

ОТЗЫВ

официального оппонента **Никонорова Николая Валентиновича**
на диссертационную работу **Наумова Андрея Сергеевича** на тему:
«Фемтосекундное лазерное микромодифицирование структуры ситаллов»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических
материалов

На отзыв представлена диссертация объемом 145 страниц машинописного текста, содержащая 54 рисунка, 11 таблиц, список литературы из 229 наименований, а также автореферат.

Актуальность работы

Перспективы создания новых приложений методами лазерного микро- и нано-модифицирования структуры диэлектриков выглядят весьма многообещающими. Прозрачные ситаллы с особым сочетанием теплофизических и механических свойств можно отнести к перспективным материалам для создания различных устройств фотоники, интегральной оптики и микрофлюидики. Диссертационная работа посвящена актуальной повестке современного оптического приборостроения и материаловедения: разработке методов лазерной микромодификации структуры алюмосиликатных ситаллов. Особое внимание уделено прозрачным ситаллам с близким к нулю значением температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР). Приведенный автором обзор литературы показывает, что на данный момент остаются открытыми вопросы о структурных изменениях и фазовых превращениях, происходящих в объеме ситаллов под действием фемтосекундного (ФС) лазерного излучения. В научных работах соискателя рассмотрены недавно открывшиеся возможности локальной лазерной аморфизации кристаллической фазы и записи световедущих структур в объеме ситалловых матриц, характеризующихся повышенной термостабильностью и микротвердостью. Полученные результаты диссертационного исследования дополняют существующие данные. Указанные особенности свидетельствуют об актуальности выполненной работы с точки зрения выбора объектов исследования и использованных методов, работа в этом отношении соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Целью диссертационного исследования А.С. Наумова являлась разработка режимов лазерной микрообработки прозрачных алюмосиликатных ситаллов, характеризующихся стабильностью ТКЛР в широком температурном диапазоне и повышенными значениями микротвердости, расширяющих возможности технологии лазерной записи элементов интегральной оптики и фотоники в их объеме.

Научная новизна работы

В работе подробно исследовано влияние режимов лазерной микрообработки многокомпонентных ситаллов на основе систем $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ и $\text{ZnO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

на характеристики формируемых областей. Показано, что варьирование параметров лазерной микрообработки позволяет прецизионно управлять размером кристаллов, знаком и величиной изменения показателя преломления, пограничными напряжениями модифицированных областей, записанных в объеме прозрачных ситаллов сфокусированным ФС лазерным пучком. Методами электронной микроскопии высокого разрешения продемонстрирована возможность прямой аморфизации ФС лазерными импульсами наноразмерных кристаллов β -кварцеподобных твердых растворов и ганита в объеме соответствующих ситалловых матриц.

На основании экспериментальных данных автором установлено, что локальное изменение показателя преломления, индуцированное ФС импульсами, обусловлено фазовыми превращениями и диффузией элементов химического состава в фокальной области воздействия. В зависимости от состава исследуемой стеклокристаллической матрицы, а также режима лазерного воздействия изменение показателя преломления может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Для литиевоалюмосиликатного ситалла с близким к нулю ТКЛР предложена методика записи аморфных оболочек волноводных структур. Определены режимы лазерной микрообработки и геометрические параметры оболочек, варьирование которых позволяет управлять модовыми характеристиками и потерями на распространение света в формируемых волноводах.

Теоретическая и практическая значимость

В рамках диссертационного исследования были уточнены температурно-временные параметры зарождения и роста кристаллов в объеме стекол литиевоалюмосиликатной системы и разработаны режимы их ситаллизации, позволяющие плавно изменять значения ТКЛР в интервале температур от -100 до 500 °C в диапазоне значений близких к нулю.

Продemonстрирована возможность лазерной записи волноводных структур в объеме прозрачных ситаллов с повышенными механическими характеристиками, а также разработана методика записи аморфных оболочек световедущих каналов с заданной геометрией в объеме термостабильного ситалла.

Углубление понимания природы аномального теплового расширения ситаллов в совокупности с развитием подходов к лазерному микромодифицированию их структуры будет способствовать созданию нового класса гибридных стеклокристаллических материалов и их применений в термостабильных устройствах фотоники и элементах интегральной оптики.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением современных инструментальных методов (дифференциально термический анализ, рентгенофазовый анализ, спектроскопия комбинационного рассеяния света с локальностью порядка 1 мкм, просвечивающая электронная микроскопия и др.) и стандартных испытаний, соответствующих поставленным целям и задачам. Противоречия сформулированных положений с современными концепциями химии и технологии стекла

и ситаллов отсутствуют. Кроме того, подтверждением достоверности является большое количество статей в рецензируемых научных журналах, а также апробация результатов на конференциях различного уровня.

По результатам исследования опубликовано 28 печатных работ, в том числе 12 статей в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных (Web of Science, Scopus), 14 публикаций в сборниках докладов, представленных на международных и российских конференциях, получено 2 патента на изобретение.

Общая характеристика диссертационной работы

Работа Наумова А.С. состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы.

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **1 главе** сообщается об актуальном состоянии научных работ, посвященных исследованию взаимодействия лазерного излучения с прозрачными диэлектриками. Большое внимание в обзоре литературы уделяется теоретическим аспектам, а именно фундаментальным основами метода ФС лазерного модифицирования, касающихся влияния различных параметров лазерного воздействия на характер и свойства образующихся локальных модификаций в объеме оксидных стекол и прозрачных ситаллов. Важной для проведения исследований представляется глава 1.5, в которой автор сопоставляет известные работы по лазерной микромодификации ситаллов различных систем, рассматривает ряд прикладных применений и достаточно аргументировано отдает предпочтение алюмосиликатным матрицам в качестве объекта исследований. В заключении обзора литературы автором обоснованно резюмируется, что существующие сегодня данные о лазерной микромодификации прозрачных ситаллов не позволяют судить даже о знаке изменения показателя преломления материала, не говоря о способах записи элементов фотоники и интегральной оптики в их объеме.

Во **2 главе** приведено подробное описание процессов подготовки шихты и синтеза образцов стекол и ситаллов, а также основные методы исследования, предполагающие изучение комплекса физико-химических характеристик, микроструктуры и свойств прозрачных ситаллов. Стоит отметить вполне достаточную экспериментальную и исследовательскую базу, на которой выполняется синтез стекол и ситаллов, а также грамотный подход к постановке экспериментов по ФС лазерной микрообработки.

В **3 главе** приведены результаты выполненных исследований и их анализ. Работа содержит большое количество проведенных экспериментов по исследованию кристаллизационных свойств стекол и описанию характеристик ситаллов, полученных на их основе. Комплексный подход к изучению кристаллизационных свойств литиевоалюмосиликатного стекла позволил уточнить температурный режим ситаллизации, позволяющий плавно регулировать субмикроструктуру образцов и, как следствие, их свойства. Автором детально изучено влияние параметров лазерной микрообработки на характеристики модифицированных областей в объеме

синтезированных ситаллов. Практической ценностью обладает предложенный автором подход к локальной аморфизации кристаллической фазы в объеме ситаллов, который позволяет добиться изменения показателя преломления. Причем, в зависимости от режима лазерной микрообработки и состава исследуемой матрицы показана возможность варьировать знак и величину показателя преломления. Автором приводятся результаты просвечивающей электронной микроскопии модифицированных областей, подтверждающие выдвинутые предположения о протекании процессов фазового превращения, происходящих в результате воздействия ультракоротких импульсов. Предложенный метод лазерной записи оболочек световедущих каналов, характеризующихся пониженным показателем преломления относительно матрицы, не противоречит известным методам записи волноводных структур в прозрачных диэлектриках и доказывает свою состоятельность, поскольку все обозначенные цели были достигнуты. Установлена взаимосвязь между режимом лазерной записи и геометрическими параметрами волноводных структур, оказывающие влияние на модовую характеристику и величину оптических потерь. Предложенные подходы легли в основу полученного патента РФ «Способ лазерной записи интегральных волноводов».

В **Заключении** представлены основные выводы по работе, в которых суммированы достигнутые результаты диссертационного исследования, приведены режимы ФС лазерной микромодификации и характеристики модифицированных областей в объеме исследуемых ситаллов.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, результаты проведенных исследований, выводы и публикации автора по теме диссертации. Работа Наумова А.С. хорошо оформлена, содержит достаточное количество фактического и иллюстрационного материала.

В диссертации получены результаты, имеющие практическую значимость в области процессов взаимодействия сверхкоротких лазерных импульсов с прозрачными диэлектриками, обладающие новизной и являющиеся оригинальными. Результаты соответствуют поставленным целям и задачам; тема диссертации соответствует заявленной специальности.

Диссертационная работа Наумова А.С. на тему: «Фемтосекундное лазерное микромодифицирование структуры ситаллов» соответствует паспорту специальности 2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов.

Замечания и вопросы по диссертационной работе:

1. В первой главе описано большое количество промышленных аналогов прозрачных ситаллов с близкими физико-механическими и теплофизическими свойствами. Однако при проведении экспериментов по лазерной микрообработке выбор объектов исследований был ограничен синтезированными образцами ситаллов. Исследование лазерной микрообработки промышленных образцов могло бы способствовать обобщению эффектов и явлений, происходящих в объеме стеклокристаллических материалов и трансляции методики записи волноводных структур в их объеме.

2. В работе отсутствуют данные о локальном перераспределении элементов химического состава в модифицированных областях, записанных в объеме литиевоалюмосиликатного ситалла. Результаты подобного исследования могли бы дополнить представления о природе изменения показателя преломления под действием лазерных импульсов.

3. В работе подробно описано влияние различных режимов лазерной микрообработки ситаллов на характеристики модифицированных областей, однако не представлен анализ возможного влияния небольших изменений в химическом составе исследуемых ситаллов на эффективность ФС лазерной микромодификации. Подобный анализ мог бы усилить понимание взаимосвязи между составом материала и его поведением при лазерной обработке.

4. Имеются замечания к оформлению диссертационной работы. В частности, на рисунках 53, 54 автору следовало привести шкалу интенсивности излучения моды на выходе из волноводов.

Тем не менее, указанные замечания не влияют на общую положительную характеристику работы и носят рекомендательный характер. Диссертация Наумова А.С. представляет собой завершенное исследование, направленное на решение актуальной задачи.

Заключение по работе

Диссертационная работа Наумова Андрея Сергеевича на тему: «Фемтосекундное лазерное микромодифицирование структуры ситаллов» отвечает требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 в последней редакции), выдвигаемым к работам, представленным на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В соответствии с п. 9 диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата наук Наумова Андрея Сергеевича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные решения, а значит, вносит значительный вклад в развитие отрасли знаний в области процессов взаимодействия сверхкоротких лазерных импульсов с прозрачными диэлектриками.

Таким образом, диссертационная работа, представленная к защите Наумовым Андреем Сергеевичем, имеет новизну и практическую значимость в части отдельных результатов исследования, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов.

Официальный оппонент

Никоноров Николай Валентинович

22 апреля 2024г

Никоноров Николай Валентинович

Доктор физико-математических наук (специальность 1.3.6. Оптика), профессор,
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», директор
научно-исследовательского центра оптического материаловедения

Адрес: 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А

Тел. +7 (812) 337-68-81

e-mail: nikonorov@oi.ifmo.ru

Подпись официального оппонента Никонорова Николая Валентиновича заверяю:

менеджер ОПС
Дымова Ю.В.
22.04.2024

