

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.

Известны два основных метода формирования изображений. В одном из них топология фотошаблона разбивается на элементарные прямоугольники, последовательно впечатываемые в необходимые места пластины, которая позиционируется с помощью двухкоординатного стола [2]. Другой — метод сканирования, когда промодулированный по амплитуде сфокусированный пучок света перемещается по поверхности светочувствительного материала путем последовательного прохода строк с перекрытием. Сканирование осуществляется в прямоугольной [3] или полярной [4] системе координат. В последнем случае формирование изображения производится непрерывным вращением подложки при одновременном перемещении сфокусированного пучка света по ее радиусу. При синхронной амплитудной модуляции пучка, выполняемой по программе от ЭВМ, можно получить фотошаблон заданной конфигурации. Так как сканирующие системы работают непрерывно, то они обеспечивают значительно более высокую производительность по сравнению с системами, использующими дискретное позиционирование.

Применение сфокусированного пучка света упрощает оптическую схему и позволяет варьировать размеры элементов путем изменения мощности лазера [5]. Кроме того, формирование протяженных элементов топологии осуществляется многократным проходом лазерного пучка с шагом перемещения, меньшим ширины записываемой дорожки. Это повышает помехоустойчивость процесса записи [6] и устраняет эффект «двойных» краев, который имеет место в проекционном способе записи [7]. Малый размер фокального пятна (менее 1 мкм) позволяет с использованием относительно маломощных газовых лазеров достичь плотности мощности $\sim 10^6$ Вт/см², необходимой для реализации термохимического способа записи на пленках хрома при скоростях сканирования до 2—3 м/с [8]. Этот способ, включающий экспонирование сфокусированным лучом пленки хрома на подложке и последующую химическую обработку в селективном травителе, позволяет получить дифракционные структуры с разрешением свыше 1000 мм⁻¹.

Точность выбора уровня мощности записывающего пучка при данной скорости сканирования и его стабильность во многом определяют неровность границ элементов топологии и воспроизводимость их размеров. Поэтому система управления излучением лазера является одной из основных в оптическом канале записи прецизионного фотопостроителя.

Данная работа посвящена разработке и исследованию системы управления оптическим излучением сканирующего лазерного фотопостроителя (ЛФП), предназначенного для изготовления фотошаблонов элементов плоской оптики. В работе сформулированы основные требования к системе управления и рассмотрены некоторые особенности формирования микроизображений сканирующим пучком света.

Влияние мощности оптического излучения на размеры формируемых элементов. Система управления оптическим излучением ЛФП должна обеспечивать уменьшение уровня флуктуаций мощности лазерного излучения до величины, позволяющей записывать элементы изображения с погрешностью выполнения границ, не превышающей дискретности позиционирования по соответствующей координате. Для ЛФП, работающего в полярной системе координат,

$$\delta d/2 \leq \Delta R; \quad \delta d_{\varphi} \leq \Delta \varphi R, \quad (1)$$

где $\delta d/2$, δd_{φ} и ΔR , $\Delta \varphi$ — соответственно погрешности выполнения границ элемента и дискретность позиционирования записывающего пучка по радиальной и угловой координатам (R — текущий радиус).

Так как для формирования микроизображений сканирующим пучком света с гауссовым распределением интенсивности используются различные физические процессы (фотохимические, фотоструктурные, термические, термохимические и т. д.), требования к величине допустимых флуктуаций и соответственно к системе управления могут существенно различаться. Связь между относительными изменениями ширины d за-

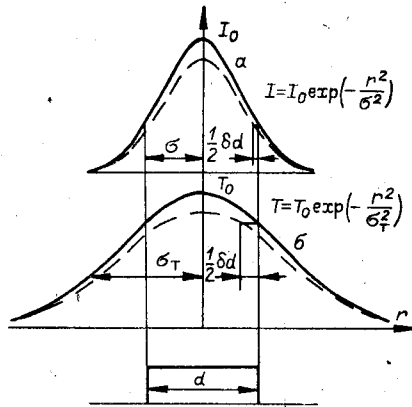


Рис. 1. Сравнение влияния флуктуаций мощности оптического излучения на ширину формируемой дорожки при записи, основанной на фото (кривая а) и термо (кривая б)-процессах:
 T_0, I_0 — соответственно максимальные температура и интенсивность, r — радиус.

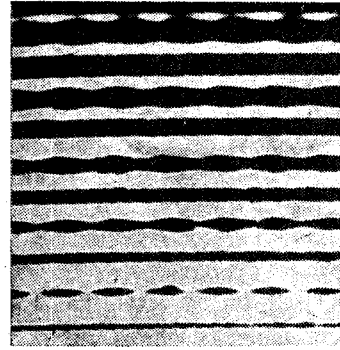


Рис. 2. Влияние синусоидальной модуляции ($\pm 10\%$) на ширину дорожки при термохимическом способе записи (период дорожек 4 мкм).
 Мощность записывающего пучка изменялась от 7 до 9,5 мВт через 0,7 мВт.

писываемой на ЛФП линии $\delta d/d$ и мощности излучения $\delta P/P$ для различных физических процессов можно охарактеризовать с помощью следующего соотношения:

$$\delta d/d = K_1 \delta P/P. \quad (2)$$

Здесь K_1 — коэффициент, зависящий от способа записи и типа регистрирующего материала. Тогда допустимое отклонение мощности записывающего пучка может быть получено из (1) и (2) следующим образом:

$$\delta P/P \leq 2\Delta R/K_1 d. \quad (3)$$

1. Если в качестве регистрирующей среды используются особоконтрастные фотоэмульсии, фоторезисты и другие материалы, имеющие пороговый характер почернения или изменения скорости травления в зависимости от величины поглощенной энергии (экспозиции), то

$$K_1 = 2\sigma^2/d^2, \quad (4)$$

где σ — радиус записывающего пучка света на уровне e^{-1} [9]. При $d = 2\sigma$ (условие наиболее эффективного использования световой энергии) $K_1 = 0,5$.

2. Формирование микроизображений с использованием тепловых эффектов (плавления, испарения и т. д.), пороговых относительно температуры, приводит к более сильному влиянию флуктуаций мощности излучения на ширину дорожки. Это обусловлено тем, что инициируемое оптическим излучением температурное распределение в регистрирующем материале (тонкой пленке), аппроксимируемое с достаточной точностью функцией Гаусса [10], имеет радиус σ_T из-за явления теплопроводности, всегда больший радиуса σ светового пятна (рис. 1). Поэтому справедлива замена в выражении (4) σ на σ_T , приводящая (при условии сохранения прежнего размера d) к росту коэффициента K_2 и, следовательно, к усилению влияния на ширину дорожки флуктуаций мощности излучения.

Так, например, для пленок хрома толщиной 40 нм при радиусе лазерного пятна $\sigma = 0,35$ мкм радиус температурного распределения, индуцированного микросекундными импульсами мощностью 50 мВт, составил 0,72 мкм [11]. В этом случае при $d = 2\sigma$ $K_2 = 1,5$.

Радиус температурного распределения растет с увеличением времени нагрева и, следовательно, с уменьшением скорости сканирования. Для лазерных фотоустройств, работающих в полярной системе координат, на малых радиусах время экспонирования элементов изображе-

ния составляет десятки, сотни и более микросекунд. На рис. 2 приведена серия тестовых дорожек, полученных по термохимической технологии [8] на пленках хрома толщиной 120 нм. При каждом значении мощности излучения записывались две дорожки: одна с синусоидальной модуляцией среднего уровня мощности ($\pm 10\%$), а другая без нее. Радиус записи составлял 2 мм, что при скорости вращения подложки с пленкой 2 с^{-1} и радиусе записывающего пятна 0,4 мкм дает длительность экспонирования 30 мкс. Видно, что при ширине дорожки менее 1 мкм уменьшение мощности на 10% ведет к исчезновению дорожки. Из этого следует, что для записи используется вершина температурного распределения, инцидируемого лазерным пучком.

Зависимость ширины дорожки d от мощности записывающего пучка при различных скоростях сканирования исследовалась в работе [8]. Из полученных экспериментальных данных следует, что величина коэффициента K_3 при средней ширине дорожки 1,5 мкм изменяется в зависимости от скорости сканирования от 3 до 5.

Таким образом, из выражения (3) находим, что для термохимической записи при $\Delta R/d = 0,1$ максимально допустимое отклонение мощности оптического излучения составляет 4%. Это ограничение касается как долговременной стабильности мощности излучения лазера (время записи достаточно сложных дифракционных элементов может достигать нескольких часов), так и его кратковременных флуктуаций (скорость сканирования в ЛФП с круговым сканированием изменяется от 10^{-5} до 3 м/с).

Система управления оптическим излучением. Система управления мощностью излучения лазера, являясь составной частью оптической системы фотопостроителя, должна обеспечивать: амплитудно-импульсную модуляцию светового потока; подавление флуктуаций мощности излучения лазера; оптическую изоляцию лазера от отраженного света; малые собственные потери световой энергии.

На первый взгляд, поставленная цель достигается достаточно просто: последовательной установкой двух отдельных блоков — стабилизации мощности лазера и импульсной модуляции [12]. Оптическую изоляцию лазера в этом случае обеспечит блок стабилизации мощности, если его выполнить на основе акустооптического модулятора (АОМ) [13]. Однако использование двух блоков приводит к неоправданно большим потерям световой энергии, усложняет оптическую схему, увеличивает ее габариты, а главное, не обеспечивает необходимой стабильности мощности излучения (блок импульсной модуляции вносит собственные шумы). Указанных недостатков лишена оптико-электронная система управления мощностью излучения лазера [14], блок-схема которой представлена на рис. 3.

Световой поток лазера 1 проходит объектив 2 и фокусируется в установленную под углом Брэгга ячейку АО-модулятора 3. Диффракцированный на ультразвуковой волне световой поток поступает через объектив 4, светоделитель 5, зеркало 6 к микрообъективу 7, который фокусирует его на поверхность регистрирующего материала 8. Диафрагма 9, расположенная между ячейкой АО-модулятора и объективом 4, пропускает световой поток, диффракцированный в первый порядок. Объективы 2 и 4 образуют телескопическую систему, которая расширяет световой поток лазера 1 до величины, необходимой для заполнения апертуры микрообъектива 7. Некоторая часть светового потока (1–3%) направляется светоделителем 5 (плоскопараллельная пластина толщиной, достаточной для разделения двух отраженных пучков) к широкополосному фотоприемнику 10 цепи оптико-электронной отрицательной обратной связи (ООС). Выходное напряжение фотоприемника вычитается схемой сравнения 11 из опорного напряжения, подаваемого от внешнего источника на вход АУ (аналоговое управление) или с выхода цифроаналогового преобразователя (ЦАП) 12. Управление ЦАП осуществляется либо трехрядным десятичным переключателем 13, либо с магистрали

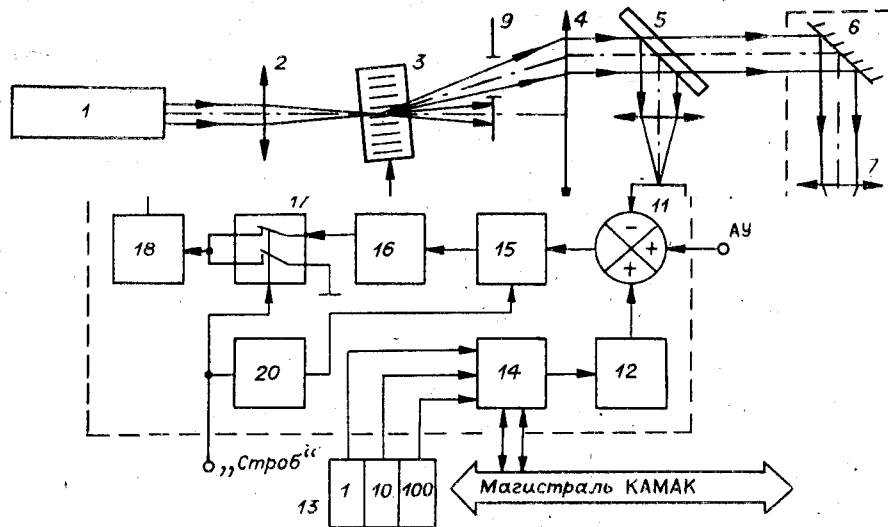


Рис. 3. Блок-схема системы управления оптическим излучением в ЛФП.

КАМАК. Преобразование кодов, дешифрация команд с магистрали КАМАК и другие логические операции производятся в цифровом блоке 14. Разностный сигнал ошибки, зависящий от флуктуаций мощности излучения лазера, поступает на вход интегрирующей схемы выборки и хранения (СВХ) 15. В режиме выборки СВХ играет роль интегрирующего усилителя со спадом амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) 20 дБ/дек. Сигнал с выхода СВХ проходит корректор АЧХ петли оптико-электронной обратной связи 16 и поступает на аналоговый коммутатор 17, управляемый по входу «Строб». При высоком управляющем потенциале коммутатор соединяет выход корректора АЧХ со входом буферного повторителя 18, выход которого соединен с блоком управления оптическим модулятором 19. При низком управляющем потенциале аналоговый коммутатор выдает на вход повторителя нулевое напряжение, выключая тем самым АО-модулятор и разрывая петлю ООС. Переключение режимов работы СВХ синхронизируется с переключением аналогового ключа посредством удлиняющей линии задержки 20. В установившемся режиме при очень большом коэффициенте усиления петли ООС величина мощности P светового потока на выходе модулятора не зависит от флуктуаций мощности излучения лазера, а определяется величиной опорного напряжения $U_{оп}$, коэффициентом передачи S фотоприемника и пропусканием ρ светоделителя:

$$P = U_{оп}\rho/(1 - \rho)S. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что, изменяя величину $U_{оп}$, можно линейно управлять мощностью светового потока P . Однако такое управление возможно лишь в ограниченном диапазоне частот. Верхняя частота этого диапазона обуславливается допустимым падением коэффициента усиления петли ООС с ростом частоты и составляет, как правило, 50—250 кГц [15]. Отличительной особенностью предлагаемой схемы является возможность работы одновременно в двух режимах управления мощностью светового потока: аналоговом посредством изменения опорного напря-

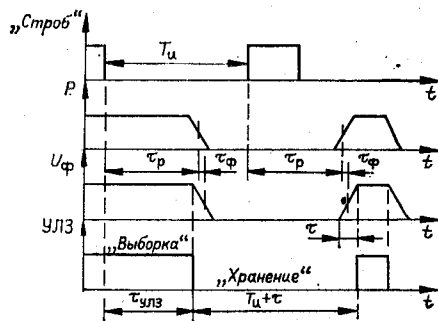


Рис. 4. Временная диаграмма работы системы управления оптическим излучением в импульсном режиме.

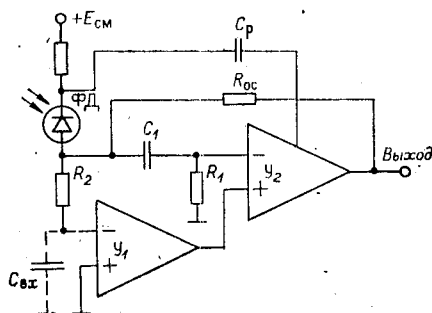


Рис. 5. Структурная схема широкополосного фотоприемника.

жения; импульсом путем включения и выключения АО-модулятора (подачей логических импульсов (уровни ТТЛ) на вход «Строб».

В режиме импульсного управления длительность фронтов световых импульсов определяется быстродействием используемого АО-модулятора (для модулятора МЛ-201 она составляет менее 50 нс) и не зависит от постоянной времени цепи ООС (1—10 мкс). Для того чтобы цепь ООС «не замечала» импульсной модуляции, схема выборки и хранения в периодах между световыми импульсами хранит информацию о разностном сигнале ошибки. Поэтому после включения модулятора импульсом управления ООС обрабатывает лишь небольшой сигнал ошибки, обусловленный изменением мощности светового потока лазера за время, прошедшее между импульсами. С увеличением частоты следования строб-импульсов эта ошибка уменьшается. Синхронизация работы СВХ и ключа с помощью линии задержки происходит следующим образом (рис. 4). При появлении на входе «Строб» сигнала низкого уровня на вход блока управления подается нулевое напряжение. Амплитуда синусоидального напряжения (80 МГц) на выходе блока падает до нуля. Из-за конечного времени распространения ультразвуковой волны в АОМ от излучателя до области взаимодействия со световым потоком соответствующее падение мощности светового потока, дифрагированного в первый порядок, происходит с задержкой. Величина задержки лежит в пределах 0,3—10 мкс. Задержка τ_p между появлением строб-импульса и соответствующим выключением светового потока на выходе включает в себя задержки распространения сигнала в аналоговом ключе, повторителе, блоке управления и АО-модуляторе, причем последняя является определяющей. Через время τ_ϕ напряжение U_ϕ на выходе фотоприемника также падает до 0. Для того чтобы СВХ не реагировала на стробирование светового потока, она переводится в режим хранения до начала падения напряжения на выходе фотоприемника. После установления напряжения на выходе фотоприемника СВХ вновь переводится в режим выборки. Таким образом, линия задержки удлиняет строб-импульс (задержанный на время $\tau_{улз}$, равное $\tau_p + \tau_\phi - \tau/2$) на длительность фронта (спада) τ светового импульса, т. е. на 50 нс для модулятора МЛ-201.

Схемная реализация. Электронная часть системы управления мощностью светового потока состоит из трех основных блоков.

Широкополосный фотоприемник. Как следует из выражения (5), точность установки требуемого уровня мощности светового потока на выходе модулятора определяется температурной и временной стабильностью коэффициента передачи фотоприемника. Кроме того, для нормальной работы системы управления необходимо, чтобы частота среза АЧХ-фотоприемника во много раз превышала граничную частоту цепи ООС и лежала в пределах 20—30 МГц. Структурная схема разработанного фотоприемника приведена на рис. 5.

Фотодиод ФД227КП подключается ко входу операционного усили-

теля, состоящего из двух каналов — низкочастотного и высокочастотного. Низкочастотный канал образован последовательным соединением двух усилителей — $У_1$ и $У_2$. Высокочастотный канал состоит из усилителя $У_2$, на вход которого через разделительную цепь R_1C_1 поступает напряжение с фотодиода ФД. Резистор $R_{ос}$ охватывает общей отрицательной обратной связью весь усилитель, а цепи R_1C_1 и $R_2C_{вх}$ обеспечивают разделение каналов (т. е. их «выключение»). Следящая обратная связь по высокочастотной составляющей осуществляется через конденсатор C_p с промежуточного выхода усилителя $У_2$ на катод ФД. Входные элементы фотоприемника (фотодиод, резисторы, конденсаторы) помещены в экран, соединенный с катодом ФД. Введение следящей обратной связи позволило значительно уменьшить влияние емкости фотодиода и монтажа и расширить полосу частот фотоприемника.

Низкочастотный канал ($0 \div 0,5$ МГц) выполнен на ОУ 574УД1. В высокочастотном канале ($У_2$) использованы биполярные СВЧ-транзисторы (КТ355 и КТ372), позволившие обеспечить скорость нарастания выходного напряжения ~ 1000 В/мкс на согласованной (50 Ом) нагрузке. Коэффициент передачи фотоприемника составляет для $R_{ос} = 13$ кОм 1,5 В/мВт на длине волны 0,5145 мкм. Амплитуда шумов на входе фотоприемника 1–5 мВ. Температурная нестабильность коэффициента передачи 0,1% на 1°C.

Блок управления модулятором (см. рис. 3) состоит из задающего генератора 21 (80 МГц), балансного модулятора 22 и усилителя мощности 23. Балансный модулятор 22 выполнен на двух МОП-транзисторах КП305Д по трансформаторной схеме с компенсацией остаточного сигнала. Усилитель мощности включает в себя четыре каскада, выполненные по схеме с общим эмиттером. Для обеспечения высокой линейности амплитудной характеристики первые три каскада работают в режиме А, а выходной, двухтактный, — в режиме АВ с 2–3-кратным запасом по мощности. Связь между каскадами осуществляется трансформаторами типа «длинная линия». Блок управления с АО-модулятором МЛ-201 обеспечивает полосу частот амплитудной модуляции 0–8 МГц; время нарастания (спада) светового импульса < 50 нс; глубину модуляции (контраст) светового потока > 300 ; нелинейность модуляционной характеристики $< 2\%$; коэффициент бегущей волны (КБВ) 0,9.

Блок модуляции и стабилизации. Принципиальная схема блока показана на рис. 6. Ток с выхода ЦАП (М12 и М13) непосредственно сравнивается с током через масштабирующее сопротивление с выхода фотоприемника (Ф). Точка суммирования этих токов через аналоговый ключ М14 соединяется со входом ОУ М15, выполняющего функции СВХ и схемы сравнения. Данная схема обеспечивает время хранения разностного сигнала ошибки с точностью 0,1% до 100 мкс, которое определяется в основном ключом М14. Для компенсации прохождения управляющих импульсов к входу М15 присоединен дополнительный ключ, коммутируемый в противофазе с основным. Для улучшения подавления флуктуаций мощности излучения осуществляется корректировка АЧХ петли обратной связи подбором емкостей С2, С3 и подстройкой резисторов R1, R2.

Мощный буферный повторитель (М18, Т3), включенный после аналогового ключа М6, обеспечивает на нагрузке 50 Ом передачу импульсов с амплитудой до 2 В и фронтами 50 нс.

Удлиняющая линия задержки, синхронизирующая работу ключей М14 и М17, выполнена на микросхемах М19 — М23. Она содержит два параллельных канала, срабатывающих один по фронту, а другой по спаду строб-импульса. Максимальная частота строб-импульсов, которую пропускает линия задержки для заданного времени $\tau_{улз}$, равна $2/\tau_{улз}$ (но не более 5 МГц при скважности 2).

Цифровой блок, управляющий ЦА-преобразователем, включает в себя дешифратор команд (Дш) с магистрали КАМАК, триггер режима управления, десятично-двоичный преобразователь (ДДП), цифровой

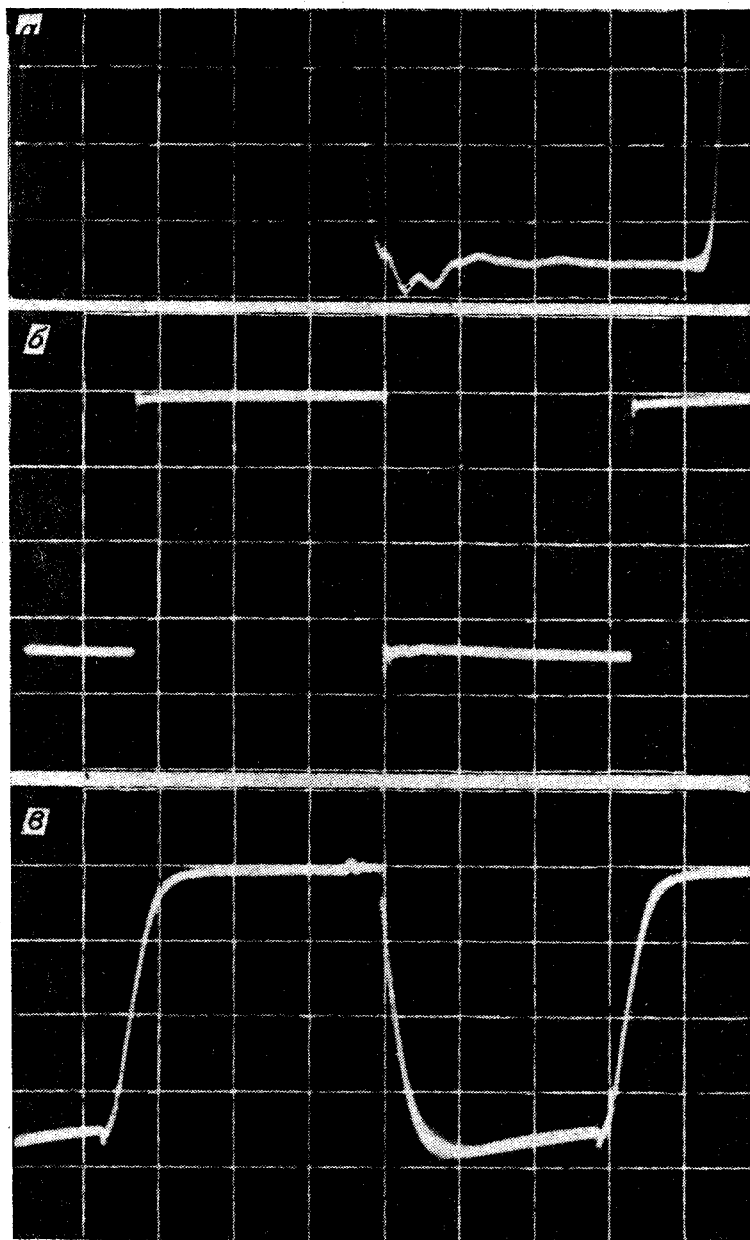


Рис. 7. Осциллограммы импульсов на выходе фотоприемника в режиме импульсного (а, б) и аналогового (в) управления (одна клетка по горизонтали: а — 100 нс, б, в — 5 мкс).

коммутатор и буферный регистр. Для управления блоком используются три команды: $A(1)F(17)$ — перевод триггера в состояние, соответствующее режиму управления с магистрали КАМАК; $A(0)F(16)$ — запись слова с шин $W1 - W8$ в буферный регистр; $A(0)F(0)$ — чтение состояния буферного регистра. По командам $C(S2)$, $Z(S2)$ происходит стирание содержимого буферного регистра и перевод блока в магистральный

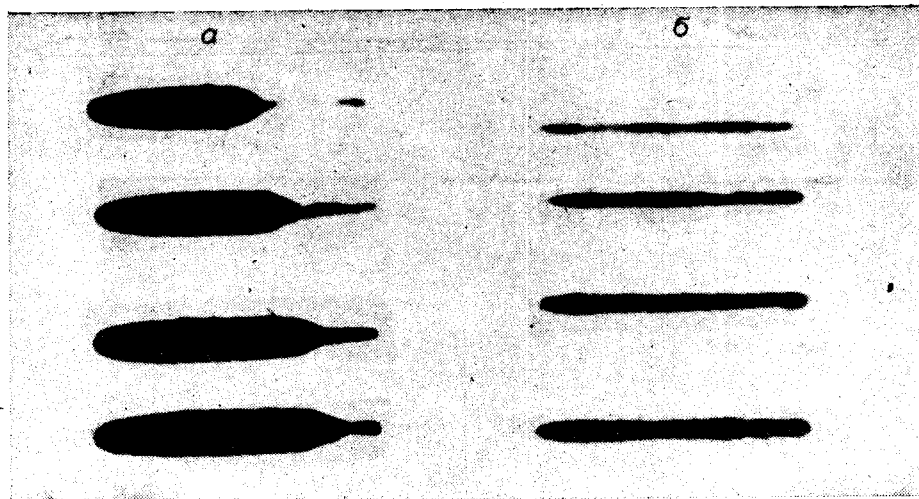


Рис. 8. Серии дорожек, записанных при одинаковой длительности управляющих импульсов (45 мкс) в аналоговом (а) и импульсном (б) режимах.

режим управления. Обратный перевод в автономный режим осуществляется сбросом триггера режима (М1—2, М1—3) кнопкой А/М. ДПП, преобразующий десятично-двоичный код с выхода программных переключателей П1—П3 типа ПП10-Ме в двоичный код, выполнен на микросхемах 155ПР6 (аналог SN74184) по схеме, приведенной в [16].

Экспериментальные результаты. Разработанная система управления использовалась в составе ЛФП для модуляции излучения аргоновых лазеров ЛГН-502 и ЛГ-106М-1, уровень высокочастотных (10—800 кГц) флуктуаций излучения которых составлял соответственно 20 и 5%. На рис. 7 приведены осциллограммы электрических сигналов с выхода фотоприемника 10 (величина напряжения на выходе фотоприемника пропорциональна интенсивности светового потока на выходе системы), полученных в режиме импульсного (а и б) и аналогового (в) управления. В первом случае модулирующий импульсный сигнал (уровни ТТЛ) подавался на вход «Строб», а во втором — на вход АУ. Длительность фронтов световых импульсов (~3 мкс) при управлении по аналоговому входу определяется величиной постоянной времени корректирующего звена 16 и может быть уменьшена до величины ~0,5 мкс ценой ухудшения (в 2—3 раза) подавления флуктуаций мощности излучения лазера на высоких частотах. Однако на практике при изготовлении на ЛФП фотошаблонов дифракционных элементов период плавного изменения мощности излучения лазера (при переходе с одного радиуса записи на другой), осуществляемого в аналоговом режиме управления, составляет 0,1—1 с, а включение и выключение производится в импульсном режиме. На рис. 8 показаны участки дорожек, записанных при одинаковой длительности управляющих импульсов (45 мкс), но для иллюстрации работы системы управления включение и выключение производилось в разных режимах: в аналоговом (а) и импульсном (б). Практическое отсутствие переходного процесса и короткие фронт и спад в режиме импульсного управления позволяют записывать с высокой точностью дорожки заданной длины, перекрытием которых формируются радиальные штрихи кодовых дисков и лимбов [6]. Импульсная модуляция может осуществляться в полосе частот 0—4 МГц, а аналоговая — в полосе 0—100 кГц.

Система управления уменьшает флуктуации мощности оптического излучения вплоть до частоты 250 кГц. На низких частотах (менее 300 Гц) относительная величина флуктуаций мощности пучка на выходе системы составляет менее 0,1% и определяется в основном собственными шумами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Коронкевич В. П. и др.** Киноформные оптические элементы — методы расчета: технология изготовления, практическое применение.— Автометрия, 1985, № 1, с. 3—24.
2. **Фотолиитография и оптика/Под ред. Я. А. Федотова и Г. Поля.**— М.: Сов. радио, 1974.
3. **Biedermann K., Holmgren O.** Large-size distortion-free computer-generated holograms in photoresist.— Appl. Opt., 1977, v. 16, N 8, p. 2014—2016.
4. **Koronkevich V. P. e. a.** Fabrication of kinoform optical element.— Optik, 1984, Bd 67, N 3, S. 259—266.
5. **Левинсон Г. Р., Смилга В. И.** Лазерная обработка тонких пленок (обзор).— Квант. электроника, 1976, т. 3, № 8, с. 1637—1659.
6. **Седухин А. Г.** Анализ помехозащищенности процесса формирования круговых шкал при сканирующем способе записи.— ОМП, 1984, № 12.
7. **Введение в фотолиитографию/Под ред. В. П. Лаврищева.**— М.: Энергия, 1977.
8. **Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Чуринов Е. Г., Юрлов Ю. И.** Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома.— Квант. электроника, 1985, т. 12, № 4, с. 755—761.
9. **Haskal H. M., Rosen A. N.** Power and focusing considerations for recording with a laser in the TEM₀₀ mode.— Appl. Opt., 1971, v. 10, N 6, p. 1354—1358.
10. **Макухин В. П., Савельев В. А.** Лазерные методы получения и обработки тонких пленок (обзор).— Зарубеж. радиоэлектроника, 1977, № 1, с. 30.
11. **Kubo T. e. a.** Investigations of holes mached by laser beam on Al and Cr thin films.— J. Appl. Phys., 1982, v. 53, N 4, p. 3231—3236.
12. **Пат. 4123780 (США).** Устройство для фильтрации помех в системе записи при помощи луча лазера.— Опубл. 31.10.78.
13. **Lager H. P.** Acoustooptic modulator intensity servo.— Appl. Opt., 1979, v. 18, N 17, p. 2905.
14. **Корольков В. П., Полещук А. Г.** Оптико-электронная система модуляции и стабилизации лазерного излучения.— В кн.: Тез. докл. Всесоюз. конф. «Робототехника и автоматизация производственных процессов». Барнаул, 1983, ч. 3, с. 56.
15. **Полещук А. Г., Химич А. К.** Устройство для линейного управления и стабилизации мощности излучения лазера акустооптическим модулятором.— ОМП, 1980, № 9, с. 36.
16. **The Bipolar Microcomputer Components Data Book for Design Engineers.**— Dallas, 1977, p. 7—294.

Поступила в редакцию 11 июля 1985 г.

УДК 531.792.2 : 621.822.57

А. Г. СЕДУХИН
(Новосибирск)

ВЛИЯНИЕ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ ВАЛА ШПИНДЕЛЯ С АЭРОСТАТИЧЕСКИМИ ПОДШИПНИКАМИ НА ТОЧНОСТЬ СИНТЕЗА КРУГОВЫХ ШКАЛ

При синтезе структуры круговых шкал на лазерном фотопостроителе, работающем в полярной системе координат [1], важно знать степень влияния, оказываемого на процесс записи различными дестабилизирующими факторами. Одним из существенных факторов, характерных для сканирующего способа записи шкал [2], является неуравновешенность вала шпинделя фотопостроителя. В шпинделе с аэростатическими подшипниками статический и динамический дисбаланс вала вызывают пространственные колебания оси вала относительно оси вращения. По этой причине в подшипниках возникают паразитные гармоники момента сопротивления вращению, которые проявляются в неравномерности скорости вращения вала и в процессе синтеза косвенно (через электронные и оптико-механические узлы фотопостроителя) влияют на точность нанесения углового положения штрихов круговых шкал.

В настоящей работе оценивается влияние неуравновешенности вала шпинделя с аэростатическими подшипниками на точность синтеза кру-