

**В. М. Ведерников, А. Г. Верхогляд, В. М. Гуренко, Л. Б. Касторский,
А. В. Кирьянов, В. П. Кирьянов, С. А. Кокарев, А. Р. Саметов**

(Новосибирск)

**ЛАЗЕРНЫЙ ГЕНЕРАТОР ИЗОБРАЖЕНИЙ
ДЛЯ СИНТЕЗА МИКРОРЕЛЬЕФА
ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
НА ТРЕХМЕРНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ**

Рассмотрены особенности построения основных систем управления в лазерном генераторе изображений, предназначенном для синтеза микрорельефа дифракционных оптических элементов на трехмерных поверхностях. Особое внимание уделено проблемам создания системы автофокусировки. Для данных применений эта система выполнена самонастраивающейся с функциями автоматического поиска, захвата и удержания поверхности записи на расстоянии наилучшей фокусировки. Приведены результаты записи дифракционных оптических элементов на различных типах поверхностей, в том числе на плоских поверхностях, покрытых пленками хрома или фоторезиста, и на сферической поверхности, покрытой пленкой хрома.

Введение. Известно, что для создания высокоэффективных ахроматизированных объективов используют наборы линз, изготовленных из стекол с существенно отличающимися показателями преломления (например, кроны и флинт). Важной особенностью дифракционных оптических элементов (ДОЭ) является то, что они обладают инверсной дисперсией по сравнению с дисперсией рефракционных элементов. Это позволяет создать на их основе ахроматизированные объективы, используя в линзах и ДОЭ стекла (или пластмассы) только одного типа [1]. Особенно высокие параметры объективов получаются, если в ДОЭ реализован непрерывный микрорельеф глубиной до 20 мкм и более [2]. Однако выполнить требование формирования малого пространственного периода при большой глубине профиля технологически довольно трудно. Предложено проблему создания высокоэффективных ахроматизированных объективов решать путем формирования гибридных структур [3], когда профиль ДОЭ формируется непосредственно на криволинейных поверхностях обычных рефракционных линз. Для реализации подобной методики требуются аппаратные средства, обладающие принципиально новыми возможностями.

Далее рассматриваются некоторые технические аспекты создания лазерного генератора изображений (ЛГИ), обеспечивающего возможность синтеза микрорельефа ДОЭ на криволинейных поверхностях обычных оптических элементов: зеркал или рефракционных линз.

Особенности построения лазерного генератора изображений, реализующего возможность синтеза микрорельефа на трехмерных поверхностях. Новый лазерный генератор изображений, обладающий возможностью синтеза микрорельефа ДОЭ на трехмерных осесимметричных поверхностях, создан в Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН на базе модели CLWS-300/C [4–6] и получил название CLWS-300/C-M (модернизированный).

Общий вид оптико-механического блока созданного ЛГИ представлен на рис. 1. Основные узлы блока: мощный аргоновый лазер, оптический канал записи, однокоординатный стол линейных перемещений и шпиндельный узел вращения – размещены на массивной гранитной плите, смонтированной на виброизолирующем основании. Оптический канал записи включает в свой состав оптику для транспортировки излучения аргонового лазера 1, два акустооптических модулятора 2 и головку записи 5 с системой автоматической фокусировки. Однокоординатный стол используется для линейного перемещения головки записи 5 оптического канала в радиальном направлении и состоит из портала 3 на аэростатических направляющих, двух линейных двигателей 6 и лазерного интерферометра 7. Шпиндельный узел вращения 4 служит для сканирования подложки с фоточувствительным слоем в угловом направлении и состоит из аэростатического шпинделя со встроенным двигателем вращения, установочного столика и датчика угла поворота. Исполнительные элементы однокоординатного стола, шпиндельного узла и системы автофокусировки обеспечивают соответствующие перемещения вдоль координатных осей R , φ и Z цилиндрической системы координат.

Система автоматической фокусировки, входящая в состав созданного генератора изображений, принципиально отличается от аналогичной системы, используемой в ЛГИ для записи изображений на плоских поверхностях. Известно, что при работе с плоскими поверхностями основная функция системы автофокусировки – поддержание постоянного зазора между рабочим объективом и поверхностью фоточувствительного слоя. В принципе в этих ситуациях бывает достаточно один раз перед началом работы вручную вывести объектив в точку наилучшей фокусировки и перевести ее в режим автофокусировки. Система при этом «захватит» поверхность и будет удерживать

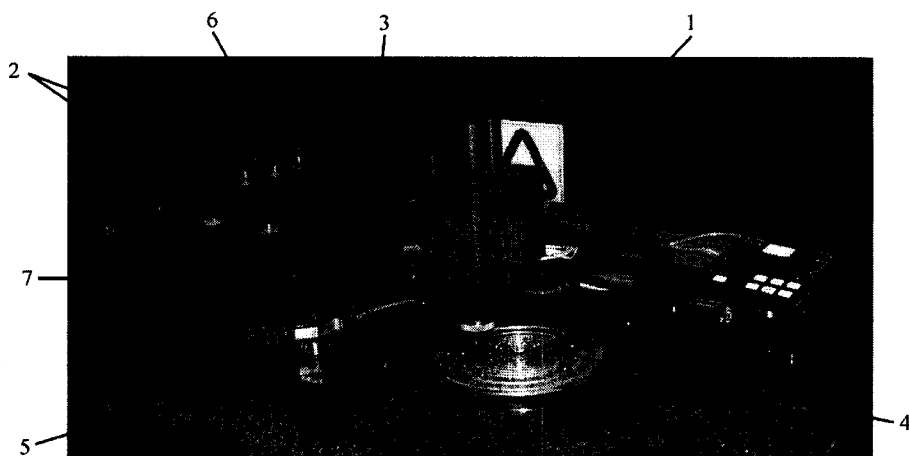


Рис. 1. Вид оптико-механического блока лазерного генератора изображений CLWS-300/C-M

ее до окончания процесса записи. В случае записи изображений на криволинейной поверхности исполнительные элементы, входящие в состав систем автофокусировки, должны обрабатывать не только быстрые отклонения поверхности, обусловленные ее движением в угловом направлении, но и медленные, обусловленные естественной кривизной поверхности при смещении портала в радиальном направлении. Диапазон этих смещений значительно превосходит рабочий диапазон перемещений исполнительных механизмов известных систем автофокусировки.

Таким образом, запись изображений на криволинейных поверхностях неизбежно приводит к необходимости реализовать трехкоординатную систему управления, в которой, по крайней мере, две координаты (R и Z) должны быть связанными. Кроме того, опыт эксплуатации ЛГИ модели CLWS-300/C показал, что для повышения скорости записи изображений целесообразно использовать режим записи «по спирали», когда жестко синхронизованы движения по двум координатам R и φ . Данный режим целесообразно использовать и в новом генераторе изображений. В этом случае система управления должна обеспечить движение одновременно по всем трем координатам (R , φ и Z). При этом настройки параметров регуляторов, обеспечивающие наиболее высокие показатели работы соответствующих систем (например, минимальное время переходного процесса, точность выхода в заданную позицию, стабильность скорости и другие), по каждому из направлений перемещения могут заметно отличаться в зависимости от реализуемого в данный момент режима движения. Оперативное изменение параметров регуляторов и алгоритмов их функционирования наиболее эффективно реализуется на основе цифровых методов. С этой целью в составе новой системы управления перемещениями по координате R для обеспечения нано- и субнанометрового разрешения используются лазерно-интерферометрические преобразователи перемещений цифрового типа [7] вместо лазерно-интерферометрических преобразователей с селективной коммутацией квадратур [8], формирующих аналоговые выходные сигналы, непосредственно используемые в регуляторах ЛГИ старой модели. Аналогичные изменения в методике преобразования выходных квадратурных сигналов фотоэлектрических растровых измерителей углов были реализованы также при создании цифровой системы управления движением по угловой координате. В целом системы управления перемещениями портала однокоординатного стола и ротора шпиндельного узла реализованы по единой схеме.

На рис. 2 представлена функциональная схема цифровых регуляторов, разработанных для систем управления перемещениями исполнительных элементов по координатам R и φ .

Квадратурные дифференциальные сигналы ($\sin X$, $\overline{\sin X}$, $\cos X$, $\overline{\cos X}$) датчиков, входящих в состав систем управления и несущих информацию о положении соответствующих объектов регулирования, поступают на входы управляемых усилителей U_1 и U_2 , затем с их выходов – на входы аналого-цифровых преобразователей АЦП₁ и АЦП₂. Частота дискретизации АЦП выбрана равной 16 МГц, что позволило обрабатывать входные сигналы с частотой до 4 МГц (фазовые соотношения между квадратурными сигналами не искажаются, если обеспечено не менее четырех отсчетов на период входных сигналов). Чтобы полностью использовать динамический диапазон обоих АЦП, осуществляется нормировка входных сигналов. Для этого в усилителях U_1 и U_2 с помощью счетверенного цифроаналогового преобразователя

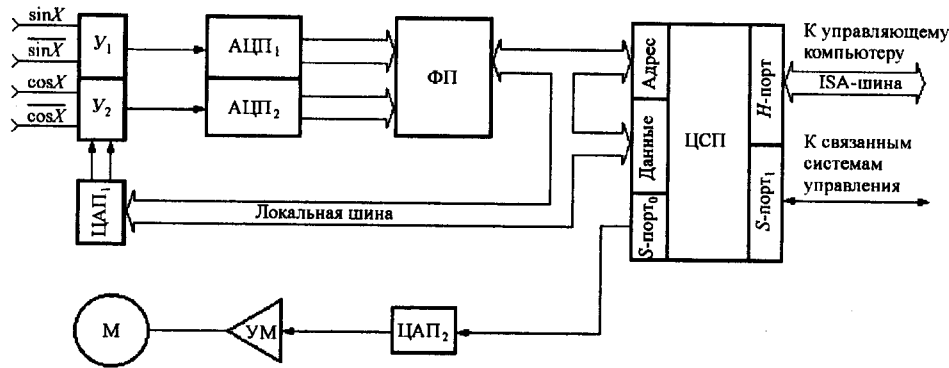


Рис. 2. Функциональная схема цифрового регулятора систем управления линейной и угловой координатами ЛГИ

ЦАП₁ устанавливаются соответствующие коэффициенты усиления. С выходов обоих АЦП информационные сигналы в цифровой форме поступают на вход функционального преобразователя (ФП), спроектированного на базе программируемой логической интегральной схемы. Этот преобразователь осуществляет предварительную обработку и преобразование сигналов датчика в текущее значение координаты объекта. Результатом предварительной обработки входных сигналов является сигнал управления коэффициентом усиления в U_1 и U_2 , передаваемый по локальной шине на ЦАП₁.

Текущее же значение координаты объекта по той же локальной шине передается в цифровой сигнальный процессор (ЦСП), который формирует основные выходные сигналы регулятора: сигнал управления перемещением и сигнал величины координаты.

В ЦСП реализован в цифровом виде классический вариант ПИД-регулятора, где П, И и Д обозначают пропорциональную, интегральную и дифференциальную составляющие сигнала управления соответственно. В основе алгоритма работы цифровых регуляторов лежит рекуррентное уравнение, описывающее в дискретном виде выбранный закон управления. Для ПИД-регулятора это уравнение имеет вид [9, 10]:

$$U_n = U_{n-2} + K_1 E_n + K_2 E_{n-1} + K_3 E_{n-2}, \quad (1)$$

где U_n и U_{n-2} – вычисленное управляющее воздействие на текущем и $(n-2)$ -тактах, а E_n, E_{n-1}, E_{n-2} – значения сигнала ошибки на последних трех тактах квантования. Коэффициенты

$$K_1 = K_p + K_D/T + K_I T, \quad K_2 = K_I T - 2K_D/T, \quad K_3 = K_D/T - K_p, \quad (2)$$

где K_p, K_D, K_I – «весовые» коэффициенты при пропорциональной, дифференциальной и интегральной составляющих соответственно, а T – период дискретизации (здесь $T = 50$ мкс).

Результат вычислений через синхронный последовательный порт ЦСП (S-порт₀) поступает на ЦАП₂. Аналоговый сигнал, сформированный ЦАП₂, через усилитель мощности (УМ) поступает на электродвигатель М, который осуществляет перемещение исполнительного элемента системы в направлении, обеспечивающем уменьшение сигнала ошибки до нуля.

Расчет полного значения координаты производится в ЦСП по специальному алгоритму после предварительной программной обработки текущих значений поступающих координат объекта. Вычисленное значение полной координаты представляет собой 32-разрядное целое число, которое передается через параллельный порт (*H*-порт) процессора в центральный процессор управляющего компьютера.

S-порт₁ служит для связи процессоров между собой в системах линейного и углового перемещений и используется для синхронизации перемещений, осуществляемых одновременно по этим координатам. Такая синхронизация необходима для реализации движения по сложной траектории (например, по спирали Архимеда с регулируемым шагом).

В данных системах управления реализовано более высокое разрешение по сравнению с предыдущей моделью ЛГИ, снижены требования к стабильности амплитуд квадратурных сигналов на их входах, и таким образом повышена устойчивость работы систем в целом. Физически каждая система управления реализована в виде соответствующего контроллера. Контроллеры управления линейной и угловой координатами представляют собой печатные платы размером 180 × 110 мм. Они устанавливаются в свободные слоты расширения IBM PC.

Для обеих систем управления экспериментально получены следующие технические результаты.

1. *Система линейных перемещений*: максимальные разрешение 0,6 нм, ошибка позиционирования ±5 нм, скорость перемещения 1 м/с, величина перемещения 2,5 м.

2. *Система угловых перемещений*: максимальные разрешение 0,5", ошибка позиционирования ±5", скорость вращения 30 об./с.

Концепция построения системы автофокусировки для записи структур на криволинейных поверхностях. В составе ЛГИ, предназначенного для синтеза микрорельефа ДОЭ на криволинейных поверхностях, необходимо использовать систему автоматической фокусировки (САФ), которая позволяла бы производить в большом динамическом диапазоне ($\Delta \geq 10$ мм) автоматический поиск поверхности, на которой предстоит произвести запись изображения («поверхности записи»), ее захват и последующее удержание в зоне наилучшей фокусировки микрообъектива записи с погрешностью $\delta < \pm 0,1$ мкм, даже при наличии достаточно быстрых (до 20–30 Гц) осцилляций поверхности записи с амплитудой до 10 мкм. Реально диапазон перемещений рабочего объектива при реализации функции автоматического поиска поверхности записи может достигать 30 мм.

Концепция реализации САФ с подобным набором функций состоит в том, что высокой чувствительности и быстродействия системы в широком динамическом диапазоне достигают за счет использования двух типов исполнительных элементов (один тип – быстродействующий, но с малым динамическим диапазоном, другой – сравнительно медленный, но с широким диапазоном) и одного общего высокочувствительного датчика сигнала ошибки фокусировки, выходной сигнал которого воспринимался бы последующими схемами однозначно во всем диапазоне перемещения рабочего микрообъектива относительно зоны наилучшей фокусировки. Для этого были разработаны: соответствующая схема оптической головки записи с большим динамическим диапазоном перемещений рабочего микрообъектива и двухконтурный цифровой регулятор. Кроме рассмотренной выше особенности, к концептуальным вопросам проектирования новой САФ относит-

ся выбор принципиальной схемы датчика сигнала ошибки фокусировки. Дело в том, что при записи на криволинейных поверхностях необходимо совмещать излучение технологического лазера с излучением зондирующего луча лазера датчика. Несоблюдение этого условия приводит к нарушению принципа компарирования Аббе и появлению погрешности фокусировки технологического лазера на поверхности записи. Так, при разнесении осей лазерных лучей всего на половину ширины следа взаимодействия ($d_{сл} \approx 1,0$ мкм) неточность совмещения фокальной плоскости объектива записи с поверхностью записи превысит предельно допустимую погрешность расфокусировки ($\delta < 0,1$ мкм) при углах наклона поверхности $\alpha \geq 12^\circ$. Ввиду этого использование датчиков расфокусировки триангуляционного типа, используемых в ЛГИ прежних моделей, не представляется возможным. Одной из подходящих для практической реализации схем может быть, например, схема датчика с перекрытием части зондирующего луча, отраженного от поверхности [11].

Упрощенная схема разработанной оптической головки записи приведена на рис. 3. В ее состав входят: датчик сигнала ошибки фокусировки (лазерный диод, нож Фуко, юстировочная пластина, двоянный фотодиод), микрообъектив, исполнительный линейный микродвигатель постоянного тока, шаговый электродвигатель, фотоприемник контроля результатов записи и видеокамера для визуального контроля.

Датчик сигнала ошибки фокусировки работает следующим образом. Полупроводниковый лазер, входящий в состав датчика, освещает поверхность записи. Изображение светового пятна, возникшее на этой поверхности, пере-

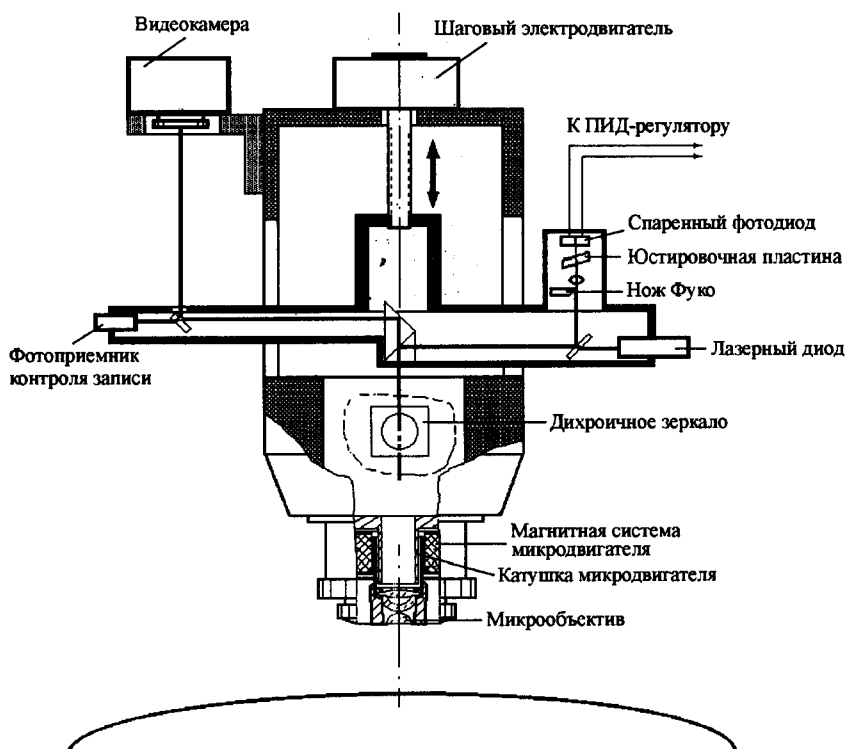


Рис. 3. Функциональная схема оптической головки для записи на криволинейных поверхностях

носится оптической системой датчика на поверхность спаренного фотодиода. При этом на пути прохождения пучка света, отраженного от поверхности, установлен нож Фуко, частично перекрывающий зондирующий луч, что приводит к искажению переносимого изображения (пятно оказывается асимметричным относительно оптической оси датчика). С помощью юстировочной пластины это пятно совмещается с границей раздела двух фотодиодов сдвоенного фотоприемника. Когда перетяжка гауссова пучка, выходящего из рабочего объектива, точно совмещена с поверхностью записи, пятно располагают точно посередине между двумя фотодиодами. При смещении перетяжки выше или ниже этой поверхности пятно соответственно смещается в направлении того или иного фотодиода, вызывая пропорциональное изменение фототоков.

В принципе работа данного датчика ошибки фокусировки ничем не отличается от работы известных прототипов [11]. Особенность конструкции датчика состоит в том, что при фокусировке излучения на криволинейные поверхности приходится учитывать, что световое пятно зондирующего лазера, перенесенное оптикой датчика на поверхность сдвоенного фотодиода, совершает на ней еще одно движение. Оно обусловлено движением записывающей головки ЛГИ в радиальном направлении, при котором зондирующий луч САФ движется по криволинейной поверхности с переменным углом наклона. В общем случае траектория движения светового пятна на поверхности спаренного фотоприемника, обусловленная этой причиной, – кривая линия. В частном случае осесимметричных поверхностей она вырождается в прямую линию. Для успешной работы датчика на осесимметричных криволинейных поверхностях необходимо, чтобы ограничивающая кромка ножа Фуко была параллельна границе раздела фотоприемников, которая, в свою очередь, должна располагаться вдоль направления движения головки.

Функциональная схема двухконтурного цифрового регулятора, используемого в системе автофокусировки ЛГИ CLWS-300/C-M, изображена на рис. 4. Первый контур управления, осуществляющий поиск поверхности записи и приведение рабочего микрообъектива САФ в окрестность зоны наилучшей фокусировки, включает в себя цифровой пропорционально-интегри-

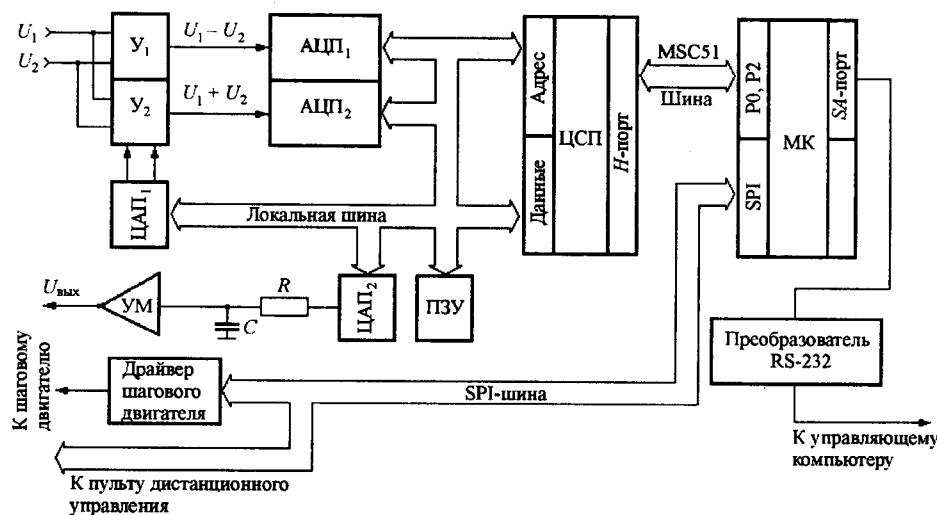


Рис. 4. Функциональная схема цифрового регулятора системы автофокусировки ЛГИ

рующий регулятор (ПИ-регулятор) на базе цифрового сигнального процессора, микроконтроллера (МК), драйвера шагового двигателя и описанных выше (см. рис. 3) датчика ошибки фокусировки и шагового двигателя. Второй контур управления, осуществляющий «захват» поверхности записи в окрестностях зоны наилучшей фокусировки, приведение микрообъектива непосредственно в данную зону и удержание его в этой зоне, включает в себя цифровой ПИД-регулятор на базе ЦСП, ЦАП₂, УМ и входящих в состав головки записи (см. рис. 3) датчика ошибки фокусировки и исполнительного линейного микродвигателя постоянного тока.

Как и в двух предыдущих системах управления, в новой САФ обработка сигналов ведется в цифровом виде. Для этого сигналы (U_1 и U_2) с выходов спаренного фотодиода головки записи, несущие информацию о положении поверхности записи, поступают на входы двух усилителей (Y_1 и Y_2), имеющих управляемые коэффициенты передачи. При этом усилитель Y_1 реализует операцию вычитания сигналов, а усилитель Y_2 – сложения. Известно, что в подобных схемах разностный сигнал ($U_1 - U_2$), снимаемый с выхода усилителя Y_1 , несет информацию об ошибке фокусировки, а суммарный сигнал ($U_1 + U_2$), снимаемый с выхода усилителя Y_2 , о текущем значении коэффициента отражения оптической поверхности.

Для того чтобы повысить точность работы САФ, разностный сигнал ($U_1 - U_2$) нормируют на суммарный сигнал ($U_1 + U_2$). В разработанной САФ данная операция реализуется в ЦСП в цифровом виде. Для этого оба сигнала поступают на входы быстродействующих аналого-цифровых преобразователей АЦП₁ и АЦП₂ соответственно. Частота дискретизации обоих АЦП выбрана равной 120 кГц. Вычисленное нормированное значение разностного сигнала используется для расчета выходного сигнала регулятора. Сформированный в ЦСП сигнал управления через ЦАП₂, RC-фильтр нижних частот и УМ поступает на линейный двигатель перемещения объектива, замыкая таким образом второй контур управления положением микрообъектива записи.

Для того чтобы снизить влияние погрешности дискретности в АЦП на качество работы САФ, оба сигнала, поступающие на входы, подвергаются предварительной нормализации за счет установки соответствующих коэффициентов усиления в обоих усилителях, подготавливающих сигналы для этих АЦП. Процедура автоматического регулирования усиления (АРУ) реализуется в ЦСП по схеме стабилизатора максимального значения суммарного сигнала ($U_1 + U_2$) на базе ПИ-регулятора. Рассчитанное значение коэффициента усиления передают по локальной шине на вход счетверенного цифроаналогового преобразователя ЦАП₁. Включение цифровых резисторов последнего в соответствующие цепи усилителей Y_1 и Y_2 позволяет замкнуть цепи АРУ в каждом из них. Реализованная система АРУ обеспечивает устойчивую работу системы автофокусировки при изменении коэффициента отражения в 10 раз.

Техническая реализация алгоритма работы цифрового ПИД-регулятора во втором контуре регулирования САФ несколько отличается от описанной выше схемы построения цифровых регуляторов для линейной и угловой координат ЛГИ. Это отличие возникло в связи с тем, что САФ выполнена двухконтурной с различными стратегиями регулирования в каждом из них (ПИ-регулирование в первом контуре и ПИД-регулирование во втором). По этой причине потребовалось вычислить раздельно три основные составляющие: пропорциональную, интегральную и дифференциальную. При этом пропор-

циональная составляющая выступает как ошибка фокусировки, интегральная составляющая – как сумма ошибок фокусировки в каждом такте квантования и дифференциальная составляющая – как разность текущей ошибки фокусировки и ошибки фокусировки в предыдущем такте квантования.

Цифровой ПИ-регулятор первого контура выполнен на микроконтроллере. Этот регулятор, используя вычисленные в ЦСП значения пропорциональной и интегральной составляющих, рассчитывает для компенсации текущей ошибки фокусировки необходимое количество шагов шагового двигателя.

Функционирование второго контура управления полностью обеспечивает ЦСП. В соответствии со стратегией ПИД-регулирования все три составляющие суммируются с учетом соответствующих коэффициентов. При этом дифференциальная составляющая предварительно фильтруется цифровым фильтром с частотой среза $F_{cp} = 800$ Гц. Полученная в результате суммирования величина используется для задания значения тока в обмотке линейного двигателя перемещения объектива.

На микроконтроллер возложен также ряд сервисных функций САФ, в частности функция поиска и захвата поверхности записи. В этом режиме МК использует вычисленное в ЦСП значение тока для вывода блока фокусировки в зону захвата. В этом режиме он принудительно размыкает второй контур регулирования.

Также на МК возложены функции общего управления системой автофокусировки, функции связи с управляющим компьютером и дистанционным пультом управления оператора.

Быстродействие этого контура позволяет компенсировать смещения объектива относительно поверхности с частотой порядка 1 Гц. Точность совмещения фоточувствительной поверхности объекта с точкой фокусировки объектива в этом случае ограничена минимальным шагом шагового двигателя и составляет 0,002 мм. Поэтому на расстояниях менее 0,05 мм от поверхности записи начинает работать второй контур управления перемещением объектива. Исполнительный элемент этого контура выполнен в виде миниатюрного линейного двигателя типа звуковой катушки. Подобный привод позволил совмещать поверхность записи с точкой фокуса объектива с погрешностью менее 0,1 мкм. Данный контур управления достаточно быстродействующий, и с его помощью можно уверенно компенсировать отклонения объекта от точки фокусировки в диапазоне ± 10 мкм с частотами до 300 Гц.

Как отмечалось выше, использование цифрового принципа управления позволяет организовать адаптивный алгоритм регулирования. Исследования данного режима в САФ представляют особый интерес для оценки, например, потенциальной возможности записи дифракционных структур на произвольных поверхностях. На рис. 5 приведены экспериментальные результаты, полученные при исследовании предельных возможностей новой цифровой САФ. В частности, исследовалась зависимость коэффициента подавления расфокусировки излучения от частоты колебания подложки. Прежде всего исследовался классический режим включения регулятора (кривая 1), когда все необходимые параметры регулятора устанавливались заранее. Затем исследовался адаптивный режим (кривая 2), когда необходимые для получения наивысших результатов параметры регулятора настраивались процессором по заданной программе постепенно, начиная с момента включения регулятора, и с соблюдением требований обеспечения устойчивости системы на всех режимах. Первый режим назван режимом «жесткого» включения. Этот режим работы является обычным для большинства ПИД-регуляторов, в

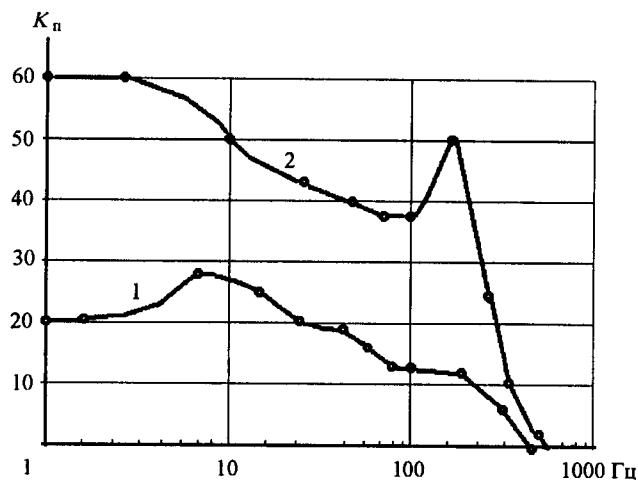


Рис. 5. Зависимость коэффициента подавления ($K_{п}$) расфокусировки цифровой САФ от частоты колебаний подложки

том числе собранных на аналоговых компонентах. Второй режим назван режимом «мягкого» включения. Режим мягкого включения позволил, как видно из приведенных графиков, в 3 раза поднять коэффициент подавления расфокусировки на частотах, близких к нулевым. Частота среза в обоих случаях осталась практически одинаковой.

Экспериментальные результаты. Разработанный лазерный генератор изображений успешно прошел испытания в Институте физики г. Ланьчжоу (КНР). Были подтверждены следующие технические характеристики: максимальный диаметр рабочего поля 285 мм; разрешение по радиальной координате 0,6 нм; разрешение по угловой координате 0,5 угл. с; разрешение по координате Z 0,02 мкм; диапазон перемещений по координате Z 30 мм; пространственное разрешение 1000 лин./мм; максимальный угол кривизны поверхности 0,2 рад (12°).

На этих испытаниях проверка работоспособности созданной установки производилась с помощью тестовых структур, записываемых в пленках хрома и фоторезиста на плоских и криволинейных поверхностях.

Режим записи изображений на плоских поверхностях с помощью нового генератора изображений CLWS-300/C-M оценивался путем записи тестовых структур, разработанных в Берлинском институте оптики (BIFO, Берлин, Германия), специально для проведения приемосдаточных испытаний установок типа CLWS-300/C [12]. На рис. 6, а–с представлены некоторые из микрофотографий тестовых структур, записанных на плоских пластинках в пленках хрома. Изображения микроструктур сделаны в отраженном свете на микроскопе МИИ-4, оснащенный ПЗС-камерой. Светлые участки соответствуют металлизированным участкам протравленных подложек.

На криволинейной поверхности производилась запись микроструктуры ДООЭ (рис. 7, а), образующей вместе с подложкой гибридный элемент типа линзакон [13]. Для этого на выпуклую сторону плосковыпуклой линзы предварительно было нанесено хромовое покрытие. Затем были записаны две системы концентрических колец (рис. 7, б) с периодом 6,6 мкм. Радиус кривизны поверхности подложки равнялся 240 мм, диаметр 52 мм. По краю под-

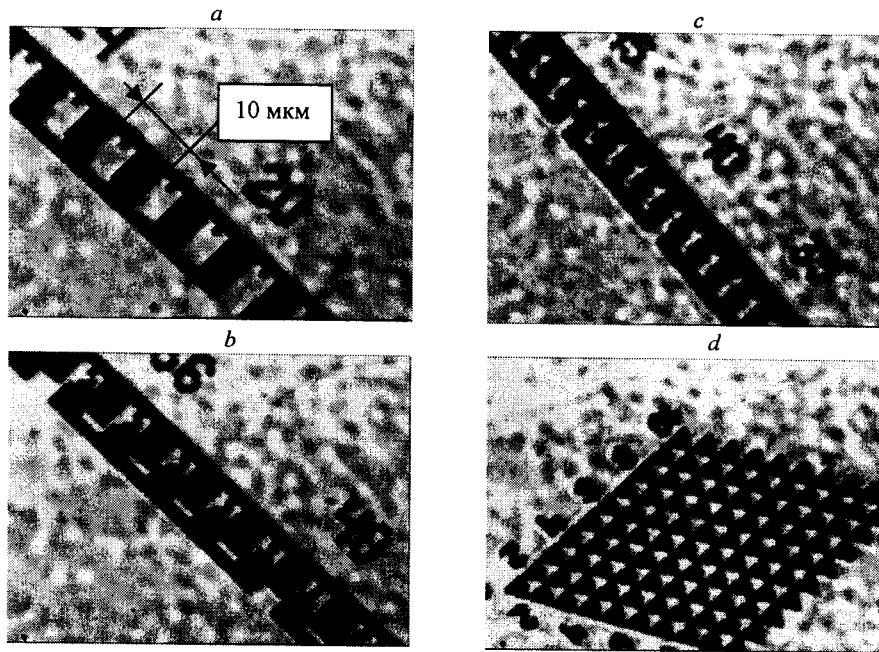


Рис. 6. Микрофотографии хромовых шаблонов тестовых структур

ложки была записана служебная информация с использованием шрифтов, наклонные границы которых имели вид ступенек (рис. 7, *c*). Запись осуществлялась при частоте вращения шпинделя 10 об./с. Перемещения по радиальной координате производились с шагом 0,5 микрона. Длина волны излучения записывающего лазера 0,488 микрона.

И, наконец, проверялась возможность нового генератора изображений записывать микроструктуры с непрерывным профилем. Для этого записывалась линза Френеля на плоской подложке, покрытой пленкой фоторезиста. На рис. 8 приведена микрофотография профиля одной из зон линзы Френеля

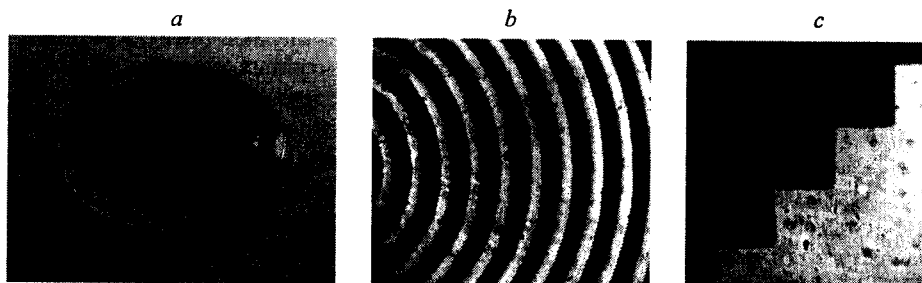


Рис. 7. Результаты записи тестовых структур: общий вид подложки с записанными микроструктурами (*a*), изображение микроструктуры в центральной области подложки (*b*), изображение ступенчатой границы (высота и ширина ступеней 12 мкм) (*c*)



Рис. 8. Интерферограмма микрорельефа участка дифракционной линзы

с фокусным расстоянием $F = 120$ мм и диаметром 22 мм. Ширина зоны около 60 мкм и глубина фазового профиля около 1 мкм.

Заключение. Лазерный генератор изображений для синтеза микроструктур на трехмерных аксиально-симметричных поверхностях создан на основе генератора изображений CLWS-300/С путем модернизации его оптического тракта, системы автоматической фокусировки, систем управления перемещениями по радиальной и угловой координатам. Для записи изображений на трехмерных аксиально-симметричных поверхностях система автофокусировки выполнена самонастраивающейся с функциями автоматического поиска, захвата и удержания поверхности записи на расстоянии наилучшей фокусировки. Достигнута фокусировка излучения с погрешностью менее $\pm 0,1$ мкм. Автоматический поиск и захват поверхности осуществлялся в широком (до 30 мм) динамическом диапазоне отклонения поверхности записи от исходного положения объектива. Результативность внесенных изменений была экспериментально проверена посредством записи микроструктур ДОЭ на различных типах поверхностей, в том числе на плоских поверхностях, покрытых пленками хрома и фоторезиста, и на сферической поверхности, покрытой пленкой хрома.

Созданный генератор изображений позволяет формировать сложный профиль ДОЭ непосредственно на криволинейных поверхностях обычных оптических элементов типа рефракционные линзы или зеркала, что дает возможность существенно расширить области применения методов компьютерного синтеза оптических элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Moris G. M., Walsh K. F., McIntyre K. J.** Optical system design with diffractive lens // *Diffractive Optics '97: EOS Topical Meetings Digest Series*. 1997. **12**. P. 28.
2. **Kley E.-B.** Lithographic techniques in diffractive optics // *Ibid*. P. 72.
3. **Kley E.-B., Schnabel B., Hübner H., Zeitner U. D.** Application of metallic subwavelength gratings for polarization devices // *Proc. SPIE*. 1996. **2863**.
4. **Kiryayov V. P.** Laser setup for flat optical components fabrication with submicron resolution // *Proc. SPIE*. 1997. **3091**. P. 66.

5. **Poleshchuk A. G., Churin E. G., Koronkevich V. P. et al.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Appl. Opt. 1999. **38**, N 8. P. 1295.
6. **Анциферов А. П., Ведерников В. М., Верхогляд А. Г. и др.** Специализированный лазерный генератор изображений для синтеза прецизионных фотошаблонов оптических элементов с произвольной топологией // Датчики и системы. 1999. № 2.
7. **Кирьянов В. П.** Метод прямого восстановления фазы квадратурных сигналов и его использование в системах позиционирования с нанометровым разрешением // Автометрия. 1997. № 3. С. 103.
8. **Кирьянов В. П., Кокарев С. А.** Лазерно-интерферометрический преобразователь перемещений с субнанометровым разрешением // Автометрия. 1998. № 2. С. 3.
9. **Katz P.** Digital Control Using Microprocessor. Prentice-Hall Intern. Inc., 1981. Book 1.
10. **Implementation** of PID and Deadbeat Controllers with the TMS320 Family. Application Report: SPRA-083, Texas Instrument. <http://www.ti.com>
11. **Handbook** of Optics. MacGraw-Hill, Inc., 1995. Vol. VI. P. 31.14.
12. **Guhr J.** Test results of the circular laser writing system CLWS-300 // Diffractive Optics: EOS Topical Meeting Digest Serial. 1997. **12**. P. 206.
13. **Koronkevich V. P., Mikhaltsova I. A., Churin E. G., Yurlov Yu. I.** Lensacon // Appl. Opt. 1995. **34**. P. 5761.

*Конструкторско-технологический институт
научного приборостроения СО РАН,
E-mail: kiryanov@tdisie.nsc.ru*

*Поступила в редакцию
28 мая 2003 г.*