

Предел дифракционной эффективности ДОЭ, изготовленных по фоторастровой технологии, определяется точностью выполнения границ топологии шаблона.

Автор благодарит проф. О. Брингдала и д-ра Ф. Вировского (университет г. Эссена, ФРГ) за полезное обсуждение и помощь в проведении численных экспериментов, проф. В. П. Коронкевича за внимание и поддержку в работе, Е. Г. Чурина за помощь в изготовлении фотошаблонов, В. П. Чернухина и В. И. Григорову за проведение фотолитографических работ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee W. H. Computer-generated holograms: techniques and application // Progress in Optics/Ed. E. Wolf.— North—Holland, Amsterdam, 1978.— P. 119.
2. Goto K., Mori K., Hatakoshi G. et al. Spherical grating objective lenses for optical disk pick-up // Jap. J. Appl. Phys.— 1987.— 26.— Suppl. 26-4.— P. 135.
3. Swanson G. I., Weldkamp W. B. Diffractive optical elements for use in infrared systems // Opt. Eng.— 1989.— 28, N 6.— P. 605.
4. Poleshchuk A. G. Fabrication of high efficient elements for diffractive and integrated optics by photorastered technology // The 5-th National Conf. on Optics and Laser Engineering, May 18—20.— Varna, Bulgaria, 1989.— P. 7.
5. Wyrowski F., Bryngdahl O. Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography // JOSA.— 1988.— 5, N 7.— P. 1058.
6. Auria L., Huignard L. P., Boy A. M., Spitz E. Photolithographic fabrication of thin film lenses // Opt. Comm.— 1972.— 5, N 4.— P. 232.
7. Коронкевич В. И., Ремесник В. Г., Фатеев В. А., Цукерман В. Г. Киноформные оптические элементы в пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников // Автометрия.— 1976.— № 5.
8. Bastians M. J. A generalized sampling theorem with application to computer-generated transparencies. // JOSA.— 1978.— 68.— P. 1658.
9. Коронкевич В. И., Ленкова Г. А., Михальцова И. А. и др. Киноформные оптические элементы: методы расчета, технология изготовления, практическое применение // Автометрия.— 1985.— № 1.
10. Floyd P. W., Steinberg L. An adaptive algorithm for spatial grayscale // Proc. SID.— 1976.— 17.— P. 78.
11. Котлепов Б. И. Микроизображения. Оптические методы получения и контроля.— Л.: Машиностроение, 1985.
12. Фотолитография и оптика/Под ред. Я. А. Федорова и Г. Поля.— М.: Сов. радио, 1974.
13. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику.— М.: Мир, 1970.

Поступила в редакцию 16 апреля 1990 г.

УДК 681.327.68 : 621.373.826

И. Б. РУДАКОВ, И. Ш. ШТЕЙНБЕРГ, Ю. А. ЩЕПЕТКИН

(Новосибирск)

#### МЕТОД МНОГОСЛОЙНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ

Оптическая побитовая запись на плоском (поверхностном) носителе довольно быстро достигла предельной плотности, обусловленной дифракционным ограничением минимального размера сфокусированного лазерного пучка. Требование повышения объема регистрируемой информации существенно и стимулирует исследования в этом направлении.

В данной работе рассматривается многослойная запись в объемной (толстой) среде как метод повышения плотности оптической регистрации двоичной информации. Способ основан на селекции объемной зоны записи при гетеродинном считывании информации [1, 2].

На рис. 1 приведена блок-схема устройства, предназначенного для многослойной оптической записи.

Луч света полупроводникового лазера 1 оптической схемой 2, 3 формируется в виде перетяжки в зоне акустооптического взаимодействия

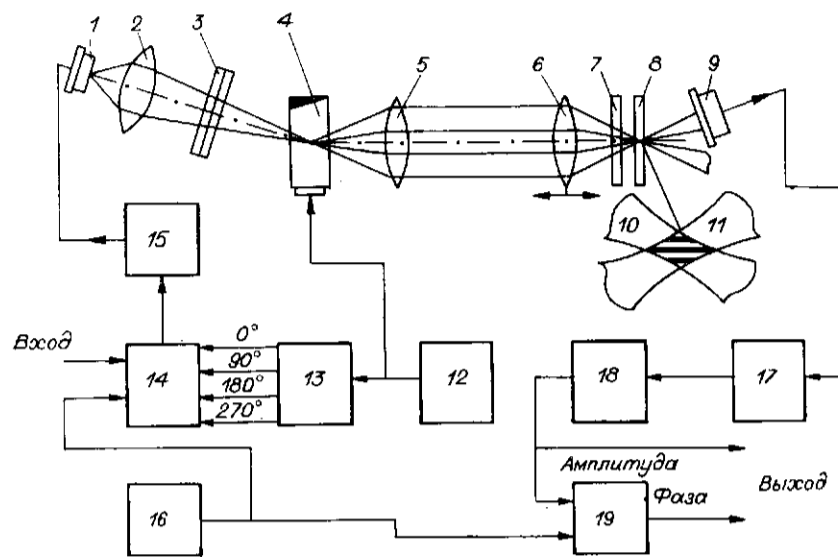


Рис. 1

модулятора 4. Полученные в результате дифракции световые пучки с помощью телескопической системы 5, 6 совмещаются в адресуемом слое объемно регистрирующей среды 8, и записывается образованная в зоне пересечения пучков 10, 11 интерференционная решетка. Размер решетки по глубине выбирается меньше толщины среды. Перемещая зону пересечения световых пучков 10, 11 по глубине, записывают информацию в других слоях.

Для повышения плотности, скорости и помехоустойчивости записи применено четырехуровневое относительное фазовое кодирование информации [2]. Информационным параметром при относительной фазовой модуляции является разность фаз пространственной решетки двух соседних следующих друг за другом пик. При четырехуровневой фазовой модуляции имеются четыре значения допустимых разностей (сдвигов) фаз решеток-пиков (0, 90, 180 и 270°). Наличие четырех градаций фазы позволяет в каждом пикте записать двухразрядное двоичное слово. Известно [3], что такое кодирование не только приводит к удвоению скорости и плотности записи, но также увеличивает помехоустойчивость по сравнению с амплитудной модуляцией.

Электронная часть устройства записи-считывания содержит генератор 12 напряжения высокой частоты (75 МГц), которое подается на электрический вход акустооптического модулятора (АОМ) 4.

Сдвиг фазы интерференционной решетки в зоне записи можно осуществить либо путем изменения фазы высокочастотного напряжения, либо изменяя относительно него фазу (задержку) вспышек лазерного света. В устройстве реализован второй метод. Для этого на выходе расщепителя фазы 13 формируются четыре гармонических напряжения, сдвинутых по фазе относительно напряжения на АОМ на 0, 90, 180 и 270°. В режиме записи один из выходов расщепителя фазы (в зависимости от входной информации) с помощью коммутатора 14 присоединяется ко входу блока питания полупроводникового лазера 15. От блока питания на импульсный полупроводниковый лазер (типа ИЛПИ-2-7К-А) подается короткий импульс тока ( $\approx 5$  нс), и в объеме светочувствительной среды 8 записывается объемная решетка-пик.

Полупроводниковый лазер ИЛПИ-2-7К-А, имеющий длину волны излучения  $\lambda = 0,67$  мкм, может работать только в импульсном режиме. Гетеродинамное считывание при импульсном питании полупроводникового лазера выполняется следующим образом. В режиме считывания на вход коммутатора фазы подается управляющее напряжение от вспомога-

ного генератора 16. Это напряжение последовательно переключает фазу высокочастотного сигнала, поступающего на блок питания лазера 15, в порядке нарастания ее (т. е. 0, 90, 180, 270, 0° и т. д.). Очевидно, что возможен и другой вариант, когда фаза уменьшается: 360, 270, 180, 90° и т. д. Изменения фазы управляющего напряжения превращаются в блоке питания 15 во времяимпульсную модуляцию внешнего полупроводникового лазера. В результате фаза интерференционной решетки, образованной в зоне пересечения световых пучков 10, 11, ступенчато (дискретно) изменяется относительно фазы записанной решетки-пита. Вследствие стробоскопического эффекта первая гармоника сигнала на выходе фотоприемника 9 и усилителя 17 равна  $f_s/4$ , где  $f_s = 16$  кГц — частота напряжения вспомогательного генератора 16. Сигнал считывания фильтруется полосовым фильтром 18, настроенным на частоту  $f_s/4$ , и далее с помощью фазового детектора 19 и осциллографа измеряются фаза записанной решетки-пита и уровень огибающей сигнала считывания. Свойство селекции объемной зоны при гетеродинном считывании основано на том, что высокочастотный сигнал (75 МГц) образуется лишь в зоне, где имеется бегущая интерференционная решетка, т. е. в зоне пересечения световых пучков 10, 11. Благодаря этому шумы, возникающие из-за рассеяния света в неадресованных слоях, мало влияют на результат считывания.

Для гауссовых пучков толщина слоя регистрирующей среды  $\Delta z$ , определенная по уровню  $1/e^2$  максимальной интенсивности,  $\Delta z = 8\lambda n/(NA)^2 \lambda = 6$  мкм, где  $\lambda = 0,67$  мкм — длина волны света;  $n = 1,5$  — показатель преломления среды;  $NA = 0,65$  — числовая апертура фокусирующего объектива 6.

Для экспериментального определения размера зоны пространственной селекции в область пересечения световых пучков 10, 11 устанавливалась тонкая дифракционная решетка, пространственная частота которой равна частоте бегущей решетки ( $\approx 1200$  лин/мм), а размер значительно превышает диаметр перетяжки световых пучков ( $\approx 2$  мкм по уровню 0,5 максимальной интенсивности). При измерении глубины зоны селекции область пересечения пучков перемещалась относительно дифракционной решетки.

На рис. 2 приведена зависимость огибающей сигнала на выходе фотоприемника от перемещения решетки вдоль оптической оси (по глубине).

Размер зоны селекции  $\Delta z \approx 5$  мкм, что характеризует разрешающую способность по глубине, близкую к дифракционному пределу ( $\Delta z = 4$  мкм при  $n = 1$ ).

Для экспериментального исследования селективных свойств гетеродинного считывания в конусных пучках на расстоянии  $\approx 35$  мкм от слоя 8 с записанной информацией устанавливался рассеиватель 7. Проверилось влияние шумов рассеяния света в неадресуемых слоях на результат считывания. Доля рассеянного света, попадающего на фотоприемник 9, примерно в 10 раз превышала мощность считанного сигнала. Дифракционная эффективность сигнальной решетки 8  $\approx 0,5\%$ .

Измерения показали, что непосредственное считывание информации со слоя 8 невозможно, поскольку флуктуации суммарной интенсивности света (от слоев 7 и 8), обусловленные спекл-шумами и изменением пропускания, составляют около 10%, т. е. соизмеримы с величиной сигнала.

На рис. 3 приведена зависимость сигнала при гетеродинном считывании от перемещения микрообъектива 6 относительно решеток 7 и 8 по глубине (см. рис. 1). Видно, что происходит хорошее разделение слабого сигнала и мощной помехи рассеивателя.

Эксперименты, подтверждающие возможность многослойной оптической записи и считывания информации, проводились на органическом фотополимерном материале, разработанном в НИОХ СО АН СССР. Материал позволяет производить запись без последующей «мокрой» обра-

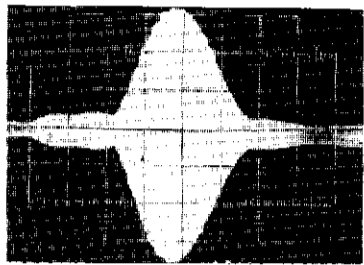


Рис. 2

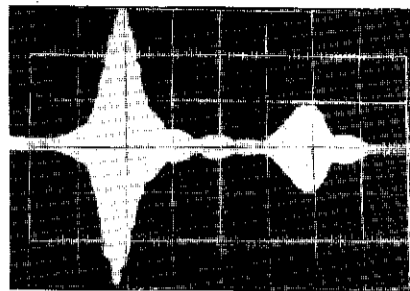


Рис. 3

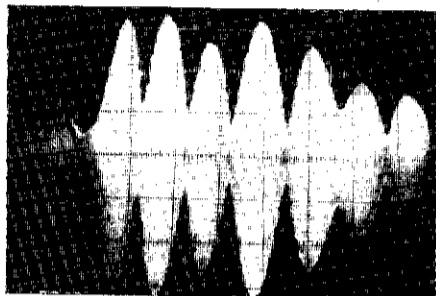


Рис. 4

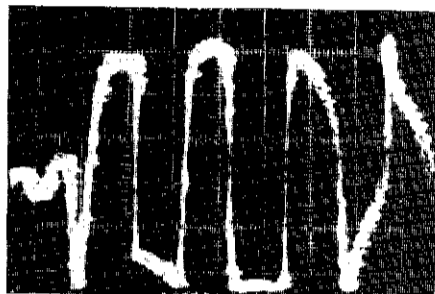


Рис. 5

ботки. Размер решетки по глубине (толщина слоя записи) составляет около 6 мкм. Если определить дифракционную эффективность как отношение интенсивностей дифрагированного света и прошедшего через среду, то максимальное значение такой дифракционной эффективности у отдельно записанной однослойной объемной решетки достигало 8—10 %.

Многослойная запись проводилась поточечно путем перемещения зоны пересечения световых пучков 10, 11 (см. рис. 1) по толщине материала 8. Использовалось двухуровневое фазовое кодирование информации. Было записано семь слоев. Расстояние между слоями по глубине 10 мкм. Фаза решетки в каждом последующем слое изменялась на  $180^\circ$  по отношению к фазе решетки предыдущего слоя. Толщина материала около 100 мкм.

На рис. 4 показано, как зависит амплитуда (огibaющая) сигнала считывания при сканировании зоны пересечения световых пучков 10, 11 по глубине (толщине) материала (см. рис. 1). Изменение фазы этого сигнала приведено на рис. 5.

#### ВЫВОДЫ

Предложен метод многослойной «побитовой» оптической записи, основанный на селекции объемной зоны регистрации, гетеродинамном считывании и фазовом кодировании информации.

Рассмотренный способ синтеза решетки-пита с помощью акустооптического модулятора и полупроводникового лазера не критичен к величине продольной (временной) когерентности излучения лазера, обеспечивает высокий коэффициент использования света, высокую механическую и временную стабильность совмещения волновых фронтов гетеродинамного (опорного) и считанного световых пучков.

Разработана схема гетеродинамного считывания при импульсном питании полупроводникового лазера. Показано, как в такой схеме осуществляется преобразование спектра считанного сигнала путем ступенчатого переключения фазы вспышек излучения полупроводникового лазера.

В результате оказывается возможным считывать высокочастотный сигнал фотосмещения обыкновенным, широкоапертурным низкочастотным фотоприемником.

Экспериментально показано, что минимальный размер объемной зоны селекции по глубине (толщине) материала составляет около 4—5 мкм и находится вблизи теоретического предела, определяемого дифракционным разрешением микрообъектива.

Приведенные результаты экспериментальных исследований показывают, что предложенный метод многослойной записи в толстой (объемной) среде позволяет примерно на порядок увеличить плотность оптической записи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sawatari T. Optical heterodyne scanning microscope // Appl. Opt.— 1973.— 12, N 11.— P. 2768.
2. Вовк Ю. В., Выдрин Л. В., Твердохлеб П. Е., Щепеткин Ю. А. Метод многоканальной записи двоичных данных на оптическом диске // Автометрия.— 1989.— № 2.
3. Вовк Ю. В., Выдрин Л. В., Вьюхина Н. Н. и др. Высокоскоростной накопитель цифровых данных на основе пакета оптических дисков // Автометрия.— 1989.— № 3.

Поступила в редакцию 14 июня 1990 г.

УДК 535.345.67

Е. Г. СТОЛОВ, З. Э. ЭЛЬГАРТ  
(Ленинград)

#### СИНТЕЗ АДАПТИВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В настоящей работе излагается теория синтеза адаптивных физических систем. Под понятием «адаптивность» в данном случае подразумевается наличие у системы нового свойства: сохранения требуемых характеристик, несмотря на отклонения ряда конструктивных параметров от заданных значений из-за невозпроизводимости технологических режимов процесса изготовления системы. Это свойство иллюстрируется примером расчета адаптивных конструкций интерференционных оптических покрытий.

Характеристики любой сложной физической системы зависят от совокупности значений конструктивных параметров. Например, параметры интерференционных покрытий зависят от оптических толщин слоев и показателей преломления слоев и обрамляющих сред:

$$T(\lambda) = T(n_0, n_1, n_2, \dots, n_m, n_{m+1}, l_1, l_2, \dots, l_m, \lambda), \quad (1)$$

где  $T(\lambda)$  — энергетический коэффициент пропускания  $m$ -слойного покрытия;  $n_0$  и  $n_{m+1}$  — показатели преломления обрамляющих сред;  $n_i$ ,  $l_i$  — показатель преломления и оптическая толщина  $i$ -го слоя;  $\lambda$  — длина волны излучения в вакууме.

В процессе практической реализации сложной физической системы ряд ее конструктивных параметров контролируется непосредственно с помощью приборов контроля, имеющихся в технологической установке, предназначенной для изготовления данных систем. Ряд других параметров определяется свойствами материалов, из которых изготавливаются элементы физической системы, и их значения претерпевают неконтролируемые изменения в определенном интервале из-за колебаний технологических режимов. Во многих случаях контролируются характеристики, являющиеся сложной функцией от конструктивных параметров системы.

Поясним изложенное на примере изготовления многослойного интерференционного покрытия. Выражение для спектральной характери-