

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

А В Т О М Е Т Р И Я

2007, том 43, № 1

**ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ**

УДК 004.085 + 535.8

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ
И ГЕТЕРОДИННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУР
В ОБЪЕМЕ РЕГИСТРИРУЮЩИХ СРЕД***

**А. Ю. Беликов, Н. Н. Вьюхина, В. Н. Затолокин, П. Е. Твердохлеб,
А. В. Трубецкой, И. Ш. Штейнберг, Ю. А. Щепеткин**

*Институт автоматки и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: peter@iae.nsk.su*

Представлены результаты экспериментальных исследований двухпучкового лазерного метода записи и гетеродинного детектирования элементарных микроструктур (микрорешеток) в объеме «толстых» регистрирующих сред. Исследования проведены на кристаллах ниобата лития, легированного железом, и на толстых фотополимерных материалах в режиме однофотонного поглощения. Показано, что размер объемной микрорешетки зависит от рабочей длины волны, числовой апертуры фокусирующего микрообъектива и показателя преломления среды. При проведении экспериментов использовались микрорешетки размерами $1,0 \times 1,4 \times 5,7$ мкм по осям X, Y, Z соответственно. Приведены характеристики одиночных и групповых микрорешеток, записанных на различных глубинах регистрирующих сред.

Введение. Задачи лазерной записи в объеме регистрирующих сред рассеивающих микроструктур и их помехоустойчивого глубинного детектирования с определением амплитуды и фазы возникают при разработке новых технологий оптической памяти, микростереолитографии и оптической томографии. В последнем случае имеет место только процесс обнаружения в исследуемом объеме «естественных» модифицированных состояний вещества главным образом в виде фазовых оптических неоднородностей. Для решения таких задач предложен двухпучковый лазерный зонд [1–3], принцип работы которого поясняет рис. 1. Используются два когерентных сфокусированных пучка света: опорный 3 и гетеродинный 4. Эти пучки, как пока-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06-07-89144-а) и Президиума Сибирского отделения РАН (интеграционный проект № 17).

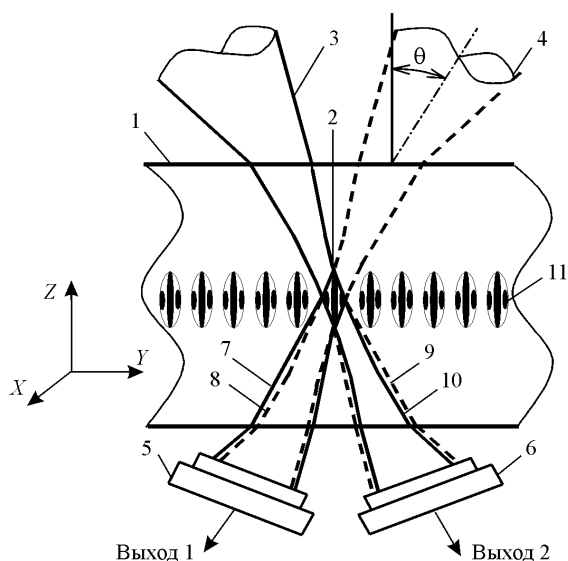


Рис. 1

зано на рисунке, пространственно совмещаются в произвольном слое 11 среды 1, в результате чего в экспонируемом объеме вещества формируется микрорешетка 2. Запись микрорешеток в других выше- и нижележащих слоях производится за счет X -, Y - и Z -перемещения среды относительно области пересечения пучков.

Обнаружение объемных микрорешеток осуществляется путем коллинеарного оптического гетеродинамирования. Частота света гетеродинного пучка 4 сдвигается на $\Delta\omega$ относительно частоты опорного пучка 3, и бегущая интерференционная решетка, образовавшаяся в зоне пересечения этих пучков, совмещается с решеткой 2 в адресуемом слое 11. Световые пучки 7 и 9 образуются в результате дифракции на решетке 2 пучков 3 и 4 соответственно. Вследствие совпадения пространственных частот бегущей и записанной решеток пучок 7 будет распространяться в одном направлении (коллинеарно) с пучком 4, а пучок 9 – с пучком 3. В результате взаимодействия двух коллинеарных пучков 7, 8 или 9, 10 с различными частотами на выходах фотоприемников 5, 6 появляются фототоки с разностной частотой $\Delta\omega$, несущие информацию о наличии (отсутствии) микрорешетки и ее параметрах (амплитуде и фазе). Зондирование микрорешетки происходит только в зоне пересечения острогофокусированных пучков, поэтому шумы рассеяния регистрирующей среды и оптических элементов, блики и переотражения мало влияют на результаты детектирования.

Далее представлены результаты экспериментальных исследований двухпучкового лазерного метода записи и гетеродинного детектирования микрорешеток в объеме ниобата лития, легированного железом, и толстых фотополимерных материалов. Исследования проводились с помощью специально созданной системы автоматизации эксперимента, позволившей осуществлять запись микрорешеток с различными значениями амплитуд и фаз, прецизионное трехкоординатное перемещение регистрирующей среды, коллинеарное гетеродинное обнаружение микрорешеток, записанных на различной глубине, определение их параметров, а также интегральную обра-

ботку полученных результатов. Для полноты картины изложение результатов исследования начнем с рассмотрения структуры такой системы и особенностей работы ее элементов, среди которых одним из наиболее важных является акустооптический модулятор фазы.

Система автоматизации. Схема установки со средствами автоматизации эксперимента приведена на рис. 2. Перетяжка пучка света полупроводникового лазера 1 оптической схемой 2, 3 переносится в зону акустооптического взаимодействия модулятора 4. Полученные в результате дифракции световые пучки с помощью телескопической системы 5, 6 совмещаются в адресуемом слое регистрирующей среды 7, где записывается образовавшаяся в зоне пересечения пучков 10, 11 интерференционная решетка. Размер решетки по глубине среды выбирается гораздо меньше ее толщины. Для записи решеток в других глубинных слоях среда 7 с помощью трехкоординатного пьезоэлектрического позиционирующего устройства перемещается по координате Z (глубине). Управление работой установки осуществляется через последовательный (COM) и параллельный (LPT) порты персонального компьютера.

Как при записи, так и при гетеродинном детектировании микрорешеток лазер 1 работает в импульсном режиме (длительность импульса 2 нс). При записи частота следования импульсов света кратна частоте напряжения управления акустооптическим модулятором (АОМ), поэтому изображение бегущей решетки, формируемой в зоне взаимодействия света со звуком, в экспонируемом микрообъеме остается неподвижным. При детектировании система автоматизации работает в режиме гетеродинного фотоприемника с двойным преобразованием частоты: в АОМ, где частота света сдвигается на

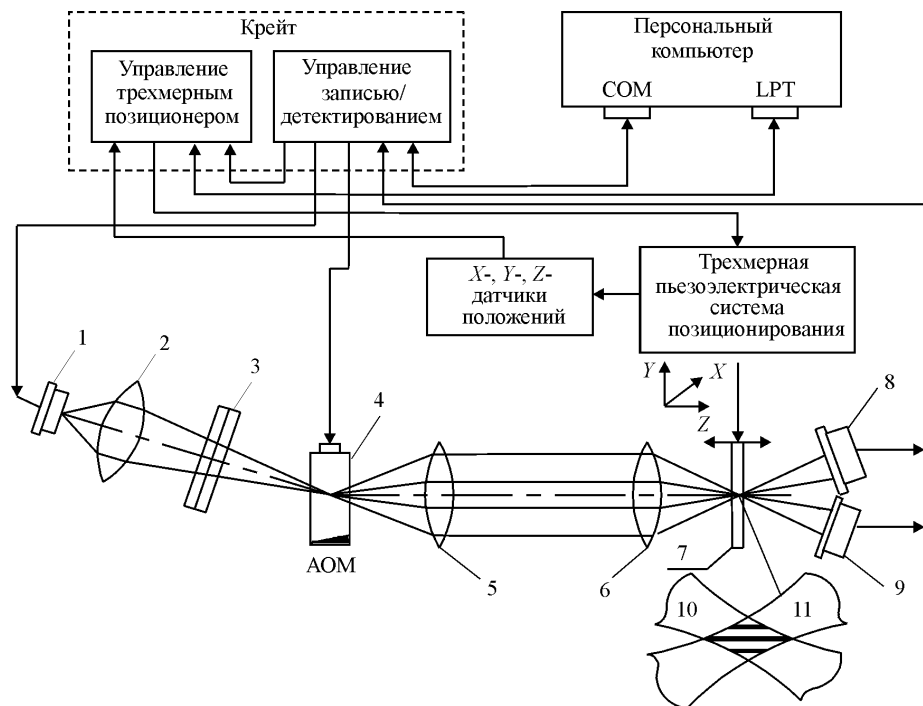


Рис. 2

80 МГц, и в фотоприемнике, где частота сигнала, получаемого в результате гетеродинирования, уменьшается с 80 МГц до 70 кГц. Низкое результирующее значение частоты необходимо для того, чтобы можно было использовать фотоприемники 8, 9 типа ФД-24К, которые имеют большую площадь светочувствительной поверхности и, следовательно, дают возможность практически полностью собрать свет гетеродинного и информационного пучков. Последнее условие является очень важным, поскольку позволяет оценить влияние рассогласования волновых фронтов пучков на результат селекции по глубине среды. При детектировании микроструктур частота следования импульсов лазера 1 устанавливается на 70 кГц выше частоты управляющего напряжения АОМ. В результате стробоскопической подсветки бегущей в АОМ ультразвуковой волны на выходе фотоприемника возникает сигнал на разностной частоте 70 кГц. Для обработки сигнала, несущего полную информацию об амплитуде и фазе детектируемой микрорешетки, служат перемножители и фильтры нижних частот, образующие два канала синхронного детектирования. Результаты детектирования с помощью двух АЦП преобразуются в цифровую форму и передаются микроконтроллером в компьютер для дальнейшей обработки.

Трехкоординатный позиционер представляет собой инерционный шаговый пьезодвигатель с тремя токовыхревыми частотными датчиками перемещения в цепи обратной связи. Диапазон перемещения составляет около 0,8 мм по всем трем координатам, разрешающая способность датчиков не хуже 0,03 мкм. Чувствительность датчика (приращение частоты на единицу длины перемещения) координаты X составляет 730 Гц/мкм, координаты Y – 1235 Гц/мкм, координаты Z – 333 Гц/мкм. Блок управления трехкоординатным позиционером обеспечивает формирование уровней дифференциальных аналоговых сигналов пилообразного типа для соответствующего привода координат (X , Y и Z) и содержит три канала, каждый из которых состоит из счетчика позиций (приращений), цифроаналогового преобразователя (ЦАП) и усилителя мощности. Кроме этого он содержит преобразователь «частота–код», с помощью которого измеряются период и фаза напряжения сигнала от выбранного датчика положения. Используется времяимпульсное преобразование, позволяющее определить период измеряемой частоты с точностью до одного периода опорного сигнала. По разности частот проводится вычисление длины перемещения позиционера. Диапазон измеряемых частот определяется характеристиками датчиков положения и выбирается от $f_{\min} = 0,1$ МГц до $f_{\max} = 1,5$ МГц. Интервал счета T_n , равный 1 мс, и частота опорного напряжения 20 МГц обеспечивают оптимальное соотношение между быстродействием и разрешающей способностью позиционера.

Основные команды микроконтроллера:

Позиционирование. Реализуется перемещение образца среды по трем координатам с заданными скоростью и точностью позиционирования. Скорость перемещения определяется длительностью такта ЦАП, формирующего пилообразное напряжение для привода пьезодвигателя, и задается в диапазоне от 150 до 17500 мкс. Большие значения такта используются для точной (до 0,03 мкм) подстройки координаты положения среды.

Запись микрорешеток. В этом режиме в обоих синтезаторах устанавливается частота, равная 80 МГц, в них загружается код данных микрорешетки (значение фазы) и обеспечивается формирование заданного количества пачек импульсов излучения лазера. Число импульсов в пачке составляет от 1 до 255, число пачек – от 1 до 65000, период следования пачек – от 0,1 до 100 мс.

Фаза микрорешетки может принимать одно из восьми значений: от 0 до 2π с шагом $\pi/4$. Любое из таких значений определяется разностью фаз между сигналами синтезаторов. Частота импульсов излучения полупроводникового лазера при записи может быть установлена 1,25 или 2,5, или 5,0 МГц.

Детектирование микрорешеток. В первом из синтезаторов устанавливается частота 80 МГц, во втором – 80,070 МГц. Обеспечивается перемещение среды по координатам X, Y, Z с помощью трехкоординатного пьезопозиционера, при этом длина перемещения задается числом выборок (максимум 32000) с тактом 1 мс. Данные АЦП передаются в компьютер. При детектировании частота импульсов полупроводникового лазера выбирается равной 10 МГц или 2,5 МГц.

Разработанное программное обеспечение позволяет передавать микроконтроллеру параметры режима работы установки, управлять работой позиционера, обрабатывать и отображать полученные результаты. Программа выполнена в среде Microsoft Visual C++ и имеет стандартный оконный интерфейс системы Windows. Окна диалога позволяют задать режим работы СОМ-порта, определить параметры позиционирования (позицию образца среды в трехмерном пространстве, область перемещения, скорость движения и точность позиционирования), параметры записи (размер и координаты матрицы микрорешеток, величину экспозиции, фазу каждой микрорешетки), параметры считывания (область и скорость считывания, число выборок данных). В рабочем окне программы отображается состояние установки (текущее положение позиционера, исполнение команд, данные считывания). Программа позволяет сохранить выбранные параметры в файле конфигурации для последующего использования их по умолчанию. Предусмотрена возможность сохранения результатов считывания в файле данных для дальнейшей обработки и графического представления в программе MathCAD. Кроме этого в среде LabWindows/CVI разработаны программы для настройки и тестирования характеристик позиционера.

Для увеличения скорости и плотности записи, а также для повышения степени помехозащищенности нами использован метод относительной фазовой модуляции. Информационным параметром в этом случае является разность фаз двух рядом расположенных пространственных микрорешеток. При 8-уровневой фазовой модуляции сдвиги фаз между соседними микрорешетками принимают значения 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 и 315°. Это позволяет в каждой информационной микрорешетке проводить запись трехрядного двоичного слова, увеличивая тем самым в 3 раза плотность записи и скорость регистрации. В этом случае, как мы полагаем, может производиться запись данных с плотностью, превышающей дифракционное разрешение оптической системы.

Фазовый сдвиг микрорешетки в области пересечения пучков осуществляется путем изменения фазы напряжения, подаваемого на АОМ 4.

При гетеродинном детектировании движущаяся в АОМ решетка совмещается с решеткой, ранее зарегистрированной в адресуемом слое. В результате взаимодействия двух коллинеарных пучков с различными частотами света на выходах фотоприемников 8, 9 (см. рис. 2) появляется электрический сигнал с разностной частотой $\Delta\omega$. Путем обработки этого сигнала находятся значения амплитуды и фазы микрорешетки.

Из вышеизложенного следует, что акустооптический модулятор является одним из важнейших элементов предложенного двухпучкового лазерного зонда. С его помощью, как уже отмечено, обеспечивается запись микрореше-

ток с восьмью уровнями фазы и сдвиг частоты света при обнаружении таких микрорешеток в объеме регистрирующей среды. АОМ в составе зонда должен работать в режиме дифракции Брэгга с выходными пучками нулевого и первого порядков. В этом случае может быть достигнут максимальный КПД по свету, что важно, например, для повышения скорости записи данных. Кроме того, для уменьшения уровня помех степень перекрытия выходных пучков в дальней зоне АОМ должна быть минимальной. Формируемые с помощью двухпучкового зонда микрорешетки должны иметь близкое к единице значение контраста и содержать минимальное количество периодов. В этом случае амплитуда информационной составляющей детектируемого сигнала будет иметь наибольшее значение, а запись данных будет проводиться с максимальной плотностью. Покажем, что большинство из этих требований не только взаимосвязано, но и противоречиво, поэтому при выборе параметров АОМ необходимо соблюдать разумный компромисс.

Акустооптический модулятор. Известно, что режим дифракции сфокусированного лазерного пучка в среде, возмущенной акустическим полем пьезопреобразователя, определяется взаимно однозначным соответствием спектров света и акустического поля. Другими словами, каждая пространственная гармоника распределения светового поля взаимодействует только с той пространственной составляющей дифракционной структуры акустического поля, для которой выполняется условие Брэгга. Пространственный спектр дифрагированного света является произведением пространственных спектров светового и акустического полей, и в общем случае распределение амплитуд дифрагированного и прошедшего пучков различно и отличается от исходного гауссова пучка.

Распределение световых полей пучков, образующих в результате интерференции пространственную структуру микрорешетки, удобно характеризовать отношением угловых расходимостей светового $\varphi_\lambda = \lambda / nd_0$ и звукового $\varphi_s = \Lambda_0 / L$ пучков в материале АОМ [4, 5]:

$$G = \varphi_\lambda / \varphi_s = \lambda L / nd_0 \Lambda_0, \quad (1)$$

где λ – длина световой волны в вакууме; L – размер электрода пьезопреобразователя в направлении распространения света; n – показатель преломления материала АОМ; d_0 – диаметр перетяжки гауссова светового пучка по уровню $1/e^2$ максимальной интенсивности; $\Lambda_0 = V / f_0$ – длина звуковой волны (V, f_0 – скорость и частота звуковой волны соответственно).

Угловой спектр амплитуды дифрагированного пучка $E_1(\alpha)$ формируется из нормированного (относительно максимальной амплитуды) углового спектра входного гауссова пучка $E(\alpha) = \exp(-\pi^2 d_0^2 \alpha^2 / 4\lambda^2)$ и углового распределения звука однородного излучателя длиной L . Распределение дифрагированного поля зависит также от величины акустической мощности [5]:

$$E_1(\alpha) \approx E(\alpha) \nu \exp \{j [\xi(\alpha) + \psi_0]\} \sin [(\nu^2 + \xi(\alpha)^2)^{1/2} / [\nu^2 + \xi(\alpha)^2]^{1/2}],$$

где $\alpha = (\Theta_B - \Theta)$ – отклонение угла падения Θ спектральной пространственной компоненты световой волны от оптимального угла Брэгга: $\Theta_B = \arcsin(\lambda / 2n\Lambda_0)$; $\nu = \pi \Delta n L / \lambda \cos \Theta_B$ (Δn – амплитуда модуляции показателя преломления n); $\xi(\alpha) = \alpha \pi L / \Lambda_0$; ψ_0 – начальная фаза.

Вместо параметра ν , характеризующего зависимость $E_1(\alpha)$ от акустической мощности, при моделировании использовался коэффициент h , равный отношению мощностей двух плоских световых волн: дифрагированной и входной, распространяющейся под углом Брэгга Θ_B к фронту плоской акустической волны (при $\alpha = 0$). Значение h находилось из выражения для нормированной интенсивности брэгговского максимума $h = \sin^2 \nu$, $\nu = \arcsin(h^{1/2})$.

Распределение интенсивности информационной микрорешетки определяется как результат интерференции дифрагированного $E_1(\alpha)$ и нулевого $E_0(\alpha)$ пучков, а распределение углового спектра амплитуды прошедшего без дифракции светового пучка $E_0(\alpha)$ – выражением [5]

$$E_0(\alpha) \approx E(\alpha) \exp[-j\xi(\alpha)] \times \\ \times \{ \cos[\nu^2 + \xi(\alpha)^2]^{1/2} + j\xi(\alpha) \sin[\nu^2 + \xi(\alpha)^2]^{1/2} / [\nu^2 + \xi(\alpha)^2]^{1/2} \}.$$

Распределения модулей E_0 и E_1 в зависимости от $\Theta/\Theta_B = 1 - \alpha/\Theta_B$ при различных значениях G приведены на рис. 3. Входной пучок $E(\alpha)$ обозначен пунктиром. Кривые рассчитаны при $h = 0,5$, $n = 1,71$, $\gamma = d_0/\Lambda_0 = 2$, $\beta = \Lambda_0/\lambda = 73,5$ ($\lambda = 0,68$ мкм, $\Lambda_0 = 50$ мкм, $d_0 = 100$ мкм). Тогда характер графиков на рисунке полностью определяется размером преобразователя L . С увеличением L (и соответственно параметра G) расходимость акустического пучка при $G > 1$ становится меньше расходимости оптического пучка. Вследствие этого высшие пространственные гармоники $E(\alpha)$ уже не участвуют в процессе дифракции, что и приводит к уменьшению ширины спектра пространственных гармоник дифрагированного пучка $E_1(\alpha)$. В зоне же записи, где в результате интерференции изображений $E_0(\alpha)$ и $E_1(\alpha)$ формируется микрорешетка, размер дифрагированного пучка оказывается больше размеров входного и нулевого пучков. В результате увеличивается площадь микрорешетки и в периферийной области существенно уменьшается ее конт-

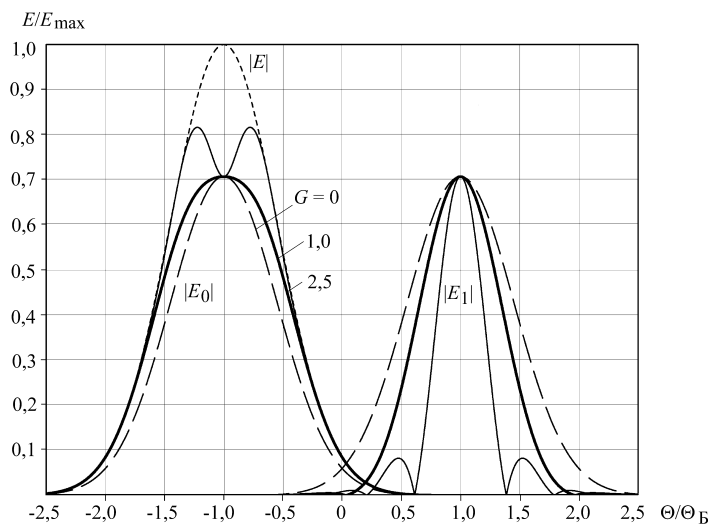


Рис. 3

раст, что приводит к нежелательному снижению плотности записи и ухудшению отношения сигнал/шум (С/Ш).

Зависимость нормированной интенсивности микрорешетки от координаты Y показана на рис. 4. Для наглядности все кривые приведены к началу координат и определены при $\psi_0 = \pi$. Как следует из рисунка, кроме роста уровня боковых лепестков увеличение G вызывает также снижение контраста интерференционной структуры микрорешетки.

Таким образом, из проведенного анализа следует, что параметр G нужно выбирать как можно меньшим. Однако, как будет далее показано, существует ряд других ограничений, приводящих к необходимости поиска компромиссного решения.

Для обеспечения максимальной плотности и скорости записи требуется уменьшать диаметр перетяжки d_0 . Минимальное значение d_0 зависит как от ограничений, присущих оптической системе, так и от уровня перекрытия в дальней зоне нулевого и дифрагированного пучков. Доля света, попавшего в зону перекрытия, в гетеродинной системе считывания определяет тот уровень помехи, который возникает даже при отсутствии регистрирующей среды.

Очевидно, что уровень перекрытия пучков нулевого и первого порядков дифракции определяется углами дифракции и расходимости каждого из пучков. В зависимости от длины волны света расходимость светового пучка ($\sim \lambda/d_0$) и угол дифракции ($\sim \lambda/\Lambda_0$) изменяются одинаково, поэтому уровень перекрытия в дальней зоне при изменении частоты света остается неизменным и зависит только от отношения $\gamma = d_0/\Lambda_0$.

Если в области пространственных частот появление помехи объясняется перекрытием спектров пучков с разной частотой света, то в предметной области такой эффект является следствием модуляции лазерного пучка бегущей фазовой дифракционной решеткой, период которой соизмерим с его диаметром.

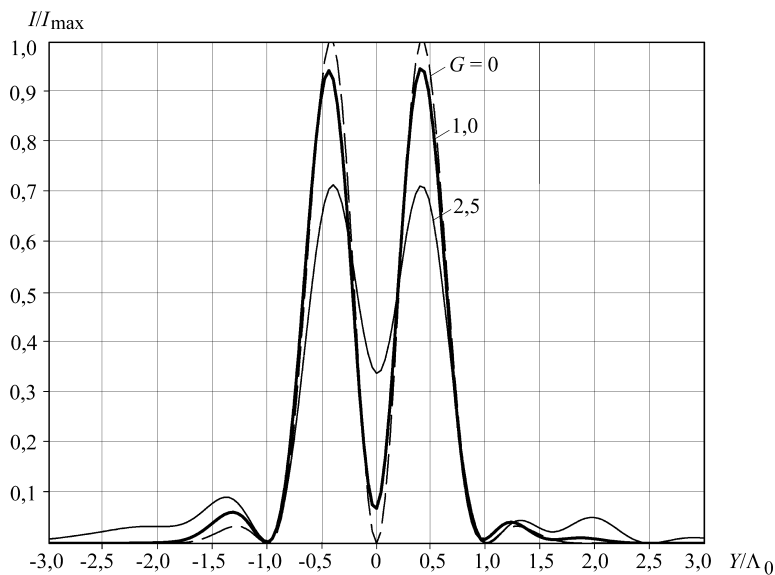


Рис. 4

Можно показать, что в предельном случае ($G = 0$), когда оба пучка (прошедший нулевой и дифрагированный) остаются по форме гауссовыми, выражение для отношения сигнал/помеха (С/П) при $h = 0,5$ имеет вид

$$C/P = \eta_c^{1/2} \exp(\gamma^2 \pi^2 / 8) = \eta_c^{1/2} F_0(\gamma), \quad (2)$$

где $\eta_c = P_c / P_0$ – дифракционная эффективность микрорешетки; P_c, P_0 – мощности сигнального (дифрагированного на микрорешетке) и считывающего световых пучков соответственно. Например, если $\eta_c = 0,01, \gamma = 2$, то $C/P = 13,9$ и $F_0(\gamma) = 139$. В реальной ситуации ($G \neq 0$) вследствие неизбежного уменьшения расходимости $E_1(\alpha)$ (см. рис. 3) уровень помехи снижается, что приводит к улучшению отношения С/П. Из результатов моделирования следует, что если $h = 0,5, G = 1, \gamma = 2$, то $F(\gamma) = 468$, причем значение $F(\gamma)$ слабо зависит от h и при $G \rightarrow 0$ величина $F(\gamma) \rightarrow F_0(\gamma)$. Отсюда минимальное значение перетяжки составляет примерно два периода акустической решетки в АОМ.

Критерий режима дифракции Q определяет условие режима дифракции Брэгга:

$$Q = \lambda L / n \Lambda_0^2. \quad (3)$$

Известно [5], что такой режим наблюдается для $Q > 1,5$, когда на выходе АОМ существуют в основном только два пучка света (нулевой и первый порядки дифракции). При $Q \ll 1$ выполняется режим дифракции Рамана – Ната, когда существует множество порядков дифракции.

Представим G как функцию параметров Q и $\gamma = d_0 / \Lambda_0$:

$$G = Q / \gamma. \quad (4)$$

Из (4) следует, что для предельных значений $Q > 1,5$ и $\gamma = 2$ значение параметра $G > 0,75$. Следовательно, предел уменьшения G с целью улучшения согласования волновых фронтов световых пучков, формирующих интерференционную микрорешетку, находится в противоречии с требованием более полного использования мощности света и уменьшения γ для повышения плотности и скорости записи.

Принятое компромиссное решение продиктовано, прежде всего, теми требованиями, которые предъявляются к параметрам разработанного двухлучевого лазерного зонда. Важнейшим из них является реализация предельно низкого порога чувствительности гетеродинной системы считывания, необходимого для исследования процессов модификации материалов с очень малой дифракционной эффективностью.

Кроме того, параметры интерференционной микрорешетки, выполняющей функции записывающего и считывающего пучков, должны быть близки к параметрам «образцовой» решетки, чтобы иметь возможность оценить влияние искажений, возникающих при лазерной модификации свойств среды. Для этого необходимо в первую очередь обеспечить отсутствие искажений углового спектра дифрагированного светового пучка.

Для выполнения первого требования желательно увеличивать параметр γ , чтобы исключить ухудшение порога чувствительности из-за перекрытия пучков. Выполнение второго требования связано с уменьшением параметра G .

В качестве материала АОМ выбран кристалл парателлуриита (TeO_2). В модуляторе используется дифракция света на продольной акустической волне, распространяющейся в направлении оси $[001]$ кристалла TeO_2 . Скорость акустической волны $V = 4,26$ км/с, частота звуковой волны $f_0 = 80$ МГц и ее длина $\Lambda_0 = 53,3$ мкм. Показатель преломления материала АОМ $n = 2,26$. Размер электрода пьезопреобразователя L выбран равным 8 мм.

Падающая световая волна ($\lambda = 0,67$ мкм) распространяется в направлении оси $[110]$ кристалла. Вектор поляризации световой волны совпадает с осью $[\bar{1}\bar{1}0]$. Диаметр перетяжки светового пучка по уровню $1/e^2$ максимальной интенсивности d_0 выбран равным 133 мкм.

Исходя из приведенных выше данных, определим основные параметры акустооптического взаимодействия: $G = \lambda L / n d_0 \Lambda_0 = 0,33$, $\gamma = d_0 / \Lambda_0 = 2,5$, $Q = \lambda L / n \Lambda^2 = 0,82$. Из (2) найдем значение минимальной обнаруживаемой дифракционной эффективности при $C/\Pi = 1$ и гауссовых пучках:

$$\min \eta_c = \exp(-\gamma^2 \pi^2 / 4) = 2 \cdot 10^{-7}.$$

Расчетное значение этого же параметра с учетом сжатия спектра пространственных частот дифрагированного пучка составило $1,4 \cdot 10^{-7}$. Столь незначительное различие обеих оценок указывает на то, что распределение интенсивности дифрагированного пучка практически не отличается от гауссова.

Среди других причин, ухудшающих порог чувствительности двухпучкового лазерного зонда, следует отметить флуктуации мощности излучения лазера, шумы электронных устройств детектирования и шумы рассеяния света в материале АОМ. Экспериментально определенное значение суммарных шумов соответствует минимальной обнаруживаемой дифракционной эффективности $\min \eta_c = 7,2 \cdot 10^{-7}$. Поскольку большую часть этих шумов составляют флуктуации мощности лазера, то радикальным средством улучшения порога чувствительности является дифференциальное детектирование, при котором в каждом из пучков (нулевом и дифрагированном) устанавливаются фотоприемники (см. рис. 1 и рис. 2), а результирующий сигнал находится как разность их сигналов. Тогда происходит подавление уровня всех синфазных помех и удвоение полезного сигнала считывания информации с фазовых решеток. Экспериментально показано, что величина $\min \eta_c$ может быть уменьшена до $3,6 \cdot 10^{-8}$, причем половину ее составляют шумы фотоприемников (при средней мощности каждого из пучков ≈ 10 мкВт и полосе пропускания считывающей системы 1 кГц).

Результаты экспериментов. В качестве регистрирующей среды использовался легированный железом кристалл ниобата лития размерами $8,0 \times 8,0 \times 0,9$ мм. Оптическая ось кристалла располагалась параллельно поверхности образца и плоскости падения интерферирующих пучков. Была выбрана необыкновенная поляризация записывающих и считывающих пучков. В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер с длиной волны $\lambda = 0,67$ мкм, работающий в импульсном режиме (длительность импульса 2 нс) и с частотой повторения импульсов 5 МГц. Импульсная мощность излучения лазера на поверхности образца была 2 мВт; интенсивность света в плоскости регистрации – $1,6 \cdot 10^5$ Вт/см², а

время экспозиции при записи каждой микрорешетки составляло 0,5–1,0 с ($2,5 \cdot 10^6$ – $5,0 \cdot 10^6$ импульсов).

Измерения показали, что микрорешетка, сформированная в среде, имеет размер $X \times Y = 1,0 \times 1,4$ мкм, контраст 0,85 и пространственную частоту 1130 мм^{-1} . Расчетное значение размера микрорешетки по глубине для дифракционно ограниченных пучков в среде с показателем преломления $n = 2,26$ составляет $\Delta Z = 8,5$ мкм.

Максимальное значение дифракционной эффективности микрорешетки равно 2,5 %. Такая эффективность соответствует амплитуде модуляции показателя преломления $\sim 3 \cdot 10^{-3}$, что является предельной величиной для легированного железом ниобата лития [6].

Для проверки возможности реализации 8-уровневого фазового кодирования на глубинах 20–180 мкм в ниобате лития проведена запись строки из восьми микрорешеток, причем фаза каждой последующей микрорешетки сдвигалась на $\pi/4$ относительно предыдущей. Характер изменения амплитуды сигнала детектирования при сканировании зоны пересечения световых пучков вдоль оси Z приведен на рис. 5, *a*. Характер изменения фазы этого сигнала показан на рис. 5, *b*. Можно видеть, что все восемь уровней фазы хорошо различаются.

Известно, что фазовая модуляция является более помехоустойчивой по сравнению с амплитудной. Для подтверждения этого тезиса на глубине 100 мкм проведена запись и детектирование последовательности из четырех микрорешеток, сформированных в одном слое ниобата лития. Все микрорешетки записаны при одной и той же экспозиции. Применялось двухуровне-

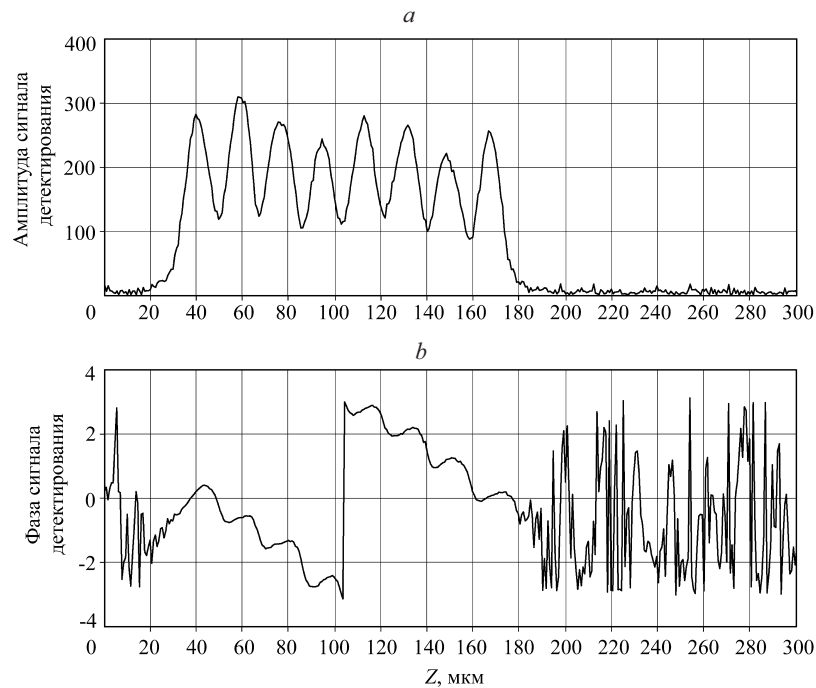


Рис. 5

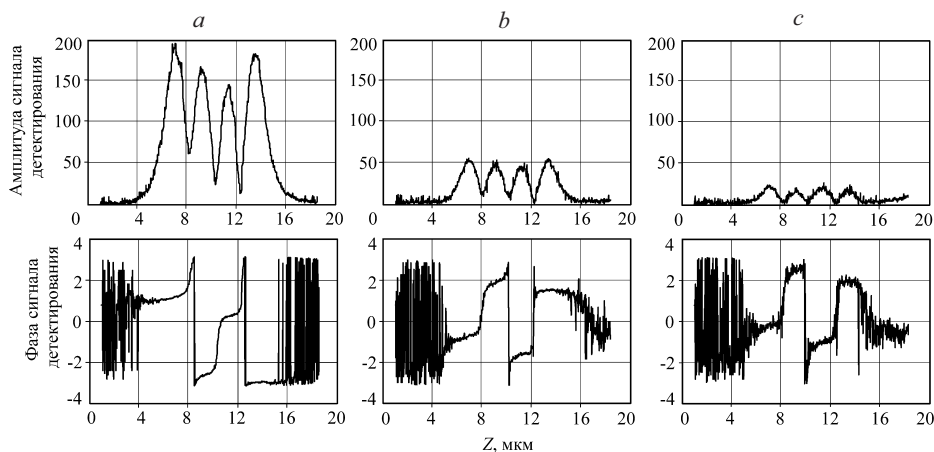


Рис. 6

вое фазовое кодирование. Характер изменения амплитуды и фазы сигнала при проведении ряда последовательных циклов детектирования показан на рис. 6, *a–c*. Видно, что, несмотря на падение амплитуды сигнала (стирание при считывании) более чем на порядок, характер изменения фазы остается постоянным.

Проведена запись матриц микрорешеток размера 5×5 . Расстояние между микрорешетками по оси X составляет 5 мкм, а по оси Y – 4 мкм. Матрицы размещались вдоль оси Z на расстоянии 40 мкм друг от друга. Детектирование отдельных микрорешеток проводилось путем сканирования матриц вдоль оси Y , возврата в исходную точку, перемещения по оси X на следующую строку и последующего прохождения аналогичным образом остальных строк и находящихся на них микрорешеток. Результаты детектирования четырех матриц микрорешеток на разной глубине приведены на рис. 7, *a–d*. Из рисунка видно, что шумы рассеяния, связанные с наличием первых трех слоев записи, мало влияют на результат детектирования четвертого слоя.

Для демонстрации предельных возможностей двухпучкового метода записи/детектирования микрорешеток была проведена запись в 50 глубинных слоях ниобата лития. Число слоев ограничено малым рабочим отрезком фокусирующего микрообъектива. Расстояние между слоями в среде составляло 12 мкм. Сдвиг фаз между двумя соседними микрорешетками был равен π радиан. Зависимость амплитуды сигнала считывания при сканировании зоны пересечения световых пучков 10, 11 (см. рис. 2) по глубине материала представлена на рис. 8, *a*. Характер изменения фазы этого сигнала приведен на рис. 8, *b*.

Анализ амплитуд сигналов детектирования микрорешеток, находящихся на различной глубине материала, показал, что размер отклика, определяемый по уровню 0,5 максимальной амплитуды, находится в диапазоне 13,0–14,3 мкм. Поскольку в процессе сканирования считывающая микрорешетка смещается относительно записанной, то результат считывания является сверткой записанного сигнала с аппаратной функцией (по глубине) системы коллинеарного гетеродинного детектирования. Вследствие этого размер отклика по глубине Z будет не менее, чем в $\sqrt{2}$ раз больше размера микрорешетки, и составит 12 мкм.

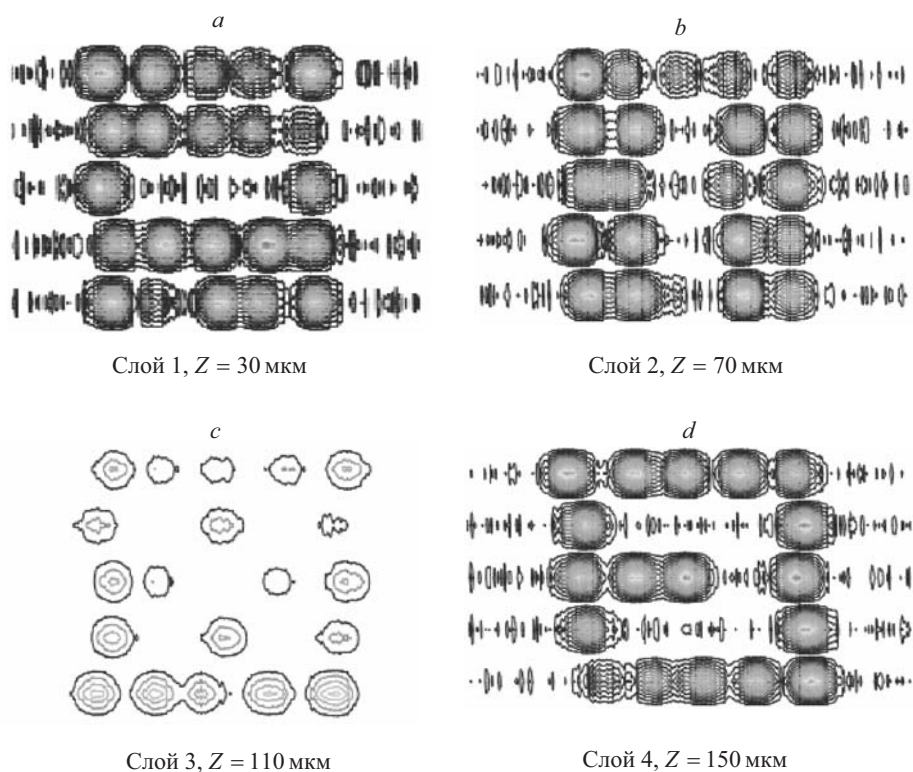


Рис. 7

Из результатов эксперимента, представленных на рис. 8, видно, что размер слоя по глубине только на 9–20 % превышает значение, соответствующее дифракционному пределу. Тем не менее расчет показывает, что при сканировании толстой регистрирующей среды двухпучковым лазерным зондом возникают сферические aberrации и, как следствие, размер сфокусированного светового пучка увеличивается.

Для глубины 570 мкм, где была зарегистрирована последняя микрорешетка, поперечный размер пучка увеличивается вдвое. Об этом косвенно свидетельствует малый уровень амплитуды отклика, что является следствием уменьшения интенсивности расширенного пучка и экспозиции при записи. Увеличение поперечного размера пучка ведет к увеличению продольного размера формируемой микрорешетки и соответственно уширению отклика. Однако, как видно из рис. 8, этого не происходит. Мы объясняем такой эффект особыми свойствами гетеродинного детектирования, которые подлежат изучению.

Двухпучковый лазерный метод записи/детектирования микрорешеток апробирован также на образцах фотополимерных композиций, разработанных в Новосибирском институте органической химии СО РАН. Толщина среды была в пределах 100–180 мкм. Получена композиция, обеспечившая запись в режиме однофотонного поглощения объемных микрорешеток (размерами $1,0 \times 1,4 \times 5,7$ мкм) последовательностью импульсов длительностью 2 нс за время 50 мкс. Минимальное значение фоточувствительности композиции составляет 10 мДж/см² при дифракционной эффективности объем-

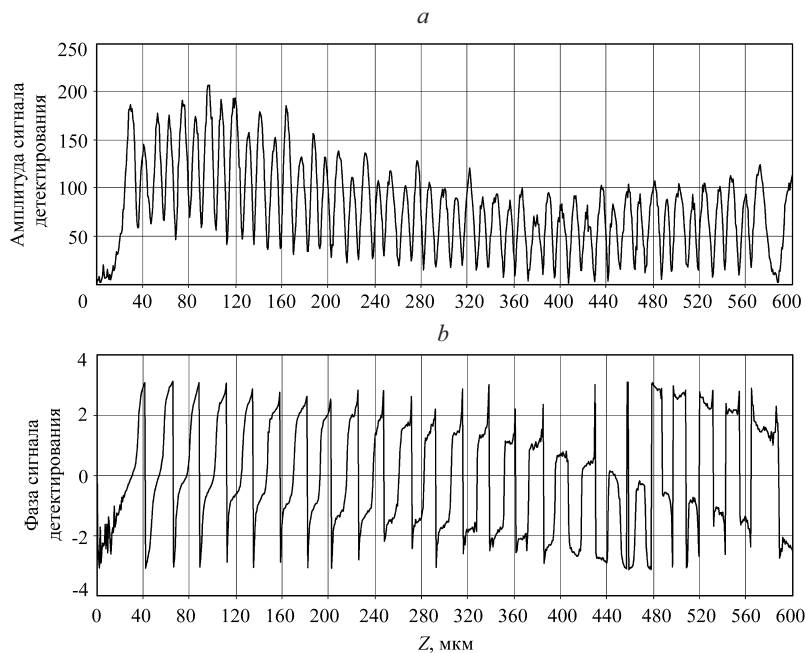


Рис. 8

ных микрорешеток, равной 0,18 %. Реализована запись десяти микрорешеток по толщине фотополимерного материала 150 мкм. Расстояние между микрорешетками 15 мкм.

Заключение. Путем совмещения двух острогофокусированных когерентных лазерных пучков в объеме регистрирующих сред можно проводить однофотонную запись одиночных и групповых микрорешеток с восьмью различными значениями фазы, а путем коллинеарного оптического гетеродинамирования – помехоустойчивое обнаружение (детектирование) таких микрорешеток с определением их амплитуды и фазы. Размеры микрорешеток зависят от рабочей длины волны излучения λ , числовой апертуры фокусирующего микрообъектива NA и показателя преломления среды. При значениях $\lambda = 0,67$ мкм и $NA = 0,65$ экспериментальные размеры микрорешеток в ниобате лития составили $1,0 \times 1,4 \times 8,5$ мкм, а в фотополимерном материале – $1,0 \times 1,4 \times 5,7$ мкм.

Созданная система автоматизации эксперимента позволила провести запись/детектирование одиночных и групповых микрорешеток в трехмерном физическом объеме регистрирующих сред (размер поля перемещения по координатам X, Y, Z 0,8 мм, разрешающая способность по каждой из координат 0,03 мкм), обеспечив при этом достаточно высокий уровень прецизионности исследования. Перемещение среды по координатам X, Y, Z реализовано с помощью программно-управляемых пьезопроводов с обратной связью, а 8-уровневая модуляция фазы микрорешеток при записи и сдвиг частоты лазерного излучения при их детектировании – с помощью АОМ.

Показано, что параметры акустооптического модулятора оказывают существенное влияние на такие характеристики двухпучкового лазерного зонда, как коэффициент полезного использования мощности лазерного пучка, плотность размещения и контраст записываемых микрорешеток, а также

уровень перекрытия пучков (а следовательно, уровень помех). Удовлетворить всем предъявляемым требованиям одновременно невозможно. Изложена методика выбора параметров АОМ исходя из условий обеспечения наилучшего порога чувствительности гетеродинного фотоприемника и высокого контраста микрорешеток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рудаков И. Б., Штейнберг И. Ш., Щепеткин Ю. А.** Метод многослойной оптической записи информации // Автометрия. 1991. № 3. С. 76.
2. **Штейнберг И. Ш., Щепеткин Ю. А.** Особенности 3-D оптической записи двоичной информации // Автометрия. 1993. № 3. С. 89.
3. **Пат. № 2161827 РФ.** Способ многослойной оптической записи и воспроизведения двоичной информации /И. Ш. Штейнберг, Ю. А. Щепеткин. Оpubл. 2001, Бюл. № 1.
4. **Магдич Л. Н., Молчанов В. Я.** Акустооптические устройства и их применение. М.: Сов. радио, 1978.
5. **Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е.** Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
6. **Tverdokhleba P. E., Steinberg I. Sh., Shepetkin Ju. A.** Multilayer recording of the microholograms in lithium niobate // Proc. Of OSA Trends in Optics and Photonics. Washington, DC: Optical Society of America, 2003. Vol. 87. P. 649.

Поступила в редакцию 26 июля 2006 г.
