

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 СОДЕРЖАНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ЗАЯВЛЕННОЙ СПЕЦИАЛЬНОСТИ И ОТРАСЛИ НАУКИ

Содержание диссертации в полной мере 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, а именно:

- п.4 «Исследование электрических, магнитных, оптических, теплофизических свойств материалов и слоев»;
- п.5 «Исследование взаимодействия материалов, пленок и гетероструктур с электромагнитным излучением».

2. АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИИ

К материалам и изделиям современной электронной техники предъявляются высокие требования по свойствам (электрическим, теплофизическим, оптическим, химическим, чистоте, регулярности микроструктуры и другим). Еще более жёстким требованиям должны удовлетворять материалы и изделия из них для перспективных приборов электронной техники. Это требует дальнейшего совершенствования не только качества материалов, но и методов их переработки в изделия, включая вспомогательные технологические изделия микроэлектронного производства. На решение ряда таких актуальных задач направлена рассматриваемая диссертационная работа Е.Б. Шершнева.

В представленной диссертационной работе теоретически (в виде моделей) и экспериментально (на специально разработанных макетных установках) изучены эффекты взаимодействия лазерного излучения различных длин волн с такими материалами, как аморфный и кристаллический кварц, многокомпонентные стёкла, природный и синтетический алмаз. Оптимизированные по результатам моделирования и натуральных экспериментов принципы и режимы обработки материалов

монохроматическим излучением лазеров различных длин волн могут быть положены в основу новых технологий. Предложенные технологические методы обработки электронных материалов позволят снизить трудоёмкость и повысить производительность технологических операций, а также повысить качество продукции (в частности, кварцевых фотошаблонов, изготавливаемых из обогащенного лазерным методом кварцевого сырья), и на этом основании могут считаться актуальными.

Не менее актуальными являются лазерные методы размерной резки и полировки природного и синтетического алмаза. Алмаз отличается высокой теплопроводностью и термостойкостью и высокими диэлектрическими свойствами, благодаря чему используется в производстве высоконадёжных микроэлектронных приборов.

3. СТЕПЕНЬ НОВИЗНЫ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ И НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫНОСИМЫХ НА ЗАЩИТУ

В ходе выполнения диссертационного исследования уточнены и получили дальнейшее развитие методы лазерной обработки аморфного и кристаллического кварца, многокомпонентного силикатного стекла, природных и искусственных алмазов, которые позволили повысить качество и производительность обработки указанных материалов, расширить их ассортимент.

Новизна предложенных технических решений подтверждена 3-мя патентами Российской Федерации и 25 патентами Республики Беларусь.

3.1. В разработанной соискателем феноменологической модели (Положение № 1) лазерного управляемого термораскалывания аморфного кварца воздействием лучей эллиптического кольцевого сечения CO_2 лазера и гауссова сечения YAG лазера впервые количественно определены условия гарантированного зарождения стартовой трещины, а также время экспозиции для нанесения стартового надреза.

3.2. Новизна положения № 2 заключается в экспериментальном обнаружении анизотропии прочности кристаллического кварца и выводе о необходимости её учёта его в модели лазерного термораскалывания лучом CO_2 лазера мощностью 25–40 Вт и определении режимов процесса, обеспечивающих повышение скорости разделения в 5–7 раз и значительное снижение отходов.

3.3. Новизна положения № 3 заключается в учёте компоненты анизотропии термофизических свойств кристалла алмаза при лазерной резке, которая возникает вследствие образования графитизированного слоя, сопровождаемого ростом термоупругих напряжений. Соискателем

предложено использовать дифференцированный нагрев при пониженном энергокладе в зону облучения.

3.4. Новизна в положении № 4 состоит в формировании нестационарной трёхмерной модели резки алмаза по неплоской поверхности излучением YAG лазера, учитывающей кроме естественной анизотропии также и модифицирование кристалла в процессе резки. Предложены оптимальные режимы процесса резки.

3.5. Проведено сравнительное изучение эффективности и качества резки алмаза лазерным излучением 1064, 532 и 266 нм (по-видимому, высшие гармоники YAG лазера). Впервые установлено, что воздействие излучением с длиной волны 266 нм обеспечивает качественный рез без образования сколов и графитизации поверхностей, что автор объясняет высоким коэффициентом поглощения УФ излучения.

3.6. Смоделирован термохимический процесс гравировки алмаза за счёт каталитического удаления углерода в присутствии слоя металла в атмосфере водорода при импульсном воздействии лазерного луча или в сканирующем режиме непрерывным лучом. Показана эффективность этого процесса.

4. ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ, СФОРМУЛИРОВАННЫХ В ДИССЕРТАЦИИ

Выводы и рекомендации, сформулированные в представленной диссертации, основаны на адекватных моделях индуцируемых лазерным излучением теплофизических процессов в исследуемых материалах и подтверждённых экспериментально с использованием современной аналитической аппаратуры. В исследованиях использовались методы атомно-силовой и электронной растровой микроскопии, электронного парамагнитного резонанса, катодолюминесценции и другие. Решения сложных математических задач, не имеющих решений в виде аналитических функций, получены с обеспечением требуемой точности численными методами для достаточных наборов параметров материалов и режимов лазерного воздействия. Результаты моделирования представлены в виде таблиц, а в ряде случаев – дополнительно в виде 3-D графиков, наглядно демонстрирующих картины температурных полей и внутренних напряжений в обрабатываемых материалах.

Оценивая модель тепломассопереноса при каталитической полировке алмаза, следует отметить, что она справедлива для стационарного режима. При нестационарном процессе тепловая её часть адекватна реальной

ситуации (следовало бы только учесть теплоты диссоциации углерода и реакций взаимодействия в объёме металла, а также каталитической реакции образования СН или СО на поверхности раздела с газом). В диффузионной части задачи лучше было бы использовать условие с сопротивлением диффузионному потоку через границу «алмаз-металл», и с параметрами скорости каталитической реакции вместо параметров диффузии СН/СО в газовой среде. В представленном виде эта модель тем ближе к реальному процессу, чем больше длительность лазерного нагрева, а критерием стационарности является установление стабильного распределения концентрации растворённого в металле углерода. При этом время установления стационарного режима возрастает с увеличением толщины слоя металла.

Учитывая вышеприведенное, модель можно оценить положительно, несмотря на сделанное замечание. Для любой теоретической модели достаточно оценить степень влияния каждого из факторов и выделить главные, а также тенденции их изменения при изменении исходных условий. Получив такие результаты, дальнейшая работа проводится экспериментально с получением количественных результатов, что и сделано соискателем.

По результатам моделирования и натуральных экспериментов определены оптимальные режимы каталитического травления алмаза для образца с толщиной слоя металла до 1 мкм, обеспечивающие скорость удаления углерода до $1,8 \cdot 10^{-10}$ кг/(м²·с) при скорости сканирования лазерного луча 10^{-4} м/с и плотности мощности 10^7 – 10^8 Вт/м², что является оптимальным для технологии.

Касаясь структуры работы, необходимо отметить, что соискателем обоснованно избрана последовательность, включающая теоретическое моделирование с последующим анализом и согласованными с ним режимами экспериментальной верификации и оптимизации процесса. Учёт особенностей кристаллического строения обрабатываемых материалов (кварца, алмаза, легированного алмаза) позволяет в безотходном режиме селективно разделять кристаллы по требуемым кристаллическим плоскостям.

5. НАУЧНАЯ, ПРАКТИЧЕСКАЯ, ЭКОНОМИЧЕСКАЯ И СОЦИАЛЬНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ

Научная значимость результатов диссертации заключается в построении прикладных моделей процессов лазерного управляемого термораскалывания хрупких материалов, обогащения кварцевого сырья и полировки поверхностей аморфного кварца. Результаты моделирования позволяют выявить основные факторы, определяющие ход и тенденции

процесса при их изменении. К таким моделям относятся математические описания процессов, учитывающие зависимости теплофизических характеристик кварца и алмаза от температуры, в том числе в условиях нестационарного режима, анизотропии кристаллических материалов.

Практическая значимость работы состоит в оптимизации режимов реальных технологических процессов, выполненных по результатам моделирования. В результате повышается качество продукции и производительность процессов. Экономическая значимость результатов диссертации оценена путём введения ряда методов в технологические цепи на ОАО Гомельское ПО «Кристалл» – управляющая компания холдинга «Кристалл-Холдинг», ОАО «Коралл» в производстве изделий из аморфного и кристаллического кварца, природных и синтетических алмазов, а так же в ОДО «Сапфир-Диамант» (г. Гомель), и на опытно-производственном участке научно-исследовательского сектора ГГУ имени Ф. Скорины для лазерной термохимической модификации поверхности синтетических сверхтвёрдых материалов.

Стоимость продукции, выпущенной с использованием результатов диссертации, составляет 11 485 711 белорусских рублей.

Социальная значимость выражается в создании благоприятных условий труда работников, занятых производством данной продукции, улучшении экологии, в частности, вследствие замены химического обогащения кварцевого сырья лазерным, обеспечивающим к тому же более высоким его качеством.

Результаты диссертации рекомендуются для использования на предприятиях, специализирующихся в производстве компонентов электронной техники из аморфных и кристаллических материалов. Результаты диссертации также используются в образовательном процессе высшей школы при подготовке специалистов в области микроэлектроники и электронной техники.

6. ОПУБЛИКОВАННОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ В НАУЧНОЙ ПЕЧАТИ

По результатам выполненных исследований опубликованы 76 научных печатных работ из них: 2 монографии в соавторстве, 38 статей, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, 8 статей в других рецензируемых журналах, 6 статей в материалах международных конференций, 22 тезиса докладов на международных научно-технических конференциях. Все разделы диссертации, выводы и положения, выносимые на защиту, отражены в

материалах, опубликованных в печати с участием соискателя. К наиболее значимым можно отнести публикации в журналах «Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования», «Оптический журнал», «Кристаллография».

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 РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

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 ПО ДИССЕРТАЦИИ

8.1. Не во всех разделах диссертации постановка задачи начинается с физического описания проблемы и путей достижения цели, хотя математическая формулировка моделей свидетельствует о наличии у автора чётких представлений о физике процессов. В то же время для читателя такое описание давало бы возможность анализа корректности модели и предлагаемых мер для достижения цели. В частности, для упомянутой выше в разделе 4 модели физическое описание теплофизических, диффузионных, термодимических процессов позволило бы корректно поставить граничные условия для диффузионной части модели. Известно, что коэффициенты диффузии в разных твердых материалах могут отличаться на порядок и более, поэтому равенство потоков на границах раздела между ними достигается при возникновении достаточного по величине концентрационного перепада на границе, т.е. при достижении стационарного режима. Поэтому на начальном этапе нагрева системы должны быть соответствующие граничные условия.

8.2. В диссертации не обсуждается вопрос о влиянии на характер процессов термораскалывания импульсного режима работы неодимового лазера.

8.3. В дополнение к соответствующей части раздела 4. при постановке комплексной диффузионно-тепловой краевой задачи о каталитической полировке алмаза (с. 202) отсутствует рисунок системы координат и граничные условия (5.16, 5.17) предполагают отсутствие теплового потока по радиусу в цилиндрической системе координат. И если это можно допустить для микронного слоя металла, то для объема плотно контактирующего с ним слоя алмаза это требует уточнения.

8.4. В подрисуночной подписи к рисунку 3.16, по-видимому, переставлены обозначения YAG и CO₂ лазеров. Отсутствует ссылка в тексте на рисунок 3.17. Непонятно, как установлена термостойкость стекла в 100 °С (с. 158). На с. 163 дана ссылка на рис. 4.13 – видимо, правильно на рисунок 4.15?

Сделанные замечания имеют большей частью характер описок, и не влияют на понимание смысла, и в большой работе не имеют принципиального значения. Сделанные замечания не затрагивают положения, выносимые на защиту.

9. СООТВЕТСТВИЕ НАУЧНОЙ КВАЛИФИКАЦИИ СОИСКАТЕЛЯ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ, НА КОТОРУЮ ОН ПРЕТЕНДУЕТ

По характеру и уровню поставленных в диссертации задач, используемым методам их решения и интерпретации результатов, апробированных публикациями в рецензируемых журналах и в двух монографиях можно заключить, 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.),

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 следующие новые научные и научно-технические результаты:

– феноменологическую модель лазерного управляемого термораскалывания аморфного кварца с использованием двух лучей разных длин волн, форм поперечного сечения и интенсивностей, впервые учитывающую теплоотдачу с поверхности;

– экспериментальное определение оптимальных режимов лазерного управляемого термораскалывания кристаллических материалов (кварца, алмаза), обеспечивающих надёжное разделение по требуемой кристаллографической плоскости без нарушения целостности по другим плоскостям, что потребовало учёта анизотропии теплопроводности и термомеханических свойств;

– модель лазерно-индуцированного каталитического полирования алмаза и экспериментальную её реализацию;

что в совокупности представляет собой существенный вклад в решение актуальных научно-технических задач, в развитие основ лазерной обработки материалов и совершенствование технологии материалов и приборов электронной техники.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, доцент,
главный научный сотрудник ГНУ
«Институт механики металлополимерных систем
имени В.А. Белого
Национальной академии наук Беларуси»

 Е.М. Толстопятов

