

*Б.И. Спектор, А.В. Трубецкой, А.М. Щербаченко*

## ЛАЗЕРНЫЙ ПОСТРОИТЕЛЬ ШАБЛОНОВ КИНОФОРМНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

### 1. Введение

Киноформные оптические элементы (КОЭ) представляют собой фазовые структуры, которые содержат информацию о волновом фронте в виде фазовой задержки, не превышающей длины световой волны [1]. Они занимают промежуточное положение между дифракционными и преломляющими оптическими элементами. Расчет фазовой структуры КОЭ производится на ЭВМ и с помощью прецизионных фотопостроителей регистрируется на фазочувствительных материалах в виде фазовой задержки в реальном масштабе времени [2], а на фото- или термочувствительных материалах - в виде плотностей почернения или набора амплитудных масок (фотошаблонов), которые в дальнейшем используются для формирования фазового рельефа [3,4].

В последнее время благодаря разработке управляемых от ЭВМ прецизионных построителей изображений [5-7] появилась возможность создавать различные КОЭ, которые могут фокусировать, отклонять, разделять и трансформировать световые пучки.

В статье представлены результаты работы по созданию и применению действующего образца лазерного построителя изображений. Рассмотрена структурная схема, приведены технические

характеристики основных электронных и оптических систем, программные средства и технология записи изготовленных на построителе шаблонов ряда КОЭ.

### 2. Структура построителя и технические характеристики основных систем

В лазерном построителе используется поточечная запись шаблонов КОЭ. Построитель содержит две независимые двухкоординатные системы позиционирования - электромеханическую систему позиционирования носителя изображения и акустооптическую систему позиционирования записывающего лазерного пучка.

Основу построителя (рис. 1) составляет двухкоординатная электромеханическая система позиционирования координатного стола (1), на котором крепится подложка (2) с термо- или фоточувствительным материалом. Координатный стол перемещается в горизонтальной плоскости на четырех воздушных опорах по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Контроль за положением стола вдоль координат X, Y осуществляется с помощью двух лазерных интерферометров (3,4). Интерфе-

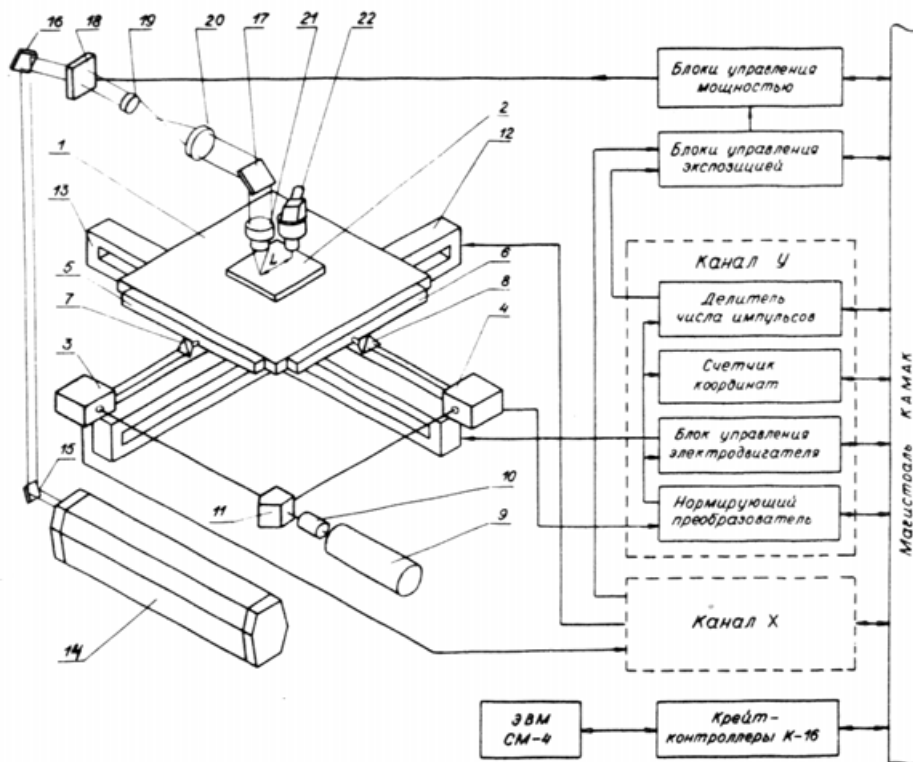


Рис. 1

рометры расположены так, что лучи их рабочих плеч направлены по ребрам измерительных направляющих (5,6), жестко закрепленных вдоль стола. Вдоль рабочих плеч интерферометров перемещаются установленные на специальных каретках уголки отражатели (7,8), которые соприкасаются с измерительными направляющими. Источником света обоих интерферометров служит He-Ne лазер (9). Излучение лазера (9), пройдя через коллиматор (10), поступает на пентапризму (11), которая делит его на два ортогональных пучка равной интенсивности и направляет каждый из них в интерферометр соответствующей координаты. Координатный стол приводится в движение с помощью линейных электродвигателей постоянного тока (12,13), конструктивно совмещенных с ортогональными направляющими, вдоль которых перемещается стол.

Для записи изображений в фотопостроителе используется аргоновый лазер (14). Излучение этого лазера через оптическую систему, включающую поворотные зеркала (15-17), двухкоординатный акустооптический дефлектор-модулятор (18) и объективы (19-21), фокусируется в плоскости подложки (2). Построитель содержит контрольно-измерительный канал (22), который создан на базе оптической головки металлографического микроскопа (600X)

с объект-микрометром и микрофотонасадкой. Оптическая ось этого канала смещена относительно оси канала записи изображений. Запись изображений в построителе осуществляется посредством:

- 1) механического перемещения носителя изображений (подложки) относительно сфокусированного лазерного пучка;
- 2) перемещения записывающего лазерного пучка относительно неподвижного носителя изображений в поле раstra, создаваемого акустооптической системой, с числом элементов разрешения  $100 \times 100$ ;
- 3) механического перемещения носителя изображений с одновременной разверткой или коррекцией записывающего лазерного пучка поперек движения носителя.

Электронные блоки систем позиционирования координатного стола и записывающего лазерного пучка, а также блоки управления экспозицией размещены в двух крейтах КАМАК и через крейт-контроллеры К-18 подключены к ЭВМ СМ-4.

Электромеханическая система позиционирования носителя изображения обеспечивает контроль положения координатного стола с дискретностью 0.08, 0.16 или 0.32 мкм. Она удерживает координатный стол в поле  $420 \times 420$  мм с погрешностью 0.5 мкм.

В режиме перемещения координатного стола по одной из координат погрешность позиционирования (удержания) по второй координате не превышает 1.5 мкм. Электромеханическая система позиционирования состоит из двух одинаковых каналов X и Y, каждый из которых содержит нормирующий преобразователь, реверсивный счетчик координат стола, блок управления линейным электродвигателем и делитель импульсов с программируемым коэффициентом деления. Нормирующий преобразователь обеспечивает стыковку лазерного интерферометра с цифровыми блоками электромеханической системы позиционирования. Счетчик координат стола регистрирует абсолютные значения координат стола относительно начального его положения, принятого за репер. Блок управления электродвигателем реализует принцип двухрежимного управления [8], при котором перемещение стола в сравнительно малую зону (320 мкм) производит квазиоптимальный по быстрдействию релейный регулятор, а точное позиционирование — пропорциональный интегрально-дифференциальный регулятор. Делитель числа импульсов с программируемым коэффициентом деления обеспечивает квантование величины перемещения стола с постоянным шагом, равным  $N \cdot q$ , где  $N$  — коэффициент деления, задаваемый от ЭВМ, а  $q$  — дискретность квантования, формируемая нормирующим преобразователем лазерного интерферометра перемещений.

К блокам акустооптической системы позиционирования лазерного пучка относятся число-импульсный сумматор и цифровой синтезатор частоты [9].

Положение лазерного пучка на выходе акустооптического дефлектора-модулятора определяется кодом, регистрируемым число-импульсным сумматором. Последний имеет три режима работы:

- 1) хранение кода числа, смену которого осуществляет ЭВМ;
- 2) суммирование кода числа, предварительно записанного в него, с импульсами генератора программируемого числа импульсов;
- 3) суммирование кода числа с импульсами нормирующего преобразователя.

Режим хранения кода числа используется при записи изображений на носитель как во время перемещения его относительно неподвижного лазерного пучка, так и во время записи

изображений на неподвижный носитель перемещением лазерного пучка. Смена кодов чисел в сумматоре, определяющих положение лазерного пучка в пространстве, производится по командам ЭВМ.

Режим суммирования кода числа, хранимого в сумматоре, с импульсами генератора пачки импульсов обеспечивает повышение скорости записи при заштриховке прямоугольных площадок, поперечные размеры которых превышают размеры регистрируемого на носителе светового пятна.

Наконец, третий режим обеспечивает повышение как скорости, так и точности записи шаблонов одномерных линейных решеток благодаря динамической компенсации ошибок электромеханической системы позиционирования носителя быстродействующим акустооптическим дефлектором записывающего лазерного пучка.

Блоки системы управления экспозицией включают кварцевый генератор импульсов с частотой 1 МГц, таймер и коммутатор импульсов, который осуществляет выбор последовательности импульсов одного из двигателей с программируемым коэффициентом деления. Эти блоки позволяют программно формировать импульсы экспозиции с дискретностью 1–128 мкс.

Лазерный построитель работает с базовым комплектом ЭВМ СМ-4, включающим процессор с диспетчером памяти, ОЗУ емкостью 96 К слов, накопители НМД и терминалы.

### 3. Программное обеспечение

Комплекс программных средств фотопостроителя реализован на базе операционной системы RSX-11M (OS PB 2.0). Он ориентирован на экспериментальные исследования точностных характеристик построителя, исследования режимов лазерной записи на различных термо- и светочувствительных материалах и изготовление шаблонов киноформных оптических элементов. Комплекс программных средств состоит из программ системного и специального обеспечения.

Системное программное обеспечение построителя использует ассемблерные обслуживающие программы. С помощью этих программ производится задание режимов работы электронных блоков различных систем построителя, обмен данными между ними и ЭВМ, преобразование целых чисел в формат ве-

ществленных и обратного преобразования. Системное программное обеспечение включает также адаптированный (с учетом аппаратной реализации построителя) пакет программ системы математического обеспечения графопостроителей СМОГ [10]. Этот пакет содержит свыше 20 программ. Изменению и доработке подверглись три подпрограммы - CANAL, LEAF и TRA.

Подпрограмма CANAL настраивает построитель на работу; она определяет режимы записи изображений, задает время экспозиции материала, дискретность перемещения стола по координатам X и Y, значения зон рассогласования по этим координатам и время задержки на успокоение электромеханической следящей системы позиционирования, при которых вывод координатного стола в заданную позицию считается законченным.

Подпрограмма LEAF задает область рисования, за пределы которой невозможно выйти иначе как заказав новую область рисования. Размеры заказываемой области ограничиваются размерами поля координатного стола и не могут превышать 420 × 420 мм. Подпрограмма имеет четыре параметра. Первые два задают размеры области рисования в миллиметрах по координатам X и Y. Область рисования может быть обведена рамкой. Для этого третий параметр должен иметь значение TRUE. Работа вне этой области запрещена. Выход за пределы этой области контролируется. В зависимости от значения четвертого параметра этот контроль бывает жестким или мягким. При жестком контроле (FALSE) всякая попытка вывести координатный стол за пределы заданной области воспринимается как ошибка. При мягком контроле (TRUE) вычерчивается область изображения, которая находится в области рисования, а линии, находящиеся вне области, игнорируются.

Основной подпрограммой, используемой при записи изображений по средством перемещения координатного стола относительно лазерного пучка, является TRA. Она обеспечивает перевод каретки из одного положения в другое. Для подпрограммы TRA начальными координатами являются координаты стола в момент обращения к подпрограмме.

Координаты точки, в которую переводится стол, задаются двумя первыми вещественными параметрами подпрограммы. Третий параметр целого типа. Его значение может изме-

няться в пределах 1-10. Оно определяет величину развертки лазерного пучка поперек движения координатного стола. Четвертый параметр также целого типа. Он определяет состояние модулятора. Если он равен 1, то при переходе координатного стола в новую позицию будет нарисована линия; если равен 0, прорисовки линии не будет. Подпрограммы СМОГ, написанные на языке Фортран IV, существенно облегчают разработку программ записи шаблонов КОЭ.

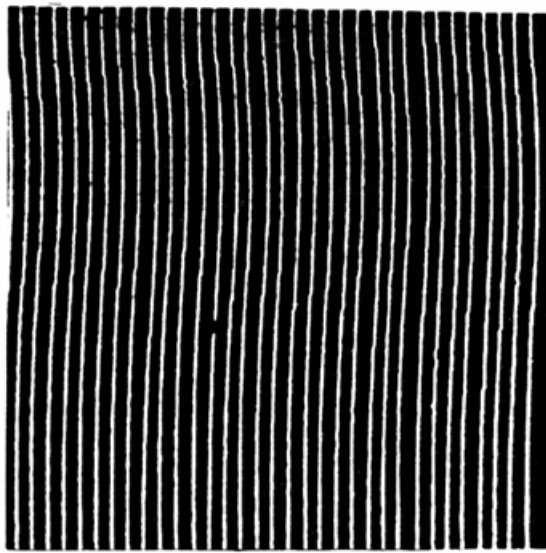
Специальное математическое обеспечение включает тестовые программы для отработки технологии лазерной записи шаблонов на различных материалах, а также программы записи шаблонов специальных оптических элементов. Фотографии некоторых из изготовленных на построителе шаблонов будут представлены ниже.

#### 4. Технология записи шаблонов

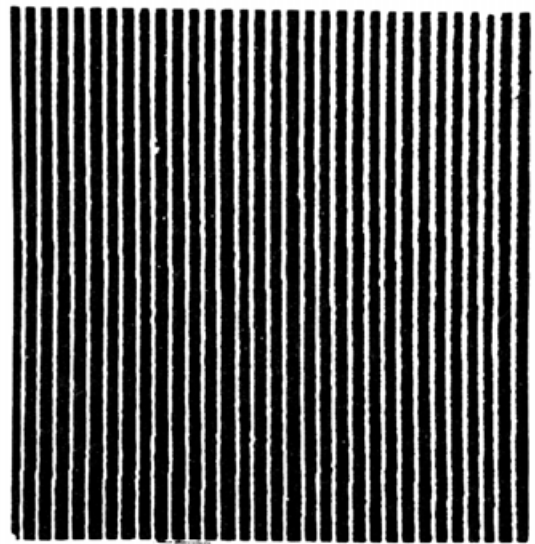
Для записи шаблонов киноформных оптических элементов использовались тонкие пленки хрома толщиной 300-1500 Å, напыленные на стеклянные подложки. Под действием лазерного излучения в тонких пленках формируется скрытое изображение [11], выявляемое последующей химической обработкой пленок в специальных травителях [12]. В местах, подвергнутых лазерному облучению, происходит окисление хрома. Благодаря тому, что скорость травления окиси хрома значительно меньше скорости травления самого хрома, на стеклянных подложках сохраняются лишь участки хрома, подвергшиеся окислению.

Тестовые записи одномерных дифракционных решеток показали, что постоянство ширины линии достигается в диапазоне скоростей до 5 см/с при длительности импульсов экспозиции в каждой точке не более 10 мкс. Ширина линии зависит от мощности излучения аргонового лазера. При изменении мощности излучения лазера в диапазоне 30-80 мВт она колеблется от 2 до 5 мВт. На рис. 2а представлены тестовые записи одномерной дифракционной решетки с шагом 6 мкм. Волнистость линии вызвана тем, что начало записи очередного штриха не совпадало с моментом окончания переходного процесса электромеханической системы позиционирования. Для повышения быстродействия и точности записи таких решеток предложен и





а



б

Рис. 2

реализован метод динамической компенсации ошибок позиционирования электромеханической системы с помощью акустооптической системы отклонения записывающего лазерного пучка. Предложенный метод и его реализация позволяют вести запись очередного штриха, не дожидаясь окончания переходного процесса позиционирования носителя. Этот момент определяет ЭВМ, которая непрерывно контролирует значение ошибки. Когда оно становится таким, что его возможно скомпенсировать, отклонив записывающий лазерный пучок, подается команда, разрешающая перемещение носителя в направлении записи штриха. При этом в число-импульсном сумматоре код числа, определяющий положение записывающего лазерного пучка, корректируется импульсами нормирующего преобразователя лазерного интерферометра. Этот метод записи позволяет скомпенсировать такие ошибки, которые могут быть вызваны случайными возмущениями (вибрациями) после окончания процесса позиционирования. Тестовая запись решетки, демонстрирующая возможности метода, представлена на рис. 2б.

Линии большей ширины (рис. 3) получают методом линования с 50%-ным перекрытием одиночных линий, формируемых во время развертки записывающего лазерного пучка поперек движения носителя изображений. Ширина линии, регистрируемая на материале, может программно изменяться в диапазоне  $(1-10) \cdot \omega$ , где  $\omega$  - ширина одиночной линии. Текст-



Рис. 3

вая часть теста записана в поле акустооптического дефлектора при неподвижном положении координатного стола. Шаг раstra акустооптического дефлектора составляет 3 мкм, размер букв 12 × 18 мкм.

## 5. Экспериментальная часть

С использованием лазерной термомеханической технологии на построителе были изготовлены шаблоны цилиндрических линз Френеля, оптических элементов с крестообразным и квадратным импульсным откликом, дискового сканера лазерного пучка с одновременной его фокусировкой в плоскости сканирования, шаблоны растровых и дифракционных решеток.

Шаблоны киноформных оптических элементов на основе линз Френеля (одиночных и взаимно пересекающихся) являются наиболее простыми из изготовленных на построителе. Цилиндрическая линза Френеля представляет собой чередование прозрачных и непрозрачных зон, причем начало прозрачной  $i$ -й зоны является концом предыдущей  $(i-1)$ -й зоны. Начальные и конечные значения  $R$   $i$ -й зоны вычислялись в соответствии с выражением

$$R_i = (m \cdot \lambda \cdot F + m^2 \cdot \lambda^2 / 4)^{\frac{1}{2}},$$

где

$F$  - фокусное расстояние линзы для источника света с длиной волны  $\lambda$ ;

$i=1,2,3,\dots$  - целые числа.

При этом нечетные значения  $m=2 \times i-1$  определяют начальные, а четные  $m=2 \times i$  - конечные значения непрозрачных зон. На рис. 4 представлена фотография шаблона двух пересекающихся под прямым углом линз Френеля с фокусным расстоянием 200 мм и относительным отверстием 1:10 для фокусировки плоско параллельного лазерного пучка ( $\lambda = 0,63$  мкм), а также импульсный отклик этого элемента.

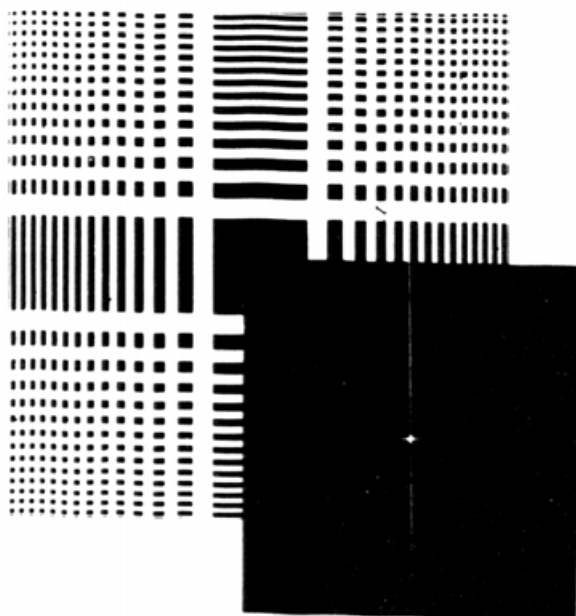


Рис. 4

Шаблон этого элемента представлен с ограниченным количеством зон. Результаты фотометрирования поперечного сечения линий изображения "креста" показали полное совпадение с расчетным - 12 мкм. Время записи шаблона, содержащего 1000 зон, составляло 40 мин.

Шаблон дискового сканера с линейной разверткой и одновременной фокусировкой лазерного пучка представлен на рис. 5. Структура шаблона представляет собой внеосевую полосу линзы Френеля, "завернутую" в кольцо путем математического преобразования координат зон линзы из декартовой системы координат в полярную [13]. Экспериментальные исследования дискового дифракционного сканера, в котором был использован этот шаблон, показали, что последний обеспечивал следующие параметры: длина линии сканирования - 15 мм, плоскость сканирования отстоит от плоскости вращения диска на 200 мм, число разрешенных позиций сканируемого пучка He-Ne лазера составляло 100.

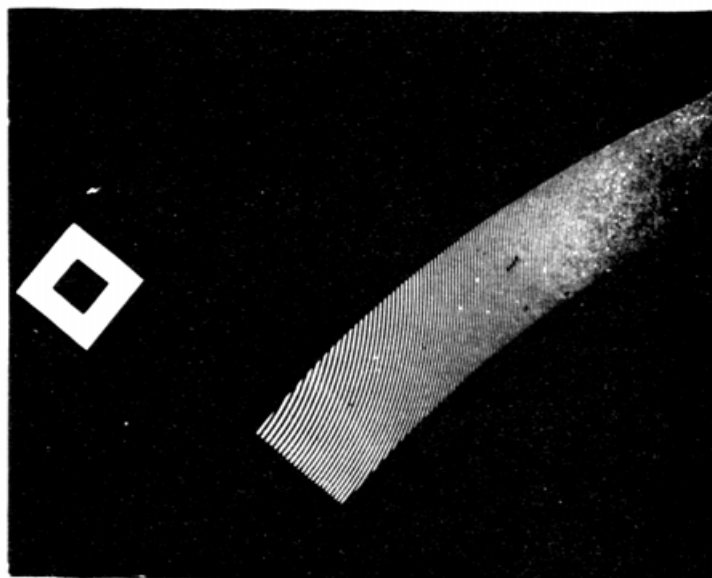


Рис. 5

## 6. Заключение

Рассмотрены структура, аппаратные и программные средства лазерного построителя шаблонов киноформных оптических элементов. Предложен и продемонстрирован метод записи шаблонов, использующий динамическую компенсацию ошибок позиционирования электромеханической системы с помощью быстродействующей акустооптической системы отклонения записывающего пучка поперек движения носителя изображений. Построитель отличается большим полем записи, высокими метрологическими характеристиками и в сочетании с термохимической

технологией записи изображений на пленках хрома может применяться для изготовления различных киноформных элементов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Lesem L.B., Hirsch P.M., Jordan J.A. The kinoform: a new waveform reconstruction device. - IBM J. Res. Develop., 1969, v. 13, p. 150-154. (Киноформ. - Зарубежная радиоэлектроника, 1969, № 12, с. 41-50).
  2. Коронкевич В.П., Меерсон А.Е., Ремесник В.П., Чейдо Г.П., Щербаченко А.М. Синтез киноформов в реальном времени. - Автометрия, 1977, № 2, с. 29-38.
  3. D'Auria L., Huignard J.P., Roy A.M., Spits E. Fotolitografic fabrication of thin film lenses. - Opt. Commun., 1972, v. 5, N 4, p. 232.
  4. Коронкевич В.П., Ленкова Г.А., Михальцова И.А. и др. Киноформные оптические элементы: методы расчета, технология изготовления, практическое применение. - Автометрия, 1985, № 1, с. 4-25.
  5. Westerg G. Electronics, 1976, N 4.
  6. Ведерников В.М., Вьюхин В.Н., Кирьянов В.П. и др. Прецизионный фотопостроитель для синтеза оптических элементов. - Автометрия, 1981, № 3.
  7. Спектор Б.И., Твердохлеб П.Е., Трубецкой А.В., Щербаченко А.М. Лазерная запись высокоинформативных изображений. - Автометрия, 1985, № 6.
  8. Щербаченко А.М., Юрлов Ю.И. Цифровая система управления перемещением объекта. - Авт. св. СССР № 798726, ОИПОТЗ № 3, 1981.
  9. Вьюхин В.Н., Ковалев Е.А., Курочкин В.В., Юношев В.Н. Быстродействующий двухканальный синтезатор частот, 1976, № 3, с. 28.
  10. Математическое обеспечение графопостроителей - СМОГ / Под ред. Ю.А. Кузнецова. Новосибирск, ВЦ СО АН СССР, 1976.
  11. Вейко В.И., Котов Г.А., Либенсон М.Н., Никитин М.И. Термохимическое действие лазерного излучения. - ДАН СССР, 1973, т. 208, № 3, с. 578-590.
  12. Коронкевич В.П., Полещук А.Г., Чурин Е.Г., Юрлов Ю.И. Селективное травление экспонированных лазером тонких пленок хрома. - Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, вып. 3.
  13. Bringdal O., Lee W.-H. Lazer beam scanning using computer-generated holograms. - Applied Optics, 1976, v. 15, № 1.
-