

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ВВОДА, ОБРАБОТКИ И ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

УДК 621.391

Б. И. СПЕКТОР, П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ, А. В. ТРУБЕЦКОЙ,
А. М. ЩЕРБАЧЕНКО
(Новосибирск)

ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ ВЫСОКОИНФОРМАТИВНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

1. Введение. Необходимость в автоматизации записи высокоинформативных изображений возникает в ряде важнейших практических приложений. Для примера достаточно напомнить о современных проблемах микроэлектроники, оптического приборостроения, информатики и вычислительной техники, решение которых тесно связано с изготовлением фотошаблонов СБИС [1] и элементов дифракционной оптики [2]; с фотозаписью специальных фильтров, масок, расщепителей, решеток и т. п. [3]; с проекционным отображением данных на большом экране [4]; с формированием оптических микроформ текстовых, графических, фотографических и т. п. документов [5].

Несмотря на различный характер указанных приложений и, как следствие, различие требований, предъявляемых к автоматизированным построителям, в основу работы последних может быть положена та или иная технология программируемой записи изображений, включающая в себя совокупность апробированных методов и средств воздействия светового пучка на чувствительную среду. Несомненно, что среди известных фототехнологий наиболее универсальной и легко перестраиваемой является лазерная технология записи сфокусированным пучком.

Лазерный пучок, как известно, можно сформировать до размеров, сравнимых с длиной волны света (мкм), а получаемая при этом плотность мощности излучения $\sim 10^6$ Вт/см² и более позволяет вести достаточно быструю запись изображений не только путем изменения оптических свойств «точечных» участков светочувствительной среды (пропускания, отражения, преломления, поляризации), но и путем инициирования в них фототермохимических превращений. Расширение поля записи достигается за счет программируемого отклонения сфокусированного пучка света и/или за счет перемещения регистрирующей среды (носителя).

Известны лазерные построители для изготовления фотошаблонов дифракционной оптики с круговой симметрией [6], построители фотошаблонов СБИС и устройства их коррекции [7—11] и лазерные дисплеи с промежуточной реверсивной регистрирующей средой [4]. Такие устройства являются, как правило, узко специализированными и имеют законченное конструктивное исполнение.

Цель настоящей статьи — изложить первые результаты работ по созданию и применению экспериментального варианта управляемого от ЭВМ лазерного фотопостроителя (далее простого построителя), легко перестраиваемого на решение тех или иных задач. Построитель позволяет вести поточечную запись высокоинформативных изображений на различных регистрирующих средах; кроме того, в нем предусмотрены

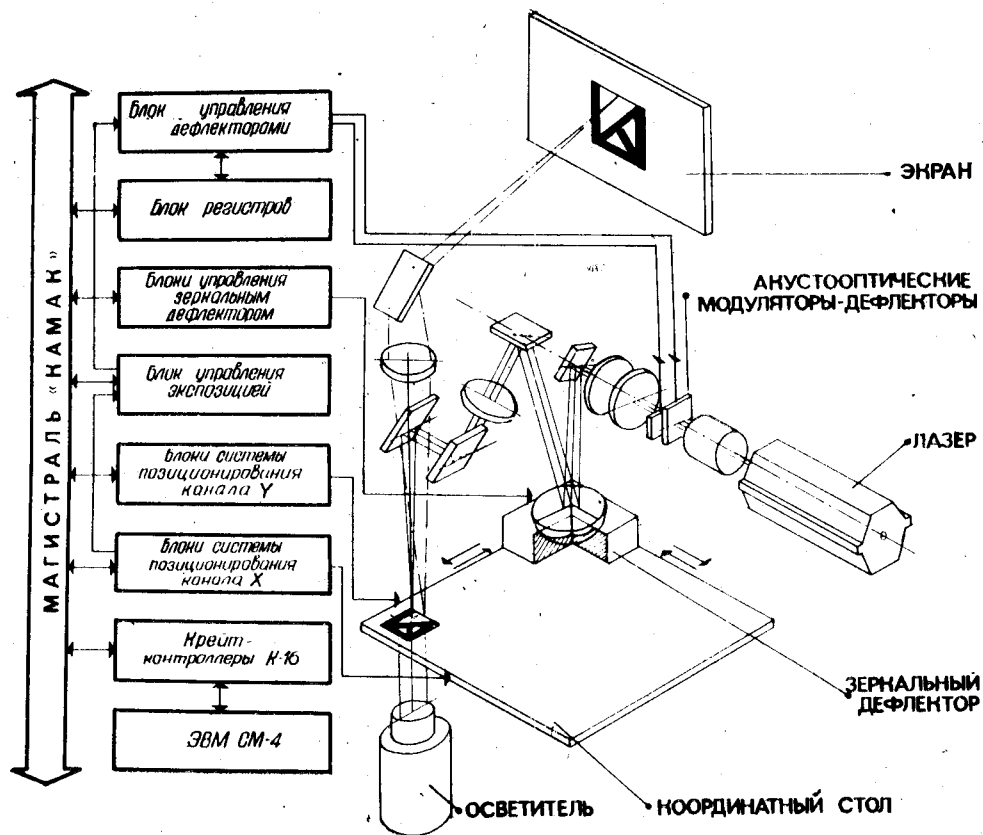


Рис.1.

возможности для исследования характеристик новых дефлекторов и модуляторов света. В целом аппаратные и программные средства построителя ориентированы на освоение в лабораторных условиях лазерной технологии изготовления фотошаблонов, масок, фильтров, микроформ и т. п. Построитель работает в прямоугольной системе координат и обладает большим рабочим полем записи. Возможности построителя иллюстрируются на примерах решения следующих задач:

- 1) запись тестовых изображений размером $10^5 \times 10^5$ элементов на галоидосеребряных эмульсиях;
- 2) проекционное отображение данных на экране с промежуточной их записью на отечественном фотохромном материале;
- 3) изготовление фотошаблонов нестандартных элементов плоской оптики с записью на пленках хрома.

2. Структура и принцип действия лазерного построителя. Построитель создан на основе трех независимых двухкоординатных систем позиционирования: прецизионного электромеханического стола для перемещения носителя изображений [11], зеркального дефлектора и акустооптического дефлектора — модулятора света. Его структурная схема приведена на рис. 1.

Плоскость X, Y стола, в которой размещен носитель, совмещена с выходной плоскостью оптической системы модуляции, отклонения и фокусировки лазерного пучка. Контроль за перемещением стола осуществляется с помощью двух лазерных интерферометрических датчиков с дискретностью отсчета по координатам X, Y $0,08$ мкм. Размеры рабочего поля стола 420×420 мм², точность установки на заданную позицию не более $0,5$ мкм.

Зеркальный дефлектор представляет собой зеркало (диаметр 37 мм), установленное в сферическом аэростатическом подвесе, с бесконтактным

электромагнитным управлением от цифроаналоговых преобразователей. Отражательная поверхность зеркала совпадает с плоскостью зрачка фокусирующего объектива и пересекает точку качания. Обеспечена устойчивая работа дефлектора с повторяемостью не хуже $3''$ в диапазоне $\pm 3,5^\circ$ по направлениям X и Y. При отсутствии воздействий система пространственной стабилизации подвижного элемента обеспечивает его возврат в начальное положение с погрешностью не хуже $2''$.

Акустооптические дефлекторы-модуляторы света (АОД) выполнены на кристаллах парателлуриата [12]. Дифракционная эффективность ячеек порядка 80%. Угол сканирования светового пучка по каждой координате при числе разрешенных позиций 100×100 составляет $1,2^\circ$. Время установки пучка на заданную позицию поля не превышает 10 мкс.

Излучение Ar- или He—Ne-лазеров поступает к носителю информации по двум оптическим каналам, отличающимся размером фокусированного пятна: 2 и 10 мкм. В оптический канал формирования пятен меньшего диаметра входит модулятор и короткофокусный объектив; в канал пятен большего диаметра — АОД и зеркальный дефлектор. Между АОД и зеркальным дефлектором расположена конфокальная оптическая система, роль которой состоит в согласовании угловых полей АОД и зеркального дефлектора во входном зрачке объектива. Ввод излучения Ar- или He—Ne-лазера в любой оптический канал записи осуществляется с помощью механического коммутатора.

Оптический канал отображения данных на экране 600×600 мм² состоит из осветителя (с коммутатором и сменным фильтром) и проекционного объектива. Оптическая ось канала отображения совмещена с оптической осью канала записи, а сопряжение каналов выполнено с помощью дихроичного зеркала, которое обеспечивает пропускание света в красно-желтой области спектра и эффективное отражение в сине-зеленой области.

Кроме того, построитель оснащен контрольно-измерительным оптическим каналом; он создан на базе оптической головки металлографического микроскопа ($600\times$) с объектмикроскопом МОВ-1-15 \times и микрофотонасадкой. Оптическая ось этого канала смещена относительно оси канала записи-отображения. Размер смещения обрабатывается программой перемещения стола. Контрольно-измерительный канал позволяет проводить контроль качества записи, редактирование программы записи; прецизионно совмещать изображения в случае их наложения или стыковки и реализовать микрофоторегистрацию записи.

3. Аппаратные и программные средства. Запись изображений осуществляется путем механического перемещения носителя изображения относительно неподвижного сфокусированного лазерного пучка и/или сканирования лазерного пучка относительно неподвижного носителя.

Электронная система управления через магистраль КАМАК и крейт-контроллер К-16 подключена к ЭВМ СМ-4.

Электромеханическая система позиционирования носителя изображения каждой из координат X, Y содержит нормирующий преобразователь, реверсивный счетчик текущей координаты стола и блок управления линейными электродвигателями.

Нормирующий преобразователь обеспечивает стыковку лазерного интерферометра с реверсивным счетчиком и блоком управления электродвигателями. Интерферометр выполнен по классической схеме интерферометра Майкельсона с использованием одночастотного лазера и внутренней фазовой модуляции его опорного плеча [13]. Нормирующий преобразователь формирует счетные импульсы каждый раз, как только призма измерительного плеча проходит расстояние, равное 0,08 мкм. Максимальная скорость перемещения стола, ограничиваемая полосой пропускания усилителей, составляет 0,3 м/с. Счет импульсов по каждой из координат осуществляется двумя реверсивными счетчиками. Один из них выполнен в виде автономного блока и предназначен для определения абсолютного значения координат стола относительно исходной

точки, принятой за репер. Второй счетчик входит в состав блока управления электродвигателем и используется для задания величины перемещения относительно положения, фиксируемого первым счетчиком.

В блоке реализовано двухрежимное управление [14], при котором перевод стола в зону, равную 320 мкм, проводит квазиоптимальный регулятор, а точное позиционирование в зоне — пропорциональный интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор. После занесения величины рассогласования на катушку должен переместиться стол блок фор-

Частота импульсов на выходе функционального преобразователя пропорциональна значению ошибки рассогласования. Специальное логическое устройство, сравнивая значения частот импульсных сигналов, формируемых интерферометром (реальная скорость координатного стола) и функциональным преобразователем (допустимая скорость), определяет моменты переключения полярности управляющего тока, что обеспечивает быстрый ввод стола в зону точного управления.

В зоне точного управления скоростная ступень отключается и начинает работу вторая ступень. Последняя реализует алгоритм пропорционального управления с помощью ПИД-регулятора, управляющие воздействия которого преобразованы в частотно-импульсную форму. Это позволило упростить ПИД-регулятор и повысить надежность и стабильность работы системы позиционирования, которая обеспечивает позиционирование стола по обеим координатам в диапазоне 0—420 мм с погрешностью 0,5 мкм за время, не превышающее 4 с.

Для управления положением зеркального дефлектора используются прецизионные генераторы тока, управляемые от ЭВМ через 10-разрядные цифроаналоговые преобразователи. Нагрузкой генераторов являются отклоняющие катушки дефлектора. Генератор работает в режиме единичных приращений тока. Схема питания обмоток дефлектора обеспечивает постоянство суммы управляющих токов, подаваемых с цифроаналоговых преобразователей.

Управление акустооптическим дефлектором осуществляется с помощью синтезатора частот с диапазоном выходных частот 52—100 МГц, временем переключения частоты 1 мкс, разрешающей способностью 400 кГц, стабильностью частоты 2×10^{-5} , выходной мощностью 2 Вт на сопротивлении 50 Ом и неравномерностью амплитудно-частотной характеристики ± 1 дБ [15].

Положение лазерного пучка в пространстве определяется содержимым блока регистров X, Y. Длительность экспозиции при этом задается временем хранения (в регистрах) кодов, поступивших от ЭВМ. Этот режим используется при записи изображений на неподвижном носителе. В том случае, когда запись изображений проводится посредством механического перемещения носителя относительно сфокусированного лазерного пучка, требуемое положение пучка в пространстве устанавливается с помощью кнопочного переключателя, имеющегося на передней панели блока. Время экспозиции пропорционально длительности импульса, сформированного в блоке управления экспозицией. Это устройство включает кварцевый генератор частоты, таймер и специальный блок, предназначенный для подключения к таймеру по командам от ЭВМ импульсов с реверсивных счетчиков канала X или Y. Частота следования этих импульсов при разгоне и торможении стола изменяется, однако интервалы следования соответствуют перемещению стола по каждой из координат на отрезки пути равной длины.

Квантование интервалов перемещения носителя осуществляют реверсивные счетчики текущих координат X или Y. ЭВМ сравнивает зна-

чения рассогласования каждой из координат и разрешает подключение к таймеру последовательности импульсов того из каналов, у которого рассогласование больше. Таймер формирует импульсы постоянной длительности для управления модулятором светового пучка в те моменты, когда носитель изображения переместится на расстояние, меньшее, чем диаметр светового пучка. Длительность импульса включения модулятора выбирается такой, чтобы за время этого импульса носитель изображения переместился на максимальной скорости на величину, не превышающую половины светового пятна. Включение светового пучка через равные промежутки пути, проходимые столом, на фиксированные интервалы времени позволяет обеспечить одинаковую экспозицию регистрирующих сред как при движении с постоянной скоростью, так и при разгоне и торможении и, следовательно, постоянство ширины линии.

ЭВМ СМ-4 содержит процессор с диспетчером памяти, ОЗУ емкостью 96 К слов, два НМД ИЗОТ-1370, АЦПУ и терминалы.

Программное обеспечение построителя разработано на базе операционной системы RSX-11 M (ОС РВ 2.0). Созданный пакет программ ориентирован на освоение технологии лазерной записи высокоинформативных изображений, опытную эксплуатацию лазерного построителя, отладку и тестирование его основных опико-электронных и электронных блоков и узлов.

Системное программное обеспечение построителя включает обслуживающие ассемблерные подпрограммы и адаптированные для него подпрограммы СМОГ [16].

4. Экспериментальные исследования. Проведены испытания одно-, двух- и трехступенчатой систем записи изображений. Первая из них выполнена на основе двухкоординатного электромеханического стола и акустооптического модулятора света; вторая — двухкоординатного акустооптического дефлектора и стола; третья — стола, зеркального и акустооптического дефлекторов. Светочувствительными материалами служили тонкие пленки хрома толщиной 30—150 нм, фотопластинки «Микрат-НК» и фотохромные материалы.

4.1. Одноступенчатая система построения изображений. Запись изображений осуществлялась путем перемещения носителя, закрепляемого на столе, относительно сфокусированного лазерного пучка [17].

В качестве регистрирующей среды использовались пленки хрома толщиной от 30 до 150 нм на стеклянных подложках. Запись изображения проведена в режиме формирования под действием лазерного излучения окиси хрома с последующей химической обработкой экспонируемого материала [18, 19]. Благодаря тому что скорость травления хрома в специальных травителях во много раз больше скорости травления его окислов [20] после травления на стеклянных подложках сохраняются только облученные участки.

Тестовые записи линий на пленках хрома с последующей химической обработкой результатов записи показали, что постоянство ширины линии достигается в диапазоне скоростей $0 \div 5$ см/с при длительности импульса экспозиции 10 мкс. Ширина линии зависит от мощности излучения Ar-лазера. При изменении мощности в диапазоне 30—80 мВт она колеблется от 2 до 5 мкм. На рис. 2 приведены примеры записи линейных решеток с шагами 10 (а) и 19 (б) мкм. Ширина темной линии на рис. 2, а соответствует лазерному пучку света, эффективный диаметр которого равен 2 мкм. Линии большей ширины, показанные на рис. 2, б, получены методом «линования» с 50%-ным перекрытием двухмикронных линий.

Путем лазерной записи на пленках хрома изготовлены шаблоны:

1) цилиндрической линзы Френеля с фокусным расстоянием 1 м, относительным отверстием 1:10 и числом зон, равным 2500 (размер последней зоны 5 мкм). (Внеосевой фрагмент шаблона линзы показан на рис. 3, а; эффект фокусировки плоского пучка света с $\lambda = 0,63$ мкм, наблюдаемый в фокальной плоскости линзы, иллюстрируется рис. 3, б.

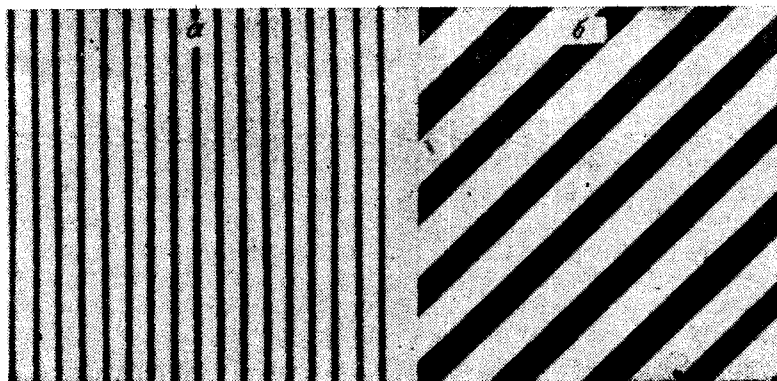


Рис. 2.

Размеры пятна Эйри: расчетный — 12 мкм, экспериментальный — 20 мкм. Время записи 40 мин);

2) двухградационных оптических масок, представляющих собой ряд одинаково ориентированных на плоскости щелей, расстояния между которыми выдержаны с высокой точностью (менее микрона). (Одна из таких масок показана на рис. 4. Ширина щели 50 мкм, длина 1000 мкм. Максимальное расстояние между щелями 39 мм. Маски удовлетворяют требованиям работы в составе бесконтактного оптического измерителя размеров изделий [21]).

4.2. *Двухступенчатая система построения изображений.* Эта система ориентирована на пофрагментную запись изображений на большом поле. Если коэффициент заполнения изображения является небольшим (порядка и менее 10%), то время его записи можно существенно сократить. Изображения такого типа встречаются, например, при микрофильмовании текстовых и буквенно-цифровых (табличных) данных.

Запись изображений в двухступенчатой системе осуществляется двухкоординатным акустооптическим дефлектором на неподвижном носителе, перемещаемом с помощью электромеханического стола. Растр из $N \times N$ точек, формируемый акустооптическим дефлектором, фокусируется объективом в плоскости носителя. Время экспонирования в каждой точке задается программным способом. Перевод лазерного пучка из одного положения в другое не превышает 10 мкс. Разработанное программное обеспечение позволяет проводить запись алфавитно-цифровой

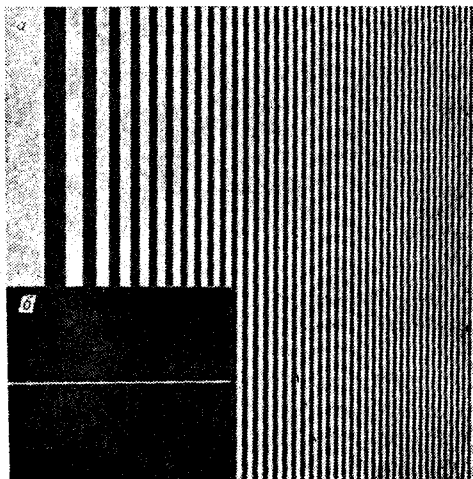


Рис. 3.

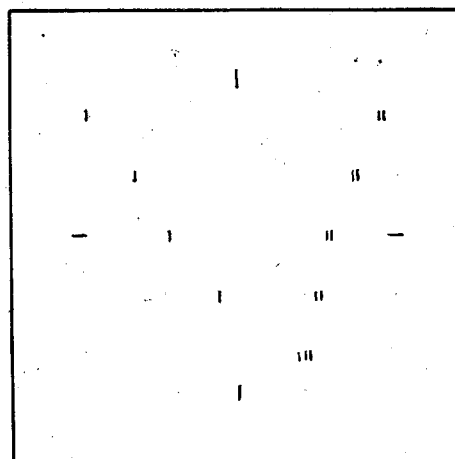


Рис. 4.

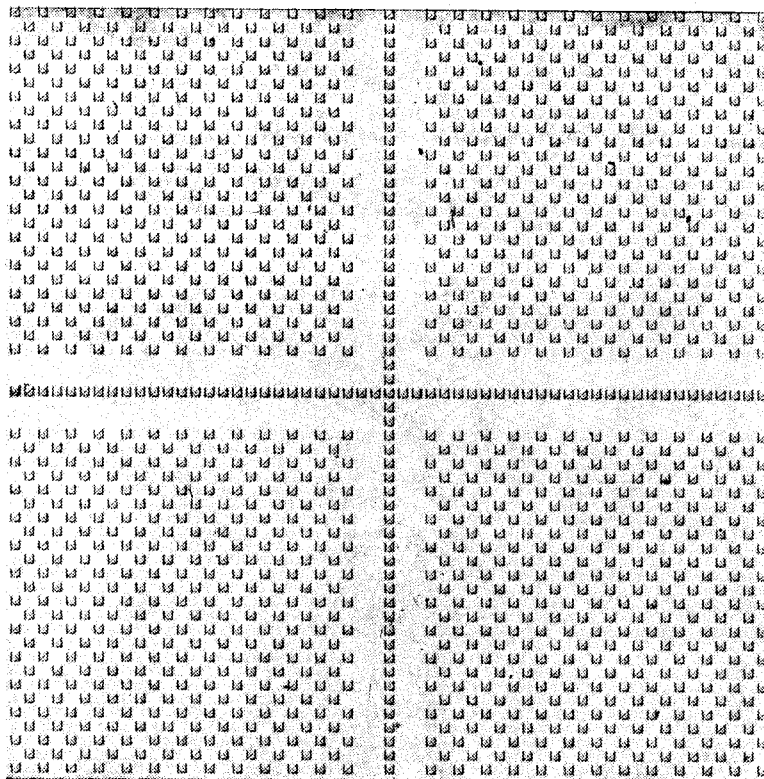


Рис. 5.

и графической информации. На рис. 5 представлена запись тестовой таблицы, осуществленная Аг-лазерным пучком на фотопластинке «Микрат-НК». Она соответствует полю изображения, содержащего 10000×10000 элементов. Размер раstra дефлектора 100×100 точек. Диаметр элемента разрешения 10 мкм. Время записи 1 ч. Для сравнения отметим, что время записи этой таблицы в режиме 4.1 превышало бы 5 ч.

Реализовано проекционное отображение данных на экран путем промежуточной поточечной записи изображений на реверсивном носителе. Проекция осуществлялась объективом «Мир-3» на экран размером 600×600 мм² с увеличением $50\times$. В качестве промежуточного реверсивного носителя использован отечественный фотохромный материал ФПП-129 в виде пленки на стеклянной подложке с эффективным поглощением в сине-зеленой области спектра.

В процессе отображения изображения на экран считывающий свет увеличивает скорость разрушения изображения на фотохромном материале. Испытания показали, что время деградации изображения, определенное по падению контраста вдвое, составило 3—5 мин. Время хранения изображения в темноте — 10 ч.

4.3. Трехступенчатая система построения изображений. Время записи изображений с высоким коэффициентом заполнения в двухступенчатой системе может превышать 10 ч. Поэтому с целью повышения средней скорости записи изображений в состав построителя введена третья, промежуточная по количеству позиционируемых точек и быстродействию ступень — двухкоординатный зеркальный дефлектор.

В трехступенчатой системе фрагменты изображения, формируемые акустооптическим дефлектором, дополнительно, мультиплицируются с помощью зеркального дефлектора. Количество позиций отклонения зеркального дефлектора выбирается из условия полного заполнения угловой апертуры фокусирующего объектива, что обеспечивает регистрацию

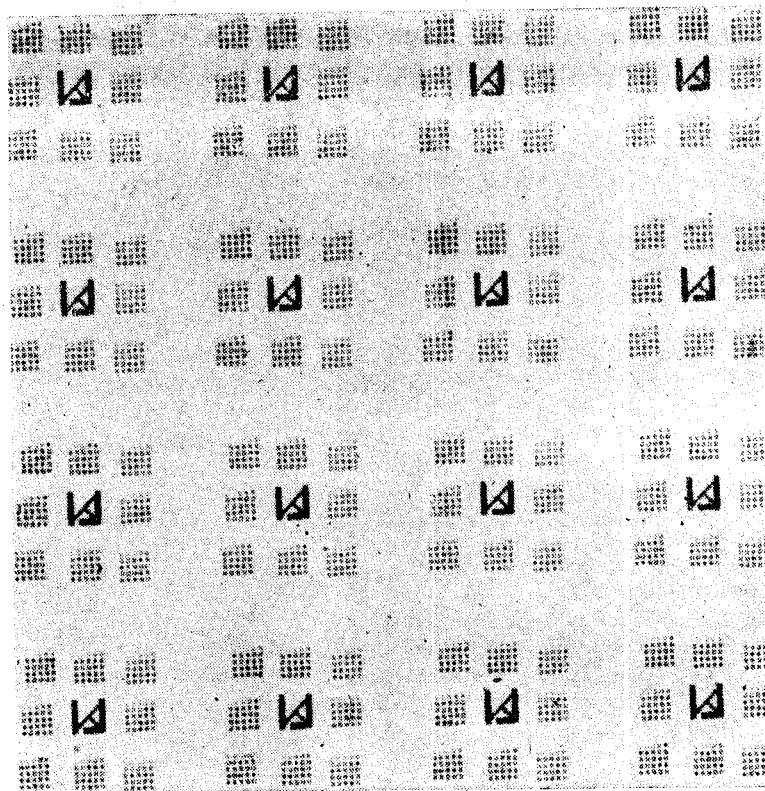


Рис. 6.

участка изображения с числом элементов 600×600 . Размер этого участка в плоскости неподвижного носителя составляет 6×6 мм. Тестовое изображение, записанное таким образом, показано на рис. 6. Наблюдаемая на рисунке неравномерность шага по координатам X , Y и их непрямолинейность могут быть устранены программным способом. Дальнейшее расширение поля записи высокоинформативных изображений производится так же, как и в двухступенчатой системе. Благодаря тому что время позиционирования зеркального дефлектора не превышало 0,1 с, время записи изображений аналогичного типа в трехступенчатой системе уменьшилось в 8—10 раз. Следовательно, вполне реально осуществить запись изображений в поле 420×420 мм с размером информативного элемента 10 мкм.

Заключение. Изложенное выше позволяет сделать следующие выводы.

1. Созданный лазерный $X - Y$ -построитель является достаточно универсальным инструментом для освоения в лабораторных условиях лазерной технологии записи высокоинформативных изображений. Это достигнуто благодаря введению в состав построителя трех независимых и управляемых от ЭВМ двухкоординатных систем позиционирования: электромеханического стола, зеркального и акустооптического дефлекторов. Выбор того или иного сочетания систем позиционирования определяется характером решаемой задачи: информативностью и свойствами изображений, подлежащих записи, коэффициентом их заполнения, а также требуемыми скоростью и рабочим полем записи.

2. Опыт записи изображения на пленках хрома, галоидосеребряных эмульсиях и фотохромных материалах свидетельствует о том, что аппаратные и программные средства построителя можно успешно применять при отработке лазерной технологии изготовления фотошаблонов специальных оптических элементов (решеток, линз, масок), проекционного

отображения данных на большой экран и микрофильмирования документов с высокой плотностью упаковки данных. Изготовленные элементы имеют высокие (в первом приближении) метрологические характеристики; некоторые из них (маски) уже сейчас применяются в новых оптических контрольно-измерительных приборах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электронно-лучевая технология в изготовлении микроэлектронных приборов/Под ред. Дж. Р. Брюэра.— М.: Радио и связь, 1984.
2. Коронкевич В. П. и др. Киноформные оптические элементы: методы расчета, технология изготовления, практическое применение.— Автометрия, 1985, № 1, с. 4—25.
3. Данилов В. А. и др. Синтез оптических элементов, создающих фокальную линию произвольной формы.— Письма в ЖТФ, 1982, т. 8, вып. 13, с. 810—815.
4. Dewar A. G. Laser — addressed liquid crystal displays.— Opt. Eng., 1984, v. 23, N 2, p. 230—240.
5. Айламазян А. К. Информация и информационные системы.— М.: Радио и связь, 1982.
6. Ведерников В. М. и др. Прецизионный построитель для синтеза оптических элементов.— Автометрия, 1981, № 3, с. 3—16.
7. Biedermann K., Holmgren O. Large size distortion-free computer-generated holograms in photoresist.— Appl. Opt., 1977, v. 16, N 8, p. 214—216.
8. Вестерберг Г. Лазерная установка для изготовления фотошаблонов ИС с высоким разрешением.— Электроника, 1976, т. 49, № 9, с. 15—16.
9. Richmond J. S. A proposed standard for monochrome television cameras for court-room USE.— Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., 1977, v. 108, p. 126—134.
10. Карпман И. М., Либенсон М. И., Яковлев Е. М. Лазерная термофотография в производстве шаблонов И. С.— Л.: ЛДНТП, 1981.
11. Бурый Л. В. и др. Автоматизированный комплекс для обработки изображений.— Автометрия, 1980, № 3.
12. Пен Е. Ф., Твердохлеб П. Е., Тищенко Ю. Н., Трубецкой А. В. Акустооптический дефлектор голограммного запоминающего устройства.— Опт. и спектр., 1983, т. 55, вып. 1.
13. Кирьянов В. П., Коронкевич В. П. Лазерный интерферометр с низкочастотной фазовой модуляцией.— Квант. электроника, 1982, т. 9, № 7, с. 1301—1303.
14. Щербаченко А. М., Юрлов Ю. И. Электронные модули КАМАК прецизионных лазерных измерительных и управляющих систем.— Автометрия, 1980, № 3, с. 33.
15. Выюхин В. Н., Ковалев Е. А., Курочкин В. В., Юношев В. Н. Быстродействующий двухканальный синтезатор частот.— Автометрия, 1976, № 3, с. 28.
16. Математическое обеспечение для графопостроителей — СМОГ/Под ред. Ю. А. Кузнецова.— Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1976.
17. Коронкевич В. П. и др. Синтез киноформов в реальном времени.— Автометрия, 1977, № 2, с. 29—38.
18. Вейко В. П., Котов Г. А., Либенсон М. И., Никитин М. Н. Термохимическое действие лазерного излучения.— ДАН, 1973, т. 208, № 3, с. 587—590.
19. Koronkevich V. P. et al. Fabrication of kinoform optical elements.— Optik, 1984, v. 67, N 3, p. 257—266.
20. Коваленко В. С. Металлографические реактивы.— М.: Металлургия, 1981.
21. Богомолов Е. Н., Вертопрахов В. В., Юношев В. П., Чугуй Ю. В. Быстродействующее оптическое контрольное устройство на основе Э-60.— В кн.: Тез. докл. «Внедрение прогрессивных средств и методов размерного контроля точных измерений длин и углов».— Л.: Госстандарт, 1984.

Поступила в редакцию 7 июля 1985 г.

УДК 621.376.5

В. П. КОРОЛЬКОВ, А. Г. ПОЛЕЩУК

(Новосибирск)

УПРАВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ПРЕЦИЗИОННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ФОТОПОСТРОИТЕЛЯХ

Введение. Одной из проблем развития плоской оптики [1] является воспроизводимое получение топологических структур общей площадью до $(1-3) \cdot 10^4$ мм² с минимальным размером элементов менее 1 мкм и точностью выполнения их границ 0,1—0,2 мкм.