

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Шершнева Евгения Борисовича

### **«Лазерная технология формирования компонентов электронной техники из аморфных и кристаллических материалов»,**

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники

#### **1. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представлена к защите**

Содержание диссертации соответствует технической отрасли наук и паспорту специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники, утвержденному приказом ВАК Республики Беларусь от 12.12.2016 № 313, в следующих пунктах раздела III (области исследований):

п. III.3. Исследование элементного состава кристаллов и слоев, их кристаллической структуры и микроструктуры;

п. III.4. Исследование электрических, магнитных, оптических, теплофизических свойств материалов и слоев;

п. III.5. Исследование взаимодействия материалов, пленок и гетероструктур с электромагнитным излучением;

п. III.8. Моделирование, расчет и проектирование технологического оборудования, методы анализа и синтеза оборудования и его узлов.

#### **2. Актуальность темы диссертации**

В диссертации представлены разработки, направленные на повышение качества обработки поверхности аморфного и кристаллического кварца, многокомпонентного силикатного стекла, природного и искусственного алмаза и снижения безвозвратных потерь дорогостоящего сырья. Установлены технологические особенности лазерной и термохимической обработки указанных материалов. Такие исследования являются актуальными для оптимизации технологических процессов формирования компонентов при производстве изделий электронной техники, таких как: активные элементы кварцевых резонаторов, теплоотводов, преобразователей ультрафиолетового излучения, подложек для эпитаксиального наращивания полупроводниковых монокристаллических слоёв для СВЧ-транзисторов.

### **3. Степень новизны результатов диссертации и научных положений, выносимых на защиту**

Все результаты и научные положения, выносимые на защиту, обладают научной и практической новизной. К их числу следует отнести следующие.

1. В технологиях обработки аморфного кварца разработаны процессы лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ), лазерных полировки и сварки изделий. Разработана математическая модель процесса ЛУТ стекла, которая дает возможность производить расчеты температурных полей и термоупругих напряжений, возникающих в процессе термораскалывания аморфного кварца и стеклянных трубок. Результаты моделирования подтверждены экспериментально при использовании лазерного излучения 1,06 мкм и 10,6 мкм при учёте его спектральной селективности. Установлен механизм зарождения и развития трещины в стекле под действием лазерного излучения с учётом зависимостей теплофизических свойств аморфного кварца от температуры. Выявлено, что двухлучевые лазерные технологии термораскалывания и сварки позволяют увеличить глубину проплавления и производительность на 25 % по сравнению с традиционными однолучевыми лазерными методами.

2. В процессах обработки кристаллического кварца установлены закономерности лазерного обогащения кварцевого сырья, а именно: предложены новые способ и установка с использованием в качестве второго источника полихроматического излучения. Проведены расчёты и подтверждены экспериментально условия ЛУТ кристаллического кварца. Разработана технология, позволяющая увеличить производительность процесса изготовления активных элементов кварцевых резонаторов за счёт увеличения скорости по сравнению с механическими методами резки в 5–7 раз.

3. Выполнено компьютерное моделирование, и экспериментально подтверждены закономерности процессов лазерной резки кристаллов искусственных и природных алмазов излучением ближнего инфракрасного, видимого и ультрафиолетового диапазонов. Наибольших значений термоупругие напряжения достигают при обработке алмаза лазерным излучением с длинами волн 532· и 266·нм, и соответственно равны 129 и 126 МПа в случае напряжений растяжения, 140 и 145 МПа – в случае напряжений сжатия. Показано, что наименьшие термоупругие напряжения достигаются при длине волны 1,06 мкм, поэтому процесс лазерной резки происходит в условиях предварительной графитизации и должен проводиться с учетом анизотропной теплопроводности графита и температурной зависимости теплофизических параметров посредством сканирования и перефокусировки лазерного излучения и послойного удаления материала толщиной  $(4-6) \cdot 10^{-4}$  м.



4. Численными методами в трехмерной постановке решены задачи теплопроводности двухслойной системы «графит – алмаз» и тепломассопереноса трехслойной системы «водород – металл – алмаз» с учетом температурных зависимостей теплофизических свойств и коэффициентов диффузии. Установлен существенно нестационарный характер распространения тепла и массы в системе «водород – металл – алмаз» при термохимической обработке с лазерным ассистированием. Это позволяет управлять процессом термохимической обработки при создании непрерывного канала термодиффузии в процессе формирования топологии на компонентах высокотемпературной твердотельной 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  $(10-30) \cdot 10^{-6}$  м.

Полученные в диссертации новые научные результаты и положения, выносимые на защиту, представляют собой логически связанную и обоснованную методологию формирования лазерной обработкой компонентов электронной техники из материалов с высокой твердостью, которые применены в микроэлектронном производстве. Новизна конструктивных и технологических решений подтверждена полученными патентами на изобретения и полезные модели.

#### **4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Выводы и рекомендации, представленные в диссертации, обоснованы использованием известного математического аппарата: аналитическое решение задачи теплопроводности, в том числе с использованием метода функций Грина, программно-реализованного метода конечных элементов и численных методов решения систем дифференциальных уравнений. Достоверность результатов математического моделирования процессов лазерного управляемого термораскалывания, резки, сварки и полировки материалов электронной техники подтверждена экспериментально. Результаты диссертации используются в технологиях обработки аморфного и кристаллического кварца, многокомпонентного силикатного стекла, природных и синтетических алмазов.

#### **5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию**

Научная значимость результатов диссертации заключается в получении новых знаний о закономерностях технологий лазерной обработки

кварца и алмазов, таких как: двухволновые технологии обогащения кварцевого сырья, лазерного управляемого термораскалывания аморфного и кристаллического кварца, технология резки природных и синтетических алмазов испарением материала и лазерное термохимическое формообразование поверхности алмаза. Разработаны математические модели лазерного воздействия на указанные материалы с учетом температурных зависимостей теплофизических свойств материала и анизотропных свойств образующегося при этом графита, установлены оптимальные параметры обработки. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены закономерности процесса резки алмаза лазерным излучением с длинами волн 266, 532 и 1064 нм.

Установлены закономерности лазерного управляемого термораскалывания аморфного кварца для фотошаблонов, заключающегося в предварительном воздействии нагрева и охлаждения и относительном перемещении лазерного пучка и кварцевого стекла вдоль линии термораскалывания, в результате которого образуется зона остаточных термоупругих напряжений. Установлены технологические режимы лазерного управляемого термораскалывания кристаллического кварца в различных направлениях относительно главной оптической оси кристалла, обеспечивающие формирование термоупругих напряжений  $(30-40) \cdot \text{МПа}$  в направлении, параллельном оси симметрии третьего порядка при удельном энергокладе  $(0,25-0,32) \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3$ , а в направлении, когда рез перпендикулярен оси симметрии третьего порядка, –  $(0,53-0,71) \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3$ , и  $(0,60-0,85) \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3$  в случае, если рез находится в плоскости, параллельной оси симметрии третьего порядка, при мощности лазерного излучения 30 Вт и скорости лазерного управляемого термораскалывания в зависимости от направления в диапазоне  $(5-17) \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ , что в 5–7 раз превосходит скорость механической резки кристаллического кварца при экономии материала за счет отсутствия отходов на  $(20-25) \%$ .

**Практическая значимость** заключается в том, что технология обогащения кварцевого сырья обеспечивает снижение содержания примесей в 2,5–3,0 раза. Разработанная технология лазерного управляемого термораскалывания кристаллического кварца для компонентов твердотельной электроники в производстве кварцевых резонаторов обеспечивает увеличение скорости резки в 5–7 раз. В процессах лазерной резки кристаллов алмаза установлены закономерности, обусловленные анизотропией тепловых свойств в зависимости от выбора кристаллографических осей симметрии. Показано, что термоупругие микромеханические напряжения вдоль осей симметрии второго, третьего и четвертого порядков возрастают на 18, 45, 14 % соответственно, что



позволяет прогнозировать появление критических микронапряжений, которые приводят к разрушению и безвозвратным потерям кристаллов в технологиях производства изделий микроэлектроники.

**Экономическая значимость** состоит во внедрении результатов работы на ведущих промышленных предприятиях: ОАО Гомельское ПО «Кристалл» – управляющая компания холдинга «Кристалл-Холдинг», ОАО «Коралл» в производстве изделий из аморфного и кристаллического кварца, природных и синтетических алмазов. При этом стоимость продукции, выпущенной с использованием результатов диссертации, составляет более 11 млн. белорусских рублей, что подтверждается актами использования результатов диссертации в промышленности.

**Социальная значимость** результатов диссертации состоит в повышении конкурентоспособности продукции и экспортного потенциала соответствующих белорусских предприятий. Результаты диссертации могут быть рекомендованы к использованию организациями, занимающимися производством субмикронных интегральных микросхем, активных элементов кварцевых резонаторов, теплоотводов для высокотемпературной электроники, теплоотводящих оснований для изделий высокотемпературной электронной техники, звукопроводов акустоэлектронных устройств. Кроме того, результаты диссертации используются при подготовке специалистов в области радиофизики и микроэлектроники, что подтверждается соответствующими актами.

## **6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати**

По результатам выполненных и представленных в диссертации исследований опубликованы 76 научных печатных работ из них: 2 монографии в соавторстве, 38 статей объемом 16,5 авторских листа, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий ВАК, 8 статей в других рецензируемых журналах, 6 статей в материалах международных конференций, 22 материала тезисов докладов на международных научно-технических конференциях.

Получены 3 патента Российской Федерации, 25 патентов Республики Беларусь.

Все положения диссертации, выносимые на защиту, а также разделы диссертации и автореферата отражены в опубликованных материалах.

## **7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК**

Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям Инструкции о порядке оформления диссертации, диссертации в виде

научного доклада, автореферата диссертации и публикаций по теме диссертации.

Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы, выводам и положениям, которые выносятся на защиту.

## 8. Замечания и предложения по диссертации

1. Не корректно использование обозначения оси  $L_4$  без расшифровки в тексте п. 3 научной новизны диссертации. В тексте диссертации часто используются узкоспециализированные термины и характеристики процессов и материалов, например, «коэффициент интенсивности напряжений», «термическая нагрузка», «температурные коэффициенты удельной теплоёмкости и теплопроводности».

2. Главу 3 следовало бы разделить на 2 главы: отдельно по лазерному обогащению (не совсем удачное словосочетание) кварцевого сырья и лазерному управляемому термораскалыванию кварца, и лазерной полировке аморфного кварца и двухлучевой лазерной сварке изделий из аморфного кварца.

3. В диссертации в гл. 4 нет чёткого разграничения между терминами «термораскалывание стекла», «резка стекла» и «лазерное управляемое термораскалывание кварца». Следовало бы унифицировать терминологию, либо дать чёткие определения, если это отдельные процессы, а не частные случаи одного и того же механизма разделения материалов.

4. В защищаемом положении 5 и в гл. 5 диссертации речь идёт об исследовании закономерностей резки алмаза лазерным излучением ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной области спектра, однако представлены результаты и не обоснованы исследования только для трёх длин волн: 266, 532 и 1064 нм.

5. В диссертации встречаются неудачные выражения «Компьютерное обеспечение...» с. 75, «...вполне удовлетворительные оценки...» с. 88, «...более точными...более точно» с. 90, «...получено 10 случаев для проведения расчетов...» с. 102, 104, 106, 107, «...точечного касания механизма нанесения дефекта...» с. 120, «...формирование температур в заданном диапазоне...» с. 130, «...наличие снижение его прочности...» с. 157.

6. В диссертации из-за мелкого шрифта обозначений осей трудно воспринимаются рисунки 3.6 - с. 64, 3.12 - с. 67, 3.18а - с.75, 3.24, 3.25 - с. 87, 3.50 - с. 113, 4.13 - с.160. Отсутствует расшифровка обозначений  $\rho_{рт}$  на с. 77 и формуле 4.2 на с. 166, с. 231, табл. 5.3 – нет ссылки на её данные в тексте.

7. Не корректно обозначать одни и те же параметры разными буквами:  $V$  – скорость относительного перемещения, с. 6, но этот же параметр



обозначен как  $v$  на с. 71, 91, 93, 109, 121, 127, 129, 143, 147. Параметр температура на графиках обозначен как  $T$ ,  $K$ , (с. 94 рис. 3.32, с. 116 рис. 3.52, с. 124 рис. 3.56, с. 137 - 139 рис. 3.71 - 3.73, с. 143, 144 табл. 3.19 - 3.21), но на рис. 3.66 - 3.69, с. 134 - 136, с. 229 температура -  $t, ^\circ C$  (в тексте и на кривых зависимостей  $t$ , с – время, с. 64 - 66, 91, 92, 94 – 97, 125, 126, 155, 161, 168 - 170), а на с. 165 символ  $T$  обозначает период, на с. 187 табл. 5.1 –  $T$ , %.

Замечания не затрагивают защищаемых положений и выводов, представленных в диссертации, и не снижают научной, практической, экономической и социальной значимостей полученных результатов.

## **9. Соответствие научной квалификации соискателя учёной степени, на которую он претендует**

По совокупности представленных достоверных и научно обоснованных результатов, подтвержденных научными публикациями в журналах высокого научного уровня и материалами докладов по теме диссертации на научных конференциях, использованных методов исследования и адекватной интерпретации полученных результатов, можно сделать вывод о том, что соискатель Шершнев Е.Б. соответствует научной квалификации доктора технических наук по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники.

## **10. Заключение**

Диссертация Шершнева Евгения Борисовича является законченной квалификационной научной работой, подготовленной соискателем самостоятельно (научный консультант – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, главный специалист по науке научно-технического управления ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» Емельянов В.А.), которая содержит новые научно-обоснованные результаты, совокупность которых является существенным вкладом в развитие технологий и оборудования для производства приборов электронной техники, и соответствует требованиям пункта 21 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий. Содержание диссертационной работы полностью соответствует отрасли технических наук по профилю специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники.

Считаю, что Шершнев Евгений Борисович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники за решение актуальных научно-технических и прикладных задач по разработке новых методов применения лазерного излучения при создании компонентов электронной техники из материалов с высокой твёрдостью, включающих:

– разработку феноменологической модели лазерного управляемого термораскалывания аморфного кварца 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 с длинами волн 10,6 мкм и 1,06 мкм соответственно, с учетом объемного поглощения и теплоотдачи с поверхности;

- 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 повышение скорости разделения материала в 5–7 раз и его экономию до (20–25) % за счет снижения отходов;

- выявленную закономерность процесса лазерной резки кристаллов алмаза, заключающуюся в учете анизотропии тепловых свойств кристаллов за счет образования слоя графита и установлении 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;

- предложенную нестационарную трехмерную нелинейную математическую модель лазерной резки кристаллов алмаза в квазинепрерывном режиме работы с длиной волны 1064 нм и частотой следования импульсов 3–7 кГц посредством сканирования и перефокусировки лазерного излучения и послойного удаления материала с учетом его температурных зависимостей, анизотропных свойств образующегося в процессе воздействия излучения графита;

- установленные закономерности резки алмаза ультрафиолетовым, видимым и инфракрасным лазерным излучением с длинами волн 266, 532 и 1064 нм, которые заключаются 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



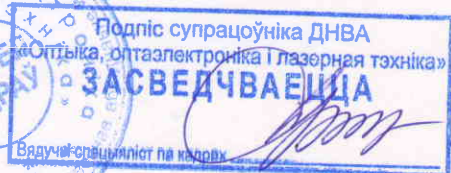
материала в зоне лазерного воздействия без наличия сколов за счет поглощения излучения в поверхностном слое, в отличие от объемного характера поглощения лазерного излучения с длинами волн 532 и 1064 нм, что вызывает изменение показателя преломления и дефокусировку излучения с образованием графитизированного слоя;

- предложенную нестационарную трехмерную нелинейную математическую модель тепломассопереноса в системе «водород – металл – алмаз», учитывающую 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.

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий лабораторией  
микро- и наносенсорики  
Государственного  
научно-производственного  
объединения «Оптика, оптоэлектроника  
и лазерная техника»

Н.И. Мухуров

*Н.И. Мухуров*  
15.01.2024г.



*С.В. Фрокопен*