

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Соколова Сергея Ивановича

«Двухлучевая лазерная обработка кварца для резонаторов и фотошаблонов субмикронных интегральных микросхем»

представленной 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 диссертации специальности и отрасли науки, по которой она представлена к защите

Целью диссертационного исследования является моделирование лазерной двухлучевой обработки кристаллического кварца и кварцевого стекла в рамках теории термоупругости и теплопроводности, установление закономерности лазерного термического раскалывания кварцевого стекла и кристаллического кварца для производства фотошаблонов и кристаллов кварца и создание методики двухлучевой лазерной обработки кварцевого сырья для производства более качественных кристаллических фотошаблонов.

Для достижения поставленной цели проведен комплекс исследований по изучению воздействия лазерного излучения на кварцевое стекло и кристаллический кварц. В ходе работы изучен процесс лазерного воздействия на кварцевое стекло в рамках теории линейной механики разрушения, исследован процесс лазерной обработки кристаллического кварца, учитывающий анизотропию теплофизических и упругих свойств кварца, разработаны новые двухлучевые способы лазерного термораскалывания кварцевого стекла и кристаллического кварца, полировки и сварки кварцевого стекла, а также очистки кварцевого сырья, проведены экспериментальные исследования процессов двухлучевой лазерной обработки кварцевого стекла и кристаллического кварца и очистки кварцевого сырья.

Таким образом, диссертационная работа *Соколова С. И. «Двухлучевая лазерная обработка кварца для резонаторов и фотошаблонов субмикронных интегральных микросхем»* полностью соответствует специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники, а также требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

2. Актуальность темы диссертации

Актуальность представленной работы обусловлена тем, что для обеспечения роста и конкурентоспособности белорусских компаний необходимо повысить качество оборудования и изделий с уникальными

эксплуатационными характеристиками. Этого можно достичь путем улучшения свойств существующих материалов или разработки новых методов обработки изделий микроэлектроники. Одним из материалов, используемых в настоящее время для резонаторов и фотошаблонов в субмикронных интегральных схемах, является кварц. Это объясняется прозрачностью кварцевого стекла в широком спектральном диапазоне, низким линейным коэффициентом теплового расширения и высокой теплопроводностью. При производстве интегральных схем с проектными нормами ниже 1 микрона чистота кварцевых фотошаблонов имеет решающее значение для качества продукции. При производстве кварцевых резонаторов, в которых используется кварцевый кристалл, его частотно-температурные характеристики определяются точностью среза пластины в определенном направлении.

Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования *Соколова С. И.* не вызывает сомнений.

3. Степень новизны результатов, полученных в диссертации, и научных положений, выносимых на защиту

Анализ представленных в диссертации *Соколова С.И.* результатов позволяет заключить, что работа содержит новые научно обоснованные результаты и научные положения. Основными из них являются:

1. Определено значение длины стартового дефекта на уровне $\sim (0,75 - 1,5) \cdot 10^{-3}$ м при скорости обработки $\sim 15 \cdot 10^{-3}$ м/с эллиптическим лазерным пучком с большой осью $\sim 6 \cdot 10^{-3}$ м и малой осью $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ м и мощности лазерного излучения ~ 30 Вт, при которой максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений составляют $\sim (0,79 - 0,94) \cdot 10^6$ Па \cdot м $^{1/2}$, что превышает критическое значение коэффициента интенсивности равного $\sim 0,7 \cdot 10^6$ Па \cdot м $^{1/2}$, который инициирует микротрещину при лазерном термораскалывании.

2. Впервые установлено, что управляемое термораскалывание кварцевого стекла осуществимо, если после нагрева лазерным пучком и охлаждения подачей хладагента при относительном перемещении лазерного пучка и материала вдоль линии термораскалывания образуется зона остаточных напряжений, в которой разность хода прямого и преломленного лучей составляет $\sim (11 - 30) \cdot 10^{-9}$ м.

3. Показано, что при определении величины напряжений растяжения в зоне обработки, учет анизотропии свойств кварца существенно влияет на их расчетные значения: учет анизотропии теплопроводности приводит к изменению значений напряжения на ~ 34 %, анизотропии теплового расширения – на ~ 46 %, анизотропии упругих свойств – на ~ 62 % по

сравнению с расчетами без их учета. При выборе параметров лазерного термораскалывания кварцевых пластин АТ- и ВТ-срезов учет анизотропии свойств кристаллов кварца, приводит к изменению максимальных значений растягивающих напряжений на $\sim 35\%$.

4. Определены оптимальные значения технологических параметров лазерной полировки кварцевых пластин различного типоразмера CO_2 -лазером (мощность лазерного излучения ~ 20 Вт, радиус лазерного пучка $\sim 1,2 \cdot 10^{-3}$ м, скорость обработки $\sim (1,5 - 5) \cdot 10^{-3}$ м/с), при которых параметр R_α уменьшается в 5 - 8 раз, R_z – в 8 - 12 раз, при этом внутренние напряжения находятся на уровне $\sim 45 \cdot 10^6$ Па, что значительно меньше прочности на разрыв для кварцевого стекла равной $\sim 300 \cdot 10^6$ Па.

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

Полученные в работе научные результаты объективны и являются обоснованными, выводы аргументированы, вытекают из содержания проведенных исследований и отражают научные положения, представленные в диссертации. Достоверность результатов и выводов несомненна и подтверждена экспериментальными данными, полученными с помощью микроскопов, полярископа-поляриметра, измерителя шероховатости и тепловизора, хорошо согласующимися с результатами теоретического анализа и моделирования в программной среде ANSYS, а также актами внедрения в производство и в учебный процесс. Кроме того, результаты работы не противоречат известным результатам других авторов.

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

Научная значимость результатов работы заключается в получении на основе моделирования, проведенных расчетов и экспериментальных исследований совокупности новых знаний о закономерностях технологических способов двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья, а также двухлучевого лазерного термораскалывания кварцевого стекла, что позволяет снизить концентрацию примесей и повысить качество кромок кварцевых фотошаблонов. Предложен механизм удаления примесей из кварцевого сырья двухлучевой обработкой CO_2 -лазером и YAG-лазером при котором частицы кварца нагреваются до температуры, близкой к температуре плавления, а частицы с примесями нагреваются до температуры, превышающей температуру плавления, за счет чего образуются конгломераты из нескольких частиц, включая частицу с примесью, которые затем удаляются механически, что снижает содержание

примесей $c \sim (3 - 3,5) \cdot 10^{-4} \%$ до $\sim (1 - 1,5) \cdot 10^{-4} \%$. Установлена закономерность термораскалывания кварцевого стекла для фотошаблонов, заключающаяся в предварительном воздействии нагрева и охлаждения и относительном перемещении лазерного пучка и кварцевого стекла вдоль линии термораскалывания, в результате которого образуется зона остаточных напряжений, для которой характерным является разность хода прямого и преломленного лучей на уровне $\sim (11 - 30) \cdot 10^{-9}$ м, а удельный энергозатрат при этом $\sim (2 - 3) \cdot 10^9$ Дж/м³ оптимален для получения глубины разделяющей микротрещины $\sim (0,18 - 0,22) \cdot 10^{-3}$ м, что позволяет исключить растрескивание кромки кварцевого фотошаблона за счет уменьшения остаточных напряжений до значений ниже прочности на разрыв. Установлены режимы лазерного термораскалывания (мощность излучения $\sim (25 - 35)$ Вт) кристаллов кварца в различных направлениях относительно главной оптической оси кристалла обеспечивающие формирование термоупругих напряжений более $\sim 30 \cdot 10^6$ Па, необходимых для создания лазерно-индуцированной трещины, позволяющие избежать растрескивания кристалла.

Практическая значимость результатов диссертации состоит в возможности уменьшения размеров и концентрации примесей до $\sim (1 - 1,5) \cdot 10^{-4} \%$ в кварцевых фотошаблонах, применяемых при производстве интегральных микросхем по субмикронным технологиям, а также в уменьшении количества времени таких технологических операций как шлифовка и резка пластин при производстве кварцевых резонаторов за счет двухлучевой лазерной резки кристаллов кварца различных срезов (X, Y – срезы, а также AT, BT – срезы).

Экономическая значимость результатов диссертации состоит в том, что результаты диссертационных исследований использовались на ОАО «Коралл» в процессе удаления примесей из кварцевого сырья при производстве кварцевых труб, штабиков и фотошаблонов с 2008 по 2021 г. Стоимость продукции, выпущенной с помощью технологии двухлучевой лазерной обработки кварца за указанный период, составила 1 508 тыс. дол. США.

Социальная значимость результатов диссертации состоит в снижении концентрации примесей и повышении качества кромок кварцевых фотошаблонов, и повышении, за счет этого, конкурентоспособности продукции и экспортного потенциала белорусских предприятий. Результаты диссертации могут быть рекомендованы к использованию организациями, занимающимися производством субмикронных интегральных микросхем и резонаторов.

6. Полнота опубликования основных положений, результатов диссертации в научной печати

По результатам проведенных исследований опубликовано 34 печатные работы, из которых 1 коллективная монография, 12 статей в рецензируемых научных журналах, 1 статья в материалах международной конференции, 7 тезисов докладов на международных научно-технических конференциях, 1 патент Российской Федерации, 12 патентов Республики Беларусь.

Все положения диссертации, выносимые на защиту, а также разделы диссертации и автореферата отражены в опубликованных материалах.

Из наиболее значимых публикаций следует выделить следующие:

1. Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / А. П. Достанко С. М. Аваков, Д. А. Голосов, В. В. Емельянов, С. М. Завадский, В. В. Колос, В. Л. Ланин, С. И. Мадвейко, С. Н. Мельников, Ю. В. Никитюк, А. Н. Петлицкий, И. Б. Петухов, В. А. Пилипенко, В. И. Плебанович, В. А. Солодуха, С. И. Соколов, Е. В. Телеш, Е. Б. Шершнёв; под ред. А. П. Достанко. – Минск : Беларус. навука, 2019. – 260 с.

2. 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. 879–885.

3. Распределение температурных полей при двухлучевой сварке кварцевого стекла / Е. Б. Шершнёв, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, А. Е. Шершнёв // Изв. ГГУ им. Ф. Скорины. – 2012. – № 6. – С. 105–109.

4. Шершнёв, Е. Б. Особенности лазерного термораскалывания кварцевого стекла / Е. Б. Шершнёв, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов // Проблемы физики, математики и техники. – 2013. – № 3. – С. 39–44.

5. Емельянов, В. А. Двухлучевая лазерная очистка кварцевого сырья / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнёв, С. И. Соколов // Докл. БГУИР. – 2021. – Т.19, № 3. – С. 40–48.

6. Моделирование температурного поля и расчет 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.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

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. Соответствие научной квалификации соискателя учёной степени, на которую он претендует

При выполнении данной работы ее автор Соколов С.И. зарекомендовал себя как грамотный специалист, способный особенно успешно использовать различные математические методы и приемы для моделирования сложных процессов, происходящих при воздействии потоков лазерного излучения на объекты из стекла и кварца. Также ему довольно неплохо удаются непростые эксперименты и изобретательская деятельность в этой области, результатом чего являются практические рекомендации по конкретному воплощению разработанных технологий. В конечном итоге анализ содержания диссертации и автореферата, включая степень новизны полученных результатов и защищаемых положений, обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, научная и практическая значимость работы, полнота опубликованности результатов в научной печати позволяют сделать вывод, что научная квалификация *Соколова Сергея Ивановича* соответствует ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники.

9. Недостатки диссертационной работы

В качестве недостатков в работе необходимо отметить следующее:

1. В обзоре литературы по тематике диссертационной работы недостаточно уделено внимания обзору по лазерной сварке, в том числе и различных стекол.

2. В разделе 3.4.2 не указано какой метод двухлучевой сварки применялся в численном эксперименте;

3. На рисунке 3.12 не приведены пояснения цифр;

4. На рисунке 3.35 не приведена размерность температуры;

5. По тексту работы помимо ссылок на свои публикации следовало бы относительно исходных формул более подробно давать ссылки на литературные источники, откуда они привлекаются, например в параграфе 4.1 формулы 4.1 – 4.10.

6. На странице 28 неверно указана маркировка измерителя импульсного излучения (ШО-2М вместо ИМО-2М).

7. Недостаточно поясняющей информации, касающейся таблицы 3.2

8. В тексте диссертации встречаются другие незначительные опечатки и описки: стр.36,53,54,100 (в соответствующих местах сделаны пометки).

Высказанные замечания не влияют на общую высокую положительную оценку диссертационной работы С.И. Соколова.

10. Заключение

Диссертация *Соколова Сергея Ивановича* на тему «Двухлучевая лазерная обработка кварца для резонаторов и фотоматриц субмикронных

интегральных микросхем», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является завершенной научной квалификационной работой и соответствует требованиям ВАК Беларуси, предъявляемым к кандидатским диссертациям. В соответствии с требованиями пункта 20 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь» *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 научные экспериментальные результаты в области электроники, включающие:

1. Механизм удаления примесей из кварцевого сырья двухлучевой обработкой CO₂-лазером и YAG-лазером при плотности мощности в зоне обработки $(8,0 - 10,0) \cdot 10^7$ Вт/м² и скорости перемещения сырья в пределах $(5 - 10) \cdot 10^{-3}$ м/с с нагревом кварцевого сырья CO₂-лазером до температуры плавления и одновременном расплавлении частиц кварца с примесями за счет преимущественного поглощения примесями излучения YAG-лазера, которое прозрачно для чистых частиц, что снижает содержание примесей с $\sim (3 - 3,5) \cdot 10^{-4}$ % до $\sim (1 - 1,5) \cdot 10^{-4}$ % и количество брака кварцевых фотошаблонов на 12 – 15 %.

2. Модель лазерного управляемого термораскалывания кварцевого стекла для фотошаблонов при одновременном воздействии на него двух пучков лазерного излучения инфракрасного диапазона различной геометрии: с максимальной интенсивностью в центре и с нулевой интенсивностью в центре, которая позволила рассчитать термоупругие напряжения по глубине стекла, необходимые для формирования микротрещины, что дало возможность увеличить скорость термораскалывания на (20 – 30) %.

3. Установленную закономерность термораскалывания кварцевого стекла для фотошаблонов, заключающуюся в предварительном воздействии нагрева и охлаждения и относительном перемещении лазерного пучка и кварцевого стекла вдоль линии термораскалывания, в результате которого образуется зона остаточных напряжений, для которой характерным является разность хода прямого и преломленного лучей на уровне $(11 - 30) \cdot 10^{-9}$ м, а удельный энерговклад $(2 - 3) \cdot 10^9$ Дж/м³ оптимален для получения глубины разделяющей микротрещины $(0,18 - 0,22) \cdot 10^{-3}$ м, что позволяет исключить растрескивание кромки кварцевого фотошаблона за счет уменьшения остаточных напряжений до значений ниже прочности на разрыв.

4. Экспериментально установленные режимы лазерного термораскалывания кристаллов кварца X, Y и Z-срезов в различных направлениях относительно главной оптической оси кристалла термораскалывание осуществляется дифференцированным нагревом, обеспечивающим формирование термоупругих напряжений на уровне $\sim (30 - 40) \cdot 10^6$ Па, необходимых для создания лазерно-индуцированной трещины. При мощности лазерного излучения (25 – 35) Вт в направлении, параллельном оси симметрии третьего порядка – скорость резки составляет

$\sim (13 - 17) \cdot 10^{-3}$ м/с, в направлении перпендикулярном оси симметрии третьего порядка: $(6 - 8) \cdot 10^{-3}$ м/с, когда линия реза лежит на плоскости, перпендикулярной оси симметрии третьего порядка, и $(5 - 7) \cdot 10^{-3}$ м/с в случае, если линия реза лежит на плоскости, параллельной оси симметрии третьего порядка.

Официальный оппонент
Кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
государственного научного учреждения
«Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларуси»

В.С. Голубев

05.05.2023 г.

Подпись Голубева В.С. удостоверено:
Дир. спец. по кадр. Д.С. Р.М. Радзишова

