

Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу **СОКОЛОВА Сергея Ивановича**
«Двухлучевая лазерная обработка кварца для резонаторов и фотошаблонов
субмикронных интегральных микросхем»,
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Соответствие диссертации специальностям и отрасли науки, по которым она представлена к защите. В диссертационной работе исследуются и моделируются процессы, протекающие при комбинированном воздействии ИК лазерного излучения двух длин волн (10,6 и 1,06 мкм) на кристаллический кварц и кварцевое стекло, используемые в технологиях кварцевых резонаторов и фотошаблонов субмикронных интегральных микросхем. На основе физических принципов сформированы модели, описывающие технологические процессы обработки изучаемых материалов и определяющие алгоритмы совершенствования и оптимизации режимов их обработки. Адекватность разработанных моделей подтверждена экспериментальными результатами на макетах технологических установок, на которых продемонстрированы заданные характеристики процессов обработки материалов. Изучены некоторые свойства обработанных материалов. По результатам диссертационного исследования получен 1 патент РФ и 12 патентов Республики Беларусь.

Исходя из вышеотмеченного, сделано заключение, что по целям, задачам и объектам исследования работа соответствует паспорту специальности 05.27.06 – технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники, и отрасли – технические науки.

Актуальность темы диссертации. Проведенное диссертационное исследование вносит вклад в научное обоснование новых процессов двухлучевых лазерных технологий в виде сформированных моделей и установленных зависимостей, дающих количественные характеристики лазерного термораскалывания кварцевых кристаллов и кварцевого стекла, а также лазерной полировки и сварки стекла.

Актуальность прикладных аспектов работы основывается также на необходимости повышения качества материалов и изделий, используемых в микроэлектронике, что в высшей степени актуально для отечественной промышленности, в которой значительную долю составляет производство микроэлектронных приборов. Кроме этого, важное значение может иметь экспортный потенциал страны по этим продуктам, прежде всего в Россию и страны

СНГ. Поэтому актуальность проведенной соискателем работы не вызывает сомнений.

Степень новизны результатов, полученных в диссертации, и научных положений, выносимых на защиту. Новизна работы обусловлена выбором концепции исследования – совершенствование технологических процессов на основе результатов физико-математического моделирования взаимодействия двухлучевых лазерных пучков с учётом их поглощательной способности исследуемыми материалами, теплофизических и прочностных характеристик материалов. При этом в предложенных моделях учитывались также энергетические и геометрические характеристики лазерных лучей и их взаимное расположение, а также действие хладагента, и влияние скорости перемещения зоны воздействия. Для моделей термораскалывания кристаллического кварца учитывалась анизотропия его характеристик по кристаллографическим осям.

Новизна положения 1, выносимого на защиту, состоит в использовании двух лазерных лучей для рафинирования кварцевого сырья, один из которых поглощается преимущественно примесью, но не чистой частицей кварца, а второй нагревает преимущественно приповерхностный слой частиц сырья. Новизна заключается в установленном комплексе количественных энергетических параметров лазерного воздействия, обеспечивающих агломерацию частиц вокруг оплавленной дефектной частицы, с последующей сепарацией дисперсного сырья по размерам или массам. Определённые автором оптимальные режимы обеспечивают снижение содержания примесей в 2...3 раза, до уровня не выше $(1...1,5) \times 10^{-4}$ %, что представляет собой значимый эффект, обеспечивающий повышенное оптическое качество стекла.

Новизна положения 2 состоит в разработке модели, основанной на комбинации двух ИК лазерных лучей с различным распределением интенсивности по сечению, позволяющей рассчитать количественные значения термоупругих напряжений по глубине стекла, необходимых для формирования микротрещины оптимальных размеров, что обеспечивает увеличение скорости термораскалывания на 12...15 %.

Новизна положения 3 состоит во впервые определенном параметре, зависящем от сочетания условий лазерного нагрева и охлаждения кварцевого стекла хладагентом и скорости его перемещения, – разности хода прямого и преломлённого лучей в зоне остаточных напряжений, составляющем 11...30 нм при величине энерговклада 2...3 ГДж/м³, определяющем условия возникновения основной микротрещины без растрескивания её кромок.

Новизна положения 4 заключается в установлении количественных значений оптимальных скоростей перемещения зон лазерного облучения мощностью 25...35

Вт, зависящих от направления кристаллографических осей кристалла кварца, при дифференцированном нагреве.

Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Основные научные положения и выводы представленной работы являются результатом физико-математического моделирования, выполненного надёжными методами математической физики с использованием в качестве начальных и граничных условий, адекватных предложенным схемам лазерной обработки избранных материалов и их характеристикам. Использовано также современное программное обеспечение (среда ANSYS). Используются методы статистической обработки экспериментальных результатов. В экспериментальной части работы использована современная аппаратура (оптические микроскопы, тепловизор, полярископ-поляриметр, профилометр). Упомянутый комплекс математических методов и аппаратуры обеспечивает обоснованность и достоверность сформулированных выводов и рекомендаций.

Эффективность рекомендаций по практическому использованию результатов работы подтверждена испытаниями образцов на макете технологической установки и в условиях промышленного производства.

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

Научная значимость полученных результатов заключается в получении совокупности новых знаний о механизмах и условиях реализации явлений, приводящих к лазерно-термическому модифицированию материалов электроники в режимах, обеспечивающих их размерную резку, полировку, сварку и очистку сырья – соответственно для каждого из рассматриваемых материалов. Результаты физико-математического моделирования проясняют механизмы процессов, протекающих при двухлучевом лазерном воздействии, показывают существенную роль длин волн излучений, их сочетаний, и воздействия хладагента, геометрии лучей и всего комплекса воздействия.

Научная значимость могла бы быть более высокой, если бы автор описал механизм лазерной полировки кварцевого стекла – выглаживание за счёт сублимации SiO_2 с выступов неровностей или растекания / коалесценции оплавленных выступов за счёт поверхностного натяжения и невысокой вязкости расплава, или обоих факторов одновременно.

Практическая и экономическая значимость полученных результатов при их внедрении определяется достижением повышенного качества изделий, более высокой производительности операций, снижением брака. Предлагаемые методы и режимы обработки материалов и оборудование, реализующее двухлучевые методы,

базируются на серийных CO₂ и ИАГ лазерах непрерывного излучения, что обеспечивает экономическую эффективность при разработке и производстве технологического оборудования.

Результаты исследований, защищённые патентами, имеют потенциал применения в других отраслях и на разных предприятиях.

Использование предложенных методов и режимов обработки материалов позволяет исключить или уменьшить применение экологически вредных химических веществ (типа плавиковой кислоты) для очистки кварцевого сырья, что даёт экологический и социальный эффект.

Опубликованность результатов диссертации в научной печати. Материалы диссертации исчерпывающе опубликованы в 1 монографии (с соавторами), 12 статьях в рецензируемых научных журналах, соответствующих п. 19 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь. 10 статей опубликованы в материалах конференций. Все публикации относятся к тематике диссертационного исследования. Все выводы диссертации подтверждены ссылками на работы автора в составе авторского коллектива. Все статьи из списка опубликованы в журналах Беларуси и России. К числу наиболее значимых публикаций можно отнести:

1. Особенности управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кварца / А.Н. Сердюков, Е.Б Шершнёв, Ю.В. Никитюк, **С.И. Соколов**, В.Ф. Шолох // Кристаллография. –2012. –Т. 57, № 6. – С. 879 – 875.

2. Моделирование температурного поля и расчёт механических напряжений при двухлучевом лазерном управляемом термораскалывании кварцевого стекла / В.А. Емельянов, Е.Б Шершнёв, **С.И. Соколов**, А.Н. Купо // Докл. БГУИР. –2021. – Т. 19, № 7. – С. 80 – 88.

Единоличные публикации соискателя в списке отсутствуют.

Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК. Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с требованиями инструкции ВАК Республики Беларусь. Текст диссертации изложен последовательно и логично, с достаточным количеством иллюстративного материала. В литературном обзоре освещены современные достижения в области лазерной обработки кварцевого стекла.

Во второй главе диссертации с достаточной подробностью описаны экспериментально-технологическое оборудование, использованная аналитическая аппаратура.

В третьей главе описаны разработанные модели процессов, сделаны физические и технологические выводы из них.

В четвёртой главе содержатся результаты экспериментов, выполненных для верификации результатов моделирования по всем использованным процессам обработки кварцевого стекла и кристаллического кварца.

В Заключении изложены основные результаты диссертации и рекомендации по практическому использованию результатов исследования.

Содержание автореферата соответствует тексту диссертации.

Замечания по диссертации. При общей положительной оценке диссертации имеются следующие замечания, касающиеся стиля изложения и оформления:

1. В начале Гл. 3.3, посвященной рафинированию кварцевого сырья, следовало бы вначале указать метод рафинирования – сепарация по размерам. Тогда была бы понятна логика описанной двухлучевой лазерной обработки. По сути это указано лишь в конце описания технологической схемы в п. 5.

2. На Рис. 4.3 диссертации обозначение параметра по оси ординат не соответствует общепринятому правилу. Это не вводит в заблуждение лишь благодаря тому, что приводит к очевидно нереальным значениям внутренних напряжений при анализе графика. Согласно правилу, следовало бы написать: $\sigma_{22} \cdot 10^{-7}$.

3. На Рис. 3.44 диссертации в подрисуночной подписи значится зависимость от времени, а в обозначении по оси абсцисс показана зависимость от глубины в микрометрах.

Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует. Анализ содержания диссертации и публикаций позволяет сделать вывод, что квалификация соискателя соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатам технических наук по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники.

Заключение. Диссертационная работа СОКОЛОВА Сергея Ивановича на тему «Двухлучевая лазерная обработка кварца для резонаторов и фотошаблонов субмикронных интегральных микросхем» представляет собой выполненную под научным руководством законченную квалификационную работу, соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, содержит новые результаты по актуальному научному направлению, совокупность которых представляет собой существенный вклад по техническим наукам по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники.

СОКОЛОВ Сергей Иванович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники за следующие принципиально новые научно обоснованные результаты, использование которых способствует повышению технического уровня технологических процессов и изделий микроэлектронной техники:

- впервые разработанные физико-математические модели комплексного воздействия двухлучевого ИК лазерного излучения разных длин волн на кварцевое стекло и кристаллический кварц, использование результатов которых позволяет повысить производительность процессов изготовления и качество фотошаблонов субмикронных интегральных схем и кварцевых резонаторов;

- определение оптимальных режимов лазерной полировки кварцевого стекла, обеспечивающих невысокий уровень внутренних напряжений, что обеспечивает снижение шероховатости поверхности (параметра R_a в 5–8 раз, параметра R_z в 8–12 раз);

- установленные оптимальные режимы двухлучевой обработки CO_2 -лазером и YAG-лазером кварцевого сырья, снижающие содержание примесей в 2...3 раза, до уровня не выше $(1...1,5) \times 10^{-4} \%$, и количество брака кварцевых фотошаблонов на (10 – 15) %,

что в совокупности вносит существенный вклад в научные основы методов обработки материалов и саму технологию изделий для производства субмикронных интегральных схем.

Официальный оппонент

доктор технических наук, доцент

главный научный сотрудник

Государственного научного учреждения

«Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого

Национальной академии наук Беларуси»

Е.М. Толстопятов

