

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.

Диссертация **Шершнева** Евгения Борисовича «Формирование элементов твердотельной электроники из материалов с высокой твёрдостью лазерной технологией», посвящена исследованиям по воздействию лазерного излучения на синтетические и природные алмазы, на аморфный и кристаллический кварц и разработке модели для описания процессов лазерного воздействия на материалы с учетом температурных зависимостей теплофизических свойств материалов и установлению технологических характеристик процесса воздействия лазерного излучения.

В процессе выполнения работы изучены процессы лазерного управляемого термораскалывания аморфного и кристаллического кварца, синтетических и природных алмазов, а также лазерной полировки кварцевого стекла непрерывным излучением CO₂-лазера. Разработана математическая модель лазерной резки кристаллов алмаза для элементов твердотельной высокотемпературной электроники излучением квазинепрерывного неодимового лазера с варьируемой частотой следования импульсов посредством сканирования и перефокусировки лазерного излучения и послойного удаления материала толщиной с учетом температурных зависимостей теплофизических свойств материала. Детальный анализ содержания диссертации, а также использованных методов позволяет заключить, что диссертация соответствует пунктам 3.3, 3.4, 3.5 паспорта специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники, отрасли наук – технические.

2. Актуальность темы диссертации.

В настоящее время разработка и создание современных приборов, устройств и технологических процессов их создания невозможно без использования микроэлектронных устройств. В связи с этим разработке современных конкурентоспособных микроэлектронных устройств в нашей стране уделяется самое серьезное внимание, в том числе и с учетом того, что в нашей стране сохранились предприятия и коллективы способные решать эту проблему. При изготовлении изделий микроэлектроники среди наиболее используемых материалов является кварц, как в кристаллической, так и в

аморфной модификациях, а также кристаллический алмаз для элементов твердотельной высокотемпературной электроники. Эти материалы являются материалами высокой твердости в связи с чем для формирования элементов твердотельной электроники из этих материалов наиболее перспективными являются технологии, основанные на использовании лазерного излучения. Разработке лазерных технологий для создания изделий микроэлектроники из материалов высокой твердости посвящена диссертационная работа Шершнева Е.Б. и с точки зрения вышеизложенного тема диссертации является, безусловно, актуальной.

3. Степень новизны результатов, полученных в диссертации и научных положений, выносимых на защиту. В диссертационной работе проведена разработка новых лазерных технологических процессов и оборудования для обработки с использованием лазерного излучения материалов высокой твердости (синтетические и природные алмазы, аморфный и кристаллический кварц) и получен ряд новых научных результатов.

Приведем некоторые из них:

1. Выполнено компьютерное моделирование процессов взаимодействия лазерного излучения для разных длин волн, включающих излучение СО₂-лазера и основной частоты и гармоник неодимового лазера при воздействии на кварцевое стекло и кристаллы алмаза.

2. На основании численных расчетов определены параметры излучения СО₂-лазера, при которых достигается температура плавления кварцевого стекла и обеспечивается полировка его поверхности. Определены условия, при которых возможно производить сварку кварцевых материалов различной толщины.

3. Выполнено компьютерное моделирование процесса лазерной обработки кристаллов алмазов под действием основной частоты неодимового лазера и его гармоник. Выполнена оценка значений напряжения, которые достигаются при обработке алмаза лазерным излучением второй и третьей гармониками излучения лазера.

4. Выполнено компьютерное моделирование процесса формирования лунок при обработке кристаллов алмазов под действием второй гармоники лазерного излучения неодимового лазера.

5. Экспериментально установлены режимы и величины плотности энергии для лазерного управляемого термораскалывания кристаллического кварца для элементов твердотельной электроники непрерывным лазерным излучением с длиной волны СО₂ для различных направлений линий реза относительно главной оптической оси кристалла, обеспечивающие формирование требуемых термоупругих напряжений $(30 - 40) \cdot 10^6$ Па.

6. Выполненные эксперименты по изучению резки алмаза излучением основной частоты неодимового лазера и его второй и третьей гармоники показали, что при воздействии излучением третьей гармоники происходит удаление материала в зоне лазерного воздействия без наличия сколов за счет поглощения излучения в поверхностном слое, в отличие от

объемного характера поглощения при воздействии излучением основной частоты неодимового лазера и его второй гармоники где происходит изменение показателя преломления и дефокусировка излучения с образованием графитизированного слоя.

4. Обоснованность и достоверность основных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Основные выводы сформулированы на основании анализа богатого экспериментального материала. Важной особенностью диссертационной работы **Шершнева Е. Б.** является то, что в ней, все основные выводы и заключения сделаны на основе анализа широкого комплекса проведенных расчетов и измерений: компьютерное моделирование процессов взаимодействия лазерного излучения разных длин с материалами высокой твердости включающими кварц, как в кристаллической, так и в аморфной модификациях, а также синтетические и природные алмазы для элементов твердотельной высокотемпературной электроники. Проведены экспериментальные исследования взаимодействия излучения различных лазерных источников – СО₂-лазера и основной частоты и гармоник неодимового лазера при варьировании параметров данных лазерных источников. На основании проведенных экспериментов определены параметры лазерных источников, при которых достигается требуемый эффект – полировка, сварка или разрезание материалов. Отдельные результаты подтверждены сопоставлением с результатами расчетов и имеющимися литературными данными.

Такой широкий набор методов исследования позволил обеспечить необходимую глубину проработки и в значительной степени предопределяет **обоснованность и достоверность** результатов и выводов, сформулированных в диссертации.

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

Научная значимость рассматриваемой диссертации заключается в том, в результате проведенных расчетов по взаимодействию лазерного излучения с материалами высокой твердости включающими кварц, как в кристаллической, так и в аморфной модификациях, а также синтетические и природные алмазы для элементов твердотельной высокотемпературной и проведенных экспериментов по воздействию на эти материалы излучения различных лазерных источников – СО₂-лазера и основной частоты и гармоник неодимового лазера при варьировании параметров данных лазерных источников определены параметры лазерных источников, при которых достигается требуемый эффект – полировка, сварка или разрезание материалов. Именно эти процессы происходят при разработке элементов микроэлектроники. Тем самым можно считать что в диссертационной работе выполнена разработка лазерных технологий для создания элементов микроэлектроники.

Практическая и экономическая значимость результатов исследований заключается в том, что результаты диссертационной работы внедрены на предприятии ОАО «Коралл» в производстве изделий из аморфного и кристаллического кварца, а разработанная типовая технологическая операция распиливания алмаза использована на ОАО Гомельское ПО «Кристалл» – управляющая компания холдинга «Кристалл-Холдинг».

Социальная значимость заключается в использовании полученных результатов в учебном процессе 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 для подготовки высококвалифицированных специалистов.

6. Опубликованность результатов диссертации.

Основные результаты работы опубликованы в 104 научных работах, из которых 2 монографии, 38 статей в научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, 7 статей в других научных изданиях, 7 статей в сборниках материалов научных конференций, 22 статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций и 28 патентов, из них 3 патента Российской Федерации и 25 патентов Республики Беларусь.

Среди журналов, в которых публиковались материалы, можно отметить такие авторитетные журналы, как «Оптический журнал», «Кристаллография», «High Temperature Material Processes», «Проблемы физики, математики и техники» и др. Материалы докладывались на самых авторитетных и представительных конференциях и совещаниях и хорошо известны научной общественности.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с требованиями ВАК. Диссертационная работа состоит из «Перечня сокращений и условных обозначений», «Введения», «Общей характеристики работы», 5-и глав, «Заключения», «Библиографического списка». Полный объем диссертации составляет 286 страниц, в т.ч. 154 рисунка на 48 страницах, 32 таблицы на 11 страницах и 10 приложений на 11 страницах. Материал диссертации в соответствии с логикой построения излагается последовательно. Во введении изложены обоснование темы диссертации и перечислены задачи, подлежащие решению для достижения поставленной цели. В первой главе диссертации содержится обзор литературы по теме исследований. Последующие главы посвящены изложению результатов исследования.

Научный уровень изложения материала достаточно высок и показывает, что автор хорошо ориентируется в рассматриваемом научном материале. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

8. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.

Анализ содержания диссертационной работы, уровня представления и обсуждения результатов позволяет заключить, что автор глубоко владеет современными методами расчетов и экспериментальными исследованиями процессов взаимодействия лазерного излучения разных длин с материалами высокой твердости включающими кварц, как в кристаллической, так и в аморфной модификациях, а также синтетические и природные алмазы для элементов твердотельной высокотемпературной электроники.

Изложение экспериментального материала и его обсуждение ведется на высоком уровне, доказательно и аргументировано, что в совокупности свидетельствует как о *достоверности* результатов и выводов диссертации, так и о *соответствии квалификации соискателя искомой ученой степени доктора технических наук*. Об этом же свидетельствует высокий уровень и количество публикаций автора в высокорейтинговых рецензируемых журналах, доклады на авторитетных конференциях, а также его участие в выполнении ряда проектов государственных программ научных исследований и международных грантов.

Оценивая диссертацию в целом положительно, следует сделать некоторые замечания:

1. Вызывает сомнение корректность фразы «Экспериментально установлены режимы лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ) кристаллического кварца и определена скорость ЛУТ в зависимости от 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 $(20 - 25) \%$;» (стр. 45 автореферата). Непонятно исходя из каких значений скорости механической резки кристаллического кварца сделано такое заключение. Ведь скорость механической резки может существенно зависеть от используемого инструмента и методики.

2. В пункте 1 научной новизны приводится значение радиуса лазерного пучка. Лазерные пучки по сечению не бывают прямоугольными. Поэтому их ширину можно оценивать, как например и ширину спектральных линий, по уровню например половинной интенсивности или $1/e$.

3. В защищаемом положении 5 приводится фраза «в случае лазерного излучения с длиной волны $266 \cdot 10^{-9}$ м происходит удаление материала в зоне лазерного воздействия без наличия сколов за счет поглощения излучения в поверхностном слое, в отличие от объемного характера поглощения при длинах волн $532 \cdot 10^{-9}$ м и $1064 \cdot 10^{-9}$ м, где происходит изменение показателя преломления и дефокусировка излучения с образованием графитизированного слоя». Было бы уместно привести сравнение коэффициентов поглощения на данных длинах волн излучения.

4. Автор не избежал стилистических погрешностей. Приведем некоторые:

Под рисунками (**Рис 5.31, 5. 32**) подписи - *Спектры природных алмазов, содержащих центры катодолюминесценции НЗ* . На самом деле это спектры катодолюминесценции. Такая подпись имеется на рис. 5.33 – Спектры КЛ природных алмазов: сплошная линия –расколовшегося, пунктирная – не расколовшегося при лазерной резке

По разному можно прочесть информацию на Рисунке 3.51 – Зависимости глубины микротрещины от скорости термораскалывания для боросиликатного (1) и кварцевого стекл с применением хладагента (2) и без применения хладагента (3). А борносиликатное с применением или без применения хладоагента??

Рис 5.31, 5. 32. *Спектры природных алмазов, содержащих центры катодолюминесценции НЗ* . На самом деле это спектры катодолюминесценции. Можно также указать, приводить значения относительных единиц для разных образцов, поскольку интенсивность может зависеть от условий эксперимента. Наиболее информативным является распределение по длинам волн.

На рис. 5.35 на оси ординат есть значение -200? Хотя понятно , что интенсивность может изменяться от 0 до каких то значений.

9. Заключение.

Сделанные замечания относятся к отдельным результатам и, принимая во внимание всю совокупность результатов, можно заключить, что диссертация **Шершнева Е.Б.** удовлетворяет всем требованиям ВАК Беларуси, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук. Автору диссертации **Шершневу Е.Б.** следует присудить искомую ученую степень по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники за:

- за разработку модели процессов взаимодействия лазерного излучения для разных длин волн, включающих излучение СО₂-лазера и основной частоты и гармоник неодимового лазера при воздействии на кварцевое стекло и кристаллы алмаза и численных расчеты параметры излучения, при которых достигается температура плавления кварцевого стекла и обеспечивается полировка его поверхности;

- за установление режима и величины плотности энергии для лазерного управляемого термораскалывания кристаллического кварца для элементов твердотельной электроники непрерывным лазерным излучением с длиной волны СО₂ для различных направлений линий реза относительно главной оптической оси кристалла, обеспечивающие формирование требуемых термоупругих напряжений $(30 - 40) \cdot 10^6$ Па;

- за разработку технологии обогащения кварцевого сырья, обеспечивающей снижение содержания примесей в 2,5 – 3 раза и лазерного управляемого термораскалывания кристаллического кварца для элементов

твердотельной электроники в производстве кварцевых резонаторов, типовой технологической операции распиливания алмаза, и технология лазерной групповой обработки алмазов внедренные в промышленное производство на предприятиях ОАО «Коралл» и ОАО Гомельское ПО «Кристалл» и обеспечивающие высокий экономический эффект;

- за экспериментальное установление параметров резки алмаза излучением основной частоты неодимового лазера и его второй и третьей гармоник и интерпретацию результатов лазерного воздействия и обработки поверхностных и глубинных слоев материалов.

Результаты исследования рекомендуется использовать в электронной промышленности в технологиях лазерной обработки, а именно резки, термораскалывания, сварки и размерной обработки поверхности изделий электронной техники алмазов и других материалов с высокой твердостью.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию и цитируемым в ней публикациям.

Официальный оппонент:
профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии БГУ

доктор физ.-мат. наук, профессор



Е.С. Воропай

