

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
Белорусского национального
технического университета



Ю.А. Николайчик

2 мая 2023 г.

ОТЗЫВ

оппонирующей организации

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

1. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки

Диссертационная работа Сергея Ивановича Соколова посвящена установлению закономерностей лазерной двухлучевой обработки кристаллического кварца и кварцевого стекла, которые применяются в микроэлектронике при изготовлении подложек фотошаблонов и кварцевых резонаторов, а именно процессов лазерного термораскалывания указанных материалов, лазерной полировки стекла и очистки от примесей мелкозернистого кварца.

Область исследований и результаты диссертационной работы соответствуют отрасли «технические науки». Задачи, содержание, полученные результаты соответствуют пунктам «моделирование, расчёт и проектирование технологического оборудования», «оборудование для изготовления и контроля оригиналов топологии твёрдотельных структур, оборудование для фотолитографии», «технология производства оборудования для изготовления ... приборов и компонентов электронной техники» раздела III паспорта специальности 05.27.06 – технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники.

2. Научный вклад соискателя в решение научной задачи и оценка его значимости

Источники лазерного излучения за десятилетия, прошедшие после их создания, нашли применение практически во всех областях человеческой деятельности. Благодаря хорошо известным преимуществам лазеров перед альтернативными источниками теплового воздействия их использование для обработки материалов совершенно обосновано. Несмотря на впечатляющие достижения такого применения для обработки, в частности, диэлектрических

материалов, остаётся много нерешённых задач. Это связано со сложностью описания процессов, происходящих в таких материалах при лазерном воздействии, многопараметрической зависимостью результатов, а также высокими концентрациями энергии и скоростями протекающих процессов.

Автор диссертации поставил целью работы установление закономерностей воздействия на кварцевые материалы двух лазерных источников, отличающихся или длиной волны излучения (10,6 мкм – CO₂-лазер и 1,06 мкм – лазер на Nd³⁺:Y₃Al₅O₁₂), или формой распределения энергии в пятнах их излучения на обрабатываемой поверхности. Диссертационное исследование С.И. Соколова носит преимущественно теоретический характер. В ней на основе теории термоупругости и теплопроводности путём применения как полученных аналитически решений, так и методами численного моделирования, установлен характер влияния интенсивности и формы двух пучков лазерного излучения на развитие трещины в тонком кварцевом стекле, а также влияние заранее нанесённого дефекта и принудительного охлаждения поверхности материала после лазерного воздействия. Выполнены расчёты термораскалывания пластин кристаллического кварца различной вырезки из монокристаллического образца. Изучены режимы полировки и сварки кварцевых стёкол, а также очистки от примесей мелкозернистого кварцевого порошка. Ряд расчётных результатов был подтверждён в экспериментах, выполненных автором.

3. Конкретные научные результаты (с указанием их новизны и практической значимости), за которые соискателю может быть присуждена искомая ученая степень

Основные результаты диссертации С.И. Соколова, за которые может быть присуждена учёная степень кандидат технических наук, а также положения, выносимые на защиту, являются новыми и оригинальными. Наиболее важные из них следующие:

1. Теоретически обнаружено и экспериментально подтверждено, что существует три варианта вырезки кристаллов кварца толщиной 1,5 мм, при которых в результате двухлучевой лазерной обработки наблюдается уверенное управляемое термораскалывание при скорости перемещения лучей около 6 мм/с, при этом разрывающее усилие для этих вариантов вырезки различается практически в два раза, что важно для повышения производительности изготовления кварцевых резонаторов.
2. Установлена закономерность термораскалывания кварцевого стекла, заключающаяся в лазерном нагреве и последующем принудительном охлаждении по линии формирующейся трещины, и экспериментально определена разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей в области микротрещины $\Delta = 10\text{--}30$ нм для получения её требуемой глубины. Это позволяет исключить растрескивание кромки фотошаблона после обработки за счёт обеспечения остаточных напряжений ниже прочности на разрыв.
3. Определены и подтверждены экспериментально значения технологических

параметров лазерной полировки кварцевого стекла CO₂-лазером (интенсивности излучения и скорости обработки), при которых на поверхности достигается температура плавления 2004 К, что позволяет полировать кварцевое стекло не вызывая последующего разрушения его поверхностного слоя, поскольку внутренние напряжения при этом в несколько раз меньше прочности на разрыв для этого материала (300 МПа).

4. Установлено, что учет зависимости теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры при расчёте технологических режимов лазерной сварки максимальная температура в зоне обработки в 1,5–1,7 раза меньше, чем без учета такой зависимости. Теоретически обнаружено, что двухлучевая суперпозиционная сварка позволяет увеличить глубину проплавления на 25 % по сравнению с однолучевой, а параллельная двухлучевая сварка позволяет избежать перегрева материалов толщиной до 1,5 мм, что в случае экспериментального подтверждения позволит заметно улучшить качество сварных соединений деталей из кварцевого стекла.

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

Анализ содержания диссертации С.И. Соколова позволяет сделать вывод, что соискатель обладает необходимыми знаниями и понимает разнообразные процессы, протекающие при лазерной обработке диэлектрических материалов.

Все основные результаты, определяющие научную и практическую значимость работы, теоретические расчеты и интерпретация полученных данных, выполнены автором лично или совместно с научными руководителями. Результаты диссертационного исследования опубликованы в известных отечественных и российских научных журналах, среди которых «Материалы. Технологии. Инструменты», «Кристаллография», «Проблемы физики, математики и техники», «Известия ГГУ им. Ф. Скорины», «Доклады БГУИР», которые соответствуют требованиям ВАК Республики Беларусь для публикации результатов диссертационных исследований.

С учётом выше указанного можно заключить, что *научная квалификация С.И. Соколова соответствует искомой учёной степени кандидата технических наук.*

5. Замечания по диссертации

1. В Главе 1 «Анализ научно-технической литературы по теме диссертационной работе» недостаточно внимания уделено анализу библиографических источников в области лазерной обработки кварцевых материалов за последние 10–15 лет. В выводах по Главе 1 формулировки носят расплывчатый характер. По какой-то причине в выводах по Главе 1 приведены ссылки на работы автора.

2. При описании оборудования и методик проведения экспериментальных исследований (Глава 2) не указана погрешность измерений,

получаемых с их использованием.

3. При описании экспериментов по двухлучевой очистке кварцевого сырья от компонентов с нежелательными примесями было бы полезно оценить временные и энергетические затраты для достижения результата, объём сырья, который перерабатывается за один технологический цикл.

4. Экспериментальные исследования проведены не по всем заявленным способам двухлучевой лазерной обработки кварцевого стекла.

5. Присутствуют жаргонные и неточные фразы: лазер на кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ везде по тексту называется «YAG-лазер» без указания иона-активатора; «Nd-лазеры имеют низкий КПД < 5%» (с. 12), хотя в настоящее время широко используются твёрдотельные лазеры с диодной накачкой, характеризующиеся существенно большим КПД; неоднократно по тексту обыкновенный и необыкновенный лучи называются «прямой и преломлённый» и др.

Приведенные замечания не затрагивают основных положений и выводов, содержащихся в диссертации, и не снижают значимости полученных результатов.

6. Заключение

Диссертационная работа Соколова Сергея Ивановича «Двухлучевая лазерная обработка кварца для резонаторов и фотошаблонов субмикронных интегральных микросхем» является самостоятельным квалификационным исследованием, соответствует требованиям ВАК Республики Беларусь, предъявляемым к кандидатским диссертациям в области технических наук, соответствует п. 21 «Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий», содержит новые научно обоснованные результаты, совокупность которых вносит вклад в развитие оборудования и технологий для обработки диэлектрических материалов с использованием лазерного излучения.

Соискатель 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 новые научно обоснованные результаты, включающие:

– разработанный механизм механического удаления примесей из кварцевого сырья после двухлучевой обработки лазерами на CO_2 и $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, что снижает содержание указанных примесей с $(3-3,5) \cdot 10^{-4} \%$ до $(1-1,5) \cdot 10^{-4} \%$ и уменьшает брак кварцевых фотошаблонов на 12–15 %;

– экспериментально установленные режимы управляемого лазерного термораскалывания пластин из кристалла кварца, вырезанных в различных направлениях относительно его главной оптической оси;

– установленную закономерность термораскалывания кварцевого стекла для фотошаблонов путём лазерного нагрева и последующего принудительного охлаждения, что позволяет исключить растрескивание кромки кварцевого фотошаблона за счет уменьшения остаточных напряжений до значений ниже прочности на разрыв.

Отзыв оппонировающей организации, подготовленный экспертом д.ф.-м.н., профессором, членом-корреспондентом НАН Беларуси Маляревичем А.М., назначенным приказом БНТУ № 313 от 02.05.2023 «О подготовке отзыва оппонировающей организации», рассмотрен и утвержден на научном собрании кафедр «Лазерная техника и технология» и «Информационно-измерительная техника и технологии» с привлечением специалистов по научному направлению диссертации приборостроительного факультета (протокол №1 от 04.05.2023), на котором соискатель Соколов С.И. выступил с докладом.

На заседании присутствовали члены научного собрания:

всего – 15 человек, из них – 1 доктор технических наук (А.Л. Жарин), 3 доктора физико-математических наук (В.Э. Кисель, А.М. Маляревич, К.В. Юмашев), 7 кандидатов технических наук (Р.И. Воробей, В.О. Кузнечик, Н.С. Мисюкевич, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, Р.В. Фёдорцев), 4 кандидата физико-математических наук (К.Н. Горбаченя, В.В. Красовский, К.Л. Тявловский, А.С. Ясюкевич):

Результаты открытого голосования по отзыву оппонировающей организации присутствовавших на заседании, которые имеют ученые степени:

«за» – 15, «против» – нет, «воздержавшихся» – нет.

Председатель научного собрания
кандидат технических наук, доцент

Р.И. Воробей

Секретарь собрания
кандидат физ.-мат. наук, доцент

А.С. Ясюкевич

Эксперт
член-корреспондент НАН Беларуси,
доктор физ.-мат. наук, профессор

А.М. Маляревич

