

На правах рукописи

ШТЕЙНБЕРГ Илья Шнеерович

ЛАЗЕРНЫЙ ДВУХПУЧКОВЫЙ МЕТОД МНОГОСЛОЙНОЙ
ЗАПИСИ/СЧИТЫВАНИЯ МИКРОГОЛОГРАММ В ОБЪЕМНЫХ
РЕГИСТРИРУЮЩИХ СРЕДАХ

01.04.05 «Оптика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институте автоматики и электрометрии
Сибирского отделения РАН

Научный руководитель доктор технических наук,
профессор
Твердохлеб Петр Емельянович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Мешалкин Юрий Петрович
кандидат физико-математических наук
Пугачев Алексей Маркович

Ведущая организация Санкт-Петербургский государственный
университет информационных технологий,
механики и оптики (ИТМО)

Защита состоится “__” _____ 20 г. в _____ часов на заседании диссертационного
совета Д 003.005.01 при Институте автоматики и электрометрии СО РАН по
адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан “__” _____ 20 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Насыров К. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Наиболее распространенные в настоящее время системы дисковой памяти с записью данных на поверхности оптического носителя подошли к пределу плотности записи, обусловленному как техническими и технологическими причинами, так и фундаментальными. Дальнейшее развитие технологии оптической памяти возможно за счет использования толстых регистрирующих сред. Это направление реализуется путем наложенной записи объемных голограмм, а также путем многослойной записи информации. Технология наложенной голографической записи информации достигла значительных успехов и близка к выходу на потребительский рынок. Однако для эффективного использования при этом страничного формата данных необходимо разрабатывать новые параллельные системы связи с компьютером. В то же время в многослойных (побитовой и микроголографической) технологиях записи информации, являющихся своеобразным трехмерным аналогом технологии CD/DVD, можно применять существующие последовательные интерфейсы. Разработанные в Германии и США методы многослойной записи информации находятся на стадии научно-исследовательских работ и не лишены существенных недостатков, связанных с неоднородностью записи по глубине, неэффективным использованием динамического диапазона среды. Также не решена в полной мере проблема компенсации изменяющейся при переходе от слоя к слою сферической аберрации.

Таким образом, несмотря на то, что методы многослойной записи информации имеют значительную перспективу увеличения плотности записи и емкости памяти, указанные недостатки препятствуют их развитию и применению. Поэтому задача разработки новых методов многослойной записи/считывания информации, лишенных упомянутых недостатков, остается по-прежнему *актуальной*.

В настоящей диссертации показано, что указанная задача может быть решена путем глубинной записи микроголограмм с использованием механизма двухфотонного поглощения, применения многоуровневого фазового кодирования при записи и фазочувствительного гетеродинного считывания.

Цели и задачи диссертации

Разработка и исследование нового лазерного двухпучкового метода многослойной записи/считывания микроголограмм в объемных регистрирующих средах, позволяющего в отличие от известных локализовать при записи интерференционную микроструктуру (микроголограмму) с дискретно изменяемой фазой и провести последующее гетеродинное детектирование такой микроструктуры с определением ее амплитуды и фазы.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- Предложить, обосновать и разработать метод многослойной записи/считывания микроголограмм в объемной регистрирующей среде.

Показать возможности повышения плотности и скорости записи информации при многоуровневом фазовом кодировании информации в микроголограмме. Определить предельную плотность записи информации.

- Исследовать особенности коллинеарного фазочувствительного гетеродинного считывания микроголограмм при их импульсном освещении.
- Создать автоматизированную установку для экспериментального исследования предложенного метода записи/считывания микроголограмм в объемных регистрирующих средах в режимах линейного и двухфотонного поглощения. Установка должна обеспечить прецизионное перемещение среды по трем координатам, возможность выбора экспозиции и фазы для каждой из микроголограмм при записи и их гетеродинное считывание с определением амплитуды и фазы.
- Определить основные характеристики установки: чувствительность гетеродинного фотодетектирования, размеры сформированной в глубине среды микроголограммы и размер области пространственной селекции, характеризующий разрешающую способность разрабатываемого метода по глубине.
- Провести исследование метода многослойной записи микроголограмм в режиме двухфотонной инициации локальных фотопревращений в кристаллах ниобата и танталата лития, а также в толстых слоях фотополимерных материалов. Определить размеры микроголограмм, величину амплитуды модуляции показателя преломления и характерное время их записи. Изучить возможности осуществления неразрушающего считывания.

Научная новизна:

Новыми результатами диссертации являются:

1. Лазерный двухпучковый метод многослойной записи и гетеродинного фазочувствительного считывания микроголограмм в объемных регистрирующих средах. Метод защищен авторским свидетельством и патентом РФ.
2. Обнаруженная и экспериментально подтвержденная возможность восстановления при гетеродинном считывании размера отклика¹, близкого к дифракционно-ограниченному значению, несмотря на наличие сферической аберрации, увеличивающей размер микроголограмм при их многослойной записи.
3. Двухфотонная запись микроголограмм в нелегированном конгруэнтном танталате лития с их последующим неразрушающим гетеродинным считыванием на длине волны $\lambda_0 = 0,66$ мкм. Значительное сокращение характерного времени записи микроголограммы по сравнению с традиционным случаем, когда возбуждение происходит с примесного уровня. Получение насыщенного значения амплитуды модуляции показателя преломления на уровне $\Delta n_s = 10,7 \times 10^{-4}$.
4. Обнаруженное влияние стехиометрии нелегированного танталата лития при двухфотонном возбуждении на амплитуду модуляции показателя

¹ Отклик – сигнал на выходе фотоприемника, полученный при считывании микроголограммы.

преломления, голографическую чувствительность и характерное время записи микроголограмм, что позволяет вести целенаправленный с точки зрения указанных параметров поиск оптимальной концентрации лития. Получение при концентрации лития 48,38 мол.% насыщенного значения амплитуды модуляции показателя преломления $\Delta n_s = 2,1 \times 10^{-3}$, характерного времени записи микроголограмм $\tau = 24$ нс и значения голографической чувствительности $S = 1,3$ см/Дж (в три раза превышает значение, полученное с легированным железом танталатом лития).

5. Двухфотонная запись микроголограмм в фотополимерных материалах на основе новых тиоксантоновых хромофоров со значениями амплитуды модуляции показателя преломления $\Delta n = 4,8 \times 10^{-3}$ и голографической чувствительностью $S = 1,2$ см/Дж. Автору неизвестны сообщения о получении таких значений Δn при двухфотонной фотополимеризации.

Практическая значимость и реализация результатов работы. Физико-технические решения и методики, принятые при проведении многослойной записи/считывания микроголограмм в объемных регистрирующих средах, включающие методику селективной глубинной модификации среды и гетеродинного считывания модифицированного состояния, методику измерения распределения шумов рассеяния и чувствительности по глубине среды, а также методику исследования собственной фоторефракции нелегированных кристаллов танталата и ниобата лития в условиях двухфотонного межзонного фотовозбуждения, являются основой для развития новых информационных технологий 3D оптической памяти, защитной голографии и научного эксперимента.

Результаты, полученные в диссертации, использованы в следующих организациях:

– ИАиЭ СО РАН при проведении инициативных НИР, проектов РФФИ, интеграционных проектов СО РАН и научных программ РАН (1993-2009 гг);

– Новосибирском институте органической химии СО РАН при создании фотополимерной композиции с низким уровнем шумов рассеяния, а также фотополимерного материала для двухфотонной записи;

– Институте физики полупроводников СО РАН при определении уровня фоторефрактивной чувствительности кристаллов танталата лития с неизвестной предысторией и определении диапазона концентрации лития, обеспечивающего минимальное оптическое повреждение кристаллов;

– Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН при определении влияния уровня индуцированных двухфотонных оптических потерь на эффективность процессов параметрического преобразования частоты в нелинейных кристаллах твердых растворов на основе танталата лития.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложенный двухпучковый метод позволяет осуществить многослойную запись, селективное по глубине считывание микроголограмм в объемных фоторефрактивных средах (кристаллы ниобата и танталата лития, фотополимерные материалы), а также

увеличить плотность и скорость записи путем применения многоуровневого фазового кодирования информации (в три раза при реализованном восьмиуровневом кодировании).

2. С помощью гетеродинного фазочувствительного считывания можно восстанавливать размер отклика, близкого к дифракционно-ограниченному значению, несмотря на наличие сферической аберрации, увеличивающей размер микроголограмм при их многослойной записи.
3. При записи микроголограмм в нелегированных фоторефрактивных кристаллах ниобата и танталата лития двухфотонное межзонное фотовозбуждение обеспечивает значения амплитуды модуляции показателя преломления, близкие к предельным, полученным для этих же материалов, но с оптимальным уровнем легирования. При этом также происходит сокращение характерного времени записи по сравнению с традиционным случаем, когда возбуждение происходит с примесного уровня.
4. Использование двухфотонного поглощения в толстых регистрирующих средах позволяет решить основные проблемы многослойной записи: обеспечить *однородную* запись микроголограмм во всем объеме среды и их *неразрушающее* детектирование с восстановлением амплитуды и фазы. В этом случае (в отличие от линейного поглощения) в *каждом* слое может быть достигнуто предельное для таких сред значение амплитуды модуляции показателя преломления.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации рассматривались на следующих конференциях: Second International Conference on “Optical Information Processing” Saint-Petersburg, Russia, 1996; International Conference on “Optical Information Science and Technology” Moscow, Russia, 1997; XVI International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, Moscow, Russia 1998; 101 Tagung “Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik” Jena, Germany, 2000; Ninth International Conference on “Photorefractive Effects, Materials, and Devices” Nice, France, 2003; Tenth International Conference on “Photorefractive Effects, Materials, and Devices” Sanya, P. R. China, 2005; Topical meeting “Controlling Light with Light: Photorefractive Effects, Photosensitivity, Fiber Gratings, Photonic Materials” Olympic Valley, California, USA, 2007; Topical Meeting on Optoinformatics, Saint-Petersburg, Russia, 2008; Topical meeting “Photorefractive Materials, Effects, and Devices” Bad Honnef, Germany, 2009.

Личный вклад автора. Постановка и решение задач исследования по теме диссертации, разработка необходимых методик и оптико-механической части экспериментальной установки, проведение экспериментальных исследований выполнены автором.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 21 научной работе, в том числе в 1 авторском свидетельстве, 1 патенте РФ, 7 научных статьях, 1 монографии (две главы) и 10 трудах международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы из 93 наименований, изложенных на 147 страницах, содержит 50 иллюстраций, 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи работы, новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе, имеющей обзорный характер, изложены современные оптические методы записи и хранения информации.

Проведен анализ наиболее распространенных в настоящее время систем дисковой памяти с записью данных на поверхности оптического носителя типа CD, DVD и Blue Ray. Показано, что подобные системы подошли к пределу плотности записи. В то же время требование дальнейшего увеличения плотности и емкости систем памяти является существенным, что и стимулирует исследования в этой области. Дальнейшее увеличение емкости памяти запоминающих устройств возможно за счет использования объемных или многослойных сред и новых методов оптической записи информации. Так при использовании объемных сред плотность оптической записи информации пропорциональна $1/\lambda^3$, что составляет величину $\sim 10^{13}$ бит/см³ (для $\lambda \sim 0,5$ мкм) в отличие от записи информации на поверхности среды, где предельная величина плотности примерно равна $1/\lambda^2$, что соответствует $10^8 \div 10^9$ бит/см².

Трехмерная запись информации в толстых регистрирующих средах может проводиться двумя методами. Первый – это наложенная запись объемных голограмм, распределенных по всей толщине среды, второй – многослойная запись, в которой информация записывается во многих последовательно расположенных слоях регистрирующей среды. Указанные методы отличаются своими возможностями, а также требованиями к регистрирующей среде.

Проведен обзор методов голографической наложенной и многослойной памяти. Отмечены их достоинства и недостатки. Показано также, что в настоящее время ни голографическая странично-ориентированная, ни многослойная память не достигли предела плотности $1/\lambda^3$ и имеют в связи с этим потенциал развития.

В главе 2 изложены основы предложенного двухпучкового метода многослойной записи микроголограмм, который позволяет провести локальную запись микроголограммы в объемной регистрирующей среде и ее гетеродинную фазочувствительную селекцию при считывании с возможностью восстановления амплитуды и фазы. Это означает, что при применении этого метода в оптических информационных технологиях можно использовать многоуровневое относительное фазовое кодирование и тем самым увеличить плотность и скорость записи информации. Суть метода проиллюстрирована с помощью рис. 1. Способ записи микроголограмм предусматривает использование двух когерентных сфокусированных пучков света: опорного 3 и гетеродинного 4. Эти пучки пространственно совмещаются в произвольном слое 11 объемной регистрирующей среды 1, и в области их пересечения записывается микроголограмма 2. Микроголограммы в других слоях

записываются путем перемещения зоны пересечения пучков по глубине объемной среды 1. В случае использования излучения с длиной волны $\lambda = 0,66$ мкм, фокусирующего объектива с числовой апертурой $NA = 0,65$ и среды с показателем преломления $n = 1,5$ размер микроголограммы по уровню $\frac{1}{2}$ максимальной интенсивности составляет по осям X, Y и Z соответственно $1 \times 1,4 \times 7$ мкм³, а ее пространственная частота равна ~ 1000 л/мм.

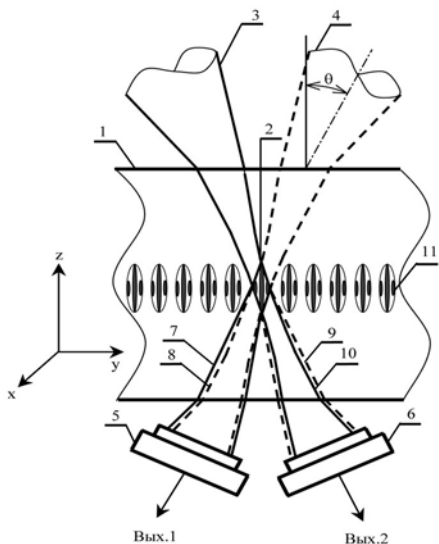


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая метод многослойной оптической записи и коллинеарного гетеродинного считывания микроголограмм

Для селекции зоны считывания в объеме регистрирующего материала 1 используется метод коллинеарного гетеродинирования. В этом случае частота света гетеродинного пучка 4 сдвигается на ω_r относительно частоты опорного пучка 3 и бегущая интерференционная решетка, образовавшаяся в зоне пересечения пучков 3 и 4, совмещается с микроголограммой 2, записанной в адресуемом слое 11. Световой пучок 7 образуется в результате дифракции на микроголограмме 2 пучка 3. Вследствие точного совпадения пространственных частот бегущей и записанной интерференционных решеток пучок 7 будет распространяться в одном направлении (коллинеарно) с пучком 4. В результате взаимодействия двух коллинеарных пучков с различными частотами света на выходе фотоприемника 5 появляется фототок с разностной частотой ω_r , несущий информацию о считанном сигнале. Причем фотоприемник 5 детектирует только то рассеянное на микроголограмме световое поле 7 опорного пучка 3, которое совпадает по направлению (угловому спектру пространственных гармоник) с прошедшей без дифракции частью 8 гетеродинного пучка 4. Гетеродинное считывание обеспечивает высокую помехозащищенность по отношению к шумам рассеяния оптических элементов и материала диска, поскольку происходит *только в зоне пересечения опорного и гетеродинного пучков света*, где формируется бегущая интерференционная решетка.

Метод гетеродинного считывания обладает уникальной возможностью восстанавливать не только амплитуду, но и, что важно для информационных технологий, фазу микроголограммы. Это позволяет применять фазовый способ кодирования информации, обеспечивающий более высокую помехозащищенность, чем амплитудное кодирование. Информационным параметром в предлагаемом методе кодирования является разность фаз пространственных решеток двух следующих друг за другом микроголограмм. Такое фазовое представление информации позволяет относительно просто реализовать многоуровневое кодирование и тем самым осуществить (при малом уровне шумов) запись данных с плотностью, превышающей дифракционное разрешение оптической системы. Так использование

восьмиуровневого фазового кодирования обеспечивает утроение плотности и скорости записи.

Рассматриваются особенности гетеродинного детектирования микроголограмм в условиях импульсного освещения. Показана возможность применения при детектировании фотоприемников с относительно невысоким быстродействием и, следовательно, большой площадью светочувствительной поверхности, что дает возможность практически полностью собрать свет гетеродинного и информационного пучков. Последнее условие является важным, позволяя учесть влияние рассогласования волновых фронтов пучков на результат селекции по глубине среды. Метод гетеродинирования импульсных световых полей применялся во всех экспериментах по многослойной оптической записи и считыванию информации, приведенных в диссертации.

Проводится анализ формирования объемной микрорешетки в области пересечения двух сфокусированных гауссовых пучков. Выражение для составляющей, несущей информацию о высокочастотной пространственной вариации интенсивности, описывается следующим выражением:

$$g(x, y, z) \propto \exp\left[\frac{-2(x^2 + y^2 \cos^2 \theta_1 + z^2 \sin^2 \theta_1)}{w_0^2}\right] \cos(-2k \sin \theta_1 y), \quad (1)$$

где w_0 - радиус перетяжки гауссова пучка, а θ_1 - половинный угол схождения пучков в среде. Выражение (1) имеет вид трехмерного гауссова распределения, а пространственная частота решетки $\nu = 2\sin\theta_1/\lambda$. Размеры микрорешетки по осям X, Y, Z, определенные по уровню $1/e^2$ максимальной интенсивности, соответственно равны:

$$r_x = w_0, r_y = w_0/\cos\theta_1, r_z = w_0/\sin\theta_1. \quad (2)$$

Показано, что при условии оптимального заполнения фокусирующего микрообъектива и соответственно получения минимального размера микрорешетки выражения (2) можно представить в виде

$$r_{x\min} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\lambda_0}{NA}, r_{y\min} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\lambda_0}{NA \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{2n}\right)^2}} \approx \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\lambda_0}{NA}, r_{z\min} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\lambda_0 n}{(NA)^2}, \quad (3)$$

где NA – числовая апертура микрообъектива, а λ_0 - длина волны излучения в воздухе. Учитывая (3), можно записать выражения для продольной, поперечной и объемной плотностей записи

$$D_z = \frac{1}{2r_{z\min}} = \frac{\pi(NA)^2}{8\lambda_0 n}, D_L = \frac{1}{\pi \cdot r_{x\min} r_{y\min}} \approx \frac{\pi(NA)^2}{(2\lambda_0)^2}, D_{3-D} = D_L D_z = \frac{\pi^2(NA)^4}{32\lambda_0^3 n}. \quad (4)$$

Для $\lambda_0 = 0,66$ мкм, $NA = 0,65$ и среды с показателем преломления $n = 1,5$ из выражения (4) получим значение ожидаемой предельной плотности записи

$1,3 \times 10^{11}$ бит/см³, а с учетом восьмиуровневого фазового кодирования плотность может увеличиться до $3,9 \times 10^{11}$ бит/см³. Эта величина всего в 9 раз меньше предельной плотности записи в объемных средах, получаемой согласно соотношению $1/\lambda^3$ ($3,5 \times 10^{12}$ бит/см³ для $\lambda_0 = 0,66$ мкм).

Глава 3 посвящена экспериментальному исследованию двухпучкового метода записи микроголограмм в фоторефрактивных регистрирующих средах в режиме линейного поглощения.

На рис. 2 приведена схема созданной экспериментальной установки.

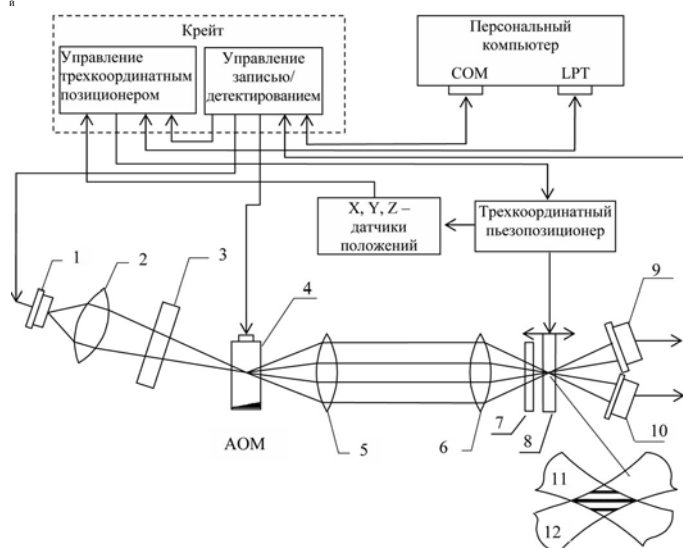


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки.

Пучок света полупроводникового лазера 1 оптической схемой 2, 3 формируется в виде перетяжки в зоне акустооптического взаимодействия модулятора (АОМ) 4. Полученные в результате дифракции световые пучки с помощью телескопической системы 5, 6 совмещаются в адресуемом слое объемной регистрирующей среды 8, где записывается образовавшаяся в зоне пересечения пучков 11, 12 микроголограмма. Для записи информации в других слоях среду 8 перемещают с помощью

пьезопозиционера по глубине относительно зоны пересечения световых пучков 11, 12. При проведении экспериментов применено восьмиуровневое фазовое кодирование информации. Наличие восьми градаций фазы позволяет в каждой микроголограмме записать трехразрядное двоичное слово, что приводит к утрате скорости и плотности записи.

Электронное устройство позволяет производить управление экспозицией и фазой записываемых микроголограмм, осуществлять прецизионное трехкоординатное перемещение регистрирующей среды, коллинеарное гетеродинное считывание записанных на различной глубине микроголограмм. Такое устройство в сочетании с разработанным программным обеспечением позволяет автоматизировать эксперимент.

Важнейшими характеристиками экспериментальной установки являются: порог чувствительности при коллинеарном гетеродинном детектировании, размер формируемой оптической схемой объемной микрорешетки и ее контраст, разрешающая способность по глубине.

Порог чувствительности, связанный как с чувствительностью самого гетеродинного метода считывания, так и с влиянием шумов электронных схем, определяется минимально измеряемым уровнем шумов рассеяния. Уровень шумов рассеяния характеризуется спектральной плотностью $\Phi_{ш}$ (отношение интенсивности шума, рассеянного в единичной полосе пространственных частот, к интенсивности света, падающего на регистрирующую среду) и может

быть записан как $\Phi_{ш} = \eta_{ш}/\Delta B$, где $\eta_{ш}$ – дифракционная эффективность шумовых решеток, ΔB – эффективная двумерная полоса пространственных частот оптической системы установки. Показано, что для разработанной установки спектральная плотность шума рассеяния составляет величину $\Phi_{ш} = 5,1 \times 10^{-12}$ мм². Учитывая, что спектральная плотность шумов рассеяния голографических фотоэмульсий и фотополимеров находится на уровне $(5 \div 10) \times 10^{-10}$ мм², можно сделать вывод о том, что оптическая схема гетеродинного детектирования сконструирована оптимально и чувствительность установки достаточна для уверенного обнаружения шумов рассеяния основных регистрирующих сред.

Проведенные измерения показали, что размеры микрорешетки в плоскости X, Y (по уровню 0,5 максимального значения интенсивности) составляют $1,0 \times 1,4$ мкм² ($\lambda_0 = 0,66$ мкм, NA = 0,65), ее пространственная частота – 1030 л/мм, а контраст – 0,82. Размер микрорешетки по Z, определяющий разрешение по глубине, зависит от показателя преломления среды и может меняться в пределах 5-12 мкм.

Рассмотрены особенности использования для многослойной записи объемных регистрирующих сред с линейным механизмом поглощения и показано, что в этом случае наличие связи между чувствительностью слоя и числом слоев приводит к необходимости поиска компромисса между ними и, как следствие, к ограничению числа слоев. Рассмотрение ведется на примере двух фоторефрактивных материалов: фотополимера и легированного железом ниобата лития (НЛ).

В экспериментах по записи/считыванию микроголограмм использовался конгруэнтный легированный железом кристалл НЛ. Импульсная мощность излучения лазера 1 ($\lambda = 0,66$ мкм) на поверхности образца составляла 2 мВт, а максимальная интенсивность света в плоскости регистрации – $1,6 \times 10^5$ Вт/см². Многослойная запись проводилась путем последовательного перемещения зоны пересечения сфокусированных световых пучков по координате Z (толщине) материала 8. Характер распределения амплитуды сигнала на выходе фотоприемника при считывании последовательности, состоящей из 9 микроголограмм, показан на рис. 3. Голограммы зарегистрированы с одной и той же экспозицией, а расстояние между ними в среде составляет 55 мкм.

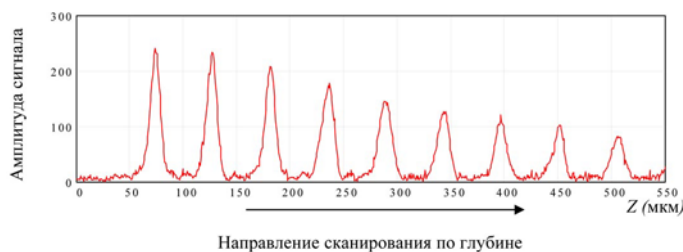


Рис. 3. Сигнал считывания при сканировании по глубине кристалла НЛ, в котором десять микроголограмм были зарегистрированы на различной глубине.

Измерения размеров откликов на уровне $\frac{1}{2}$ максимального значения амплитуды показали, что они находятся в диапазоне $13,6 \div 15,1$ мкм. Максимальная ширина отклика лишь в 1,1 раза больше дифракционно ограниченного размера. В то же время расчет показывает, что для использованного стандартного микробъектива 40^x с числовой

апертурой $NA = 0,65$ влияние сферической аберрации приводит к уширению сфокусированного светового пучка. На глубине 510 мкм, где проводилась запись последней микроголограммы, поперечный размер пятна увеличивается вдвое. При увеличении поперечного размера пучка следует ожидать также и увеличения продольного размера микроголограммы (по оси Z), а, следовательно, и уширения отклика. Однако, как видно из рис. 3, этого не происходит. На наш взгляд, этот весьма важный эффект можно объяснить особенностями гетеродинного детектирования. Поскольку при записи и считывании используются одни и те же световые пучки, то оба пучка, поступающие на фотоприемник 9, имеют *одинаковые* фазовые искажения. Если световые пучки попадают на фотоприемник полностью, то результат фотосмещения не зависит от фазовых искажений пучков. Вторая особенность гетеродинного считывания заключается в селективности углов, в пределах которых эффективно детектируется излучение сигнальной волны. Влияние сферической аберрации приводит к нарушению фазировки пространственных гармоник исходного сфазированного (сфокусированного) пучка в глубине материала, в результате чего он значительно расширяется. Учет угловой селективности при гетеродинном считывании приводит к тому, что каждая пространственная гармоника интерференционного поля образует сигнал только от взаимодействия с той же решеткой при записи и вследствие этого электрические сигналы на выходе фотоприемника оказываются сфазированными.

Особенность разработанного метода гетеродинного считывания восстанавливать размер отклика, близкий к дифракционно-ограниченному значению, является важной и отличает его от известных методов, например, конфокального считывания, применяемого в побитовой и микроголографической системах многослойной записи. Учитывая, что восстановление происходит несмотря на наличие значительной сферической аберрации, требование к точности ее компенсации становится меньше.

Также реализовано селективное стирание микроголограммы в выбранном слое и возможность записи/считывания микроголограмм с восемью уровнями фазы. Для демонстрации предельных (с точки зрения разрешения по глубине) возможностей двухпучкового метода записи/детектирования микроголограмм была проведена запись в 50 последовательно расположенных по глубине объемных микроголограмм (размер микроголограмм по глубине равен 9,6 мкм, расстояние между ними – 12 мкм). Максимальное значение дифракционной эффективности зарегистрированных микроголограмм составляло 1,5 %. Достигнута амплитуда модуляции показателя преломления, равная 3×10^{-3} , предельная величина для легированного железом ниобата лития. Однородность записи по глубине была обусловлена выбором низкого коэффициента поглощения (низкой чувствительности).

Фотополимерный материал (ФПМ) для проведения многослойной записи был разработан в НИОХ СО РАН. Толщина фотополимерной светочувствительной композиции составляла 120÷180 мкм.

Размер микроголограммы в ФПМ для длины волны лазера $\lambda = 0,66$ мкм и числовой апертуры фокусирующего объектива $NA = 0,65$ составляет $1 \times 1,4 \times 6$ мкм³ по осям X, Y, Z соответственно. В ФПМ толщиной 150 мкм проведена однородная глубинная запись 10 последовательно расположенных микроголограмм (время записи 20 мс, экспозиция – 200 мДж/см²). Достигнута амплитуда модуляции показателя преломления, равная $3,7 \times 10^{-3}$. При минимальной экспозиции 20 мДж/см² (время записи 50 мкс) многослойная запись неоднородна по глубине, что является следствием сильного линейного поглощения.

Установлены недостатки применяемых материалов. Для ниобата лития – это стирание микроголограмм в процессе считывания, для ФПМ – низкая скорость записи, связанная с диффузионным характером формирования голограмм, и низкая чувствительность при экспонировании наносекундными импульсами света с высокой интенсивностью, используемыми в исследуемом методе записи.

Глава 4 посвящена исследованию двухпучкового метода многослойной записи в толстых регистрирующих средах в режиме двухфотонного поглощения (ДФП).

Показано, что при использовании пересекающихся сфокусированных лазерных пучков возможно пространственно локализовать область записи микроголограммы, обеспечить в ней требуемую интенсивность излучения и провести двухфотонную фотомодификацию свойств среды. Учитывая отсутствие поглощения в других слоях, метод ДФП позволяет обеспечить однородность записи по глубине регистрирующей среды.

Оптическая схема установки, созданной для проведения многослойной двухфотонной записи и считывания микроголограмм, приведена на рис. 4.

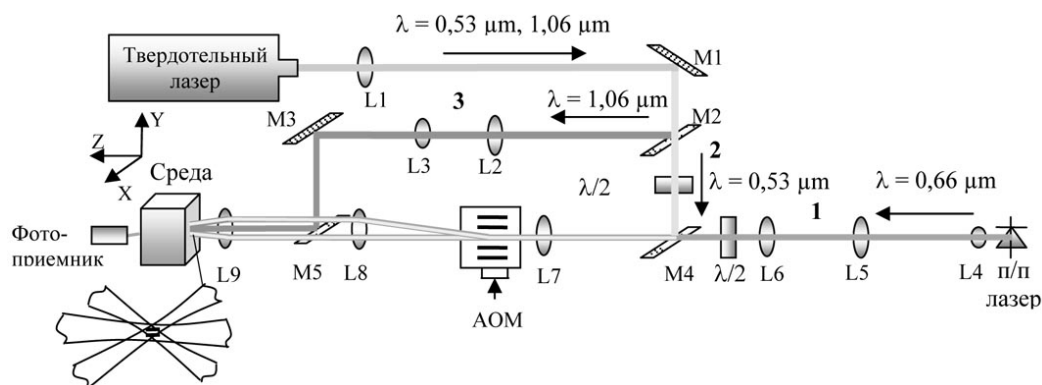


Рис. 4. Оптическая схема установки для многослойной двухфотонной записи и гетеродинного считывания микроголограмм.

На схеме можно выделить три основных канала. Канал 1 предназначен для гетеродинного считывания микроголограмм (описан выше). Канал 2 предназначен для формирования объемной микроголограммы с помощью излучения на длине волны $\lambda = 0,53$ мкм с высокой интенсивностью. Твердотельный лазер генерирует излучение на длинах волн $\lambda = 0,53$ мкм (длительность $T = 1,7$ нс) и $\lambda = 1,06$ мкм (длительность $T = 3$ нс). Зеленое излучение направляется на дихроичное зеркало M4 (канал 2) и вводится в

оптическую схему первого канала таким образом, чтобы обеспечить дифракцию на акустооптическом модуляторе (АОМ) без дополнительной подстройки. Проходя линзы Л8 и Л9, световые пучки с длиной волны $\lambda = 0,53$ мкм формируют микроголограмму диаметром 1,5 мкм в заданном по глубине слое регистрирующей среды. Максимальная интенсивность излучения в области регистрации составляет 5,8 ГВт/см². Канал 3 предназначен для формирования острогофокусированного излучения на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм, что обеспечивает дополнительную подсветку микрорешетки, сформированной излучением на длине волны $\lambda = 0,53$ мкм.

Проведено исследование двухфотонной записи микроголограмм в нелегированных кристаллах ниобата и танталата лития (ТЛ), а также в ФПМ на основе новых и эффективных тиоксантиновых хромофоров.

В нелегированном кристалле НЛ показана возможность двухфотонной записи микроголограмм одним импульсом, что является чрезвычайно важным фактором на пути увеличения скорости записи в возможных практических приложениях. Получено увеличение 1,6 раза амплитуды модуляции показателя преломления нелегированного НЛ в присутствии дополнительного пучка с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм. Недостатком этого материала является отсутствие неразрушающего считывания на длине волны $\lambda = 0,66$ мкм, что связано с образованием центров окраски в кристалле НЛ при действии излучения высокой мощности.

Впервые проведена двухфотонная запись микроголограмм в нелегированном кристалле танталата лития (состав близкий к конгруэнтному), где в отличие от ниобата лития осуществлено *неразрушающее* считывание на длине волны $\lambda = 0,66$ мкм. Размер микроголограммы составляет $1 \times 1,4 \times 10$ мкм³. Квадратичная по интенсивности зависимость амплитуды модуляции показателя преломления подтверждает двухфотонный характер записи.

Важной характеристикой материала является скорость записи. На рис. 5 приведены кривые, характеризующие скорость изменения амплитуды модуляции показателя преломления для трех значений интенсивности излучения. Все три подгоночные кривые хорошо описываются моноэкспоненциальной функцией вида: $\Delta n = \Delta n_s [1 - \exp(-t/\tau)]$, где Δn_s – насыщенное значение амплитуды модуляции показателя преломления, τ – характерное время записи. Результаты исследования свидетельствуют о том, что двухфотонное межзонное фотовозбуждение позволяет обеспечить значение амплитуды модуляции показателя преломления на уровне $\Delta n_s = 10,7 \times 10^{-4}$ (при $I = 4,1$ ГВт/см²). Следует отметить, что такое значение Δn может быть достигнуто в каждом слое записи в отличие от случая, когда используется механизм линейного поглощения. Исходя из данных, приведенных на рис. 5, можно вычислить голографическую чувствительность танталата лития при двухфотонной записи, которая определяется следующим образом

$$S = \frac{1}{I \Delta z} \left. \frac{d\sqrt{\eta}}{dt} \right|_{t=0}$$
, где I – интенсивность света, Δz – размер голограммы по глубине, η – дифракционная эффективность голограммы. Наблюдаемое

значение голографической чувствительности $S = 0,45$ см/Дж ($I = 4,1$ ГВт/см², $\Delta z = 10$ мкм) не уступает лучшим результатам, полученным с легированным железом танталатом лития, а характерное время записи $\tau = 32$ нс значительно меньше характерного времени, полученного при традиционном возбуждении с примесных центров.

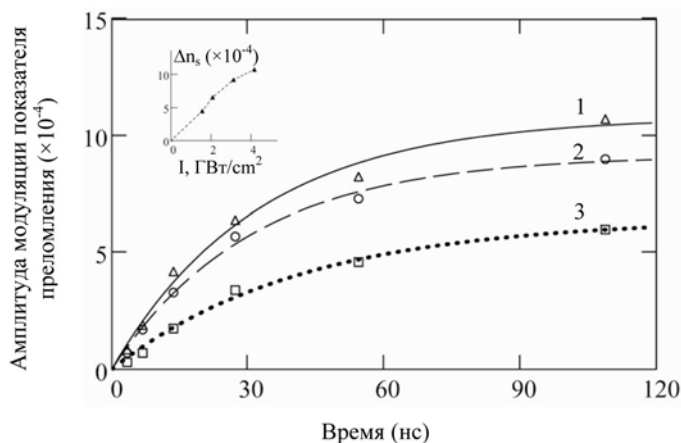


Рис. 5. Изменение амплитуды модуляции показателя преломления в процессе записи для трех значений интенсивности излучения записывающих пучков: 1 – $I = 4,1$ ГВт/см², 2 – $I = 3,1$ ГВт/см², 3 – $I = 2,1$ ГВт/см². На вставке приведена зависимость Δn_s преломления от интенсивности.

модуляции показателя преломления равна $\Delta n_s = 2,1 \times 10^{-3}$, а характерное время записи составляет $\tau = 24$ нс. При этом значение голографической чувствительности ТЛ такого состава составляет $S = 1,3$ см/Дж, что в три раза превышает значения, полученные для легированного железом ТЛ.

Исследованы процессы двухфотонной записи микроголограмм в толстых (100–200 мкм) ФПМ, созданных на основе тиоксантоновых хромофоров. Максимальное значение сечения двухфотонного поглощения этих хромофоров составило 252×10^{-50} см⁴·с. Помимо высокого значения сечения двухфотонного поглощения хромофор должен иметь хорошую растворимость в полимерной матрице и обладать высокой фотоиницирующей способностью, т.е. свойством эффективного образования свободных радикалов при действии света для инициирования роста полимерной цепи. Этими факторами определялся выбор исследованных хромофоров-фотоинициаторов. Образцы ФПМ с новыми и высокоэффективными хромофорами были изготовлены в НИОХ СО РАН. Проведена двухфотонная запись последовательности микроголограмм в произвольном по глубине слое. Глубина записи варьировалась в диапазоне 50 – 150 мкм. Размер микроголограммы составлял $1 \times 1,4 \times 6,4$ мкм³. На рис. 6 приведены значения амплитуды модуляции показателя преломления как функции интенсивности записывающих пучков для ФПМ, содержащих хромофоры Т3 и Т4. Линейная зависимость амплитуды модуляции показателя преломления от интенсивности подтверждает двухфотонный механизм формирования микроголограмм для ФПМ со свободно-радикальной

Исследовано влияние стехиометрии нелегированного танталата лития на амплитуду модуляции показателя преломления и голографическую чувствительность. Были выбраны 4 образца с молярной концентрацией лития C_{Li} : 47,95; 48,38; 48,75 и 49,6 мол.%. Концентрация железа во всех образцах меньше 10^{18} см⁻³ и образцы можно считать условно чистыми. Показано, что результаты записи сильно зависят от молярной концентрации лития в кристалле. При концентрации лития 48,38 мол.% амплитуда

инициацией. Из рис. 6 видно, что запись носит явно выраженный пороговый характер.

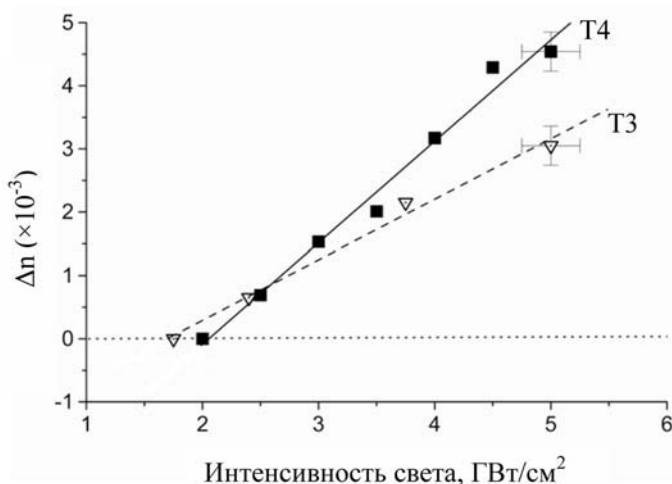


Рис. 6. Зависимость двухфотонно-индуцированного изменения показателя Δn от суммарной интенсивности записывающих пучков для двух ФПМ, содержащих хромофоры Т3 и Т4.

$4,8 \cdot 10^{-3}$. Считывание для этого класса материалов носит *неразрушающий* характер.

В заключении сформулированы следующие основные результаты диссертации:

1. Предложен новый лазерный двухпучковый метод записи/считывания микроголограмм, позволяющий в отличие от известных локализовать элементарный микрообъем в X, Y, Z – пространстве среды, зарегистрировать интерференционную микроструктуру (микроголограмму) с дискретно изменяемой фазой, а также провести гетеродинное детектирование такой микроструктуры с определением ее амплитуды и фазы. Метод защищен авторским свидетельством и патентом РФ. Показано, что путем многоуровневого фазового кодирования плотность записи информации можно довести до уровня $3,9 \times 10^{11}$ бит/см³ (при $\lambda_0 = 0,66$ мкм, $NA = 0,65$, $n = 1,5$).

2. Исследован процесс коллинеарного гетеродинного детектирования микроголограмм при их импульсном освещении. Показано, что в этом случае реализуется режим гетеродинирования со смещенной частотой, с подавлением несущей и с переносом спектра сигнала в сторону нижних частот, что позволяет определять амплитуду и фазу высокочастотных световых полей с помощью фотоприемника с большой площадью светочувствительной поверхности и малым быстродействием.

3. Создана автоматизированная оптико-электронная установка для многослойной записи микроголограмм в толстых регистрирующих средах в режимах линейного и двухфотонного поглощения. Диапазон перемещения среды по трем координатам – 0,8 мм, а точность позиционирования не хуже 0,2 мкм. Размеры микрорешетки в плоскости X, Y (по уровню 0,5 максимального значения интенсивности) – $1,0 \times 1,4$ мкм² ($\lambda_0 = 0,66$ мкм, $NA =$

Пороговая характеристика среды является достоинством при проведении многослойной записи. В этом случае улучшается степень локализации микроголограммы при записи и уменьшается влияние перекрестных шумов при считывании. Порог записи микроголограмм по интенсивности находится на уровне 1,2 ГВт/см². Значение голографической чувствительности составило $S = 1,2$ см/Дж ($d = 6,4$ мкм, $I = 4,9 \cdot \text{ГВт/см}^2$), а значение амплитуды модуляции показателя преломления – $\Delta n =$

0,65), а размер по Z , определяющий разрешение по глубине, зависит от показателя преломления среды и может меняться в пределах 5-12 мкм. Порог чувствительности гетеродинного фотодетектирования составляет $5,1 \times 10^{-12}$ мм², что достаточно для обнаружения шумов рассеяния основных регистрирующих сред.

4. Обнаружена и экспериментально подтверждена возможность восстановления размера отклика, полученного при гетеродинном детектировании микроголограммы, близкого к дифракционно-ограниченному значению, несмотря на наличие сферической аберрации, приводящей к увеличению размеров микроголограммы более чем в два раза на глубине ~ 500 мкм. Продемонстрированы возможности записи/детектирования микроголограмм с восемью уровнями фазы и их селективного стирания (в кристаллах ниобата лития) в произвольном по глубине слое.

5. Впервые реализована многослойная двухфотонная запись микроголограмм ($1 \times 1,4 \times 10$ мкм³) в нелегированном кристалле танталата лития (состав близкий к конгруэнтному) и их последующее *неразрушающее* детектирование на длине волны $\lambda_0 = 0,66$ мкм. Показано, что двухфотонное межзонное фотовозбуждение электрона приводит к значительному сокращению характерного времени записи по сравнению с традиционным случаем, когда возбуждение происходит с примесного уровня, и позволяет получить насыщенное значение амплитуды модуляции показателя преломления на уровне $\Delta n_s = 10,7 \times 10^{-4}$ (при $I = 4,1$ ГВт/см²).

6. Обнаружено значительное влияние стехиометрии нелегированного танталата лития при двухфотонном возбуждении на амплитуду модуляции показателя преломления, голографическую чувствительность и характерное время записи. Установлено, что при концентрации лития 48,38 мол.% насыщенное значение амплитуды модуляции показателя преломления равно $\Delta n_s = 2,1 \times 10^{-3}$, а характерное время записи составляет $\tau = 24$ нс. При этом значение голографической чувствительности ($S = 1,3$ см/Дж) в три раза превышает значения, полученные с легированным железом танталатом лития.

7. Исследованы процессы двухфотонной записи микроголограмм в толстых (100–200 мкм) фотополимерных материалах на основе тиоксантоновых хромофоров. Проведена двухфотонная запись последовательности микроголограмм размера $1 \times 1,4 \times 6,4$ мкм³ в произвольном по глубине слое. Показано, что хромофоры обеспечивают высокие значения голографической чувствительности фотополимерного материала ($S = 1,2$ см/Дж) и амплитуды модуляции показателя преломления ($\Delta n = 4,8 \times 10^{-3}$). Запись носит пороговый характер, что позволяет повысить степень локализации микроголограммы при записи. Определено, что порог записи микроголограмм по интенсивности находится на уровне $1,2$ ГВт/см².

Таким образом, при выполнении диссертации решена важная научно-техническая задача по созданию нового лазерного двухпучкового метода трехкоординатной микромодификации толстых регистрирующих сред, многослойной записи в таких средах микроголограмм и последующего

гетеродинного детектирования их информационного содержания: амплитуды и фазы. Полученные результаты составляют научную основу для развития новых технологий 3D оптической памяти с многослойной пословной организацией данных, защитной голографии, физического эксперимента и других приложений. Предложенные в диссертации методики двухфотонной модификации регистрирующих сред и селективного гетеродинного детектирования модифицированных состояний нашли применение при проведении научных исследований в НИОХ СО РАН (разработка фотополимерного материала для двухфотонной записи на основе тиоксантоновых хромофоров), ИФП СО РАН (определение значения фоторефрактивной чувствительности кристаллов танталата лития с неизвестной предысторией и концентрации лития, обеспечивающей минимальное оптическое повреждение), а также в ИМКЭС СО РАН (определение влияния уровня индуцированных двухфотонных оптических потерь на эффективность процессов параметрического преобразования частоты в нелинейных кристаллах твердых растворов на основе танталата лития).

Список основных работ, опубликованных автором по теме диссертации:

1. Штейнберг И.Ш., Щепеткин Ю.А. Авторское свидетельство № 1769233 с приоритетом от 15 ноября 1989 г.
2. Рудаков И.Б., Штейнберг И.Ш., Щепеткин Ю.А. Метод многослойной оптической записи информации // Автометрия. – 1991. – № 3. – стр. 76 – 80
3. Штейнберг И.Ш., Щепеткин Ю.А. Особенности 3-D оптической записи двоичной информации // Автометрия. – 1993. – №3. – с. 89–93
4. Штейнберг И.Ш., Щепеткин Ю.А. Способ многослойной оптической записи двоичной информации // Патент России. – № 2017237. – бюл. 14. – 1994
5. Steinberg I.Sh., Shepetkin. Ju. A. Multilayer three–dimensional optical recording // Proc. SPIE 1996. – V. 2969. – pp. 232–236
6. Tverdokhleba P.E., Trubetskoy A.V., Steinberg I.Sh., Shepetkin Ju. A. Acousto–optical scanners for systems of high–speed recording. – processing. – and displaying of information // Proc. SPIE. – 1998. – V. 3402. – p. 184–186
7. Твердохлеб П.Е., И.Ш. Штейнберг, Щепеткин Ю.А. Метод гетеродинного детектирования импульсных световых сигналов // Автометрия. – 1999. – № 5. – стр.41–52
8. Tverdokhleba P.E., Trubetskoi A.V., Steinberg I.Sh., Shchepetkin Yu.A. High–speed 3–D recording–readout of the information in the volume media with usage of optical heterodyne and multilevel phase data coding (optical system and its components) // Proc. SPIE. – 1999. – v. 3733. – pp. 334–338
9. Tverdokhleba P.E., Steinberg I.Sh., and Shepetkin Ju.A. Multilayer Recording of the Microholograms in Lithium Niobate // OSA Trends in Optics and Photonics 2003. – v. 87. – pp. 649–654
10. Герасимова Т.Н., Пен Е.Ф. Твердохлеб П.Е., Шелковников В.В., Штейнберг И.Ш. Органические светочувствительные материалы для трехмерной оптической памяти // Монография «3D лазерные информационные технологии». – Новосибирск. – 2003. – глава 2. – с. 53 – 109
11. Твердохлеб П.Е., Трубецкой А.В., Щепеткин Ю.А., Штейнберг И.Ш. Многослойная оптическая память // Монография «3D лазерные информационные технологии». – Новосибирск. – 2003. – гл. 3. – с. 110 – 167

12. Steinberg I.Sh. Use of two-photon recording of microholograms in pure lithium niobate for three-dimensional optical memory // *OSA Trends in Optics and Photonics*. – 2005. – v. 99. – pp. 610 – 615
13. Штейнберг И.Ш. Двухфотонная запись микроголограмм в чистом ниобате лития // *Труды 3-й международной научно-практической конференции*. – Часть 1. – Томск. – 2005. – с. 234 – 237
14. Belikov A.Yu., Vyukhina N.N., Zatolokin V.N., Tverdokhlebs P.E., Trubetskoy A.V., Steinberg I.Sh., Shepetkin Ju.A. Computer control system for 3D laser recording and detection of microstructures in volume media // *Proceedings of the Second IASTED International Conference on Novosibirsk*. – 2005. – pp. 201 – 206
15. Твердохлеб П.Е., Беликов А.Ю., Вьюхина Н.Н., Штейнберг И.Ш., Щепеткин Ю.А. Новые возможности для совершенствования защитных лазерных технологий // *Официальные материалы второго международного форума «ГОЛОГРАФИЯ ЭКСПО –2005»*. – Москва. – 2005. – с. 83–84
16. Беликов А.Ю., Вьюхина Н.Н., Затолокин В.Н., Твердохлеб П.Е., Трубецкой А.В., Штейнберг И.Ш., Щепеткин Ю.А. Экспериментальные исследования процессов лазерной записи и гетеродинного детектирования микроструктур в объеме регистрирующих сред // *Автометрия*. – 2007. – т. 43. – № 1. – с. 76 – 90
17. Steinberg I.Sh., Kalabin I.E. Two-photon recording of the microholograms in undoped lithium tantalate crystals with different compositions // *Controlling Light with Light: Photorefractive Effects. – Photosensitivity. – Fiber Gratings, Photonic Materials on CD-ROM*. OSA. – Washington. – 2007. – MB6
18. Steinberg I.Sh., Shepetkin Y. A. Two-photon recording of microholograms in undoped lithium tantalate // *Applied Optics*. – 2008. – v. 47. – pp. 9–14
19. Steinberg I.Sh., Loskutov V.A., Shelkovnikov V.V., Shepetkin Yu.A. Two-photon recording of microholograms in photopolymer materials with new cationic thioxanthone photoinitiators // *Optics Communications*. – 2008. – v. 281. – pp. 4297–4301
20. Steinberg I.Sh., Loskutov V.A., Shelkovnikov V.V., Tverdokhlebs P. E. New photopolymer materials for two-photon recording of microholograms // *Proceedings of the Topical Meeting on Optoinformatics'2008* – СПб.: СПб ГУИТМО. – 2008. – с. 87–90
21. Steinberg I.Sh., Kalabin I.E., Tverdokhlebs P. E. Two-photon induced photorefraction in undoped lithium tantalate crystals with different compositions // *Appl. Phys. B*. – 2009. – v. 95. – pp. 407–411