

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор  
ГО «Научно-практический центр  
НАН Беларуси по  
материаловедению»,  
доктор физико-математических  
наук, член-корреспондент  
НАН Беларуси

В. М. Федосюк

«08» 02 2024 г.

### ОТЗЫВ

оппонирующей организации на диссертацию  
Шершнева Евгения Борисовича на тему  
«Лазерная технология формирования компонентов электронной техники из  
аморфных и кристаллических материалов»,  
представленной на соискание ученой степени доктора технических  
наук по специальности  
05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников,  
материалов и приборов электронной техники

Экспертиза диссертации и автореферата Шершнева Е.Б. проводилась в соответствии с требованиями Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, утвержденного Указом Президента Республики Беларусь от 17.11.2004 № 560 (в ред. Указа Президента Республики Беларусь от 02.06.2022 № 190), и Положения о совете по защите диссертаций, утвержденного постановлением Высшей аттестационной комиссии Республика Беларусь от 22.02.2005 № 19 (в ред. постановления ВАК от 19.08.2022 № 2).

#### **Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки**

Диссертация, посвящена комплексному решению проблемы снижения трудоемкости производства на основе разработки и внедрения лазерных технологических процессов и оборудования при формировании компонентов электронной техники. Рассмотрены процессы лазерной обработки аморфного и кристаллического кварца, используемого в производстве прецизионных фотошаблонов, активных элементов кварцевых резонаторов, вакуумных электронно-лучевых трубок. Также рассматриваются процессы, протекающие при воздействии лазерного излучения на искусственные и природные алмазы, которые применяются в производстве изделий для высокотемпературной электроники, а именно: теплоотводов, преобразователей ультрафиолетового излучения, подложек для

эпитаксиального наращивания полупроводниковых монокристаллических слоёв для СВЧ-транзисторов, оптических окон для источников мощного излучения. Кроме того, представлены исследования лазерных термохимических реакций для прецизионной модификации поверхности алмаза.

Тематика диссертационных исследований Шершнева Е.Б. соответствует отрасли науки – технические науки по профилю специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники, которая ориентирована на разработку новых и совершенствование существующих видов технологического оборудования и технологических сред для производства материалов, приборов и компонентов электронной техники.

Содержание диссертации соответствует паспорту указанной специальности, утвержденному приказом ВАК Республики Беларусь от 12.12.2016 № 313, в следующих частях:

- исследование элементного состава кристаллов и слоев, их кристаллической структуры и микроструктуры (из пункта 3.3);
- исследование электрических, магнитных, оптических, теплофизических свойств материалов и слоев (из пункта 3.4);
- исследование взаимодействия материалов, пленок и гетероструктур с электромагнитным излучением (из пункта 3.5);
- моделирование, расчет и проектирование технологического оборудования, методы анализа и синтеза оборудования и его узлов (из пункта 3.8);
- оборудование для разделения полупроводниковых пластин, микромонтажа кристаллов и герметизации интегральных микросхем (из пункта 3.11).

#### **Научный вклад соискателя в разработку научной проблемы с оценкой его значимости**

В диссертации обобщены результаты работ, выполненных непосредственно Шершневым Е.Б. и направленных на разработку актуальной научной проблемы, которая заключается в разработке лазерных технологий, а именно: обогащения кварцевого сырья, управляемого термораскалывания, полировки и сварки аморфного и кристаллического кварца, термораскалывания вакуумного стекла, разделения и формообразования синтетических и природных алмазов методами непосредственного испарения и термохимической модификации материала.

Научный вклад соискателя заключался в определении направления и постановке задач исследования, выборе и разработке методов формирования и изучения свойств исследуемых материалов для электронной техники, анализе полученных результатов. Под руководством Шершнева Е.Б., и при его непосредственном участии выполнены основные экспериментальные

исследования, разработаны математические модели технологических процессов.

Научный вклад Шершнева Е.Б. заключается в определении технологических параметров и расчёте технологических режимов методами математического моделирования лазерных полировки и сварки кварцевого стекла, лазерного обогащения кварцевого сырья, лазерного управляемого термораскалывания кристаллического кварца, лазерной резки алмаза и лазерного термохимического формообразования.

Высокая значимость научного вклада соискателя подтверждается 76 научными печатными работами, из которых: 2 монографии в соавторстве, 38 статей, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, утвержденного Указом Президента Республики Беларусь от 17.11.2004 № 560 (в ред. Указа Президента Республики Беларусь от 02.06.2022 №190), 8 статей в других рецензируемых журналах, 6 статей в материалах международных конференций, 22 тезиса докладов на международных научно-технических конференциях, 3 патента Российской Федерации, 25 патентов Республики Беларусь.

#### **Конкретные научные результаты, за которые соискателю может быть присуждена искомая ученая степень**

Диссертация Шершнева Е.Б. представляет собой комплексное исследование, логически законченное и выполненное на высоком научном уровне с применением современных экспериментальных и теоретических методов.

Исходя из анализа содержания диссертационной работы, можно сделать общий вывод о том, что соискатель Шершнев Е.Б. заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук за научные и теоретически обоснованные научно-технические результаты в технологических процессах производства элементов электронной техники из синтетических и природных алмазов, аморфного и кристаллического кварца и кварцевого стекла с использованием параметрически оптимизированного лазерного излучения, а именно: термораскалывания кварцевого стекла, полировке поверхности и сварке деталей, формообразования методом графитизации и управления топологией поверхности алмаза лазерным термохимическим методом.

Среди конкретных научных результатов, полученных Шершневым Е.Б. впервые, важно отметить следующие:

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 400 нм 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  $1,06 \cdot 10^{-6}$  м с энерговкладом  $(1,4 - 5,2) \cdot 10^9$  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 элементов электронной техники из аморфного кварца.

2. Определены режимы двухлучевой суперпозиционной лазерной сварки аморфного кварца, где 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  $V = (2,8 - 3,2) \cdot 10^{-3}$  м/с, радиус первого лазерного пучка  $r_1 = (1,15 - 1,35) \cdot 10^{-3}$  м, радиус второго лазерного пучка  $r_2 = (1,4 - 1,6) \cdot 10^{-3}$  м, мощность первого лазерного пучка  $P_1 = 32 - 38$  Вт и мощность второго лазерного пучка  $P_2 = 33 - 37$  Вт.

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 направлении. 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.

4. В рамках линейной механики разрушения показано, что условием роста термоиндуцированной трещины являются растягивающие напряжения в её вершине, при этом расчетный коэффициент интенсивности напряжений должен превышать критический коэффициент интенсивности напряжений  $0,7 \cdot 10^6$  Па·м<sup>1/2</sup>. Длина стартового дефекта определяет величину и коэффициенты интенсивности термоупругих напряжений. В частности, при длине стартового дефекта  $L = (0,75 - 1,5) \cdot 10^{-3}$  м максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений составляют  $K_I = (0,79 - 0,94) \cdot 10^6$  Па·м<sup>1/2</sup>, что выше критического, при скорости обработки  $15 \cdot 10^{-3}$  м/с.

5. Установлены закономерности лазерной резки кристаллов алмаза, обусловленные анизотропией тепловых свойств в зависимости от выбора кристаллографических осей симметрии. Показано, что термоупругие микромеханические напряжения вдоль осей симметрии второго, третьего и четвёртого 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.

6. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены закономерности резки алмаза лазерным излучением с длинами волн 266, 532 и  $1064 \cdot 10^{-9}$  м. Показано, что при энергии импульса  $(15 - 20) \cdot 10^{-3}$  Дж в случае лазерного излучения с длиной волны  $266 \cdot 10^{-9}$  м происходит удаление алмаза с наименьшими разрушениями поверхности. При воздействии лазерного излучения длины волны  $532 \cdot 10^{-9}$  м увеличивается коэффициент объёмного поглощения, наблюдается переход графита из кристаллического в аморфное состояние. При длине волны  $1064 \cdot 10^{-9}$  м наблюдаются рекристаллизация и образование кристаллического графита в зоне лазерного воздействия.

7. В результате математического моделирования каталитического теплопереноса в системе водород – металл – алмаз, с учётом зависимости теплофизических свойств и коэффициентов диффузии от текущей температуры показано, что наиболее эффективным способом формирования канала термодиффузии в процессе формирования топологии на элементах высокотемпературной твердотельной 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.

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

Представленные в диссертационной работе результаты рекомендуется использовать в технологиях обогащения кварцевого сырья, производстве элементов твердотельной электроники, например, кварцевых резонаторов, изделий электронной техники из кварцевого стекла, природных и искусственных алмазов, для изготовления которых целесообразно применять технологии лазерной резки, оплавки, сварки и лазерного управляемого термораскалывания.

Результаты диссертации внедрены на ведущих предприятиях отрасли: ОАО «Коралл» (г. Гомель) и ОАО Гомельское ПО «Кристалл» – управляющая компания холдинга «Кристалл-Холдинг», что подтверждается соответствующими актами-справками. Кроме того, 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.

## Замечания по диссертации

1. В работе существенное внимание уделяется технологиям производства ЭЛТ. В чём преимущество такой технологии по сравнению с технологиями производства ЖК и LED дисплеев?

2. Чем обусловлен выбор материалов с высокой твердостью (кварц и алмаз)? Например, синтетический нитрид бора так же, как и алмаз, относится к 10 классу твердости по шкале Мооса. А кварц по шкале Мооса относится лишь к 7 классу.

3. В главе 5 рассматривается процесс лазерной резки алмаза, который происходит путем селективной графитизации алмаза в результате лазерного нагрева с последующим испарением образовавшегося графита (с. 223), т.е. по механизму, который существенно отличается от лазерного термораскалывания, рассмотренного в предыдущих главах. Однако, при этом в разделе 5.3 рассматриваются явления раскалывания алмазов под действием лазера. В чем состоит принципиальное различие процессов лазерной резки и лазерного термораскалывания алмаза?

4. В гл. 5. представленной диссертации на стр. 230 приведены результаты ЭПР спектроскопии кристаллов алмаза после лазерной обработки. На графике приведены единицы измерения напряжённости  $H$  внешнего магнитного поля в Гс (Гаусс), в то же время в автореферате на аналогичном графике используется физическая величина магнитной индукции  $B$ , с указанием единиц измерения Тл (Тесла). Чем объясняется такое расхождение?

5. В ряде математических моделей исследуемых процессов, представленных в диссертации, зависимости теплофизических характеристик (коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость) алмаза от температуры учтены в линейном приближении. Чем вызван выбор такой аппроксимации?

Следует отметить, что приведенные выше замечания не затрагивают основных положений и выводов, содержащихся в диссертации, и не снижают научной, практической и социальной ценности полученных результатов.

## Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

По совокупности представленных новых достоверных и научно обоснованных результатов, подтвержденных научными публикациями в журналах высокого научного уровня и докладами по теме диссертации на научных конференциях, аргументированных выводов, используемых методов исследования и интерпретации полученных результатов, качественного оформления диссертации и автореферата в полном соответствии с требованиями ВАК, можно сделать вывод о том, что научная квалификация соискателя Шершнева Е.Б. соответствует ученой степени доктора

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

Диссертационное исследование Шершнева Е.Б. является комплексной самостоятельно выполненной и законченной научной работой, и соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук.

Отзыв оппонировавшей организации, подготовленный экспертом, доктором технических наук Богатыревым Юрием Владимировичем, назначенным приказом от 23.01.2024 № 2, рассмотрен и утвержден на расширенном научном семинаре ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» (протокол от 08 февраля 2024 года № 1), на котором соискатель Шершнев Е.Б. выступил с докладом. На заседании присутствовали:

всего 19 человек, из них из них - 2 доктора наук и 10 кандидатов наук. Результаты открытого голосования присутствовавших на заседании, которые имеют ученые степени:

«за» – 12, «против» – нет, «воздержавшихся» – нет

Председатель научного семинара,  
заведующий лабораторией, к.ф.-м.н.

  
С.Б. Ластовский

Эксперт,  
главный научный сотрудник,  
д. т. н.

  
Ю.В. Богатырев

Секретарь научного семинара,  
заведующий лабораторией, к.ф.-м.н.

  
В.Д. Живулько