

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Доктора технических наук

Сысоева Валентина Константиновича

на диссертационную работу

Михайлова Юрия Владимировича на тему «**Фемтосекундная лазерная запись двулучепреломляющих и люминесцирующих микроструктур в нанопористых стеклах**», представленную на соискание учёной степени кандидата химических наук по специальности 2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов

Создание систем длительного хранения данных является приоритетной задачей современной информационной техники

Традиционные носители (магнитные диски, флеш-память) имеют ограниченный срок жизни (десятки лет) и подвержены деградации под действием внешних факторов.

Технология оптической памяти на основе кварцевого стекла, использующая фемтосекундную лазерную запись нанорешеток (5D-технология), демонстрирует высокую долговечность, но страдает от низкой скорости записи – формирование одного вокселя требует десятков или сотен импульсов. Поэтому поиск новых методов увеличивающих качество оптической памяти, заключающийся в создании новых функциональных материалах и новых методов формирования вокселей **является актуальной задачей.**

Поэтому работа Михайлова представляется чрезвычайно актуальной.

Диссертант предлагает принципиально новый подход: использовать в качестве носителя информации нанопористое стекло (НПС). Благодаря развитой поверхности и особенностям взаимодействия лазерного излучения с пористой структурой, запись двулучепреломляющих элементов происходит уже при 3–5 импульсах, что на порядок быстрее чем в кварцевых стеклах. Кроме того, наличие сквозной пористости позволяет импрегнировать стекло люминесцирующими добавками, создавая дополнительный канал кодирования.

Автор провел работы в двух дополняющих друг друга направлениях : -создание новой оптической среды (нанопористых стекол) и усовершенствование лазерных методов записи элементов (вокселей) в этих стеклах .Таким образом, работа Михайлова Ю.В. направлена на решение двух взаимосвязанных проблем: увеличение скорости записи и повышение информационной ёмкости носителя. Это определяет высокую актуальность диссертации для развития технологий долговременного хранения данных, а также для фотоники (активные волноводы).

Диссертация состоит из введения трех глав заключения списка литературы изложена на 131 странице и содержит детальное описание проведенных исследований.

В ходе выполнения работы автором получен ряд **новых научных результатов**, имеющих как фундаментальное, так и прикладное значение.

В результате детального исследования влияния параметров поровой структуры стекла на лазерное модифицирование автору удалось впервые установить зависимость величины наведённого двулучепреломления от условий синтеза НПС (температура ликвации, температура консолидации). Показано, что ключевым параметром является не диаметр пор (который меняется незначительно), а удельный объём пор. При консолидации при 730–740 °С удельный объём падает с 0,138 до 0,046 см³/г, что приводит к резкому снижению оптической разности хода (ОРХ) и сужению энергетического окна записи. Этот результат весьма важен для понимания механизма формирования нанорешеток в пористых средах.

Методом сканирующей электронной микроскопии автор проследил эволюцию структуры: при 2–4 импульсах образуется эллиптическая полость, при 5 и более – нанорешетка, аналогичная кварцевому стеклу. При этом перезапись (изменение ориентации медленной оси) возможна уже при 4 импульсах, тогда как для монолитного кварцевого стекла требуется 50–100 импульсов. Этот результат имеет прямое практическое значение для создания перезаписываемых оптических носителей.

Продемонстрировано многоуровневое кодирование с использованием сигнала люминесценции. Разработаны методики импрегнирования НПС ионами Ag^+ , Bi^{3+} и Sm^{3+} . Наиболее интересен подход с серебром: одиночный импульс формирует люминесцирующий воксел (нанокластеры Ag), а увеличение числа импульсов приводит к формированию двулучепреломления. Это позволило кодировать 1 бит в люминесценции и до 3 бит в двулучепреломлении (ориентация оси и уровень ОРХ) с точностью считывания 100% и 99,86% соответственно. Для самария показана возможность независимого кодирования за счёт лазерного восстановления $\text{Sm}^{3+} \rightarrow \text{Sm}^{2+}$, причём этот процесс слабо зависит от длительности импульса, что позволяет разделять каналы. В итоге реализована 6D-запись

В качестве технологических достижений следует отметить оптимизацию синтеза крупногабаритных дисков из НПС (диаметр 100 мм, толщина 6 мм) из промышленного стекла ДВ-1 (подавляющее число исследований, посвященных синтезу НПС, выполнено на образцах малых размеров с линейным размером порядка 1 см). Впервые для НПС, импрегнированного висмутом, продемонстрирована лазерная запись волноводов с широкополосной люминесценцией в ближней ИК-области (1200–1500 нм), что открывает перспективы создания активных волноводных усилителей.

Практическая значимость работы в первую очередь связана с тем, что разработанные технологические режимы могут быть непосредственно использованы в производстве оптических носителей нового поколения. Крупногабаритные заготовки НПС пригодны для нанесения на них стандартных сервометок и последующей записи данных на коммерческих лазерных установках. Показанная термостабильность люминесцентных вокселей ($400\text{ }^\circ\text{C}$, 1 ч) соответствует расчётному сроку хранения не менее 1000 лет, что превосходит требования к архивной памяти (обычно не более 30 лет). Кроме того, методика получения активных волноводов может найти применение в интегральной фотонике, в частности для создания компактных источников излучения в телекоммуникационном диапазоне.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается:

- использованием комплекса взаимодополняющих методов: адсорбция азота (БЭТ), оптическая и сканирующая электронная микроскопия, спектроскопия люминесценции, поляризационная оптическая томография;
- применением современного оборудования (лазерная установка Light Conversion Pharos SP, объектив с NA 0,65, трёхкоординатный стол Aerotech);
- хорошей воспроизводимостью результатов, подтверждённой статистическими данными;
- публикацией основных результатов в 4 рецензируемых журналах, включая Q1 (*Microporous and Mesoporous Materials*), а также апробацией на 6 всероссийских и международных конференциях.

Несмотря на общее высокое качество работы, считаю необходимым высказать следующие **замечания и пожелания**.

1. Отсутствие данных о количестве циклов перезаписи. Автор сообщает, что перезапись четырьмя импульсами позволяет достичь «той же величины ОРХ, что и у исходного воксела». Однако не указано, сколько циклов перезаписи выдерживает материал без деградации. Для практического использования перезаписываемых носителей это критично.

2. Недостаточное обсуждение влияния длительности импульса на процесс величину формируемой оптической разности хода в вокселах. Отмечено, что «длительность импульса практически не влияет на возможность восстановления ионов самария», но при длительности 600 фс ОРХ заметно ниже, чем при 180 фс. Следовательно, для разделения каналов важно выбирать длительность, но автор не приводит количественных критериев выбора.

3. . Утверждается, что «выход годной продукции составил 100%» для четырёх дисков. Такая малая выборка не позволяет сделать статистически значимый вывод. Кроме того, не указаны методы контроля качества (отсутствие трещин, равномерность пористости по площади диска). Для промышленного

внедрения необходимы данные о воспроизводимости свойств от партии к партии.

4. Химическая устойчивость. В автореферате не приведены данные о стойкости НПС к воздействию влаги, кислот или щелочей. Поскольку пористое стекло может адсорбировать воду из атмосферы, это могло бы повлиять на долговременную стабильность. Желательно было бы провести ускоренные испытания во влажной среде, а может быть, и поставить вопрос о создании носителей из НПС с закрытой пористостью за счет оплавления поверхностного слоя НПС.

Эти замечания не снижают общей высокой оценки работы, а скорее указывают на направления дальнейших исследований. Исследования проведенные в диссертационной работе носят комплексный характер: от исследование материалов до создание микроструктур в этих материалах лазерным излучением. Диссертация и автореферат написаны логично, ясным языком, хорошо иллюстрированы.

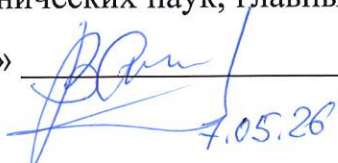
Заключение о соответствии диссертации критериям

Диссертационная работа Михайлова Ю.В. является завершённым научным исследованием, содержащим решение актуальной задачи – создание функциональных материалов на основе нанопористых стекол для высокоскоростной многомерной оптической записи.

Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9–14 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (в действующей редакции Постановления Правительства Российской Федерации), с учетом соответствия паспорта специальности, а её автор, **Михайлов Юрий Владимирович**, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата химических наук по специальности 2.6.14 Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, главный специалист проектного комплекса 510 «НПО Лавочкина» _____ Сысоев Валентин Константинович


7.05.26

Адрес: 141402, Московская область, г. Химки, ул. Ленинградская, д. 24

Телефон: +7 495 2866000 (9297)

E-mail: sysoev@laspace.ru

Сайт: <https://www.laspace.ru>

Даю свое согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку



7.05.26

Сысоев Валентин Константинович

Подпись главного специалиста АО «НПО Лавочкина», доктора технических наук Сысоев Валентина Константиновича удостоверяю:

Заместитель генерального директора
по персоналу и общим вопросам



 Шолохова И.В.