

## ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

по диссертационной работе Соколова Сергея Ивановича

«Двухлучевая лазерная обработка кварца для резонаторов и фотошаблонов субмикронных интегральных микросхем», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Диссертационная работа Соколова С.И. посвящена разработке моделей и технологий процессов лазерной двухлучевой обработки кристаллического кварца и кварцевого стекла. Актуальность работы обусловлена тем, что одним из материалов, применяемых в резонаторах и фотошаблонах для субмикронных интегральных микросхем, является кварц. Научная значимость полученных результатов диссертации связана с установлением закономерностей лазерного раскалывания кварцевого стекла и кристаллического кварца, используемых при изготовлении подложек фотошаблонов и кварцевых резонаторов, создании технологии двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья для получения кварцевых фотошаблонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Соискатель Соколов С.И. проявил необходимые научные знания и компетенции во время выполнения диссертации. Соколов С.И. изучил процесс лазерного воздействия на кварцевое стекло в рамках теории линейной механики разрушения, исследовал процесс лазерной обработки кристаллического кварца, учитывающий анизотропию его теплофизических и упругих свойств, разработал новые двухлучевые способы лазерного термораскалывания кварцевого стекла и кристаллического кварца, полировки и сварки кварцевого стекла, а также очистки кварцевого сырья. Полученные научные результаты подтверждены соискателем с помощью аналитического метода и метода конечных элементов, а также экспериментальных исследований. Результаты диссертации обладают научной новизной, использованы в научно-исследовательских работах, выполненных в рамках государственных программ научных исследований, в которых соискатель являлся исполнителем. Результаты опубликованы в ряде отечественных и российских изданиях, неоднократно докладывались на научных конференциях, а также запатентованы в Республике Беларусь и Российской Федерации. Поставленные мною, как научным руководителем, цели диссертационной работы достигнуты, а задачи выполнены в полном объеме.

После окончания аспирантуры в 2009 году соискатель занимался научно-педагогической деятельностью в должности ассистента, а с 2016 года и по настоящее время работает в должности старшего преподавателя кафедры общей физики учреждения образования «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины». В течение работы на кафедре проводил на высоком научно-методическом уровне лекционные, лабораторные и практические занятия по таким дисциплинам как «Механика», «Оптика», «Физическое материаловедение», «Основы научных исследований и планирование эксперимента» для студентов специальностей «Физическая электроника», «Физика (производственная деятельность)» и других. Руководит производственными практиками, дипломными проектами, НИР студентов.

Результаты диссертационной работы использованы на предприятии ОАО «Коралл» в процессе удаления примесей из кварцевого сырья при производстве кварцевых труб, штабиков и фотошаблонов. Стоимость продукции, выпущенной с

помощью технологии двухлучевой лазерной обработки кварца составила 1 508 тыс. долларов США. Также результаты работы внедрены в учебный процесс УО «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины» в качестве лекционного материала для студентов специальностей «Физическая электроника» и «Физика (производственная деятельность)» факультета физики и информационных технологий.

На основании изложенного, предлагаю присудить Соколову Сергею Ивановичу ученую степень кандидата технических наук за:

– механизм удаления примесей из кварцевого сырья двухлучевой обработкой CO<sub>2</sub>-лазером и YAG-лазером при плотности мощности в зоне обработки  $(80 - 100) \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> и скорости перемещения сырья в пределах  $(5 - 10) \cdot 10^{-3}$  м/с с нагревом кварцевого сырья CO<sub>2</sub>-лазером до температуры 2273 К 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  $(3 - 3,5) \cdot 10^{-4}$  % до  $(1 - 1,5) \cdot 10^{-4}$  % и количество брака кварцевых фотошаблонов на  $(12 - 15)$  %;

– 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  $(20 - 30)$  %;

– установленную 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, которая вызывает разность хода прямого и преломленного лучей  $(11 - 30) \cdot 10^{-9}$  м, а удельный энергоклад  $(2 - 3) \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup> 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;

– 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  $(30 - 40) \cdot 10^6$  Па, необходимых для создания лазерно-индуцированной трещины, при мощности лазерного излучения  $(25 - 35)$  Вт в направлении, параллельном оси симметрии третьего порядка – скорость резки  $(13 - 17) \cdot 10^{-3}$  м/с, а в направлении, когда линия реза перпендикулярна оси симметрии третьего порядка:  $(6 - 8) \cdot 10^{-3}$  м/с, когда линия реза находится в плоскости, перпендикулярной оси симметрии третьего порядка, и  $(5 - 7) \cdot 10^{-3}$  м/с в случае, если линия реза находится в плоскости, параллельной оси симметрии третьего порядка.

Научный руководитель  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой общей физики  
учреждения образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины»

Е.Б. Шершнева

Подпис *Е.Б. Шершнева*  
ЗАВЯЖАЮ  
Начальник отдела кадров  
установы адукацыі "Гомельскі дзяржаўны  
універсітэт імя Францыска Скарыны"

15.03.2023