

## НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.391

В. М. ВЕДЕРНИКОВ, В. Н. ВЬЮХИН, В. П. КИРЬЯНОВ,  
Ф. И. КОКОУЛИН, В. П. КОРОНКЕВИЧ, А. И. ЛОХМАТОВ,  
В. И. НАЛИВАЙКО, А. Г. ПОЛЕЩУК, Г. Г. ТАРАСОВ,  
В. А. ХАНОВ, А. М. ЩЕРБАЧЕНКО, Ю. И. ЮРЛОВ

(Новосибирск)

### ПРЕЦИЗИОННЫЙ ФОТОПОСТРОИТЕЛЬ ДЛЯ СИНТЕЗА ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Последние десятилетия внимание исследователей обращено на киноформную оптику. В основе этой новой области лежит хорошо известный факт: преобразование волновых фронтов можно осуществлять, используя явление дифракции, т. е. пропуская свет через тонкие рельефные или фазовые пластинки. Создавая дифракционные структуры путем нанесения геометрического рельефа или изменения показателя преломления вещества, можно отклонять, фокусировать, модулировать, разделять и трансформировать световые пучки.

Киноформ — дифракционный элемент переменной оптической толщины, преобразующий форму волнового фронта заданным образом с минимальными потерями световой энергии. Физически он представляет фазовую дифракционную структуру в виде рельефа или изменения плотности на тонкой прозрачной подложке. Изменения оптической толщины структуры лежат в пределах длины волны света.

Простейший киноформ — пилообразная дифракционная решетка с «блеском», высота зуба которой равна длине волны света. При работе на пропускание она поворачивает волновой фронт на угол, пропорциональный ее шагу. Фактически для монохроматического пучка она выполняет роль обычной призмы, служащей для излома оптической оси на заданный угол.

Аналог киноформной линзы — фазовая линза Френеля, или киноформ точки. У киноформных линз длина оптического пути для всех лучей, соединяющих объект и изображение, с ростом апертурного угла не остается постоянной, а меняется скачкообразно по фазе на  $2\pi$  при переходе от одной зоны Френеля к другой.

Киноформные оптические элементы привлекают внимание специалистов по следующим причинам:

1. Компоненты киноформной оптики изготавливают на тонких подложках в виде пленок или рельефа. Следовательно, они имеют малый вес при большой апертуре и из-за малого поглощения в слое пропускают свет в широкой спектральной области.

2. Производство киноформов основано на технологии, аналогичной технологии изготовления грампластинок, когда тиражирование большими партиями осуществляется методом штамповки с предварительно изготовленной матрицы или шаблона.

3. Киноформы позволят конструировать пространственно-перекрывающиеся оптические системы, так как на одной подложке можно делать несколько киноформных элементов.

4. Киноформы легко трансформировать в полосу, кольцо, сферу или любую другую плоскую или объемную фигуру. Простое линейное перемещение такого элемента относительно лазерного пучка осуществляет сканирование по объему с одновременной перефокусировкой излучения.

5. Киноформы дают возможность проводить более широкий круг преобразований изображений, чем это делается при помощи классических оптических элементов.

Помимо традиционных линз и призм, в киноформном виде будут построены элементы, обладающие новыми функциональными возможностями. Они позволят преобразовать волновой фронт в асферический, превратить точку на входе в окружность или любую другую фигуру, как это делается, например, в аксиконах, и осуществить конформные и аффинные преобразования над изображениями.

При помощи киноформных элементов будут конструировать пространственно-неинвариантные оптические системы, у которых изопланатизм меняется направленно в любой точке поля. В практическом смысле такие устройства будут «выхватывать» отдельные части изображения, растягивать их, поворачивать, фокусировать и изменять форму. Можно управлять геометрическим преобразованием изображений и реставрировать изображения, искаженные смазом из-за движения объекта или аберрациями типа дисторсии и астигматизма.

В пространственно зависимых оптических системах киноформ может осуществлять преобразование Меллина при построении систем распознавания образов, не зависящих от масштаба изображения. Выполнение преобразования Абеля даст возможность восстанавливать профили с круговой симметрией по их проекциям. В общем случае киноформы не заменят обычных оптических элементов, но в ряде специальных применений для работ с лазерным излучением они будут полезны и получат широкое распространение.

Хотя использование дифракционных структур для построения изображений и преобразований световых пучков известно давно, они все же не получили широкого применения по следующим причинам:

световая эффективность дифракционных структур очень мала, только часть мощности светового пучка идет на создание изображения;

они имеют высокий уровень фона, так как часть падающего света создает постоянную засветку в плоскости изображения;

им присущ большой хроматизм и их нельзя использовать для визуальных оптических систем;

их трудно изготовить, так как минимальные размеры элемента круговой дифракционной структуры для высокоапертурных линз равны длине волны света.

Преодоление двух первых затруднений шло следующим путем. Вначале Рэлей [1] предложил применять для концентрации света вместо зонной пластинки Френеля фазовую зонную пластинку с прямоугольным профилем. Позднее Вуд изготовил такую пластинку. Преимущество пластинки Рэрея — Вуда состояло в том, что она позволила собрать в основном изображении до 40% света и практически полностью устранить фон. Следующий шаг осуществил Габор. Амплитудные и фазовые голографические линзы Габора концентрируют в основном порядке до 34% света. Энергия не разбрасывается по внешним порядкам, и в изображении практически отсутствует фон.

В 1969 г. Лезем, Хирш и Жордан [2] создали при помощи многоградационного фотопостроителя и ЭВМ фазовую структуру, аналогов которой в оптике не было. При освещении лазерным пучком она восстанавли-

ливалась объемное изображение предмета, синтезированного на ЭВМ. При этом в отличие от голограмм при восстановлении не происходило потери энергии на нежелательные дифракционные порядки. Этой структуре они присвоили название «киноформ». Однако изготовленные при помощи ЭВМ киноформные линзы [3] не позволяли получать качество изображения, достаточное для практического применения. Выполнением киноформных линз фотолитографическим путем [4] удалось достигнуть эффективности, равной 63%, однако существующее фотолитографическое оборудование для производства интегральных схем не может воспроизвести круговые структуры с субмикронной точностью, поэтому изготовители киноформных линз ограничились их применением для «грубых» оптических работ, таких, например, как матрицы линз для монохроматических осветителей.

Для устранения хроматизма дифракционных структур (третий недостаток) в 1956 г. Слюсарев [5] обратил внимание на возможности гибридных оптических систем, состоящих из линз и фазовых зонных пластинок (киноформов). Он показал, что большой хроматизм фазовой линзы Френеля может быть использован для компенсации остаточной хроматической aberrации (вторичного спектра) обычной оптической системы. В результате можно достигнуть хорошего исправления хроматизма, например, у астрономических объективов. Вместе с тем он указал еще на одно преимущество гибридных систем: у них отсутствует дисторсия. В этот же период Тудоровский [6] предложил специальный ступенчатый фазовый фильтр, при помощи которого устранялся вторичный спектр ахроматического объектива. Вся система работала аналогично четырехлинзовому апохроматическому объективу. К сожалению, эти элементы из-за технологических трудностей не были реализованы экспериментально.

Широкое практическое применение киноформных элементов сдерживается из-за отсутствия прецизионных установок, позволяющих изготавливать фазовые структуры со сложным многоградационным профилем. При разработке элементов интегральной оптики широко используются технология и оборудование, применяемые при производстве элементов микроэлектроники. Для изготовления киноформов такого оборудования нет.

Предлагаемая работа — первое сообщение о лазерном фотопостроителе, созданном в лаборатории когерентной оптики ИАиЭ СО АН СССР для производства киноформных структур с круговой симметрией. Ниже приведены принципы работы основных узлов фотопостроителя и первые экспериментальные результаты.

**Схема фотопостроителя.** Прецизионный лазерный фотопостроитель состоит из следующих основных блоков: оптического блока записи информации, узла перемещения блока записи, блока прецизионного аэро-статического шпинделя, вращающего диск с фоточувствительным материалом, модулятора излучения лазера и блока сопряжения с ЭВМ.

Фазовая структура осесимметричного киноформа записывается сфокусированным лазерным пучком на диске с фотоматериалом. Микрообъектив, фокусирующий лазерный пучок, перемещается по радиусу линейным двигателем. Эти перемещения задаются и фиксируются лазерным интерферометром. ЭВМ осуществляет управление и контроль за работой всех узлов.

Задание алгоритмов управления функциональными блоками, их контроль и тестирование проводятся через программно управляемую, магистрально-модульную систему КАМАК. Машинная независимость структуры КАМАК позволяет применять для управления работой фотопостроителя различные типы ЭВМ.

На фотопостроителе можно изготавливать фазовые киноформные структуры и транспаранты (фотошаблоны), которые в дальнейшем при-

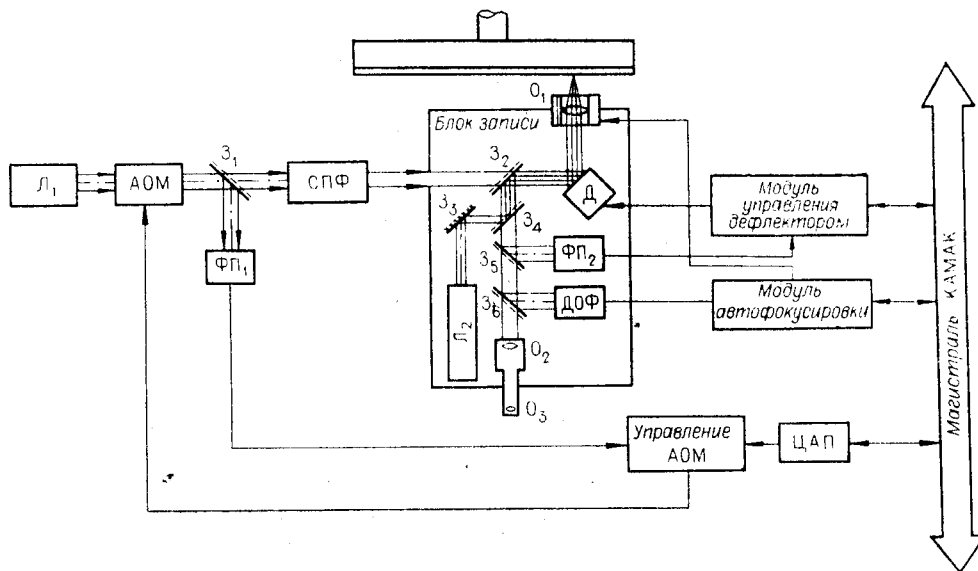


Рис. 1.

годны для тиражирования и получения киноформов в других материалах.

Фотопостроитель обеспечивает возможность записи фазовой структуры на диске диаметром 300 мм с погрешностью позиционирования по радиусу, не превышающей 0,3 мкм, фокусировку лазерного пучка в пятно размером 0,7—2,5 мкм по всей поверхности диска, стабильность вращения диска с погрешностью, не превышающей 0,1%, стабильность мощности излучения лазерного пучка до 1%, аналоговую и импульсную модуляцию лазерного пучка (частота импульсной модуляции 10 МГц, аналоговая модуляция осуществляется в полосе частот 40 кГц, линейность 1% и динамический диапазон 60 дБ), автоматическое управление работой всех блоков от ЭВМ.

**Оптический блок записи информации.** Одним из основных функциональных узлов устройства является оптический блок записи информации, который содержит систему автоматической фокусировки лазерного пучка на поверхность фотоносителя, сканирующее устройство (дефлектор) для малых отклонений пучка по радиусу диска, микроскоп визуального контроля записываемой информации.

Структурная схема блока записи приведена на рис. 1. Свет от лазера  $L_1$  проходит акустооптический модулятор (АОМ), схему преобразования формы записываемого пятна (СПФ), светоделительное зеркало  $Z_2$  и направляется подвижным зеркалом дефлектора Д к микрообъективу  $O_1$ . Этот объектив (апертура 0,4, фокусное расстояние 8 мм), связанный с исполнительным элементом системы автоматической фокусировки, направляет излучение лазера на поверхность светочувствительного материала. Размеры, форма и распределение интенсивности в записываемом пятне задаются с помощью блока СПФ. Для обеспечения работы блока автоматической фокусировки и контроля записи структуры система снабжена He-Ne-лазером  $L_2$  мощностью 1 мВт. Световой поток этого лазера последовательно проходит зеркала  $Z_3$ ,  $Z_4$ ,  $Z_5$  и направляется дефлектором Д к объективу  $O_1$ . Мощность вспомогательного лазера  $L_2$  выбирается таким образом, чтобы не происходило экспонирования материала.

Отраженная от поверхности часть светового потока воспринимается объективом  $O_1$  и направляется светоделителем  $Z_3$  к фотоприемнику ФП<sub>2</sub> цепи контроля информации и управления дефлектором, а часть потока светоделителем  $Z_6$  — к датчику ошибки фокусировки (ДОФ). Световой

поток через  $Z_3$  проходит далее микроскоп визуального контроля. Микроскоп состоит из объектива  $O_1$ , телескопической системы  $O_2 - O_3$ . Увеличение микроскопа  $500\times$ .

Для поддержания точки фокусировки лазерного пятна на поверхности вращающегося диска в блоке записи информации имеется система автоматической фокусировки (АФ) [7].

Система АФ состоит из следующих основных звеньев: датчика ошибки фокусировки, электронного модуля и исполнительного элемента [8]. Датчик ошибки фокусировки предназначен для преобразования продольного смещения поверхности фотоносителя относительно плоскости фокусировки в электрический сигнал.

Сканирующее устройство — дефлектор Д в блоке записи — обеспечивает быстрый доступ в радиальном направлении к требуемому участку носителя информации в пределах поля зрения фокусирующего объектива.

**Узел перемещения блока записи.** Блок записи оптической информации жестко связан с координатным столом. Перемещение стола осуществляется от линейного электродвигателя постоянного тока по азимутическим направляющим. Управление двигателем производится от специального электронного блока. Величину перемещений фиксирует лазерный интерферометр типа ИПЛ-10 [9].

Подвижная часть координатного стола прикреплена к газостатическим подшипникам, которые перемещаются по двум параллельным шлифованным цилиндрическим направляющим, связанным с неподвижным основанием. Специальной юстировкой в процессе сборки удалось достичь непараллельности хода стола, равной  $0,5''$  в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Измерение координат и скорости перемещения стола осуществляет лазерный интерферометр. Угловой отражатель измерительного плеча интерферометра закреплен на расстоянии 20 мм от поверхности фотоносителя, в результате чего погрешность измерения из-за нарушения принципа компарирования не превышает  $0,05$  мкм.

Для повышения надежности работы фотопостроителя, обеспечения высокой скорости измерения перемещений и исключения влияния колебаний мощности стабилизированного по частоте лазера на точность отсчета координат нами разработан специальный интерферометр с внутренней фазовой модуляцией. Это позволило получить на выходе фотопреобразователя сигналы переменного тока. Разрешающая способность интерферометра равна  $0,08$  мкм. Усилительный тракт допускает максимальную скорость перемещения стола  $0,3$  м/с.

Перемещение стола фиксируется двумя реверсивными счетчиками координат и рассогласования. Счетчик координат предназначен для определения абсолютного значения координат стола относительно центра вращения диска. Этот счетчик выполнен в виде отдельного модуля КАМАК и допускает измерение координат стола с разрешающей способностью  $0,08$  мкм. Счетчик рассогласования входит в состав блока управления электродвигателем и используется для задания приращения координаты относительно значения, фиксируемого первым счетчиком.

Блок управления линейным электродвигателем постоянного тока конструктивно выполнен в виде модуля КАМАК. Он использует двухрежимное управление, при котором для быстрого перевода координатного стола в некоторую сравнительно малую область ( $80$  мкм) применяется квазиоптимальное управление, а для точного позиционирования в этой зоне — пропорциональное. Блок управления электродвигателем обеспечивает установку координатного стола в заданное положение с погрешностью  $0,3$  мкм.

Блок управления электродвигателем, кроме реверсивного счетчика, содержит цифровой регулятор, обеспечивающий формирование сигнала

управляющего воздействия. В реверсивный счетчик этого блока ЭВМ заносит величину рассогласования, на которую должен переместиться координатный стол. Регулятор формирует сигнал управления электродвигателем, который обрабатывает заданное перемещение до тех пор, пока содержимое реверсивного счетчика не станет равным нулю. Если величина рассогласования превышает зону точного управления, работает скоростная ступень. Включение скоростной ступени осуществляет дешифратор зон. Схема цифрового регулятора реализует известную схему, когда исполнительный двигатель половину пути, равного ошибке рассогласования, разгоняется полным током, а вторую половину тормозится таким же током. Если за один цикл управления координатный стол не попадает в зону точного управления, регулятор выполняет повторный цикл обработки рассогласования.

В зоне точного управления скоростная ступень отключается и управление передается второй ступени, реализующей алгоритм пропорционального управления с помощью PID-регулятора. Одной из особенностей регулятора этой ступени является то, что все составляющие регулирующего воздействия (пропорциональная ( $P$ ), интегральная ( $I$ ) и дифференциальная ( $D$ )) представлены в частотно-импульсной форме, причем  $P$ - и  $I$ -составляющие предварительно преобразуются в цифровую форму с помощью реверсивных счетчиков. Отсутствие аналоговых интегрирующих устройств, простота многоразрядных преобразователей код — частота существенно упростили и повысили надежность и стабильность регулятора. Другая особенность этого регулятора — использование в нем широтно-импульсного модулятора, обеспечивающего простоту схемы управления электродвигателем постоянного тока.

**Блок прецизионного аэростатического шпинделя.** Для вращения фотопластины служит блок аэростатического шпинделя, состоящий из собственно шпинделя, двигателя, устройства крепления подложки, датчика угловой скорости, силовой электроники и блока управления скоростью вращения двигателя.

Собственно шпиндель — это шлифованный полый цилиндр с фланцем, вращающийся в корпусе. В полость корпуса подается сжатый воздух, который поступает в зазор цилиндр — корпус и образует воздушную подушку, служащую аэростатическим подшипником для цилиндра. Цилиндр вращается асинхронным электродвигателем переменного тока типа АДП-362, в котором полый немагнитный ротор заменен на сплошной ферромагнитный. Последний жестко связан с цилиндром. Статор закреплен на корпусе. Ротор вращается полем катушек статора и механически не связан с последним. Замена ротора позволила, наряду с простотой и надежностью компоновки самого двигателя, избавиться от дополнительных шумов и вибраций. На роторе двигателя закреплен стеклянный диск, имеющий 1000 радиальных штрихов. Диск входит в блок датчика угловой скорости, выходной сигнал которого подается в блок управления скоростью вращения двигателя.

Блок управления электродвигателем обеспечивает постоянство скорости вращения с относительной погрешностью 0,1%. Он состоит из датчика угловой скорости, синтезатора опорной частотной последовательности, с помощью которого устанавливается частота, пропорциональная задаваемой скорости вращения, и цифрового регулятора. Система управления скоростью вращения диска содержит две ступени регулирования: грубую, устанавливающую требуемое число оборотов за минимальное время, и точную, обеспечивающую поддержание заданной скорости вращения двигателя с погрешностью 0,1%.

Блок управления скоростью вращения двигателя выполнен в виде модуля КАМАК; он имеет амплитудный модулятор, преобразующий постоянное напряжение регуляторов в квадратурные синусоидальные сиг-

налы переменного тока постоянной частоты. Эти сигналы после предварительного усиления используются для управления электродвигателем.

**Модулятор излучения лазера.** Модуляция излучения проводится акустооптической ячейкой, выполненной из тяжелого флинта. В блок модулятора, помимо преобразующей оптики, входят ВЧ-генератор (частота 80 МГц, мощность 3 Вт), цифроаналоговый преобразователь ЦАП и блок управления (см. рис. 1).

Акустооптический модулятор обладает высоким быстродействием (10 МГц), равномерной амплитудно-частотной характеристикой, большой дифракционной эффективностью (70%) и хорошими оптическими показателями. Основным требованием, предъявленным к модулятору, является долговременная стабильность мощности излучения лазерного луча при аналоговом и импульсном управлениях. С этой целью, а также для получения линейной зависимости интенсивности светового потока от величины подводимой к ячейке электрической мощности возбуждения разработан блок управления с отрицательной обратной связью по интенсивности [10].

Световой поток лазера  $\mathcal{L}_1$  (см. рис. 1) поступает к ячейке акустооптического модулятора АОМ. На выходе ячейки выделяется первый дифракционный порядок, который направляется на фотоматериал и частично (1—2%) к фотоприемнику (ФП) датчика обратной связи блока управления. Выходное напряжение фотоприемника сравнивается с выходным напряжением цифроаналогового преобразователя. Разностный сигнал ошибки, зависящий от нелинейности передаточной характеристики и мощности лазера, поступает на вход управляемого аттенюатора, включенного между выходом задающего генератора и входом усилителя мощности СВЧ-генератора. Применение схемы управления модулятором позволило уменьшить флуктуации мощности светового потока, вызванные шумами лазера в рабочей полосе частот, приблизительно на 40 дБ и получить линейную передаточную характеристику.

Включение модулятора производится по командам ЭВМ, посылаемым на цифроаналоговый преобразователь. Цифроаналоговый преобразователь выполнен в стандарте КАМАК и содержит 10-разрядный двоичный буферный регистр и схему преобразования управляющего кода в постоянное положительное напряжение с минимальным шагом дискретности, равным 4. Цифроаналоговый преобразователь осуществляет модуляцию лазерного луча с частотой  $\sim 50$  кГц.

**Блок сопряжения с ЭВМ.** Применение КАМАК позволяет использовать для управления работой фотопостроителя и производства киноформов различные типы ЭВМ. Отладка системы и изготовление первых элементов проводились нами от ЭВМ ТЗ-16М.

Связь ЭВМ ТЗ-16М с электронными модулями КАМАК осуществляет кейт-контроллер. Список и формат команд обращения к контроллеру выбраны так, чтобы обеспечить единство системы по используемому языку программирования. Такое единство достигается за счет применения клавишного языка машины для кодирования операций КАМАК и команд обращения к кейт-контроллеру.

Контроллер обеспечивает двусторонний обмен информацией между отдельными модулями, минуя внутренние регистры ЭВМ. Обмен проводится по программному каналу в режимах обработки сигналов готовности и обработки сигналов прерывания, вызываемых запросами на обслуживание функциональных модулей. Запросы от модулей объединены в шесть групп, приоритет запроса каждой группы соответствует ее номеру. Ввод данных в ЭВМ осуществляется только в двоично-десятичном коде, а вывод данных — в двоично-десятичном и двоичном. При выводе числовых данных в двоичном коде необходимо предварительное программное преобразование десятичных чисел в двоичные. Ввод и вывод число-

вых данных происходят потетрадно: параллельным кодом внутри тетрады и последовательным — между тетрадами. Скорость обмена данных между модулями КАМАК и ЭВМ определяется быстродействием канала ввода-вывода данных. Минимальный период вывода одной тетрады 400 мкс, а период ввода 100 мкс.

Разработанное математическое обеспечение системы включает в себя пакеты программ для тестирования программно управляемых модулей КАМАК, системных программ, осуществляющих управление функциональными узлами установки, и программ, реализующих алгоритмы вычисления параметров синтезируемых элементов. Эти программы хранятся в косвенно-адресуемой памяти ЭВМ и позволяют компоновать управляющую программу для записи на фотоносителе синтезируемого изображения.

Для записи фазового или амплитудного рельефа экспонируемый материал закрепляется на диске. Координатный стол совмещается с центром вращения диска. Это положение координатного стола принимается за начало отсчета. В этой точке реверсивные счетчики координаты и рассогласования устанавливаются в исходное состояние. Запись рельефа в материале производится лазерным лучом путем последовательной записи концентрических полос шириной 1—2,5 мкм.

ЭВМ вычисляет значение уровня интенсивности и требуемое значение координат стола. Вычисленные значения заносятся в буферный регистр цифроаналогового преобразователя, управляющего модулятором лазера, и реверсивный счетчик рассогласования. Блок управления движением стола осуществляет перевод последнего в требуемую позицию. ЭВМ опрашивает реверсивный счетчик рассогласования и в момент, когда значения скорости и рассогласования становятся меньше заданных, включает схему выделения интервала времени, соответствующего одному обороту диска. В течение этого интервала времени лазерный пучок засвечивает фотоматериал.

**Экспериментальные результаты.** Контроль за работой прецизионного фотопостроителя и отработка программ для ЭВМ осуществлялись по результатам записи тестовых дорожек при производстве френелевских зонных пластинок, аксиконных оптических элементов, шаблонов для киноформных линз и фазовых корректоров для объективов. В качестве фотоматериала применялись пленки халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП).

Выбор этого типа фотоматериала обусловлен следующими причинами: запись фазовой структуры производится в реальном времени; пленки ХСП изготавливают путем напыления в вакууме, что гарантирует высокую однородность пленки по толщине;

ХСП позволяет вести запись дифракционной структуры излучением видимого диапазона спектра ( $\lambda = 0,63$  мкм) и использовать для этой цели стандартный гелий-неоновый лазер небольшой мощности;

пленки ХСП могут служить резистом [11] для изготовления шаблонов киноформных структур по стандартной технологии фотолитографии [12];

структуры, синтезированные в поглощающих ХСП, являются шаблонами для переноса топологии рисунка в оксидное стекло или кварц.

В экспериментах пленки халькогенидных материалов систем As—S—Se, As—Se и As—Se—Te наносили термическим испарением в вакууме из термостатированного испарителя. Для обеспечения воспроизводимости характеристик контролировались условия напыления и, в частности, стабилизировалась скорость напыления пленки. В качестве исходных материалов использовали особо чистые халькогенидные стекла. Для подложек были выбраны стандартные пластины из оксидного стекла размером 70 × 70 мм и специальные пластины хорошего качества



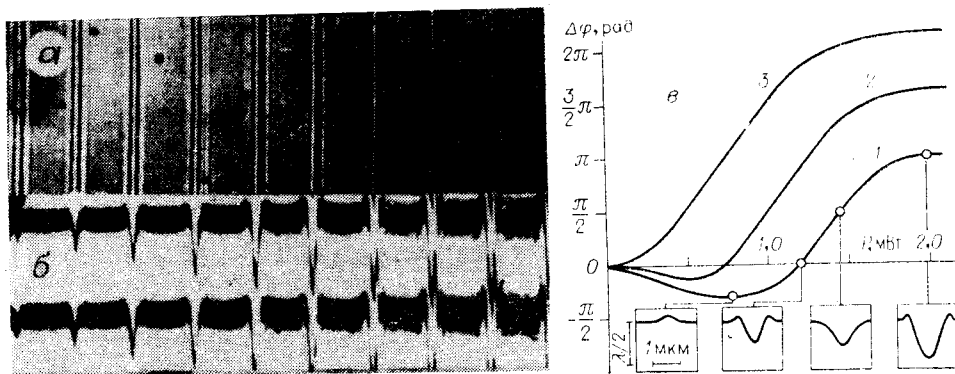


Рис. 2.

Ø60 мм. На подложки, предназначенные для изготовления фотолитографических шаблонов, перед напылением ХСП наносился подслои хрома. Толщина халькогенидных пленок варьировалась от 0,2 до 1 мкм, при этом неоднородность толщины на рабочем поле диаметром 60 мм не превышала 0,1λ.

При записи дифракционных элементов на фотопостроителе пластина с фотослоем вращается с постоянной скоростью, поэтому условия экспонирования в центре и на периферии пластины различны. Для наглядности предположим, что сечение сфокусированного луча имеет равномерное распределение интенсивности диаметром  $g$ . В центре пластины  $R=0$  время экспозиции  $t$  для одного оборота определяется периодом вращения  $T=1/f$ , где  $f$  — частота вращения пластины. На расстоянии  $R$  от центра получения постоянной экспозиции  $E_{\text{const}}=It$  необходимо линейное нарастание интенсивности излучения  $I$  по радиусу пластины. В частном случае при  $f=4\text{ с}^{-1}$  в центре время экспонирования составляет 0,25 с, а на радиусе 30 мм при  $g=2\text{ мкм}$  время  $t=2,5\text{ мкс}$ .

Большинство известных фотоматериалов не обладает линейным откликом в таком широком динамическом диапазоне; это относится и к халькогенидным пленкам. Поэтому при записи дифракционных структур необходимо учитывать характеристическую кривую фотоматериала и затем машинными средствами корректировать мощность лазерного пучка.

В эксперименте составлялись два типа тестовых программ для записи дорожек и сплошных зон (перекрывающиеся дорожки) на различных диаметрах фотопластины. Первые тесты — дорожки с шагом, превышающим диаметр записывающего лазерного луча, — позволяли построить характеристические кривые фотоматериалов для изготовления круговых дифракционных решеток — аксиконов. Тесты второго типа — перекрывающиеся дорожки — необходимы для получения шаблонов киноформных линз и френелевских зонных пластинок.

На рис. 2 приведены изображения тестовых дорожек с шагом 10 мкм (см. рис. 2, а), интерферограммы (см. рис. 2, б) и характеристические кривые фотоматериала (см. рис. 2, в). Материал пленки —  $\text{As}_2\text{Se}_3$  толщиной 1 мкм. Мощность лазерного пучка, измеряемая в плоскости входного зрачка фокусирующего объектива, от дорожки к дорожке возрастала от 0 до 10 мВт через 0,1 мВт. Дорожки записаны на радиусе 15 мм при частоте вращения пластины  $2\text{ с}^{-1}$ .

В области малых экспозиций, недостаточных для образования поверхностного рельефа, наблюдается формирование «скрытого» фазового рельефа в результате изменения показателя преломления, обусловленного

фототермоструктурными превращениями в объеме пленки. На этой стадии экспонируемая пленка импульсно нагревается излучением лазера с постоянной времени  $\sim 0,1$  мкс и также быстро охлаждается (закалка) после экспозиции, а ее толщина после этого практически не изменяется. Этот рельеф можно выявить с помощью ширинг-интерферометра в проходящем свете. Однако глубина «скрытого» рельефа невелика вследствие малой толщины пленки. Механизму фототермоструктурных превращений в ХСП свойственны высокая чувствительность и быстродействие. Плотность энергии при получении дорожек составляла  $1,4 \cdot 10^{-2}$  Дж/см<sup>2</sup>, что на два порядка меньше плотности энергии, необходимой для одинаковых изменений показателя преломления в пленке без нагревания. Эксперименты позволили провести записи дорожек сфокусированным лучом лазера мощностью 10 мВт в микросекундном диапазоне импульсных заливок.

На второй стадии увеличение интенсивности лазерного излучения сверх определенного порогового значения приводит к гладкому поверхностному испарению регистрирующего материала (рис. 2, а). Интерферограмма (см. рис. 2, б) такой поверхности пленки, полученная в отраженном свете, позволяет увидеть особенности образования поверхностного рельефа. Пороговая мощность, энергия и интенсивность, необходимые для получения штриха глубиной  $\lambda/20$ , для этого радиуса пластины составляли 1 мВт,  $10^{-9}$  Дж и  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup> соответственно. Образование рельефа хорошего качества в реальном времени возможно на глубину  $\sim \lambda/4$ . Пространственное разрешение, определяемое шириной дорожки, не меньше  $1000 \text{ мм}^{-1}$ .

С ростом интенсивности лазерного луча увеличение глубины штриха на третьей стадии образования фазового рельефа сопровождается объемным взрывным испарением, уширением дорожки, разбросом продуктов испарения по поверхности пленки и образованием «брустверов» по краям штриха.

Следовательно, в результате воздействия лазерного излучения на поглощающую халькогенидную пленку в последней происходит фототермоструктурное изменение показателя преломления, а также уменьшение толщины пленки при ее плавлении и испарении. Поэтому в качестве отклика регистрирующего материала удобно оперировать величиной изменения фазы  $\Delta\phi$  волны, прошедшей через пленку и регистрируемой в интерферометре сдвига в проходящем свете:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \int_0^d \Delta n(z) dz + [n(z) - 1] \Delta d \right\},$$

где  $\Delta n(z)$  — фотоструктурные изменения показателя преломления пленки в направлении распространения света,  $n(z) = n_0 + \int_0^d \Delta n(z) dz$  — абсолютное значение показателя преломления фотослоя после экспозиции,  $d$  — начальная толщина пленки,  $\Delta d$  — изменение толщины пленки в результате плавления и испарения,  $\lambda$  — длина волны света.

Общий вид характеристической кривой материала (см. рис. 2, в) определяется конкурирующими процессами, выраженными двумя членами соотношения для  $\Delta\phi$ . В области малых интенсивностей изменение фазы обусловлено увеличением показателя преломления в результате фототермоструктурных превращений в пленке (кривая 1 на рис. 2, в). В области больших экспозиций включается второй механизм записи: уменьшается геометрическая толщина пленки вследствие испарения. В результате фаза прошедшей волны изменяет свой знак. На вставках

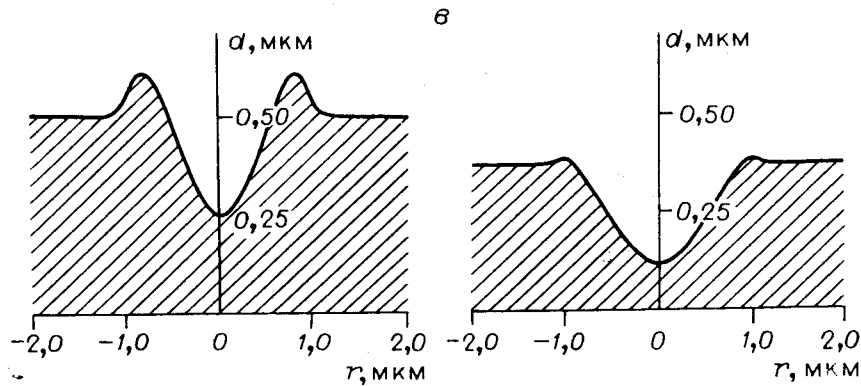
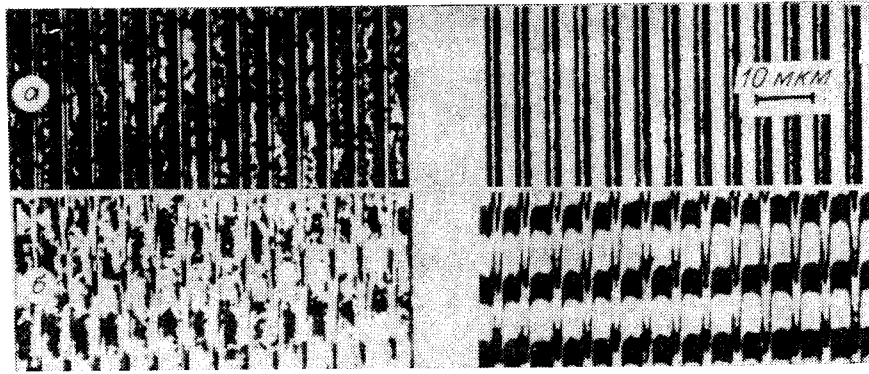


Рис. 3.

рис. 2, в приведены контуры фазовых профилей четырех типичных точек характеристической кривой материала.

При обработке экспонированной пластины в травителях «скрытый» фазовый рельеф преобразуется в поверхностный, а также увеличивается глубина поверхностного рельефа. В этом случае процесс обработки аналогичен процессу проявления фоторезистов. На рис. 2, в приведены характеристические кривые материала для двух последовательных процедур травления, отличающихся временем обработки (5 и 10 мин соответственно, кривые 2 и 3). Характеристическая кривая материала после травления принимает вид кривой одной полярности в результате преобразования скрытого рельефа в поверхностный. Пороговая мощность записи для такого способа получения поверхностного рельефа в 10 раз меньше по сравнению с записью в реальном времени и составляет 0,1 мВт.

Наиболее простой элемент, который можно изготавливать на фотопостроителе, — кольцевая дифракционная решетка. Она является аналогом известного оптического элемента — аксикона. При изготовлении аксикона в реальном времени можно получить глубину штриха удовлетворительного оптического качества величиной  $\sim \lambda/4$ . Такая глубина штриха в некоторых случаях может оказаться недостаточной. Необходимую глубину поверхностного рельефа достигают последующим химическим травлением пленки. Профиль штриха и его глубина подвергаются в этом случае существенным изменениям. В тех случаях когда запись проводилась излучением высокой интенсивности и поверхность пленки покрывалась продуктами взрывного испарения, химическое травление позволяло удалить продукты испарения. На рис. 3, а, б приведены изображения поверхности и ее интерферограммы до и после химической

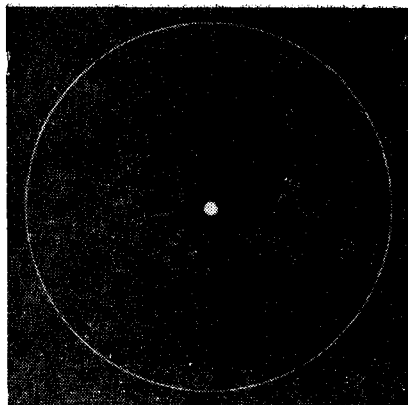


Рис. 4.

обработки соответственно. В мягких травителях устраняются брустверы по краям штриха и материал, разбросанный по поверхности пленки. В результате различия в скоростях травления облученного и необлученного материалов увеличивается глубина дорожки (см. рис. 3, в).

В нашем эксперименте 8000 штрихов кольцевой дифракционной дорожки с шагом 2,50 мкм записывалось в течение 30 мин. Первые результаты записи показали высокое качество пространственно-частотного спектра (рис. 4) и отсутствие «духов».

Следующий этап включал изготовление амплитудной зонной пластинки Френеля (рис. 5). Френелевская пластинка состоит из чередующихся про-

зрачных и непрозрачных зон. При изготовлении пластинки на фотополостроителе проводилось экспонирование светочувствительного материала в тех местах, где должны быть расположены прозрачные зоны. Каждая зона определяется начальным  $r_n$  и конечным  $r_n$  радиусами, которые вычисляются ЭВМ перед выполнением текущей зоны.

Следящая система перемещает экспонирующий луч по полю прозрачной зоны дискретными шагами: шаг — экспонирование, шаг — экспонирование и т. д. От дискретности перемещения записывающего пучка непосредственно зависит точность выполнения границ прозрачной зоны. Уменьшать дискретность до 1 мкм нецелесообразно, так как в этом случае увеличивается время изготовления пластинки. Для того чтобы дискретность перемещения не сказывалась на точности выполнения границ прозрачной зоны, был принят следующий алгоритм выполнения зон. Вначале экспонирующий луч устанавливается на окружности радиусом  $r_1$  (см. рис. 5, а). Экспонирование материала на окружности этого радиуса, а также на всех последующих окружностях осуществляется в течение одного оборота шпинделя при мощности лазерного луча 10 мВт. Затем пучок переводят на окружность радиусом  $r_1 + \delta$ , где  $\delta = 1$  мкм. После экспонирования материала на окружности радиусом  $r_1 + \delta$  записывающий луч перемещается на окружность радиусом  $r_1 + 2\delta$  и т. д. После перехода записывающего луча через окружность радиусом  $r_{cp} = (r_1 + r_2)/2$  луч переходит на окружность радиусом  $r_2$ , материал на этой окружности экспонируется в течение одного оборота, а затем луч поступает на окружность радиусом  $r_2 - \delta$  и так далее до окружности радиусом  $r_{cp}$ . Переход через  $r_{cp}$  сверху является критерием выполнения зоны. После этого начинается полный цикл нанесения следующей зоны. Такой алгоритм позволяет выполнять границы прозрачных зон с погрешностью, не превышающей погрешность измерителя перемещений. Другими словами, при экспонировании пучок лазера сначала рисует на фотоматериале начало и конец зоны; а затем уже засвечивает остальное поле между зонами.

Проведена запись зонных пластинок Френеля со следующими параметрами: фокусное расстояние в первом порядке дифракции  $f = 200$  мм,  $\lambda = 0,44$  и  $0,63$  мкм, число зон — 600, 1000, 1500 и 3000. Время, необходимое для рисования указанного количества зон, составляло вначале 1, 1,3, 1,4 и 1,5 ч соответственно. Затем путем совершенствования программы удалось сократить время изготовления пластинки с числом зон 8500 до 40 мин.

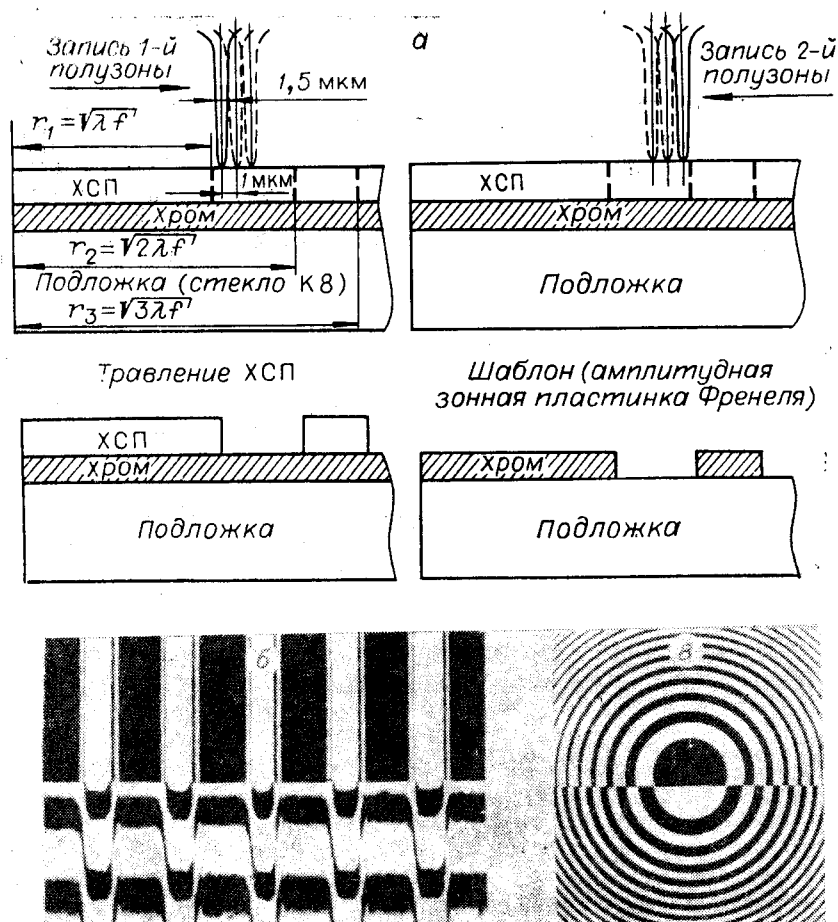


Рис. 5.

Химическим травлением удаляется материал в экспонированных участках халькогенидной пленки (см. рис. 5, б). Перемещения лазерного луча с шагом 1 мкм было достаточно, чтобы на рабочем поле 60 мм обеспечить высокое качество краев зон и полное вытравливание халькогенидного материала внутри экспонированной зоны. Необходимо отметить, что для получения правильных размеров ширины зон в программу ЭВМ вводилась коррекция ширины лазерного пучка. На рис. 5, в показаны центральные зоны хромового шаблона, полученные без коррекции (верхняя половина, позитив) и после коррекции (нижняя половина, негатив).

После травления хрома через окна в халькогенидной пленке и снятия оставшегося халькогенидного слоя готовые шаблоны — амплитудные зонные пластинки Френеля — показали высокое качество изображения; диаметр каустики первого дифракционного порядка при падении на зонную пластинку плоского волнового фронта совпадал по величине с теоретическим, определяемым дифракционными ограничениями.

Если пластинку Френеля использовать в качестве шаблона, то, применяя стандартную технологию фотолитографии, можно получить фазовый прямоугольный рельеф в прозрачной подложке.

В последующих экспериментах процесс получения хромового шаблона был исключен. Сокращение операции перевода рисунка на ХСП в

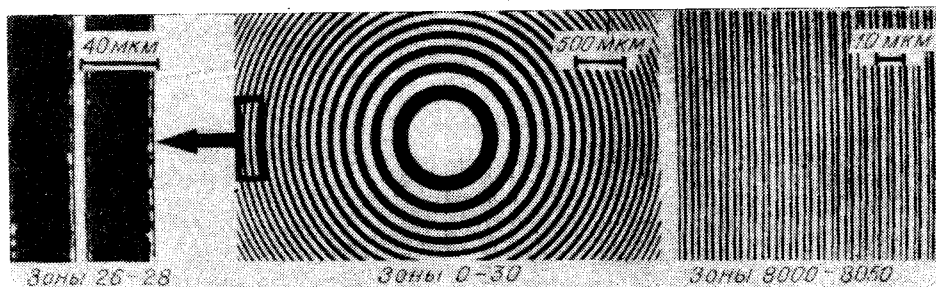


Рис. 6.

хром позволяет избежать «растравление» хрома под резистивной маской, особенно заметное на периферийных зонах, когда ширина зоны (2,5 мкм) сравнима с величиной «подтравки».

Разработана технология изготовления шаблона непосредственно в пленке ХСП. Учитывалось, что в современном оборудовании для фотолитографии при тиражировании элементов применяются источники с максимумом интенсивности излучения в синей и ультрафиолетовой областях спектра. Большинство халькогенидных стекол с коэффициентом более  $10^5 \text{ см}^{-1}$  не пропускают излучения в этой области, обеспечивая необходимый контраст при толщинах слоя 0,1 мкм.

В этом случае слой ХСП совмещал функции фоторезиста и поглощающего слоя. Далее по стандартной технологии проводилось многократное контактное копирование дифракционной структуры, полученной в слое ХСП. По нашим измерениям такой подход обеспечил получение структуры зон с точностью 0,3 мкм.

При обработке программ для ЭВМ было необходимо вести постоянный контроль радиусов и ширины зон. Для этой цели готовый элемент устанавливали в шпинделе фотопостроителя. Позиционирование контрольного микроскопа с увеличением  $1000\times$  на границы зон осуществлялось автоматически по командам ЭВМ. Фиксировалась разница между заданным перемещением и действительным значением размера зоны, которая после статистической обработки учитывалась при корректировке рабочих программ для ЭВМ.

Травление фазовых зонных пластинок (пластинки Рэлея — Вуда) по изготовленным шаблонам проводилось на подложках из плавленого кварца в Институте физики полупроводников СО АН СССР, а также на подложках из оксидного стекла. В первом случае применялась технология химического травления кварца в специальных растворах, во втором — плазмохимического травления оксидного стекла.

Качество изображения, аберрации и распределение энергии в точке оценивались по стандартным методикам и соответствовали теоретическим значениям для элементов с данной апертурой.

В заключение для демонстрации высокого качества работы фотопостроителя приводим фотографии зон амплитудных пластинок Френеля (рис. 6) в центре и на краю элемента. Пластинка имеет рекордные параметры для этого вида дифракционных структур из всех, которые когда-либо были получены в оптике: число зон 8500, ширина последней зоны 2,5 мкм, главное фокусное расстояние 270 мм (для  $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$ ), относительное отверстие 1 : 4,5.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рэлей Д. Волновая теория света. М.: ГИИТЛ, 1940.
2. Lesem L. B., Hirsch P. M., Jordan J. A. The Kinoform: a New Waveform Reconstruction Device.— IBM J. Res. Dev., 1969, vol. 13, p. 150.

3. Jordan J. A. et al. Kinoform Lenses.— Appl. Opt., 1970, vol. 9, N 8, p. 1883.
4. Auria L. et al. Photolithographic Fabrication of Thin Film Lenses.— Opt. Comm., 1972, vol. 5, N 4, p. 232.
5. Слюсарев Г. Г. Оптические системы с фазовыми слоями.— ДАН, 1957, т. 113, № 4, с. 730.
6. Тудоровский А. И. Объектив с фазовой пластинкой.— Опт. и спектр., 1959, т. VI, вып. 2, с. 198.
7. Кирьянов В. П. и др. Киноформы. Оптическая система для синтеза элементов.— Препринт № 99. Новосибирск: изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1979.
8. Кокоулин Ф. И., Полещук А. Г. Исполнительные элементы автоматической фокусировки.— ОМП, 1979, № 8, с. 21.
9. Лазерные интерферометры: Сб. науч. статей. Новосибирск: изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1978.
10. Полещук А. Г., Химич А. К. Устройство для линейного управления и стабилизации мощности излучения лазера акустооптическим модулятором.— ОМП, 1980, № 9, с. 36.
11. Наоки А., Хироси Х., Новоу К. Тонкие пленки халькогенидного стекла. Заявл. 11.04.70, № 45-31139, опубли. 13.12.76. Кл. 99(5)С3 (НО1 21/02). Япония. Пат. 51-47027.
12. Бобров С. Т., Туркевич Ю. Г. Дифракционные оптические элементы, изготовленные методами фотолитографии.— В кн.: Применение лазеров в системах преобразования, передачи и обработки информации. Л.: изд. ЛДНТП, с. 73.

Поступила в редакцию 17 сентября 1980 г.

УДК 681.325.2+681.327.68 : 778.38

П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ

(Новосибирск)

## МАТРИЧНЫЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРОЦЕССОР

Задача настоящей статьи — конкретизировать структуру, набор операций и возможности специализированного оптико-электронного процессора, предложенного в [1] для многоканальной параллельной обработки больших массивов данных. Устройство ориентировано на выполнение групповых операций матричной алгебры (содержание операций уточняется ниже) и согласно [2] получило название матричного оптико-электронного процессора (МОЭП). Поставленную задачу будем решать при условии, что данные, подлежащие обработке, имеют двоичную форму представления и поступают на вход процессора в страничном формате.

Блок-схема МОЭП, состоящего из матричного оптического преобразователя (МОП) и фоточувствительного параллельного страничного процессора (ПСП), приведена на рис. 1. С помощью параллельных каналов 1 и 2 оптическое изображение страницы данных, восстанавливаемой из голографического ЗУ (ГЗУ), передается в МОП, а затем (в преобразованном виде) в ПСП. В свою очередь, данные, определяющие оператор преобразования, поступают из устройства управления (УУ) по электронным параллельно-последовательным каналам 3 и 4. Результаты параллельной обработки формируются в ПСП и по электронному параллельно-последовательному каналу 5 поступают в УУ.

**I. МОП.** Согласно [1] МОП, входящий в состав МОЭП, реализует операцию аналогового умножения трех матриц. Для приме-

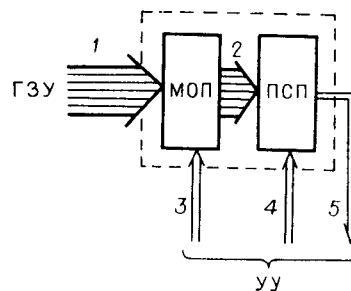


Рис. 1.