нанесения риски-засечки с использованием лазера с диодной накачкой на установке лазерной обработки алмаза ЭМ-260 и технологическая инструкция КРЮП 25278.200061; комплект документов на типовую технологическую операцию распиливания 00226773.02231.20636 (распиливание кристаллов алмаза с применением установки лазерной обработки алмаза и СТМ ЭМ-260).

Технологии и оборудование внедрены на ОАО «Коралл» и на ОАО Гомельское ПО «Кристалл» – управляющая компания холдинга «КРИСТАЛЛ-ХОЛДИНГ».

### **Опубликованность результатов диссертации**

По результатам выполненных исследований опубликованы 76 научных печатных работ общим объемом 22,6 авторского листа, из них 2 монографии в соавторстве объемом 2,5 авторского листа, 38 статей объемом 15,5 авторского листа, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, 8 статей в других рецензируемых журналах объемом 3,5 авторского листа, 6 статей в материалах международных конференций объемом 1,3 авторского листа, 22

тезиса докладов на международных научно-технических конференциях объемом 1,8 авторского листа. Получены 3 патента Российской Федерации объемом 1 авторский лист, 25 патентов Республики Беларусь объемом 7,2 авторского листа.

### **Структура и объем диссертации**

Работа состоит из введения, общей характеристики, 5 глав, заключения, списка использованных источников, 10 приложений. Список использованных источников включает библиографический список из 320 наименований и список публикаций соискателя ученой степени из 104 наименований. Общий объем составляет 290 страниц, в том числе 158 рисунков на 48 страницах, 31 таблица на 11 страницах, 10 приложений на 11 страницах.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**Первая глава** посвящена анализу существующих методов размерной лазерной обработки аморфных и кристаллических материалов, в частности кварца, природного и искусственного алмаза. Показано, что существующие способы лазерной и газолазерной резки, лазерного скрайбирования существенно уступают по производительности и качеству методу лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ). Проведен анализ существующих математических моделей процессов лазерного теплового и термохимического воздействия на материалы электронной техники.

Приведены результаты анализа уровня разработок, имеющих цель повышения качества обработки поверхности материалов высокотемпературной электроники с повышенными эксплуатационными характеристиками. Рассмотрены технологические особенности лазерной и термохимической обработки синтетических и природных алмазов. Анализ существующего уровня техники и технологий выявил перспективные направления использования лазерных методов в процессах производства компонентов электронной техники.

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

Для осуществления процессов лазерной обработки кварца использованы две экспериментальные установки. В каждую установку входит координатный стол, CO<sub>2</sub>-лазер ИЛГН-802 (НПП «Исток», Россия) и ND:YAG-лазер ЛТИ-502 (ООО «Фтоил», Россия). Установки управляются системами ЧПУ SINUMERIK 802S (Siemens, Германия) и платой Arduino (Италия). Эти системы представляют собой микропроцессорную систему числового программного управления с приводами на шаговых двигателях. Лазерная обработка синтетических и природных алмазов производилась на установке, где

использовались лазеры ГОИ 16 (ЛТИ 502-1 (ООО «Фтоил», Россия), RL 10Q, RL 30Q, LS-2134Y (ООО «Спекс-тиайай рус», Россия).

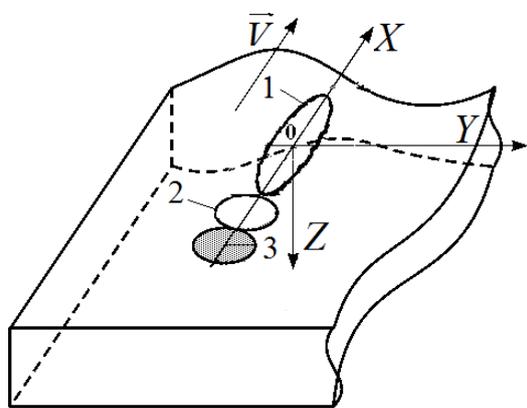
Для оценки эффектов взаимодействия лазерного излучения с материалами электронной техники производились измерения с использованием микроскопов типа МБС-2 («ЛОМО», СССР), ММУ-3 («ЛОМО», СССР). Оценка остаточных напряжений в материалах производилась с помощью серийного полярископа-поляриметра ПКС-125 («ЗОМЗ», СССР) по компенсационному методу Сенармона. Для определения параметров шероховатости  $R_a$  и  $R_z$  использовался измеритель шероховатости SURTRONIC 25 («Taylor Hobson», Великобритания), а оценка однородности микрорельефа проводилась на профилографе-профилометре блочной конструкции, модель 201 (ОАО «Калибр», Россия). Для определения распределения температурных полей в зоне лазерной обработки использовался тепловизор ИТ-3СМ (НПК «Аурис», Россия). Для оценки твердости материалов использовался микротвердомер ПМТ-3 («ЛОМО», СССР). Структуру поверхностей, обработанных лазерным излучением образцов СТМ «Алмазот», исследовали на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LSH («Tescan», Чехия).

Образцы исследовались методами катодolumинесценции и ЭПР спектроскопии. Для исследования морфологии и физических свойств поверхности образцов, полученных в результате экспериментов, применены бесконтактный и контактный методы атомно-силовой микроскопии (АСМ) на комплексе «НАНОТОП-203» (Беларусь).

**Третья глава** работы содержит теоретические основы, экспериментальные данные о процессах и оборудовании для лазерных технологий обогащения кварцевого сырья, ЛУТ аморфного и кристаллического кварца, полировке и сварке аморфного кварца применяемых для изготовления технологической оснастки и компонентов электронной техники.

Обогащенное традиционными методами кварцевое сырье содержит в своем составе примесные внутризеренные включения и атомы замещения в кристаллической решетке. Селективность спектра поглощения лазерного излучения кристаллическим кварцем позволила создать эффективную технологию и оборудование для обогащения кварцевого сырья. За счет комбинированного воздействия двух источников, один из которых воздействует на кристаллический кварц, а другой поглощается частицами с примесью, в результате чего образуется агломерат с соседними частицами, который удаляется сепарацией через сито.

Для установления режимов обогащения кварцевого сырья в системе математического конечно-элементного анализа (МКЭ) ANSYS построена модель нагрева частицы, содержащей примесь. Проведен анализ температурных полей, полученных МКЭ и аналитическим решением задачи теплопроводности. Установлено, что отличие в распределении температуры, полученное при использовании обеих методик решения, до глубины  $50 \cdot 10^{-6}$  м составляет не более 7 %, а длительность прогрева частиц кварца зависит от плотности мощности лазерного излучения. Модель лазерного обогащения кварцевого сырья позволяет рассчитать распределение температурных полей в системе «кварцевая частица – примесь» и создать высокоэффективный метод обогащения кварцевого сырья с применением полихроматического источника излучения. Для создания предварительного нагрева до температуры не более 1800 К частиц сырья фракционного состава от  $(0,1-0,4) \cdot 10^{-4}$  м используется источник с длиной волны не менее 400 нм при одновременном воздействии квазинепрерывного лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм для дополнительного нагрева выше температуры плавления частиц сырья с неизвлекаемыми традиционными методами примесей. Энерговклад составляет  $(1,4-5,2) \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>, что приводит к образованию агломератов, которые отсеиваются механической сепарацией. Степень очистки сырья для производства компонентов электронной техники из аморфного кварца возрастает в 2,5–3 раза. Изготовленный из



1 – эллиптический кольцевой лазерный пучок; 2 – гауссов лазерный пучок; 3 – хладагент  
**Рисунок 1 – Схема двухлучевого термораскалывания**

обогащенного сырья аморфный кварц используют в производстве высококачественных заготовок для фотосаблонов и кварцевой оснастки.

Разработан метод двухлучевого ЛУТ аморфного кварца, заключающийся в нагреве поверхности движущимися лазерными пучками с длинами волн 10,6 мкм и 1,06 мкм соответственно, с образованием разделяющей микротрещины при охлаждении вслед за пучками зоны нагрева (рисунок 1). Вследствие высокой термостойкости (1273 К) аморфного кварца ЛУТ неосуществимо без направленного надреза в предварительно

созданной зоне остаточных напряжений на линии термораскалывания.

Разработана математическая модель ЛУТ аморфного кварца при двулучевом воздействии на материал пучков лазерного излучения различной геометрии. Она позволяет рассчитать температурные поля, формируемые в

обрабатываемом материале. Формула (1) позволяет рассчитать температурное поле для эллиптического пучка с нулевой интенсивностью в центре, а формула (2) – для гауссова осесимметричного пучка с максимальной интенсивностью в центре:

$$T(r, t) = \frac{P_0 \gamma a AB}{2\lambda} \int_0^t \frac{d\tau \exp \left\{ - \frac{(S - V(t - \tau))^2 \cos^2 \alpha}{4a\tau + A^2} - \frac{(S - V(t - \tau))^2 \sin^2 \alpha}{4a\tau + B^2} \right\} f(z, \tau)}{\sqrt{(4a\tau + A^2)(4a\tau + B^2)}}, \quad (1)$$

$$T(r, t) = \frac{2P_0 a^2 \gamma}{\lambda \pi} \int_0^t \frac{d\tau \cdot \tau}{\sqrt{(4a\tau + A^2)(4a\tau + B^2)}} \exp \left\{ - \frac{(S - V(t - \tau))^2 \cos^2 \alpha}{(4a\tau + A^2)} + \frac{(S - V(t - \tau))^2 \sin^2 \alpha}{4a\tau + B^2} \right\} \times \\ \times \left[ \frac{1}{4a\tau + B^2} \left( - \frac{B^2 (S - V(t - \tau))^2 \sin^2 \alpha}{\alpha a \tau (4a\tau + B^2)} + 1 \right) + \frac{1}{4a\tau + A^2} \left( \frac{(S - V(t - \tau))^2 \cos^2 \alpha}{(4a\tau + A^2) 2a\tau} \right) + 1 \right] f(z, \tau), \quad (2)$$

$$f(z, \tau) = \exp(\gamma^2 a \tau - \gamma z) \operatorname{erfc} \left( \gamma \sqrt{a\tau} - \frac{z}{2\sqrt{a\tau}} \right) + \frac{\gamma + h}{\gamma - h} \exp(\gamma^2 a \tau + \gamma z) \operatorname{erfc} \left( \gamma \sqrt{a\tau} + \frac{z}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \\ - \frac{2h}{\gamma - h} \exp(hz + h^2 a \tau) \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{a\tau}} + h \sqrt{a\tau} \right), \quad (3)$$

где  $\gamma$  – коэффициент поглощения среды;

$P_0$  – плотность мощности в центре пучка;

$V$  – скорость перемещения лазерного пучка;

$S$  – направление главной оси эллипса, повернутой относительно оси  $OX$  на угол  $\alpha$ ;

$A$  и  $B$  – полуоси эллиптического гауссова пучка;

$h = \beta/\lambda$ ;

$\beta$  – коэффициент теплоотдачи;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности;

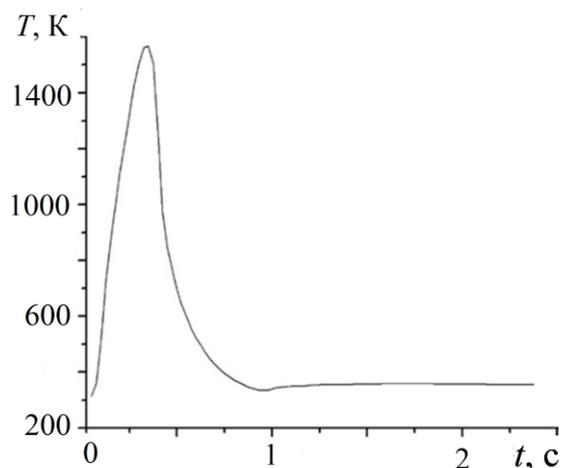
$a$  – коэффициент температуропроводности.

Обозначение  $f(z, \tau)$  (3) служит для сокращения записи формул (1) и (2). На основании сведений о распределении температуры с учетом обоих видов воздействия решена задача термоупругости.

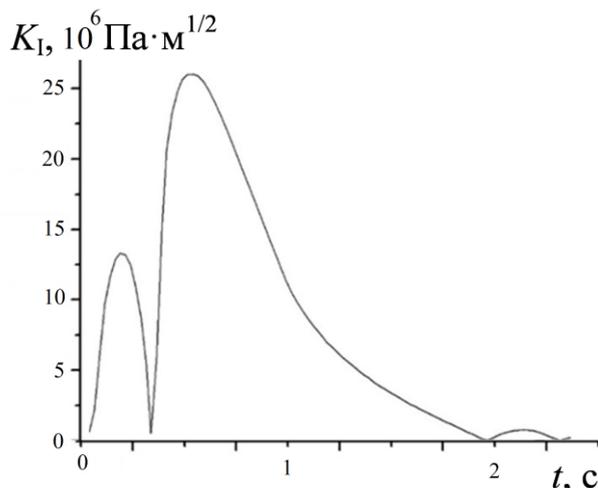
Данный метод позволяет эффективно управлять температурным полем в процессе ЛУТ. Из эксперимента следует, что для осуществления процесса термораскалывания формируются термоупругие напряжения от  $0,35 \cdot 10^9$  Па, при этом скорость процесса увеличивается до 30 %.

Исследование процесса ЛУТ кварца показывает, что при увеличении удельного энерговклада лазерного излучения в интервале  $(0,8-2) \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup> и уровне прочности, составляющем  $3 \cdot 10^8$  Па, в аморфном кварце развивается микротрещина глубиной  $(0,1-0,3) \cdot 10^{-3}$  м.

Разработан метод ЛУТ кристаллического кварца, позволяющий увеличить скорость разделения материала по сравнению с механической резкой на порядок. При ЛУТ в вершине трещины формируются значительные по величине коэффициенты интенсивности напряжений. Максимальная температура в вершине трещины достигает 1600 К (рисунок 2), а максимальные значения растягивающих напряжений в вершине трещины –  $5 \cdot 10^8$  Па, что характеризуется соответствующим коэффициентом интенсивности напряжений  $K_I$  (рисунок 3).



**Рисунок 2 – Зависимость температуры в вершине трещины от времени**



**Рисунок 3 – Зависимость коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины от времени**

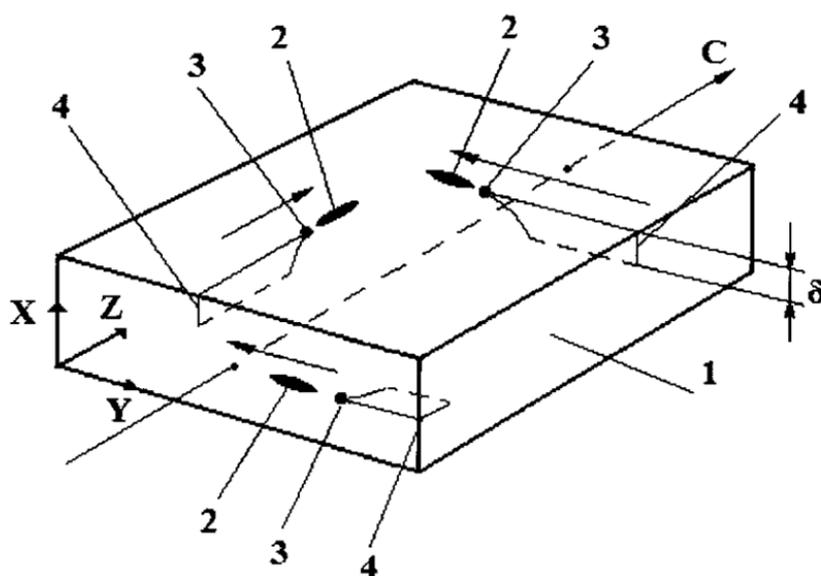
Далее, при переходе напряжений из сжимающих в растягивающие значение коэффициента уменьшается, а затем резко увеличивается. При этом второй максимум значений коэффициентов интенсивности напряжений соответствует уже растягивающим напряжениям в вершине трещины, что означает выполнение обоих необходимых условий для начала развития трещины.

В случае термораскалывания аморфного кварца при длине стартового дефекта  $L = 0,75 \cdot 10^{-3}$  м максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений составляют  $K_I = 0,79 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}^{1/2}$ , при  $L = 1 \cdot 10^{-3}$  м максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений составляют  $K_I = 0,86 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}^{1/2}$ , а при  $L = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений составляют  $K_I = 0,94 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}^{1/2}$ .

Выполнено моделирование МКЭ процесса управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кварца. Исследовался метод ЛУТ с применением одного лазерного источника и двух с учетом спектральных характеристик кристаллического кварца. На основании выполненных

расчетов показано существенное влияние анизотропии свойств материала при выборе параметров обработки. Дифференцированный нагрев, обеспечивающий формирование необходимых для создания лазерно-индуцированной трещины термоупругих напряжений в каждом направлении ориентации обеспечивается за счет увеличения скорости резки вдоль оси симметрии третьего порядка в 1,6–1,8 раза по сравнению с вариантом резки перпендикулярно оси симметрии третьего порядка либо соответствующим изменением мощности лазерного излучения.

В соответствии с полученными экспериментальными данными при одинаковых параметрах обработки ЛУТ устойчиво протекает вдоль оси симметрии третьего порядка в кристаллическом кварце (рисунок 4).



1 – обрабатываемый материал; 2 – лазерное излучение; 3 – вершина трещины;  
4 – линия реза; С – ось симметрии третьего порядка;  $\delta$  – глубина трещины

Рисунок 4 – Схема ЛУТ кристаллического кварца в различных кристаллографических направлениях

При этом линия реза лежит в плоскости, параллельной оси симметрии третьего порядка, что соответствует напряжениям растяжения  $\sigma_{zz} = 86,8 \cdot 10^6$  Па (вариант 1). 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 (вариант 2). 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 (вариант 3). То есть при скорости

обработки  $6 \cdot 10^{-3}$  м/с ЛУТ осуществимо по всем направлениям, при скорости  $15 \cdot 10^{-3}$  м/с термораскалывание наблюдается только в варианте 1, так как в вариантах 2 и 3 возникающих растягивающих напряжений  $\sigma_{zz}$  недостаточно для возникновения трещины. Анализ данных показывает, что анизотропия свойств кристаллов кварца в случае обработки АТ- и ВТ-срезов не оказывает существенного влияния на максимальные значения температуры в зоне обработки. Значительно более важными факторами являются такие параметры, как скорость обработки и геометрические размеры обрабатываемой пластины. Так, различия, обусловленные анизотропией теплофизических свойств, приводят к разнице в максимальных значениях температуры, не превышающей 3 %, а различия, обусловленные скоростью обработки и геометрией образца для выбранных параметров, достигают 45 %. Различия, обусловленные этими факторами, приводят к разнице в максимальных значениях растягивающих напряжений порядка (50–80) %. При этом и анизотропия свойств кристаллов кварца оказывает существенное влияние на максимальные значения термоупругих напряжений в зоне обработки. Данная разница в величинах растягивающих напряжений учитывается в программном обеспечении технологических режимов ЛУТ.

Экспериментально установлены оптимальные параметры лазерной полировки аморфного кварца, 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  $P = 2,2 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>.

Лазерная сварка применяется для производства ряда электронных приборов из аморфного кварца, таких как кварцевые гироскопы, фотоэлектронные умножители и др. Построены математические модели и исследованы процессы двухлучевой суперпозиционной, последовательной и параллельной лазерной сварки изделий из аморфного кварца. Установлено, что учет зависимости теплофизических свойств аморфного кварца от температуры (плотность, теплопроводность, теплоемкость, коэффициент линейного термического расширения) принципиально важен для расчета технологических режимов лазерной сварки.

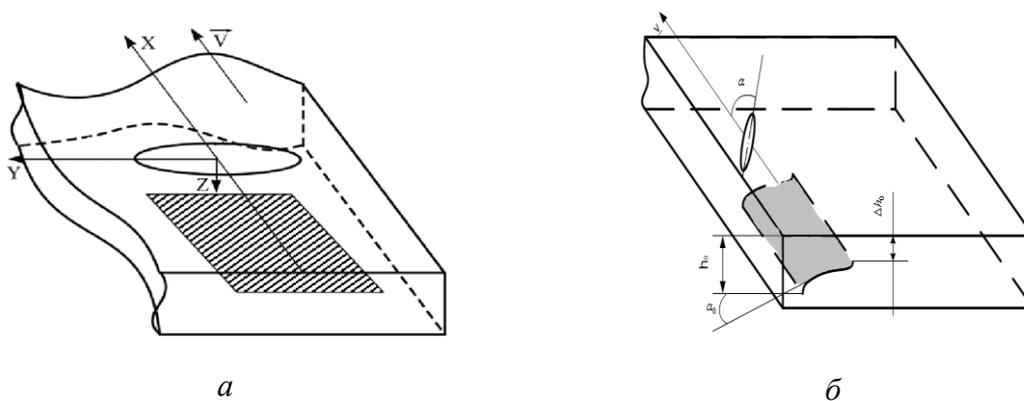
Двухлучевая суперпозиционная сварка позволяет увеличить глубину проплавления до 25 % по сравнению с традиционной однолучевой сваркой. Последовательная двухлучевая лазерная сварка позволяет замедлить спад температуры при остывании, однако аморфный кварц обладает высокой вязкостью даже при высоких температурах, поэтому жидкая фаза расплава шва, испытывающая гидродинамическую неустойчивость, характерная для металлов, для аморфного кварца не образуется, и при последовательной двухлучевой сварке уменьшается глубина проплавления, поэтому

использование последовательной двухлучевой лазерной сварки нецелесообразно в случае обработки аморфного кварца. Параллельная двухлучевая сварка позволяет избежать перегрева тонких материалов при лазерной сварке материалов различной толщины.

**Четвертая глава** содержит теоретические и экспериментальные результаты исследований процессов и описание оборудования для лазерных технологий в производстве ЖК-экранов и вакуумных ЭЛТ.

Построена модель по определению температурных полей и термоупругих напряжений, возбуждаемых движущимися лазерными пучками: первый с длиной волны 10,6 мкм с нулевой интенсивностью в центре, второй луч с длиной волны 1,06 мкм с гауссовым распределением интенсивности по сечению пучка. С помощью численного анализа рассчитаны температурные поля и пространственно-временное распределение термоупругих микромеханических напряжений для различных режимов ЛУТ. Полученные решения отличаются от известных учетом влияния объемного поглощения и поверхностной теплоотдачи при одновременном воздействии лазерных пучков из ближней и дальней инфракрасных областей оптического диапазона.

Разработан способ осуществления ЛУТ стекла в параллельной поверхности плоскости, от наклонной поверхностной микротрещины, полученной асимметричным лазерным воздействием (рисунок 5).



***a*** – схема образования трещины, параллельной поверхности;

***б*** – схема асимметричного нагрева с образованием наклонной трещины в объеме стекла

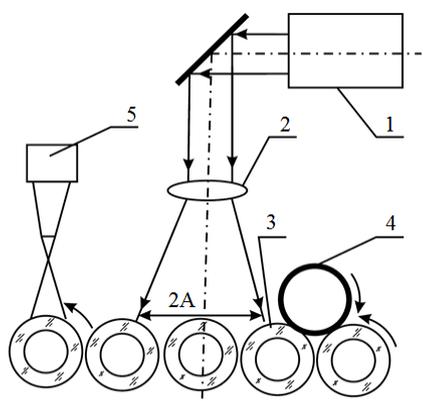
**Рисунок 5 – Схема ЛУТ стекла**

Анализ выражений для температурных полей и напряжений показывает, что определяющий вклад в развитие трещины, параллельной поверхности, вносят напряжения, ориентированные перпендикулярно поверхности образца. Эти напряжения, будучи на поверхности равными

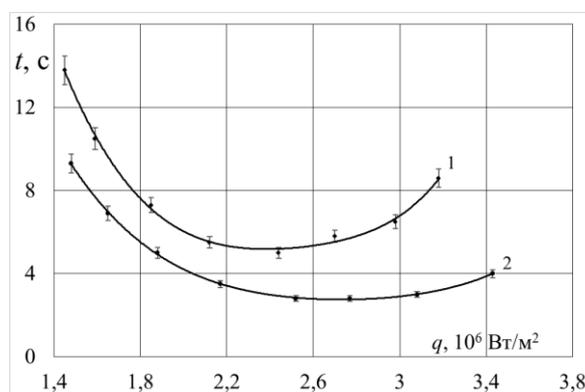
нулю, в глубине материала достигают предела технической прочности стекла и приводят к расслаиванию образца в силу создания условий, определяемых совокупностью технологических параметров процесса.

Глубина, на которой расслаивающие напряжения достигают максимальных значений, определяется режимом термообработки и изменяется в пределах  $(0,1-2) \cdot 10^{-3}$  м. Это позволяет создать экранные пластины с высокой неплоскостностью поверхности для последующего нанесения лазерным методом функциональных покрытий жидкокристаллических панелей. Показано, что при определенных условиях ЛУТ параллельно поверхности и ЛУТ стекла на заданную глубину можно объединить в едином цикле обработки (комбинированные ЛУТ), что имеет большое значение для получения кромок стеклоизделий с профилем повышенной механической прочности.

В производстве ЭЛТ ряд комплектующих изготавливается из вакуумного стекла С52-1 трубчатой формы. Метод ЛУТ трубок имеет перед традиционными газопламенными способами ряд неоспоримых преимуществ. Разработанная схема ЛУТ включает нагрев вращающейся трубки лазерным пучком эллиптического сечения с последующим нанесением надреза, который перерастает в кольцевую разделяющую трещину (рисунок 6). Построена математическая модель процесса.



1 – лазер; 2 – линза; 3 – трубка;  
4 – привод; 5 – устройство надреза  
Рисунок 6 – Схема термообработки лазерной трубкой  
стеклянных трубок эллиптическим пучком



1 – 100 Вт; 2 – 40 Вт  
Рисунок 7 – Зависимость времени термообработки  
стеклянных трубок диаметром  $2 \cdot 10^{-2}$  м от плотности  
мощности лазерного пучка

Термораскалывание происходит в тот момент времени, когда температура противоположной стенки будет отличаться от температуры поверхности на величину, равную термостойкости стекла. Градиент температуры должен быть нелинейным, и необходимо обеспечить прогрев

трубки на всю толщину до перепада по температуре, соответствующего термостойкости стекла, и температура нагрева не должна превышать температуру стеклования.

В результате возникает усилие, стремящееся разорвать трубку вдоль ее оси. Техническая прочность стекла обратно пропорциональна корню квадратному из глубины микротрещины, поэтому нанесение искусственного надреза на трубке будет инициировать, и ускорять процесс ЛУТ.

Такой прием придает закономерный характер статистической величине термостойкости стекла и использован при разработке технологии и установки для термораскалывания стеклянных трубок на кольца для плоской ножки электронно-оптической системы. Эксперимент показывает, что термораскалывание по схеме «нагрев – надрез» эффективно до определенного минимального диаметра трубок, ниже которого приходится принимать специальные меры для повышения надежности процесса.

На рисунке 7 приведена зависимость времени термораскалывания от плотности мощности лазерного пучка при постоянной скорости вращения трубок. Она получена на основании экспериментальных данных по термораскалыванию трубок из стекла С93-1 с толщиной стенки  $(1,7-2,0) \cdot 10^{-3}$  м.

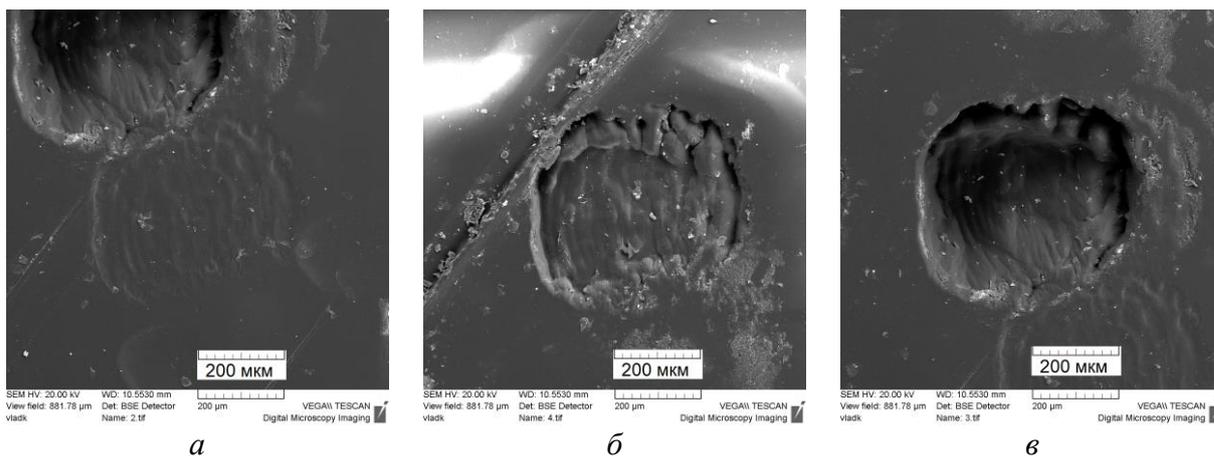
Кривая 1 соответствует термораскалыванию по схеме «нагрев – надрез». Кривая 2 – по схеме «надрез – нагрев – охлаждение». Применение локального охлаждения с помощью воздушно-водяной смеси позволяет снизить время термораскалывания на (4–6) с. Причем эта схема дает возможность управляемого развития несквозной трещины, особенности формирования которой соответствуют выявленным ранее закономерностям лазерного управляемого термораскалывания листового стекла на заданную глубину. Помимо плотности мощности существенное влияние оказывает частота вращения трубок. Установлено, что с увеличением частоты вращения происходит сначала медленное, а затем резкое возрастание времени, необходимого для термораскалывания. Оптимальный диапазон частоты вращения для диаметра  $9 \cdot 10^{-3}$  м при плотности мощности лазерного излучения  $2,6 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> составляет (0,6–2,0) об/с.

Термораскалывание трубок для плоской ножки и штенгеля ЭОС целесообразно производить по разным схемам, и необходимо согласовать производительность обоих технологических процессов. Экспериментальная проверка показывает, что время термораскалывания трубок диаметром  $2 \cdot 10^{-2}$  м с применением схемы «нагрев – надрез» (кривая 1, рисунок 7) при использовании лазера ИЛГН-709 с мощностью 100 Вт соответствует производительности процесса с применением схемы «надрез – нагрев – охлаждение» при использовании лазеров ЛГН-703 с мощностью более 40 Вт

(кривая 2, рисунок 7).

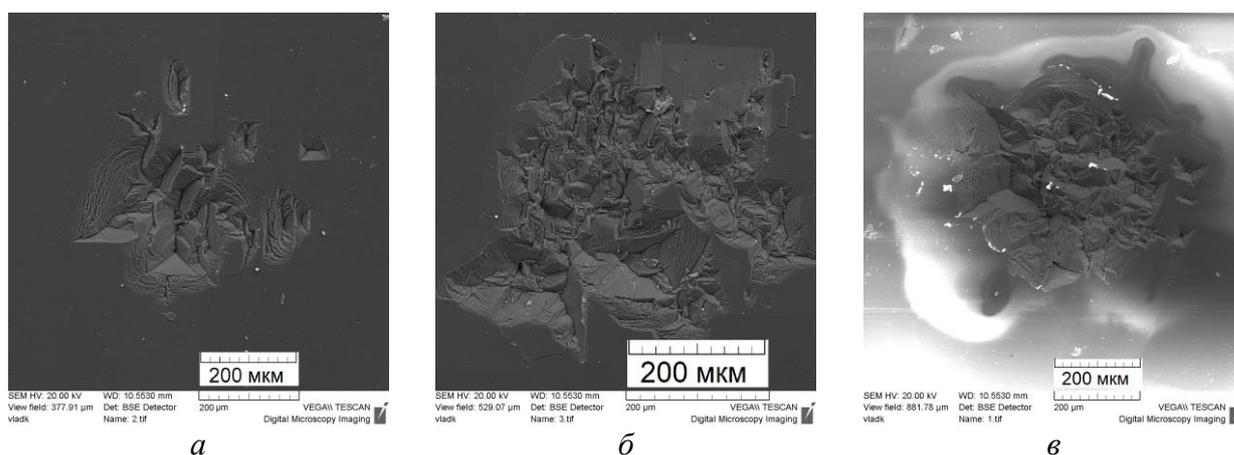
В пятой главе выполнено численное моделирование процесса обработки кристаллов алмаза при воздействии лазерного излучения с длиной волны 266, 532 и 1064 нм.

Проведена экспериментальная проверка результатов при различных режимах обработки. Структура поверхностей, обработанных лазерным излучением образцов СТМ «Алмазот», исследована на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) VEGA II LSH (рисунки 8 и 9).



*a* – два импульса; *б* – три импульса; *в* – пять импульсов

**Рисунок 8 – Структура поверхности, образованной в СТМ «Алмазот» при воздействии лазерного излучения с длиной волны 532 нм с энергией в импульсе  $15 \cdot 10^{-3}$  Дж, при различном количестве импульсов**



*a* –  $12,5 \cdot 10^{-3}$  Дж; *б* –  $17,5 \cdot 10^{-3}$  Дж; *в* –  $20 \cdot 10^{-3}$  Дж

**Рисунок 9 – Структура поверхности, образованной в СТМ «Алмазот» при воздействии одного импульса лазерного излучения с длиной волны 532 нм, при различной энергии импульса**

Режимы обработки: время (10–120) с, частота следования импульсов (1–15) Гц, энергия в импульсе  $(10–20) \cdot 10^{-3}$  Дж, длительность импульса до

$15 \cdot 10^{-9}$  с. Анализ результатов СЭМ показывает, что с увеличением количества импульсов лазерного излучения (ЛИ) площадь зоны воздействия остается прежней, но по мере увеличения поглощенной энергии наблюдается изменение разрушения поверхностного слоя материала. В этом процессе играют существенную роль спектральные характеристики алмаза, а именно зависимость его коэффициента поглощения от длины волны лазерного излучения. В ближней ИК-области (1064 нм) исследуемый материал прозрачен, поэтому наблюдается поглощение ЛИ за счет оптического разрушения материала с образованием слоя кристаллического графита, это подтверждается АСМ-исследованиями. При воздействии ЛИ, соответствующей видимой области (532 нм), образуется аморфный графит. При использовании УФ (266 нм) ЛИ наблюдается частичная абляция материала и формируется зона фазовых превращений с минимальными разрушениями.

Анизотропия теплофизических свойств алмаза позволяет производить его резку в различных кристаллографических направлениях с различной эффективностью. Результаты, полученные после проведенных численных исследований, представлены в таблице 1.

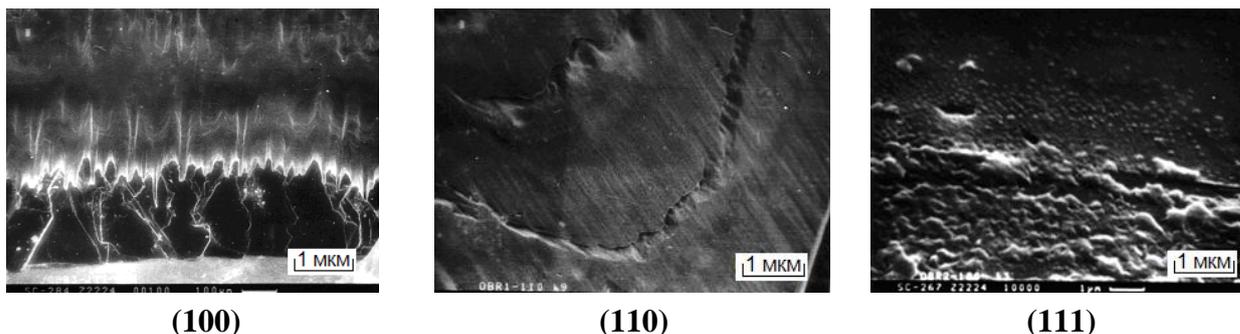
Таблица 1 – Зависимость глубины реза ( $10^{-6}$  м) от скорости ( $V$ ) в различных кристаллографических плоскостях (КГП)

$V, 10^{-3}$ м/с	КГП		
	(111)	(110)	(100)
4	42	37	39
6	35	27	32
8	31	21	29

На рисунке 10 приведены АСМ-исследования по плоскостям реза кристалла алмаза (100), (111) и (100). Отчетливо видна структура поверхности, состоящая из выступов-гранул со средними латеральными размерами  $(1-1,5) \cdot 10^{-6}$  м.

По результатам АСМ-исследований можно сделать вывод, что на плоскости (110) четко видны треугольные впадины, являющиеся фигурами травления, подтверждающими кристаллизацию графита. При большом увеличении видны структуры размером до  $1 \cdot 10^{-6}$  м.

Наибольшие изменения в структуре плоскости реза наблюдаются, когда плоскость обработки параллельна кристаллографической плоскости (111). В этом случае видны так называемые зоны напыла, характерные для материалов, прошедших полное расплавление. Из полученных результатов следует, что наиболее эффективно разрушение происходило по плоскости (111) кристалла октаэдрического типа.



**Рисунок 10 – Образование графита в кристаллографических плоскостях (100), (110), (111) в результате воздействия лазерного излучения**

Моделирование МКЭ процесса фазового перехода «алмаз – графит» осуществлялось за счет циклической проверки условия достижения температуры графитизации с последующим присвоением теплофизических свойств графита соответствующим областям модели.

Результаты расчетов полей температурных напряжений представлены в таблице 2. Напряжения, действующие вдоль осей  $x$ ,  $y$  и  $z$ , обозначены символами  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  соответственно.

**Таблица 2 – Результаты расчетов моделирования полей температурных напряжений лазерной обработки кристаллов алмаза при различных длинах волн лазерного излучения**

Напряжения, МПа		Вариант обработки								
		$\lambda = 266$ нм			$\lambda = 532$ нм			$\lambda = 1064$ нм		
		(100)	(110)	(111)	(100)	(110)	(111)	(100)	(110)	(111)
$\sigma_x$	Растяжения	30,4	52,9	47,0	53,7	32,6	30,0	16,0	17,1	15,8
	Сжатия	10,1	140,0	134,0	145,0	10,5	90,8	50,0	50,1	40,8
$\sigma_y$	Растяжения	43,4	129,0	124,0	126,0	39,8	42,1	22,6	19,6	22,0
	Сжатия	47,9	133,0	123,0	136,0	47,7	43,9	25,6	25,5	23,5
$\sigma_z$	Растяжения	10,99	10,8	10,6	11,0	10,41	10,82	10,06	0,72	00,97
	Сжатия	50,8	31,5	27,4	28,2	6,2	5,8	3,02	3,3	30,2

Анализ данных, приведенных в таблице 2, показывает, что наибольших значений напряжения достигают при обработке алмаза лазерным излучением с длинами волн 266 и 532 нм и соответственно равны 129 и 126 МПа в случае напряжений растяжения, 140 и 145 МПа – в случае напряжений сжатия. Данные значения напряжений не достигают значений, соответствующих пределу прочности алмаза.

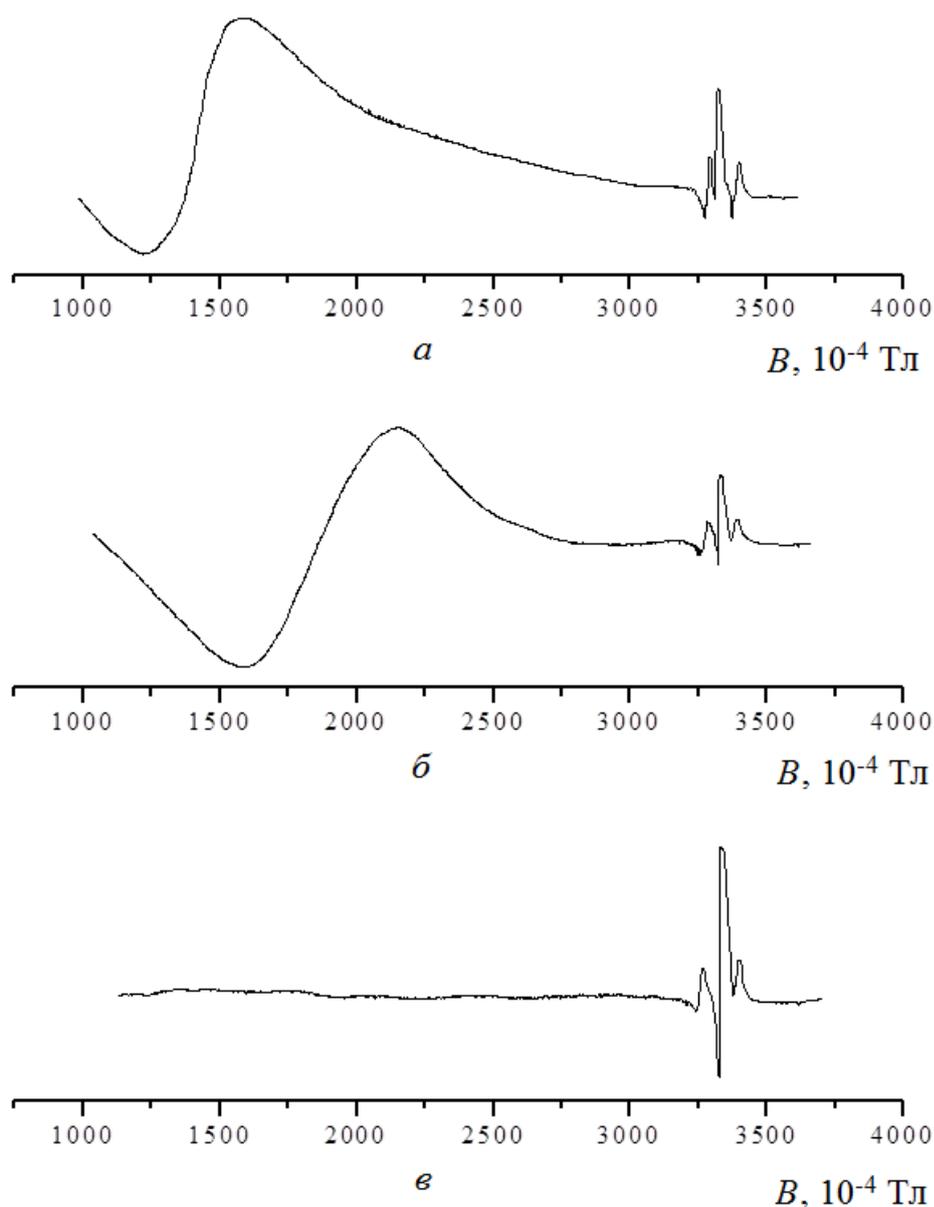
Показано, что кристаллы алмаза, выдерживающие термическую нагрузку без неуправляемого разрушения, отличаются высокой концентрацией примесного азота, которая определяется методом катодоллюминесценции.

Оценка концентрации дефектных центров N3, состоящих из пар замещающих атомов азота и вакансий, по интенсивности бесфононной линии на длине волны  $503,2 \cdot 10^{-9}$  м показала, что в нерасколовшихся образцах она выше, чем в расколовшихся. Это обусловлено зависимостью между концентрацией А-дефектов (пары атомов азота) и величиной трещиностойкости алмаза. В спектрах таких образцов присутствует бесфононная линия, характерная для центров N3, состоящих из трех атомов азота и вакансии, с длиной волны 415,2 нм. В то же время, несмотря на присутствие спектров N3 в отдельных образцах алмазов, а также парамагнитного азота, максимум широкой полосы был смещен в длинноволновую область (465 нм вместо 435 нм для большинства исследованных кристаллов). Сдвиг А-полосы в низкоэнергетичную область связан с присутствием примеси азота в замещающем положении. Непосредственной причиной смещения максимума полосы является увеличение расстояния между элементами донорно-акцепторной пары вблизи дислокации, что приводит к неуправляемому разрушению кристаллов.

На рисунке 11, а приведены характерные спектры ЭПР исходных образцов, а на рисунке 11, б, в – после лазерной обработки, в результате которой образцы раскалывались на две части.

Математическое моделирование позволяет установить технологические параметры процесса лазерной резки алмазов. Решена краевая задача теплопроводности для гауссова распределения энергии в поперечном сечении движущегося лазерного пучка. Зависимости теплофизических характеристик алмаза от температуры  $T$  были учтены в линейном приближении: коэффициент теплопроводности  $\lambda = 628 - 0,148 \cdot T$  Вт/(м·К), удельная теплоемкость  $c = 344 + 1,445 \cdot T$  Дж/(кг·К). Относительная скорость перемещения лазерного луча  $V = (4-8) \cdot 10^{-3}$  м/с, плотность мощности лазерного источника варьировалась в пределах  $q = (10^{10}-10^{11})$  Вт/м<sup>2</sup>.

На основании результатов математического моделирования установлены параметры лазерной резки алмазов, а именно плотность мощности поверхностного источника  $q = 6 \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>, относительная скорость движения теплового источника ЛИ  $V = 8 \cdot 10^{-3}$  м/с, шаг перефокусировки  $5 \cdot 10^{-4}$  м. Эти значения с точностью до 10 % согласуются с результатами экспериментальных исследований.



*a* – исходный образец; *б* – первая расколота часть;  
*в* – вторая расколота часть

**Рисунок 11 – ЭПР-спектры монокристаллов алмаза**

В основе термохимического способа обработки алмаза лежит процесс каталитического взаимодействия углерода, входящего в состав алмаза, с водородом или смесями водорода с водяным паром и углекислым газом. Были исследованы физико-химические механизмы протекающих тепловых и диффузионных процессов. Для реализации движущегося теплового источника на границе раздела фаз «металл – алмаз» в процессе размерной термохимической обработки используется сканирующий лазерный луч.

Полученные в результате решения системы дифференциальных уравнений теплопроводности для двухслойной среды «металл – алмаз» значения температур можно использовать в качестве аргументов для системы дифференциальных уравнений диффузии в рамках заданных интервалов времени.

Анализ результатов моделирования, а именно значений коэффициентов диффузии и соответствующей им интенсивности термохимических процессов, показывает, что в диапазоне плотностей мощности  $q = (10^7-10^8)$  Вт/м<sup>2</sup> и толщине металлического покрытия до 1 мкм оптимальная скорость сканирования составляет величину порядка  $10^{-4}$  м/с. Это обеспечивает создание необходимых условий на границе раздела фаз «металл – алмаз» и позволяет контролировать динамику диффузионных коэффициентов  $D$ , что в целом повышает управляемость исследуемого процесса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Определены экспериментально обоснованные режимы процесса двухлучевого лазерного обогащения кварцевого сырья. Конечно-элементная модель для нахождения температурных полей и метод обогащения кварцевого сырья с применением полихроматического источника излучения с длиной волны не менее 0,4 мкм для создания предварительного нагрева частиц кварцевого сырья до температуры не более 1800 К для частиц сырья фракционного состава от  $(0,1-4,0) \cdot 10^{-4}$  м при одновременном воздействии квазинепрерывного лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм с энерговыделением  $(1,4-5,2) \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup> для нагрева выше температуры плавления частиц сырья с примесями, что приводит к образованию агломератов, которые отсеиваются механической сепарацией, и тем самым обеспечивает повышение в 2,5–3 раза степени очистки сырья для производства компонентов электронной техники из аморфного кварца [1–А; 23–А; 25–А; 33–А; 37–А; 93–А; 101–А; 103–А].

2. Методом функции Грина получены температурные поля на поверхности и в приповерхностной области обрабатываемого материала, на основании которых рассчитаны термоупругие напряжения. Установлено, что совместное использование двух типов лазерного излучения 1,06 и 10,6 мкм позволяет эффективно управлять температурным полем для лазерного управляемого термораскалывания. Скорость термораскалывания при изготовлении заготовок фотошаблонов увеличивается на 30 % при напряжениях до  $0,35 \cdot 10^9$  Па [5–А; 10–А; 11–А; 12–А; 13–А; 17–А; 32–А; 47–А; 48–А; 50–А; 51–А; 62–А; 64–А].

3. Установлена и обоснована необходимость учета анизотропии

свойств кристаллов кварца на основании результатов эксперимента и конечно-элементного моделирования процесса управляемого термораскалывания. 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 из выбранных направлений. Это может быть обеспечено как за счет увеличения скорости резки вдоль оси симметрии третьего порядка в 1,6–1,8 раза, так и изменением мощности лазерного излучения. Введение второго луча в процесс лазерного термораскалывания увеличивает растягивающие микромеханические напряжения, что увеличивает производительность процесса изготовления активных элементов кварцевых резонаторов [21–А; 26–А; 53–А; 54–А; 67–А; 97–А – 100–А].

4. В рамках линейной механики разрушения показано, что условием роста термоиндуцированной трещины являются растягивающие напряжения в ее вершине, при этом расчетный коэффициент интенсивности напряжений должен превышать критический коэффициент интенсивности напряжений равный  $0,7 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}^{1/2}$ . Длина стартового дефекта определяет величину и коэффициенты интенсивности термоупругих напряжений. В частности, при длине стартового дефекта  $L = (0,75–1,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$  максимальный коэффициент интенсивности напряжений составляет  $K_I = (0,79–0,94) \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}^{1/2}$ , что выше критического, при скорости обработки  $15 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$  в производстве компонентов кварцевых резонаторов [18–А; 24–А; 52–А; 55–А; 68–А; 69–А; 84–А; 85–А; 87–А; 88–А; 89–А; 90–А; 91–А; 92–А; 94–А; 95–А; 96–А].

5. Определены режимы двухлучевой суперпозиционной лазерной сварки аморфного кварца, в которой использовались лучи с различной дифракционной расходимостью, которые показали, 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 лазерных пучков  $V = (2,8–3,2) \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ , радиус первого лазерного пучка  $r_1 = (1,15–1,35) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , радиус второго лазерного пучка  $r_2 = (1,4–1,6) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , мощность первого лазерного пучка  $P_1 = 32–38 \text{ Вт}$  и мощность второго лазерного пучка  $P_2 = 33–37 \text{ Вт}$  [22–А; 77–А; 102–А].

6. Определены закономерности пространственной локализации температурных полей при полировке аморфного кварца излучением  $\text{CO}_2$ -лазера. Разработана регрессионная модель полировки аморфного кварца излучением лазера с учетом вычисленных значащих факторов с помощью дисперсионного анализа. При скорости обработки  $(4–6) \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$  и радиусе лазерного пучка  $(1,1–1,3) \cdot 10^{-3} \text{ м}$  достигается оптимальная температура

полировки 2000 К, при этом остаточные механические напряжения не превышают предел прочности аморфного кварца. Результаты, полученные с помощью регрессионной модели, согласуются с экспериментальными данными [27–А; 29–А; 35–А; 70–А; 73–А; 74–А; 104–А].

7. Разработан способ лазерного управляемого термораскалывания стекла, при котором образуется разделяющая трещина, параллельно поверхности стекла, которая зарождается от микротрещины, нанесенной на поверхности стекла. Анализ выражений для температурных полей и напряжений показывает, что определяющий вклад в развитие трещины, параллельной поверхности, вносят напряжения, ориентированные перпендикулярно поверхности образца. Эти напряжения, будучи на поверхности равными нулю, в глубине материала могут достичь технической прочности стекла, определяемой поверхностной микротрещиной, и привести к расслаиванию образца в силу создания условий, определяемых суммой технологических параметров, таких как плотность мощности, скорость относительного перемещения. Глубина, на которой расслаивающие напряжения достигают максимальных значений, определяется режимом термообработки и изменяется в пределах  $(0,1-2) \cdot 10^{-3}$  м. Это позволяет создать экранные пластины, идеально прилегающие друг к другу, с последующим нанесением лазерным методом функциональных покрытий для изготовления жидкокристаллических панелей [4–А; 41–А; 43–А; 44–А; 45–А; 46–А; 56–А; 61–А; 63–А; 79–А; 81–А].

8. Разработан метод термораскалывания стеклянных трубок в производстве ЭЛТ, сущность которого заключается в одновременном нагреве нескольких вращающихся вдоль своей оси трубок при непрерывном их перемещении вдоль большой оси эллиптического, неподвижного лазерного пучка с последующим нанесением зарождающего дефекта (надреза) в области напряжений, созданных лазерным нагревом. Такой метод оптимален для термораскалывания трубчатого стекла на кольца диаметром  $2,6 \cdot 10^{-2}$  м при толщине стекла до  $2 \cdot 10^{-3}$  м и реализован в установке резки стеклянных колец для ЭОС, где использован  $\text{CO}_2$ -лазер мощностью 90–120 Вт, точность разделения составляет не менее  $0,2 \cdot 10^{-3}$  м при толщине стенки разделяемых труб до  $2 \cdot 10^{-3}$  м, производительность не менее 600 шт./ч [2–А; 9–А; 42–А; 78–А; 86–А].

9. Установлены закономерности лазерной резки кристаллов алмаза, обусловленные анизотропией тепловых свойств, в зависимости от выбора направлений резки относительно кристаллографических осей симметрии. Показано, что термоупругие напряжения вдоль осей симметрии второго, третьего и четвертого порядков возрастают на 18, 45, 14 % соответственно, что позволяет прогнозировать появление критических микронапряжений,

приводящих к разрушению и безвозвратным потерям кристаллов в производстве компонент для изделий электронной техники таких, как теплоотводы [3–А; 6–А; 16–А; 36–А; 38–А; 57–А; 58–А; 66–А].

10. Методами катодолюминесценции и ЭПР-спектроскопии установлено, что природное алмазное сырье с низкой концентрацией центров НЗ не подлежит лазерной обработке. При наличии в атомах центров В2 в области высоких температур образуются кольцевые трещины, обусловленные наличием аморфного азота. При наличии в спектрах ЭПР сдвига А-полосы в низкоэнергетическую область (465 вместо 435 нм), что является следствием увеличения расстояния между элементами донорно-акцепторной пары в окрестности дислокации, повышается вероятность разрушения кристалла алмаза [19–А; 20–А; 49–А].

11. Разработана нестационарная трехмерная нелинейная математическая модель лазерной резки кристаллов алмаза лазерным излучением с длиной волны излучения 1064 нм, частотой генерации 3–7 кГц при скорости послойного удаления материала толщиной  $(4–6) \cdot 10^{-4}$  м с учетом температурных зависимостей теплофизических свойств материала от температуры. С учетом анизотропных свойств образующегося при этом графита установлены оптимальные параметры обработки: плотность мощности лазерного излучения  $(5–7) \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>, относительная скорость перемещения  $(7–9) \cdot 10^{-3}$  м/с, шаг перефокусировки  $(4–6) \cdot 10^{-4}$  м, и получена корреляция с экспериментальными данными с погрешностью (7–10) % при изготовлении теплоотводов [7–А; 82–А].

12. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены закономерности резки алмаза лазерным излучением с длинами волн 266, 532 и 1064 нм. Показано, что при энергии импульса  $(1,5–2,0) \cdot 10^{-2}$  Дж в случае лазерного излучения с длиной волны 266 нм происходит удаление алмаза по механизму абляции. При воздействии лазерного излучения с длиной волны 532 нм увеличивается коэффициент объемного поглощения, наблюдается переход графита из кристаллического в аморфное состояние. При длине волны 1064 нм наблюдаются рекристаллизация и образование кристаллического графита в зоне лазерного воздействия [28–А; 30–А; 71–А; 72–А].

13. В результате математического моделирования каталитического теплопереноса в системе «водород – металл – алмаз», с учетом зависимости теплофизических свойств и коэффициентов диффузии от текущей температуры показано, что наиболее эффективным способом формирования канала термодиффузии в процессе формирования топологии на компонентах высокотемпературной электроники является использование лазерного излучения, обеспечивающего поверхностный тепловой источник с

плотностью мощности  $q = 10^7-10^8$  Вт/м<sup>2</sup> при толщине металлического покрытия до  $10^{-6}$  м и скорости сканирования  $10^{-4}$  м/с. В этих условиях достигаются скорости перехода углерода из алмазной в газовую фазу до  $1,8 \cdot 10^{-10}$  кг/(м<sup>2</sup>·с) при разрешении  $10^{-5}$  м [8-А; 14-А; 15-А; 31-А; 34-А; 39-А; 40-А; 59-А; 60-А; 65-А; 75-А; 76-А; 80-А; 83-А].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Результаты диссертации внедрены на предприятии ОАО «Коралл» в производстве изделий из аморфного и кристаллического кварца. Технология обогащения кварцевого сырья обеспечивает снижение содержания примесей в 2,5–3 раза. Технология лазерного управляемого термораскалывания кристаллического кварца для компонентов электронной техники в производстве кварцевых резонаторов дает увеличение скорости резки в 5–7 раз. В производстве ЭЛТ разработаны и внедрены технология лазерной резки и оплавки штенгеля методом лазерного управляемого термораскалывания на операциях резки В2.735.905 ТК и оплавки В20.735.905 ТК1, что повысило производительность изготовления штенгеля для плоской ножки в 2,8 раза; установка разгерметизации ЭЛТ В2.М3.104.013.000, обеспечивающая разгерметизацию суточной программы за одну смену.

На ОАО Гомельское ПО «Кристалл» – управляющая компания холдинга «Кристалл-Холдинг» внедрены следующие результаты: типовая технологическая операция распиливания алмаза 00226773.02231.20636 с применением установки лазерной обработки алмаза и СТМ ЭМ-260 БРАС. 442169.004; технология лазерной групповой обработки алмазов на установке ЭМ-280 БРАС. 442169.011 для лазерного распиливания (резки) алмазного сырья и СТМ; технология изготовления и реставрации однокристалльного и однолезвийного инструмента из СТМ «Алмазот» и ТУ РБ 190410065.010-2003 «Наконечники к приборам для измерения твердости металлов и сплавов из сверхтвердого монокристалла «Алмазот».

Стоимость продукции, выпущенной с использованием результатов диссертации, составляет 11 485 711 белорусских рублей, что по курсу Национального банка Республики Беларусь на 01.11.2023 соответствует 3 705 068 долларов США.

Также результаты работы внедрены в образовательный 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.

Результаты исследования рекомендуется использовать в электронной промышленности в технологиях лазерной обработки, а именно резки, термораскалывания, сварки и размерной обработки компонентов электронной техники из кварца, синтетических и природных алмазов.

## **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. Шершнев ; под ред. А. П. Достанко. – Минск : Беларус. навука, 2020. – 260 с.

2–А. Шершнев, Е. Б. Лазерные технологии и оборудование в электронике / Е. Б. Шершнев, С. И. Соколов, В. А. Емельянов. – Минск : Интеграл Полиграф, 2023. – 204 с.

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

3–А. Dependence of the diamond laser processing efficiency on crystallographic directions / S. Shalupaev, E. Shershnev, V. Sviridova, Y. Nikitjuk // Optics of Crystals. – 2001. – Vol. 4358. – P. 329–333.

4–А. Шершнев, Е. Б. Лазерное разделение стекла в плоскости, параллельной поверхности / Е. Б. Шершнев, С. В. Шалупаев, Ю. В. Никитюк / Изв. Гомель. гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2001. – № 6 (9). – С. 114–117.

5–А. Лазерное термораскалывание диэлектрических материалов / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, А. Н. Сердюков // Ceramics. Pol. ceramic bull. – 2001. – Т. 65. – С. 75–83.

6–А. Шершнев, Е. Б. Исследование режимов и свойств кристаллических материалов при лазерной обработке / Е. Б. Шершнев, Ю. А. Драенков / Изв. Гомель. гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2001. – № 6 (9). – С. 138–140.

7–А. Размерная обработка ювелирных алмазов излучением YAG:Nd-лазера с модулированной добротностью / Г. Е. Ретюхин, А. Г. Кощеев, И. В. Файн, Е. Б. Шершнев / Вес. Нац. Акад. Навук Беларусі. Сер. фізіка-техн. навук. – 2001. – № 1. – С. 73–77.

8–А. Оптимизация процесса электроразрядного спекания

синтетических алмазов / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершневу, Н. Н. Федосенко, Ю. В. Никитюк, В. П. Морозов // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. – 2002. – № 5. – С. 58–61.

9–А. Обработка методом лазерного термораскалывания керамических и стеклянных изделий трубчатой формы / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, В. Н. Мышковец, А. В. Максименко // Ceramics. Pol. ceramic bull. – 2003.– Vol. 79. – P. 115–120.

10–А. Прецизионная лазерная обработка хрупких неметаллических материалов / Е. Б. Шершневу, С. В. Шалупаев, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа / Изв. Гомель. гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2005. – № 3 (30). – С. 87–92.

11–А. Исследование процесса лазерного термораскалывания толстых керамических пластин / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа // Вест. Полоцк. гос. ун-та. Сер. В. – 2005. – № 6. – С. 140–143.

12–А. Двулучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа // Оптич. журн.. – 2005. – Т. 73, № 5. – С. 62–66.

13–А. Лазерный двулучевой метод обработки высокопрочных керамических материалов / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершневу, М. Алексеюк, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа // Ceramics. Pol. ceramic bull. – 2005. – Т. 89. – С. 44–49.

14–А. Шалупаев, С. В. Металлизация алмазных порошков в технологии производства инструмента на керамических связках / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершневу, В. П. Морозов // Ceramics. Pol. ceramic bull. – 2005. – Т. 89. – С. 58–63.

15–А. Ходинский, А. Н. Исследование процесса и разработка установки для лазерной маркировки изделий из монокристаллических материалов с высокой твердостью / А. Н. Ходинский Е. Б. Шершневу, А. Е. Шершнёв // Изв. Гомель. гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2006. – № 6 (39), ч. 1. – С. 156–159.

16–А. Хмыль, А. А. Исследование процесса лазерной обработки сверхтвердых алмазоподобных монокристаллических материалов / А. А. Хмыль, Е. Б. Шершневу, А. Е. Шершнёв // Изв. Гомель. гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2006. – № 6 (39), ч. 2. – С. 107–110.

17–А. Шершневу, Е. Б. Моделирование, эксперимент и оборудование для лазерного термораскалывания аморфного кварца / Е. Б. Шершневу, В. В. Свиридова, С. И. Соколов // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2008. – Т. 13, № 1. – С. 12–16.

18–А. Шершневу, Е. Б. Математическое моделирование процессов лазерного управляемого термораскалывания листового стекла /

Е. Б. Шершневу, С. В. Шалупаеву, С. И. Соколову // Изв. Гомель. гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2009. – № 4, ч. 2. – С. 204–212.

19–А. Шершневу, Е. Б. Влияние примесей и структурных неоднородностей на раскалывание кристаллов алмаза при лазерном формообразовании / Е. Б. Шершневу, А. Е. Шершнёву // Изв. Гомель. гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2009. – № 4 (55), ч. 2. – С. 213–218.

20–А. Шершневу, Е. Б. Исследование влияния дефектов кристаллической решетки синтетических кристаллов СТМ на их лазерную обработку / Е. Б. Шершневу, А. Е. Шершнёву // Изв. Гомель. гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2009. – № 5 (56), ч. 2. – С. 141–144.

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

22–А. Распределение температурных полей при двухлучевой сварке аморфного кварца / Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, А. Е. Шершнёву // Изв. Гомель. гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2012. – № 6. – С. 105–109.

23–А. Использование метода конечных элементов для оптимизации режимов лазерной сепарации кварцевого сырья / Е. Б. Шершневу, П. В. Астахов, В. В. Свиридова, С. И. Соколов // Чрезвычайн. ситуации: образование и наука. – 2012. – Т. 7, № 2. – С. 8–13.

24–А. Шершневу, Е. Б. Особенности лазерного термораскалывания аморфного кварца / Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов // Проблемы физики, математики и техники. – 2013. – № 3. – С. 39–44.

25–А. Шершневу, Е. Б. Моделирование двухлучевой лазерной сепарации кварцевого сырья / Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов // Изв. Гомель. гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2013. – № 6. – С. 216–220.

26–А. Шершневу, Е. Б. Особенности лазерного раскалывания кристаллического кварца АТ- и ВТ-срезов / Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов // Изв. Гомель. гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2014. – № 6. – С. 220–224.

27–А. Исследование процесса лазерной полировки аморфного кварца / Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, А. Е. Шершнёву // Проблемы физики, математики и техники. – 2015. – № 4. – С. 45–49.

28–А. Особенности применения лазерного излучения с длинами волн 1064 нм, 532 нм и 266 нм для обработки кристаллов алмаза / Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, А. Е. Шершнёву // Проблемы физики, математики и техники. – 2017. – № 1. – С. 22–24.

29–А. Исследование лазерного макро- и микроформообразования

хрупких неметаллических материалов методом полного факторного эксперимента / Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, А. Е. Шершнёв // Проблемы физики, математики и техники. – 2017. – № 4. – С. 38–40.

30–А. Обработка синтетических алмазных структур лазерным излучением с длиной волны 532 нм / Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, С. Ф. Ермаков // Проблемы физики, математики и техники. – 2018. – № 4 (37). – С. 47–51.

31–А. Изучение влияния параметров обработки на протекание поверхностных нанопроцессов при формообразовании синтетических алмазов / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнев, С. И. Соколов, А. Н. Купо // Изв. Гомель. гос. ун-та им. Ф. Скорины. Сер.: Естеств. науки. – 2021. – № 6 (129). – С. 159–163.

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

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

34–А. Изучение влияния примесей на процессы формообразования синтетического алмаза в зоне термического влияния лазерного излучения / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнев, А. Н. Купо, С. И. Соколов // Изв. Гомель. гос. ун-та им. Ф. Скорины. Сер.: Естеств. науки. – 2022. – № 3 (132). – С. 117–120.

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

36–А. Оптимизация параметров лазерной обработки алмазов / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, И. Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 4 (53). – С. 30–36.

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

38–А. Estimating the parameters of laser processing of diamonds via the

finite element method and artificial neural networks / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнева, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, И. Ю. Аушев // Докл. БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 4. – С. 40–45.

39–А. Шершнева, Е. Б. Нелинейная математическая модель процесса тепломассопереноса в технологиях термохимической обработки алмаза / Е. Б. Шершнева // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 3 (56). – С. 75–80.

40–А. Шершнева, Е. Б. Термохимическая обработка алмаза движущимся тепловым источником / Е. Б. Шершнева // Изв. Гомель. гос. ун-та им. Ф. Скорины. Сер.: Естеств. науки. – 2023. – № 6 (141). – С. 123–129.

### **Статьи в других рецензируемых научных изданиях**

41–А. Шершнева, Е. Б. Лазерный метод получения плотноупакованной структуры тонких пленок / В. А. Емельянов, Н. Н. Федосенко, Е. Б. Шершнева // Электронная техника. Серия 11. Лазерная техника и оптоэлектроника. – 1992. – № 3–4. – С. 55–57.

42–А. Шершнева, Е. Б. Особенности применения лазерной технологии в производстве стеклоизделий / Е. Б. Шершнева, А. С. Танасейчук, В. А. Емельянов // Электрон. техника. Сер. 11. Лазер. техника и оптоэлектроника. – 1993. – № 1–2. – С. 29–32.

43–А. Получение прозрачных токопроводящих покрытий реактивным лазерным напылением / Н. Н. Федосенко, В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнева, А. А. Танасейчук // Электрон. техника. Сер. 11. Лазер. техника и оптоэлектроника. – 1993. – № 1–2. – С. 42–44.

44–А. Динамика формирования полей температурных напряжений в процессе лазерного управляемого термораскалывания / Е. Б. Шершнева, В. А. Емельянов, В. А. Зайцев, С. В. Шалупаев // Лазер. новости. – 1995. – Вып. 4. – С. 14–17.

45–А. Лазерное параллельное термораскалывание хрупких неметаллических материалов / Е. Б. Шершнева, В. А. Емельянов, В. А. Зайцев, С. В. Шалупаев // Лазер. новости. – 1995. – Вып. 3. – С. 37–41.

46–А. Forming Dynamics of Temperature Stress Fields in the Process of Parallel Thermosplitting / J. Ranachowski, A. Serdyukov, S. Shalupaev, E. Shershnev // Prace IPPT – IFTR Rep. – 1996. – № 10. – P. 1–10.

47–А. Шершнева, Е. Б. Оптимизация процесса лазерного управляемого термораскалывания стекла излучением инфракрасного диапазона / Е. Б. Шершнева, В. В. Свиридова, С. И. Соколов // Чрезвычайн. ситуации: образование и наука. – 2008. – Т. 3, № 1. – С. 90–96.

48–А. Использование метода конечных элементов для оптимизации режимов лазерного управляемого термораскалывания кварцевых стекол / Е. Б. Шершнев, П. В. Астахов, В. В. Свиридова, С. И. Соколов // Чрезвычайн. ситуации: образование и наука. – 2009. – Т. 4, № 2. – С. 123–128.

### **Статьи в сборниках материалов научных конференций**

49–А. Исследование природы примесных и дефектных включений ответственных за разрушение монокристаллов алмаза при лазерной резке / Е. Б. Шершнев, Н. М. Лапчук, А. Р. Филипп, Е. В. Шершнева // Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применение (СТИМ-2001) : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Киев, 4–6 июля 2001 г. / Ин-т сверхтверд. материалов им. В. Н. Бакуля. – Киев, 2001. – С. 247–249.

50–А. Шалупаев, С. В. Лазерная двулучевая обработка материалов в производстве изделий электронной техники / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения (INTERMATIC-2004) : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 7–10 сентября 2004 г. / Моск. гос. ин-т. радиотехники, электроники и автоматики ; редкол.: Ю. В. Гуляев [и др.]. – М., 2004. – Ч. 1. – С. 133–135.

51–А. Лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов по замкнутым криволинейным траекториям / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 6 Междунар. конф., Минск, 26–28 мая 2005 г. / Белорус. гос. ун-т. ; под ред. В. М. Анищика [и др.]. – Минск, 2005. – С. 436–438.

52–А. Шершнев, Е. Б. Лазерное управляемое термораскалывание с использованием ультразвукового диспергирования хладагента / Е. Б. Шершнев, С. И. Соколов // Юбилейная научно-практическая конференция, посвященная 40-летию Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины : материалы науч.-практ. конф, Гомель, 11 июня 2009 г. : в 4 ч. / Гомель. гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол.: О. М. Демиденко (отв. ред.) [и др.]. – Гомель, 2009. – Ч. 4. – С. 90–92.

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

54–А. Моделирование процесса лазерного термораскалывания

аморфного кварца в рамках линейной механики разрушения / А. Н. Сердюков, Е. Б. Шершнев, 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. : Нац. академ. наук Беларуси ; редкол.: С. А. Маскевич (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2012. – Ч. 2. – С. 191–194.

### **Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций**

55–А. Емельянов, В. А. Феноменологические модели процессов лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнев, С. В. Шалупаев / Передовые технологии в производстве материалов и восстановлении изношенных поверхностей : тез. докл. II Междунар. конф., Минск, 24–25 марта 1997 г. – Минск, 1997. – С. 34.

56–А. Шалупаев, С. В. Комбинированное лазерное термораскалывание / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк // Лазерная физика и спектроскопия : тез. докл. IV Междунар. конф. по лазер. физике и спектроскопии, Гродно, 4–8 окт. 1999 г. : в 2 ч. / Гродн. гос. ун-т. ; под ред. В. К. Кононенко [и др.]. – Гродно, 1999. – Ч. 2. – С. 177–179.

57–А. Шершнев, Е. Б. Эффективность воздействия импульсного лазерного излучения на алмазы в различных кристаллографических направлениях / Е. Б. Шершнев, С. В. Шалупаев, Ю. В. Никитюк / Современные проблемы машиноведения – научные чтения, посвященные 105-й годовщине со дня рождения Павла Осиповича Сухого : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 5–7 июля 2000 г. / Гомель. гос. техн. ун-т ; под общ. ред. А. С. Шагиняна. – Гомель, 2000. – С. 18–20.

58–А. Shalupaev, S. V. Dependence of the diamond laser processing efficiency on crystallographic directions / S. V. Shalupaev, E. B. Shershnev, Y. V. Nikitjuk // Optics of Crystals : Abstr. of the Intern. Sci. Conf., Mozyr, Sept. 26–30, 2000 / Nat. Acad. of Science of Belarus. – Mozyr, 2000. – P. 65.

59–А. Оптимизация процесса электроразрядного спекания синтетических алмазов / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Н. Н. Федосенко, Ю. В. Никитюк // Национальная конференция по росту кристаллов : тез. докл. IX Нац. конф., Москва, 16–21 окт. 2000 г. / Ин-т кристаллографии им. А. В. Шубникова Рос. акад. наук. – Москва, 2000. – С. 418.

60–А. Shalupaev, S. V. Laser thermostrengthening of the high-pressure apparatus dies used for synthesis of supersolid materials / S. V. Shalupaev, E. B. Shershnev, V. P. Morozov // Problems of Interaction of Radiation with Matter : Abstr. of the Intern. Conf., Gomel, Oct. 30 – Nov. 1, 2001 / ed.: I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov ; Gomel State Univ. – Gomel, 2001. –

P. 59–60.

61–А. Shalupaev, S. V. An examination of laser glass separation in the plane parallel to its surface / S. V. Shalupaev, E. B. Shershnev, Y. V. Nikitjuk // Problems of Interaction of Radiation with Matter : Abstr. of the Intern. Conf., Gomel, Oct. 30 – Nov. 1, 2001 / ed.: I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov ; Gomel State Univ. – Gomel, 2001. – P. 58–59.

62–А. Шершнеv, Е. Б. Двухлучевая лазерная обработка хрупких неметаллических материалов / Е. Б. Шершнеv, С. В. Шалупаев, Ю. В. Никитюк // Квантовая электроника : тез. докл. V Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–25 нояб. 2004 г./ Белорус. гос. ун-т ; под ред. И. С. Манака. – Минск, 2002. – С. 148.

63–А. Шалупаев, С. В. Определение траектории развития разделяющей трещины при лазерном асимметричном термораскалывании методом конечно-элементного анализа / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнеv, Ю. В. Никитюк // Актуальные проблемы прочности : тез. докл. XLIII Междунар. конф., Витебск, 27 сент. – 5 окт. 2004 г. / Витебск. гос. техн. ун-т ; Науч. исслед. ин-т математики и механики СПбГУ. – Витебск, 2004. – С. 246.

64–А. Шалупаев, С. В. Двухлучевая лазерная обработка хрупких неметаллических материалов. / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнеv, Ю. В. Никитюк // Квантовая электроника : тез. докл. V Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–25 нояб. 2004 г. / Белорус. гос. ун-т. ; под ред. И. С. Манака [и др.]. – Минск, 2004. – С. 148.

65–А. Исследование локальной термохимической обработки алмаза с лазерным ассистированием / А. А. Хмыль, Е. Б. Шершнеv, С. В. Шалупаев, А. Е. Шершнеv // Взаимодействие излучения с твёрдым телом (ВИТТ-2005) : тез. докл. Междунар. конф., Минск, 28 сент. 2005 г. / Белорус. гос. ун-т. – Минск, 2005. – С. 276–278.

66–А. Хмыль, А. А. Компьютерное моделирование процесса лазерной обработки алмаза / А. А. Хмыль, Е. Б. Шершнеv, А. Е. Шершнеv // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств : тез. докл. IV Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 25–26 мая 2006 г. : в 2 т. / Полоцк. гос. ун-т. – Новополоцк, 2006. – Т. 1. – С. 202–205.

67–А. Конечный элементный анализ процесса лазерного термораскалывания кристаллического кварца / А. Н. Сердюков, Е. Б. Шершнеv, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, В. Ф. Шолох // Проблемы взаимодействия излучения с веществом : тез. докл. III Междунар. науч. конф., посвящ. 85-летию со дня рождения Б. В. Бокутя, Гомель, 9–11 нояб. 2011 г. : в 2 ч. / Гомель. гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол.: А. В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2011. – Ч. 2. – С. 124–128.

68–А. Моделирование процесса лазерного термораскалывания

аморфного кварца в рамках линейной механики разрушения / А. Н. Сердюков, Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов // Лазерная физика и оптические технологии : тез. докл. IX междунар. науч. конф., Гродно, 30 мая – 2 июня 2021 г. : в 2 ч. / Гродн. гос. ун-т. им. Я. Купалы ; редкол.: С. А. Маскевич [и др.]. – Гродно, 2021. – Ч. 2. – С. 278.

69–А. Повышение эффективности лазерного управляемого термораскалывания силикатных стекол / Е. Б. Шершневу, 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 : тез. докл. науч. семинара, Гомель, 21 мая 2014 г. / Гомель. гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол.: А. В. Рогачев [и др.]. – Гомель, 2014. – С. 251–253.

70–А. Исследование лазерного макро- и микроформообразования хрупких неметаллических материалов методом полного факторного эксперимента / Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, А. Е. Шершнёв // Проблемы взаимодействия излучения с веществом : тез. докл. IV Респ. науч. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения Б. В. Бокутя, Гомель, 9–11 нояб. 2016 г. : в 2 ч. / Гомель. гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол.: С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2016. – Ч. 2. – С. 193–196.

71–А. Шершневу, Е. Б. Исследование обработки кристаллов алмаза лазерным излучением с длиной волны 266 нм / Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов // VI Конгресс физиков Беларуси : тез. докл. конгр., Минск, 20–30 нояб. 2017 г. / Ин-т физики Нац. акад. наук Беларуси ; редкол.: С. Я. Килин (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 267–268.

72–А. Экспериментальные исследования по обработке алмаза лазерным излучением с длиной волны 532 и 266 нм / Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, А. Е. Шершнёв // Проблемы взаимодействия излучения с веществом : тез. докл. V Междунар. науч. конф., Гомель, 14–16 нояб. 2018 г. : в 2 ч. / Гомель. гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол.: Д. Л. Коваленко [и др.]. – Гомель, 2018. – Ч. 2. – С. 258–263.

73–А. Численное моделирование лазерной полировки аморфного кварца с использованием метода планирования вычислительных экспериментов / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов // Научная конференция, посвященная 110-летию со дня рождения Ф. И. Федорова : тез. докл. науч. конф., Гомель, 25 июня 2021 г. / Гомель. гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол.: С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2021. – С. 317–320.

74–А. Optimization of the parameters of laser polishing of quartz glass using the method of planning computational experiments / V. A. Emelyanov, E. B. Shershnev, Y. V. Nikitjuk, S. I. Sokolov // 19<sup>th</sup> International Conference

on Global Research and Education : Abstr. of the Intern. Conf., Gomel, Oct. 20–22, 2021 / Gomel State Univ. named F. Skaryna ; ed.: S. A. Khakhomov [et al.]. — Gomel, 2021. – P. 117–119.

75–А. Термохимическая лазерная обработка монокристаллов алмаза / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнев, А. Н. Купо, С. И. Соколов // Квантовая электроника : тез. докл. XIII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–26 нояб. 2021 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.), А. А. Афоненко, А. В. Баркова. – Минск, 2021. – С. 382–285.

76–А. Изучение влияния примесей на процессы формообразования синтетического алмаза в зоне термического влияния лазерного излучения / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнев, А. Н. Купо, С. И. Соколов // Прикладные вопросы точных наук : тез. докл. VI Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, преподавателей, Армавир, 28–29 окт. 2022 г. / Кубан. гос. техн. ун-т ; науч. ред.: Л. А. Горovenko ; отв. ред.: О. П. Ровенская. – Армавир, 2022. – С. 19–21.

### **Патенты**

77–А. Лазерная обрабатывающая головка : пат. 736 Респ. Беларусь : МПК В23К 26/14 / Е. Б. Шершнев, А. С. Танасейчук ; дата публ.: 30.06.1995.

78–А. Установка для получения отверстий в стеклооболочке кинескопа : пат. 815 Респ. Беларусь : МПК В23К 26/00 / А. С. Танасейчук, Е. Б. Шершнев, А. Я. Калюко ; дата публ.: 15.08.1995.

79–А. Способ получения электропроводящего прозрачного покрытия из оксида индия : полезная модель 960 Респ. Беларусь : МПК С23С 14/28, С23С 14/08 / А. С. Танасейчук, Н. Н. Федосенко, Е. Б. Шершнев ; дата публ.: 15.12.1995.

80–А. Установка для получения алмазоподобных пленок : полезная модель 323 Респ. Беларусь : МПК С23С 14/28 / А. С. Старовойтов, В. А. Зайцев, Е. Б. Шершнев, С. В. Шалупаев, Н. Н. Федосенко, Ю. В. Никитюк, В. П. Морозов ; дата публ.: 30.09.2001.

81–А. Установка для лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов : полезная модель 683 Респ. Беларусь : МПК С03В 33/02 / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк ; дата публ.: 30.09.2002.

82–А. Способ лазерной обработки кристаллических сверхтвердых материалов : пат. 5706 Респ. Беларусь : МПК В28D 5/00 / А. С. Старовойтов, В. А. Зайцев, В. В. Макеев, Е. Б. Шершнев, Г. Е. Ретюхин, Ю. А. Драенков ; дата публ.: 30.12.2003.

83–А. Способ получения алмазоподобных углеродных пленок : пат. 6030 Респ. Беларусь : МПК С23С 14/28 / А. С. Старовойтов, В. А. Зайцев, Е. Б. Шершнев, С. В. Шалупаев, Н. Н. Федосенко, В. Ф. Шолох, Ю. В. Никитюк ; дата публ.: 30.03.2004.

84–А. Установка для лазерной резки хрупких неметаллических материалов : полезная модель 1979 Респ. Беларусь : МПК С03С 33/02, В23К 26/00 / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, И. М. Каморников, И. Л. Полторан ; дата публ.: 30.06.2005.

85–А. Установка для лазерной резки хрупких неметаллических материалов : полезная модель 2164 Респ. Беларусь : МПК С03В 33/02 / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа, А. М. Евтухов ; дата публ.: 09.30.2005.

86–А. Установка для лазерной резки трубок из хрупких неметаллических материалов : полезная модель 2274 Респ. Беларусь : МПК С03В 33/02 / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа ; дата публ.: 12.30.2005.

87–А. Установка для лазерной резки хрупких неметаллических материалов : полезная модель 2283 Респ. Беларусь : МПК С03В 33/02 / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, А. М. Евтухов ; дата публ.: 12.30.2005.

88–А. Способ разделения хрупких неметаллических материалов под действием термоупругих напряжений : пат. 10022 Респ. Беларусь : МПК С03В 33/00 / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа ; дата публ.: 30.12.2007.

89–А. Способ разделения хрупких неметаллических материалов под действием термоупругих напряжений : пат. 10167 Респ. Беларусь : МПК С03В 33/00 / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа ; дата публ.: 30.12.2007.

90–А. Способ разделения хрупких неметаллических материалов под действием термоупругих напряжений : пат. 2342333 Рос. Федерация : МПК С03В33/09 / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа ; дата публ.: 27.12.2008.

91–А. Способ разделения хрупких неметаллических материалов под действием термоупругих напряжений : пат. 2320549 Рос. Федерация : МПК С03В33/02 / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа ; дата публ.: 27.03.2008.

92–А. Установка для лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов : полезная модель 4625 Респ. Беларусь : МПК С03В 33/00 / Е. Б. Шершнеv, С. И. Соколов, А. С. Побияха ; дата публ.: 30.08.2008.

93–А. Установка для обогащения жильного кварца : полезная модель 5147 Респ. Беларусь : МПК С03В 1/00 / Е. Б. Шершнеv, С. И. Соколов, А. С. Побияха ; дата публ.: 30.04.2009.

94–А. Установка для лазерного термораскалывания хрупкого неметаллического материала по замкнутому криволинейному контуру : полезная модель 6567 Респ. Беларусь : МПК С03В 33/00 / Е. Б. Шершнеv, С. И. Соколов ; дата публ.: 30.10.2010.

95–А. Установка для разделения хрупкого неметаллического материала под действием термоупругих напряжений по криволинейной траектории : полезная модель 7086 Респ. Беларусь : МПК С03В 33/00 / Е. Б. Шершнеv, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк ; дата публ.: 28.02.2011.

96–А. Способ лазерного управляемого термораскалывания хрупкого неметаллического материала : пат. 14622 Респ. Беларусь : МПК С03В 33/09, С03В 33/02 / Е. Б. Шершнеv, С. И. Соколов ; дата публ.: 30.08.2011.

97–А. Установка для лазерной резки хрупкого неметаллического материала : полезная модель 7557 Респ. Беларусь : МПК С03В 33/00 / Е. Б. Шершнеv, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк ; дата публ.: 30.08.2011.

98–А. Установка для лазерной резки хрупкого неметаллического материала : полезная модель 7590 Респ. Беларусь : МПК С03В 33/02 / Е. Б. Шершнеv, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк ; дата публ.: 30.10.2011.

99–А. Способ разделения резкой кристаллического кварца под действием термоупругих напряжений : пат. 16478 Респ. Беларусь : МПК С03В 33/02, В28D 5/00, С03В 33/09 / Е. Б. Шершнеv, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк, В. Ф. Шолох ; дата публ.: 30.10.2012.

100–А. Способ разделения резкой кристаллического кварца под действием термоупругих напряжений : пат. 2478083 Рос. Федерация : МПК С03В 33/09 / Е. Б. Шершнеv, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк, В. Ф. Шолох ; дата публ.: 27.03.2013.

101–А. Установка для обогащения жильного кварца : полезная модель 9675 Респ. Беларусь : МПК С03В 1/00 / Е. Б. Шершнеv, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк ; дата публ.: 30.10.2013.

102–А. Установка для двухлучевой лазерной сварки аморфного кварца : полезная модель 9962 Респ. Беларусь : МПК В23К 31/10, С03В 33/02 /

Е. Б. Шершнев, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк ; дата публ.: 28.02.2014.

103–А.Способ обогащения кварцевой крупки : пат. 21228 Респ. Беларусь : МПК С03В 1/00, В07В 13/04, Н05В 6/00 / Е. Б. Шершнев, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк ; дата публ.: 30.08.2017.

104–А.Установка для двухлучевой лазерной полировки изделий из хрупких неметаллических материалов : полезная модель 12062 Респ. Беларусь : МПК С 03В 33/02 / Е. Б. Шершнев, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк; дата публ.: 30.08.2018.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, cursive letters and a horizontal line at the end.

## РЭЗІЮМЭ

Шаршнеў Яўгеній Барысавіч

### Лазерная тэхналогія фарміравання кампанентаў электроннай тэхнікі з аморфных і крышталічных матэрыялаў

**Ключавыя словы:** лазернае выпраменьванне, тэрмасколванне, мадэляванне, крышталічны кварц, аморфны кварц, алмаз, фоташаблон, рэзанатары.

**Мэта работы:** комплекснае рашэнне праблемы фарміравання кампанентаў вырабаў электроннай тэхнікі з аморфнага і крышталічнага кварцу, шматкампанентнага шкла, сінтэтычных і прыродных алмазаў для зніжэння працаёмкасці працэсаў іх вырабу на аснове распрацоўкі і ўкаранення лазерных тэхналагічных працэсаў і абсталявання.

**Метады даследавання:** лікавыя і аналітычныя метады рашэння задач тэрмапругкасці і цепламасаабмену; прафілаграфічны метад даследавання шурпатасці паверхняў; метад поўнага фактарнага эксперыменту; лазерныя тэхналагічныя ўстаноўкі, бескантактны і кантактны метады АСМ; катодалюмінесцэнцыя, ЭПР-спектраскапія.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** распрацаваны спосаб двухпрамянёвага лазернага ўзбагачэння кварцавай сыравіны для часціц фракцыйнага складу ад  $0,1-4,0 \cdot 10^{-4}$  м; пабудавана фенаменалагічная мадэль лазернага кіруемага тэрмасколвання кварцу, якая дазваляе разлічыць значэнні каэфіцыента інтэнсіўнасці напружання, большыя за крытычнае значэнне  $0,7 \cdot 10^6$  Па·м<sup>1/2</sup>; устаноўлены рэжымы лазернага кіруемага тэрмасколвання аморфнага і крышталічнага кварцу і вызначана хуткасць лазернага кіруемага тэрмасколвання у залежнасці ад крышталаграфічнага напрамку ў дыяпазоне  $(5-17) \cdot 10^{-3}$  м/с, што ў 5-7 разоў больш за хуткасць механічнай рэзкі пры эканоміі матэрыялу за кошт адсутнасці адходаў да (20–25) %; устаноўлены заканамернасці лазернай рэзкі алмаза з улікам спектральнай селектыўнасці, якія заключаюцца ў паслядоўнай змене механізмаў падзелу матэрыялу пры лазерным апраменьванні: абляцыя (266 нм), фазавы пераход графіту другога роду (пры 532 нм) і рэкрышталізацыя (пры 1064 нм); атрыманы заканамернасці фарміравання бесперапыннага каналу лазернай каталітычнай тэрмадыфузіі, якія забяспечваюць хуткасць пераходу вугляроду з фазы алмаза ў газавую да  $1,8 \cdot 10^{-10}$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

**Рэкамендацыі па выкарыстанні і галіна прымянення:** у электроннай прамысловасці пры лазерным фарміраванні кампанентаў электроннай тэхнікі ў вытворчасці фоташаблонаў, рэзанатараў, цеплаадводаў і іншых вырабаў.

## РЕЗЮМЕ

Шершнев Евгений Борисович

### Лазерная технология формирования компонентов электронной техники из аморфных и кристаллических материалов

**Ключевые слова:** лазерное излучение, термораскалывание, моделирование, кристаллический кварц, аморфный кварц, алмаз, фотошаблоны, резонаторы.

**Цель работы:** комплексное решение проблемы формирования компонентов изделий электронной техники из аморфного и кристаллического кварца, многокомпонентного стекла, синтетических и природных алмазов для снижения трудоемкости их изготовления на основе разработки и внедрения лазерных технологических процессов и оборудования.

**Методы исследования:** численные и аналитические методы решения задач термоупругости и тепломассообмена, профилографический метод исследования шероховатости поверхностей; метод полного факторного эксперимента, лазерные технологические установки, бесконтактный и контактный методы АСМ; катодолюминесценция, ЭПР-спектроскопия.

**Полученные результаты и их новизна:** разработан способ двулучевого лазерного обогащения кварцевого сырья для частиц фракционного состава от  $(0,1-4,0) \cdot 10^{-4}$  м; построена феноменологическая модель лазерного управляемого термораскалывания кварца, позволяющая рассчитать значения коэффициента интенсивности напряжений больше критического значения  $0,7 \cdot 10^6$  Па $\cdot$ м $^{1/2}$ ; установлены режимы лазерного управляемого термораскалывания аморфного и кристаллического кварца, и определена скорость лазерного управляемого термораскалывания в зависимости от кристаллографического направления в диапазоне  $(5-17) \cdot 10^{-3}$  м/с, что в 5–7 раз больше скорости механической резки при экономии материала за счет отсутствия отходов до (20–25)%; установлены закономерности лазерной резки алмаза с учётом спектральной селективности, заключающиеся в последовательной смене механизмов разделения материала при лазерном облучении: абляция (при 266 нм), фазовый переход графита второго рода (при 532 нм) и рекристаллизация (при 1064 нм); получены закономерности формирования непрерывного канала лазерной каталитической термодиффузии, обеспечивающие скорость перехода углерода из фазы алмаза в газовую до  $1,8 \cdot 10^{-10}$  кг/(м $^2$ ·с).

**Рекомендации по использованию и область применения:** в электронной промышленности при лазерном формировании компонентов электронной техники в производстве фотошаблонов, резонаторов, теплоотводов и других изделий.

## SUMMARY

Sharshnev Yauheni Borisovich

### **Laser technology for producing electronic components from amorphous and crystalline materials**

**Keywords:** laser radiation, thermal cleaving, simulation, crystalline quartz, amorphous quartz, diamond, phototemplates, resonators.

**Purpose of work:** to provide a comprehensive solution to the problem of creating components of electronic products using amorphous and crystalline quartz, multi-component glass, synthetic and natural diamonds, with the aim of minimizing the labor-intensive nature of their production process through the advancement and implementation of laser-based technological procedures and equipment.

**Research methods:** numerical and analytical methods for solving problems of thermoelasticity and heat-mass transfer; profilographic method for studying surface roughness; full factor experiment method; laser processing installations; non-contact and contact AFM methods; cathodoluminescence and EPR spectroscopy.

**Results and scientific novelty:** a method of two-beam laser enrichment of quartz raw materials for particles with a fractional composition from  $(0.1-4.0) \cdot 10^{-4}$  m has been developed; a phenomenological model of laser controlled thermal cleaving of quartz has been developed, which enables the calculation of a stress intensity factor greater than the critical value of  $0.7 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ; the controlled thermal cleaving modes of amorphous and crystalline quartz have been established and the controlled thermal cleaving speed has been determined for different crystallographic directions within the range of  $(5-17) \cdot 10^{-3}$  m/s, which is 5–7 times greater than mechanical cutting, while also reducing material waste by up to (20–25)%; the regularities of diamond laser cutting in terms of spectral selectivity have been established, which consist in the successive change of the material separation mechanisms under laser irradiation: ablation (at 266 nm), second-order graphite phase transition (at 532 nm) and recrystallization (at 1064 nm); the regularities of creating a continuous channel of laser catalytic thermal diffusion providing the carbon transition rate from the diamond phase to the gas phase up to  $1.8 \cdot 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  have been obtained.

**Recommended application areas:** in the electronics industry when implementing laser processing technologies to produce various electronic components such as phototemplates, resonators, heat sinks, and other related items.

*Научное издание*

**Шершне** Евгений Борисович

**ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ  
ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ИЗ АМОРФНЫХ  
И КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

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

Подписано в печать **05.01.2024**. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. **2,50**. Уч. изд. л. **2,5**. Тираж 60. Заказ **240**.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/ 238 от 24.03.2014,

№ 2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск