

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор

Института общей физики  
имени А.М. Прохорова РАН

И.А. Щербаков

2016 г.

## О Т З Ы В

ведущей организации на диссертационную работу Липатьевой Татьяны Олеговны «Формирование под действием лазерного излучения волноводных структур в стеклах и исследование их оптических характеристик», представленную на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 05.17.11 – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов

Интенсивные исследования в области физикохимии и технологии силикатов и их германатных аналогов в значительной степени стимулируются постоянно усложняющимися запросами информационных технологий, фотоники, лазерной физики. В настоящее время поиск оптических сред, пригодных для применений в качестве компонентов интегральной оптики, становится одной из ключевых задач оптического материаловедения. Значительный интерес в рамках этой задачи представляют исследования стекол, в объеме и на поверхности которых могут быть сформированы выделения активных диэлектрических кристаллов. При этом использование лазеров в качестве инструмента для локального модифицирования стекол с целью выделения кристаллической фазы оправдано для создания миниатюрных волноводных устройств, сочетающих в себе пассивные аморфные и/или активные кристаллические элементы. Однако до настоящего времени возможности формирования кристаллических структур, пригодных для использования в качестве волноводных элементов интегральной оптики, не обсуждались. Несмотря на то, что химия и химическая технология стекла достигли высокой степени развития, процессам кристаллизации, и особенно

локальной кристаллизации полярных, в том числе, сегнетоэлектрических фаз в стекле уделяется явно недостаточное внимание.

В связи с этим актуальность диссертационной работы Липатьевой Т.О., направленной на изучение кристаллизационных процессов в стеклах под действием лазерного излучения, отыскание новых подходов к формированию на поверхности и в объеме стекол кристаллических волноводных структур и установление взаимосвязи между характеристиками исходного стекла, параметрами лазерной обработки и свойствами сформированных волноводов, не подлежит сомнению.

Представленная квалификационная работа изложена на 180 страницах и состоит из введения, трех глав, выводов и списка литературы из 224 источников.

В первой главе описаны достижения в области лазерной кристаллизации как в объеме, так и на поверхности стекол, проанализированы выбранные для исследования стеклообразующие системы и свойства выделяемых в них кристаллов. В качестве объекта для кристаллизации выбраны стекла литиевоборогерманатные и лантаноборогерманатные, в которых возможно выделение нелинейно-оптических кристаллов  $\text{LiBGeO}_4$  и  $\text{LaBGeO}_5$  соответственно. Обсуждены данные о влиянии параметров лазерного пучка на процессы локальной кристаллизации и характер получаемых структур. Рассмотрены современные методы лазерного формирования аморфных волноводов с различными профилями и кристаллических структур в стеклах как в виде отдельных кристаллов и массивов кристаллов, так и представляющих собой непрерывные поликристаллические структуры с выраженными границами кристаллических зерен. Особое внимание уделено анализу возможностей использования лазерного воздействия на стекла по сравнению с традиционными методами ионной имплантации, ионного обмена и литографии.

Во второй главе описаны используемые автором методики синтеза и исследований свойств стекол, способы локального лазерного облучения стекол.

Поскольку в работе Липатьевой Т.О. в состав выбранных стекол входила значительная часть дорогостоящего оксида германия, то особое внимание отводилось получению стекол оптического качества в условиях лабораторных варок. Синтез стекол производился с варьированием и оптимизацией условий варки, при этом было изучено влияние свилей и пузырей в сформованном стекле на процессы лазерного модифицирования. Для изучения свойств стекол и полученных в них кристаллических и аморфных структур Липатьевой Т.О. использован комплекс современных методов локального анализа, позволивший адекватно описать изучаемые процессы на самых ранних стадиях кристаллизации.

Описанные в третьей главе результаты лазерного модифицирования можно разделить на две основные части: облучение стекол с помощью лазера на парах меди, позволяющее сформировать кристаллические структуры на поверхности литиевоборогерманатных стекол, и облучение фемтосекундным лазером, с помощью которого были получены кристаллические и аморфные структуры в объеме лантаноборогерманатных стекол. При этом автор подчеркивает, что для литиевоборогерманатных стекол характерна поверхностная кристаллизация, а склонность к объемной кристаллизации этих стекол значительно ниже, чем у лантаноборогерманатных. Благодаря варьированию условий облучения удалось в литиевоборогерманатных стеклах сформировать поверхностные кристаллические и аморфные структуры с помощью лазера на парах меди, а в объеме лантаноборогерманатных стекол осуществить локальное модифицирование свойств фемтосекундным лазерным пучком. Показано влияние основных параметров лазерного облучения - энергии, длительности, частоты следования импульсов, поляризации, скорости и направления перемещения лазерного пучка, геометрии пучка на морфологию сформированных структур. Большое внимание уделяется исследованию процессов зарождения кристаллов под действием пучка неподвижного лазера и детектированию наличия кристаллов. Предложен метод, позволяющий

значительно снизить время ожидания зарождения затравочных кристаллов и работающий для различных сечений перетяжки лазерного пучка.

С прикладной точки зрения особый интерес представляет способ кристаллизации стекла с помощью лазерного пучка с эллиптическим сечением перетяжки, использование которого позволяет снизить температурный градиент в процессе кристаллизации и приводит к формированию кристаллического трека рекордно малой толщины и с минимальными на данный момент потерями на пропускание. Именно для кристаллического волновода, сформированного с помощью лазерного пучка, перетяжка которого имеет эллиптическое сечение, продемонстрирован эффект генерации второй гармоники и измерена эффективность преобразования основного излучения. Для изменения профиля лазерного пучка были использованы различные оптические элементы - призматический телескоп, цилиндрические линзы с различными фокусными расстояниями. Более того, показана возможность кристаллизации одновременно восемью пучками, что может быть использовано для создания кристаллических текстур в стеклообразной матрице, например, пьезоэлектрических текстур на основе борогерманата лантана со структурой стилвеллита.

В лантаноборогерманатных стеклах с разным содержанием неодима сформированы кристаллические волноводы, содержание неодима в которых соответствует его содержанию в стекле, что может непосредственно задаваться при синтезе. Автором работы показано, что ионы неодима равномерно встраиваются в структуру кристаллических волноводов, замещая атомы лантана. Такие кристаллические структуры перспективны для использования в качестве активных сред для миниатюрных лазеров. Не менее важным является то, что автор обратил внимание на технологический аспект подготовки стекол для лазерной кристаллизации и установил требования, которым должно соответствовать стекло для получения наилучшего результата.

Стоит отметить наличие в тексте диссертации ссылок на результаты, опубликованные автором. Такое представление информативно и наглядно

демонстрирует полноту отражения результатов исследований диссертационной работы в рецензируемых печатных изданиях.

Научная новизна полученных результатов и их практическая значимость не вызывает сомнений. Тем не менее, полученные результаты в ряде мест обсуждаются излишне скупно, а иногда сводятся к констатации фактов.

Автор располагал широкими возможностями исследования сформированных структур. Однако методы количественного анализа двулучепреломления, атомная силовая микроскопия и методика измерения локального показателя преломления были использованы в основном для характеристики кристаллических волноводов, сформированных в лантаноборогерманатном стекле. Было бы более наглядно привести подобные результаты и для структур в литиевоборогерминитных стеклах. Особенно интересно было бы сравнить влияние поглощающих добавок NiO и Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на свойства и структуру полученных волноводов.

Использование автором термина "кристаллический канал" не вполне корректно с семантической точки зрения, так как каналом обычно называют узкую длинную полость, которая в данном случае, очевидно, отсутствует. Более оправдано было бы использовать термин "трек".

При обсуждении рекомендаций к качеству полировки, свильности и пузырности стекол автору стоило бы добавить соответствующие фотографии поверхности стекол.

К сожалению, недостаточно внимания в диссертации уделено сведениям об оптическом качестве стекол и методах его контроля. Требования к стеклам, при выполнении которых гарантируется воспроизводимость процесса кристаллизации под действием лазерного пучка, сформулированы недостаточно четко, в частности не вполне понятно, какова должна быть (при заданных параметрах лазерного пучка) температура стеклования, плавления, степень однородности и т.д.?

Имеются недостатки, связанные с оформлением рисунков. Иногда подписи или обозначения на рисунках плохо читаемы (например, рисунки 47,

54, 56, 57). В выводах из диссертации нижние и верхние подстрочные индексы не использованы.

Вышесказанные замечания во многом носят рекомендательный характер и не снижают теоретической и практической значимости полученных результатов.

Подводя итог обсуждаемой диссертационной работы, следует отметить, что работа Липатевой Т.О. вносит заметный вклад в развитие представлений о локальной кристаллизации стекол под действием лазерного излучения. Они безусловно имеют практическую значимость для формирования активных структур на основе нелинейно-оптических кристаллов. Результаты, полученные в диссертации Липатевой Т.О., указывают на возможность разработки технологии локальной управляемой лазерной кристаллизации стекол и в будущем будут востребованы для совершенствования элементной базы интегральной оптики и фотоники.

Липатевой Т.О. выполнено большое по объему физико-химическое исследование процессов кристаллизации стекол под действием лазерного излучения с привлечением самых современных методов локального анализа, получены ценные научные и прикладные результаты, которые вносят вклад в развитие представлений о начальных стадиях зарождения и росте кристаллов в стеклах при лазерном облучении. Автореферат диссертации и публикации полностью отражают основное содержание работы.

Необходимо отметить, что заглавие работы скорее соответствует физико-математическим наукам. Однако, внимательное рассмотрение диссертации свидетельствует о том, что работа выполнена на стыке наук и может быть защищена на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 05.17.11. – технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов.

Диссертационная работа отвечает требованиям п.9 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842,

предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а Липатьева Т.О. заслуживает присуждения степени кандидата химических наук по специальности 05.17.11. – технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов.

Диссертация и автореферат Липатьевой Т.О. «Формирование под действием лазерного излучения волноводных структур в стеклах и исследование их оптических характеристик», обсуждены, а отзыв заслушан и Диссертация и автореферат Липатьевой Т.О. «Формирование под действием лазерного излучения волноводных структур в стеклах и исследование их оптических характеристик» обсуждены, а отзыв заслушан и утвержден на заседании Ученого совета отдела «Субмиллиметровая спектроскопия» ИОФ РАН, протокол № 91 от «3» ноября 2016 года

Заведующий Лабораторией технологии наноматериалов  
для фотоники ИОФРАН им. А.М. Прохорова

д. х. н., профессор

П.П. Федоров



Ученый секретарь ИОФРАН им. А.М. Прохорова

к. ф.-м. н.

С.Н. Андреев

