

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЗАПИСИ
СКРЫТЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ПЛЕНКАХ ХРОМА
ПРИ СИНТЕЗЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ
УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР**

А. В. Кирьянов, В. Г. Никитин

*Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41
E-mail: alexey@tdisie.nsc.ru*

Проанализированы специфические источники погрешности формирования топологии углоизмерительных структур с помощью метода растрового сканирования на основе термохимической технологии записи скрытых изображений в пленках хрома. Установлена связь данного вида погрешностей с особенностями динамики нагрева пленок хрома лазерным излучением. Предложен и реализован алгоритм коррекции процесса записи структур, обеспечивающий точность синтеза углоизмерительных структур на уровне единиц угловых секунд.

Ключевые слова: лазерный генератор изображений, технология записи скрытых изображений, прецизионные углоизмерительные структуры, фотоэлектрические угловые преобразователи.

Введение. Среди многочисленных применений лазерных генераторов изображений с круговым сканированием типа CLWS-300/С одним из наиболее важных является изготовление прецизионных угловых шкал, растров и многоразрядных кодовых дисков [1], которые в данной работе объединены под общим названием – углоизмерительные структуры. До последнего времени при производстве этих изделий использовались, как правило, специализированные системы и устройства.

Например, при изготовлении угловых шкал для геодезических приборов применялся целый комплекс устройств, куда входили круговые делительные машины и пантографы, с помощью которых наносились штрихи и проводилась оцифровка лимбов.

При производстве прецизионных растров для инкрементальных угловых преобразователей были созданы специальные комплексы [2, 3], реализующие принцип проекционной фотолитографии.

Для изготовления многоразрядных кодовых дисков, используемых в абсолютных угловых датчиках, в Московском институте электронной техники и в Ленинградском институте точной механики и оптики разработаны и созданы разнообразные синтезирующие устройства типа автоматических спе-

циальных делительных машин и автоматизированной фотомеханической делительной машины соответственно [4, 5].

Отличительной особенностью лазерных генераторов изображений с круговым сканированием является то, что они позволяют синтезировать любые из указанных выше углоизмерительных структур простой сменой программы управления записью. Непрерывное движение по угловой координате существенно сокращает время синтеза структур. Более того, высокая плотность мощности в пятне ($\sim 10^7$ Вт/см²) дает возможность производить запись скрытых изображений непосредственно в пленках хрома [6] на стеклянных (кварцевых) подложках (с последующим однократным жидкостным травлением), традиционно применяемых для изготовления рабочих образцов шкал. Это позволило в условиях промышленного производства заметно упростить технологический процесс изготовления прецизионных структур [7].

Опыт использования данной технологии для формирования топологии многоразрядных кодовых дисков выявил наличие специфических погрешностей, связанных с особенностями теплового механизма записи изображений в пленках хрома. Некоторые из них были рассмотрены в работах [8, 9]. Однако погрешности, проявляющиеся особенно резко в условиях формирования топологии элемента при изменении линейной скорости сканирования излучения в широких пределах, не были затронуты в этих работах.

Цель представленной работы – показать особенности формирования топологии многоразрядных кодовых дисков при использовании термохимической записи и коррекции возникающих при этом искажений топологии.

Анализ специфических требований к процессу формирования углоизмерительных структур. Важнейшим требованием при записи углоизмерительных структур является, безусловно, обеспечение необходимой точности формирования их топологии. Наиболее жестко вопрос сохранения высокой точности стоит при синтезе многоразрядных кодовых дисков. Топология кодового диска, записанного в двоичном коде, представлена на рис. 1, *a*.

Для углоизмерительных структур принципиально важно, чтобы границы элементов топологии, относящихся к различным кодовым разрядам (расположенным на разных кодовых дорожках), имели точное взаимное положение. Если не учитывать конечный размер записывающего пучка лазера на поверхности фоточувствительного слоя и производить включение и выключение излучения точно в заданных угловых позициях (рис. 1, *b*), происходит смещение сформированных границ элементов топологии на половину диа-

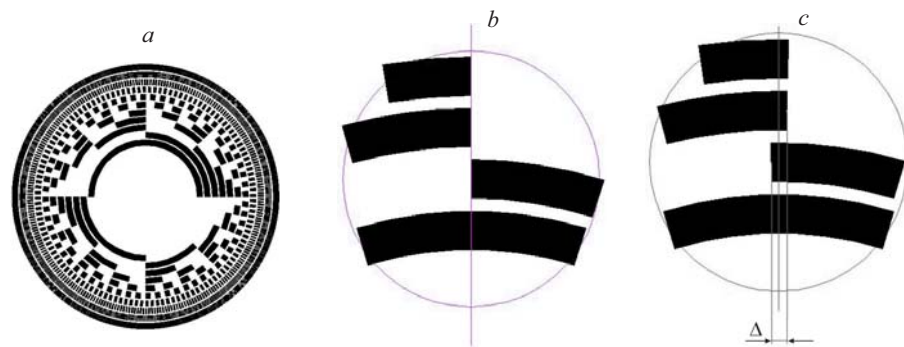


Рис. 1

метра записывающего пучка в обе стороны от точки включения и выключения, которое приводит к появлению дополнительной погрешности синтеза структуры Δ (рис. 1, *c*). Максимальная величина угловой погрешности изготовления топологии многоразрядного кодового диска, возникающая вследствие конечного размера записывающего пучка диаметром d_0 (в микрометрах), может быть оценена из следующего выражения:

$$\Delta \approx (\partial_{R_{out}} + \partial_{R_{in}}) = \frac{d_0 A}{4\pi \cdot 10^3} \left(\frac{1}{R_{out}} + \frac{1}{R_{in}} \right) = d_0 \left(\frac{1}{R_{out}} + \frac{1}{R_{in}} \right) \cdot 10^2 \quad (1)$$

Здесь Δ – погрешность (в угловых секундах); $\partial_{R_{out}}$ и $\partial_{R_{in}}$ – погрешности формирования внешнего и внутреннего разрядов диска соответственно; $A = 1296000$ (число угловых секунд в 360°); R_{out} и R_{in} – радиусы внешнего и внутреннего разрядов диска (в миллиметрах).

В соответствии с ГОСТ РВ 52015-2003 для данного типа угловых преобразователей допускается погрешность, не превышающая $1/2$ углового размера младшего разряда [10]. Например, для 16-разрядного кодового диска угловой размер младшего разряда равен $19,77''$. Следовательно, допустимая погрешность структуры не должна превышать 10 угл. с. Если формируется кодовый диск с внешним диаметром структуры, равным 80 мм, и ширина кольцевых зон каждого двоичного разряда равна 2 мм, то при расстоянии между кольцевыми зонами 0,2 мм внутренний диаметр структуры будет 10 мм. В этом случае согласно выражению (1) игнорирование конечных размеров записывающего пучка вызовет расхождение в положениях границ элементов старшего и младшего разрядов порядка $22''$, что в 2 раза превышает погрешность, допустимую для такого вида преобразователей.

Для уменьшения данных искажений при формировании структур используют программную коррекцию задаваемых размеров топологических элементов [11]. Например, применяют принудительное смещение угловых координат точек включения и выключения излучения в зависимости от текущего угла поворота, для того чтобы скомпенсировать увеличение линейного размера топологических элементов на половину диаметра записывающего пучка.

Анализ экспериментальных результатов, регистрируемых при формировании структур. Вышеуказанный алгоритм коррекции погрешностей эффективно применяется для синтеза изображений в пленках фоторезиста. При синтезе скрытых изображений в пленках хрома использование подобного алгоритма имеет свои особенности. В этом случае при формировании границ топологии существенную роль играет динамика тепловых процессов, лежащих в основе механизма записи [12]. Конфигурация следа, оставляемого лазерным лучом в пленке хрома, существенно различается в зонах включения и выключения излучения особенно при больших радиусах записи (более 3–5 мм). На рис. 2, *a, b* представлены микрофотографии дуг шириной 1 мкм и длиной 10 мкм при радиусах записи, равных 63 мм (*a*) и 1 мм (*b*). Скорость вращения составила 10 оборот./с, диаметр записывающего пучка равен 1 мкм (по уровню e^{-2}). Элементы топологии на рисунках имеют темный цвет. На штрихах (см. рис. 2, *a*) наблюдается обострение края следа в зоне включения. При малых радиусах записи (см. рис. 2, *b*) это различие не наблюдается. (Стрелками обозначено направление движения пучка.)



Рис. 2

Искажения проявляются и при формировании топологических элементов, синтезируемых путем так называемой «заливки» зоны, реализуемой последовательным сдвигом записывающего пучка в радиальном направлении с шагом, меньшим формируемой ширины следа. На рис. 2, *c* представлена микрофотография элемента размером 10×10 мкм (хром имеет белый цвет, стекло – темный). На

ней видны искажения переднего края элемента в области включения излучения и достаточно ровный край в области выключения. Дополнительные тестовые записи подобных структур [13] показали, что помимо повышенной изрезанности края границы элемента формируются с разным смещением относительно момента подачи управляющих сигналов. В области выключения излучения граница элемента формируется со сдвигом по ходу записи приблизительно на половину диаметра записывающего луча, т. е. на 0,5 мкм. При больших радиусах записи в области включения граница элемента смещена по ходу записи (а не против хода!) на 1,5–2,0 мкм, что приводит к уменьшению реального размера синтезируемого штриха относительно расчетного значения. При малых радиусах записи наблюдается ожидаемое смещение передней границы элемента против хода записи. Такая зависимость расположения передней границы формируемого элемента от радиуса записи (при стабильной угловой скорости вращения подложки это означает зависимость от линейной скорости движения светочувствительного слоя) может быть объяснена лишь инерционностью тепловых процессов в системе «пленка хрома–стеклянная (кварцевая) подложка».

Анализ динамики нагрева пленки хрома при растровом сканировании. Время взаимодействия лазерного излучения с участком системы «пленка–подложка» размером, равным диаметру записывающего луча, является существенным фактором процесса разогрева. Этот процесс исследовался путем решения задачи теплопроводности для следующих условий [13]: радиус записывающего пятна $r_0 = 0,5$ мкм по уровню e^{-2} , скорость вращения 15 оборот./с, радиус записи может меняться от 6,6 до 150 мм, толщина пленки хрома порядка 100 нм. При этих параметрах время взаимодействия составляет 1 мкс. Известно, что в таких условиях процесс разогрева будет существенно зависеть от теплофизических свойств пленки и подложки [12]. Результаты численного решения линейной задачи теплопроводности [13] приведены в графическом виде на рис. 3. Они представляют собой изолинии максимальных температур, достигнутых на поверхности пленки при записи единичного штриха длиной 5 мкм на разных радиусах записи R ($R = 150; 33,3$ и 6,6 мм). Координаты точек включения и выключения лазерного излучения на рисунке обозначены жирными вертикальными линиями. Температурное

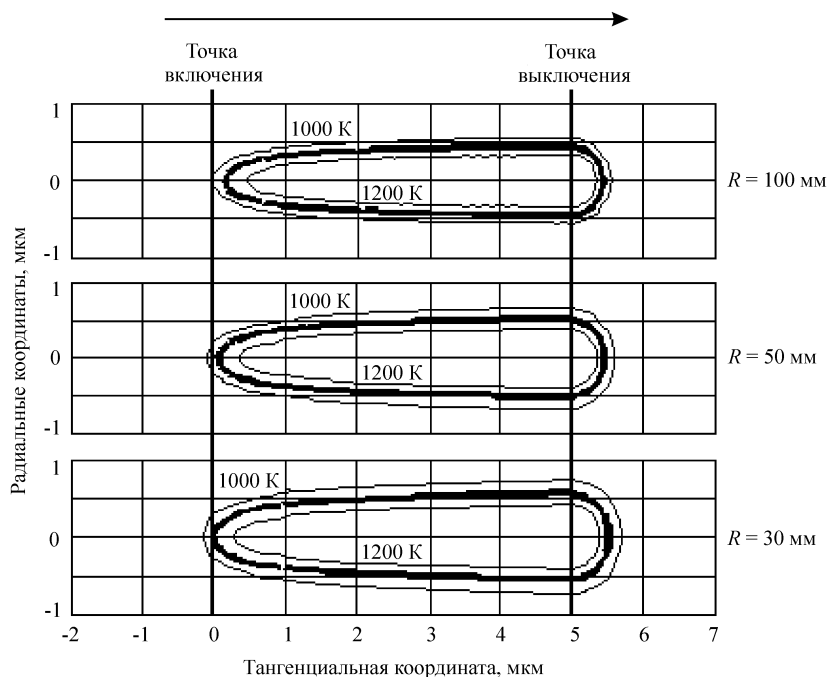


Рис. 3

поле представлено изолиниями со значениями температур, равными 1200, 1100 и 1000 К. На рисунке по ходу движения слоя (стрелкой обозначено направление лазерного пучка) просматривается явная асимметрия температурного поля. Видно, что в области включения лазерного излучения (координата $x = 0$) только отдельные изолинии выходят в отрицательную область, в то время как остальные лежат в области взаимодействия излучения с пленкой (область от $x = 0$ до $x = 5$ мкм), а в области выключения все изолинии выходят за область взаимодействия. Более того, здесь все изолинии представляют собой концентрические полуокружности в отличие от зоны включения, где они близки к параболам. Интересно проследить положение изолинии со значением температуры $T = 1100$ К (на рисунке выделена жирной линией), которой можно поставить в соответствие реально получаемый след шириной в 1 мкм после воздействия лазерного излучения и проявления с помощью специального селективного травителя. (В ходе травления пленки удаляется та часть хрома, которая не подвергалась воздействию лазерного излучения. Оставшаяся часть представляет собой интересующий нас след взаимодействия излучения с пленкой.) Эта изолиния практически на всех графиках начинается сразу же за точкой с координатой 0 и заканчивается в точке с координатой 5,5 мкм, т. е. выходит за пределы зоны взаимодействия на 0,5 мкм. Но тот факт, что изолиния начинается от 0 для всех радиусов записи и практически не зависит от текущего радиуса, свидетельствует о более сложном механизме формирования реального следа в пленке, чем просто ее разогрев.

Таким образом, результаты расчетов указывают на характерное искажение формы следа взаимодействия лазерного излучения с движущейся пленкой хрома. Конфигурация температурного поля, рассчитанного на основе ли-

нейной модели, не дает полного совпадения с конфигурацией реального следа, оставленного излучением в пленке. По-видимому, здесь присутствует некоторый процесс, производный от разогрева и имеющий еще большую инерцию, чем исходный процесс разогрева. В работе [14] указывалось, что таким процессом может быть взрывная кристаллизация пленки хрома. Термохимические процессы в данном случае зависят от теплофизических характеристик пленки, которые, в свою очередь, существенно зависят от метода и условий напыления.

Вследствие этих причин для коррекции искажений топологии структур необходимо использовать данные экспериментов по определению реальных задержек, имеющих место при формировании топологии элементов.

Процедура коррекции искажений топологии структур в тангенциальном направлении. Зависимость величины смещения границы следа от радиуса записи (как и любую монотонную функцию на небольшом участке) возможно аппроксимировать линейно. В процессе записи длина каждого штриха в области выключения увеличивается на вычисленное значение поправки. При этом координата включения пучка остается неизменной, а координата выключения смещается по ходу движения. Примем следующие обозначения (рис. 4): R – текущий радиус записи; R_m – радиус, на котором было измерено значение разрыва следа; R_0 – значение радиуса записи, при котором разрыв исчезает; $A(R)$ – величина разрыва следа в области начала оборота; Δ – угловой размер поправки.

Тогда $A(R)$ примет следующий вид:

$$A(R) = \frac{R - R_0}{R_m - R_0} A_m. \quad (2a)$$

Угловая же величина разрыва

$$\Delta(R) = \frac{A(R)}{R} = \frac{A_m}{R} \frac{R - R_0}{R_m - R_0}. \quad (2б)$$

Действительно, при $R = R_0$ поправка обращается в 0, а при $R = R_m$

$$\Delta(R_m) = \frac{A_m}{R_m} \frac{R_m - R_0}{R_m - R_0} = \frac{A_m}{R_m}.$$

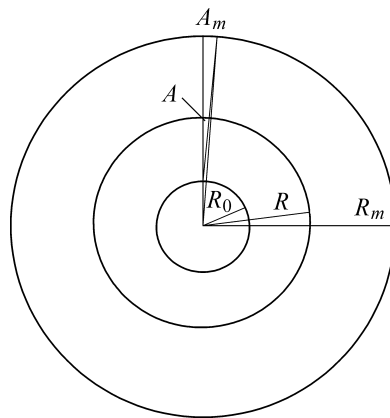


Рис. 4

Для $R \gg R_0$ величиной R_0 можно пренебречь. Тогда угловая поправка предельно упростится, что важно для работы оператора круговой лазерной записывающей системы в производственном процессе:

$$\Delta = \frac{A_m}{R_m} \cdot 10^6. \quad (3)$$

Множитель 10^6 в (3) добавлен для удобства оператора, чтобы не требова-

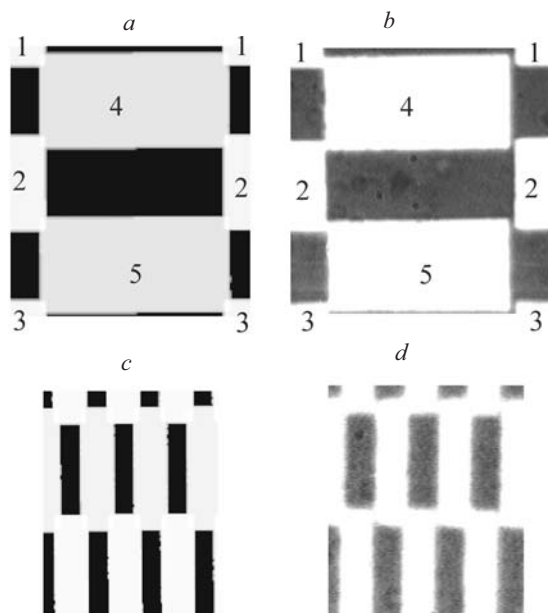


Рис. 5

лось большое число десятичных нулей при вводе данных в управляющую программу. Необходимо подчеркнуть, что величина $A_m(R)$ в значительной степени зависит от параметров пленки и свойств подложки и иногда может быть нулевой или даже отрицательной [13].

Данный метод коррекции предварительно был сформирован программой-эмулятором и апробирован в тестовых записях угловых структур при скорости вращения 10 оборот./с на различных радиусах: 30 мм (рис. 5, *a, b*) и 1 мм (рис. 5, *c, d*). Записывались штрихи размером 20 мкм в тангенциальном и 10 мкм в радиальном направлениях. Для анализа методики коррекции формировалась структура типа шахматной доски с перекрытием в углах. Для этого сначала на заданном радиусе были записаны штрихи первой серии. Затем на меньших радиусах записаны штрихи второй и третьей серии. Четвертая серия штрихов была сдвинута по углу на 14 угл. с и по радиусу на 8 мкм относительно штрихов первых трех серий. Последней была записана пятая серия, которая по углу имела сдвиг, аналогичный штрихам четвертой серии, но на меньшем радиусе. В результате должны сформироваться структуры, приведенные на рис. 5, *a, c*.

Изображения реальных штрихов в отраженном свете показаны на рис. 5, *b*. В синтезируемой структуре наблюдается разрыв порядка 1 мкм.

Аналогичная запись, сделанная на радиусе 1 мм, представлена на рис. 5, *d*. Видно, что разрывы между структурами отсутствуют.

И, наконец, на рис. 6 показана аналогичная тестовая структура, записанная на радиусе 25 мм с использованием корректирующей методики. Из рисунка видно, что передние фронты штрихов первых трех серий стали совпадать с задними фронтами штрихов четвертой и пятой серии. Качество совпадения иллюстрируется прямыми линиями в радиальном направлении.

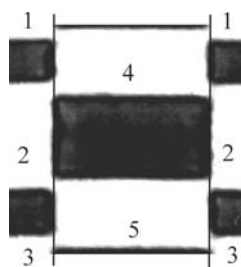


Рис. 6

Данная процедура коррекции была внедрена в технологический цикл изготовления кодовых дисков абсолютных преобразователей углов диаметром порядка 70–90 мм на Уральском оптико-механическом заводе. Испытания показали, что несоответствие задних и передних границ штрихов, относящихся к разным кодовым дорожкам, не превышает единиц угловых секунд.

Заключение. В представленной работе показано, что при записи скрытых изображений в движущихся пленках хрома специфика тепловых процессов обуславливает искажение топологии записываемых элементов и для ряда применений, например синтеза многоразрядных кодовых дисков для угловых преобразователей, эти искажения становятся недопустимо большими. Результаты моделирования показали, что данный вид погрешностей связан с инерционностью прогрева системы «пленка–подложка» сфокусированным движущимся лазерным пучком. Предложена, экспериментально апробирована и внедрена в серийное производство процедура коррекции искажений топологии элементов, обеспечившая точность синтеза углоизмерительных структур на уровне единиц угловых секунд для лимбов диаметром порядка 70–90 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ведерников В. М., Кирьянов В. П., Корольков В. П. и др.** Лазерная технология изготовления круговых шкал и кодовых дисков. Новосибирск, 1986. 39 с. (Препр./ИАиЭ СО АН СССР; № 329).
2. **Dr. J. Heidenhain** GmbH, General Catalog. Traunreut, Germany, 1982.
3. **Шухардт Г.** Новый приборный комплекс для изготовления высокоточных круговых шкал // Йенское обозрение. 1986. № 2. С. 92.
4. **Преснухин Л. Н., Майоров С. А., Меськин И. В., Шаньгин В. Ф.** Фотоэлектрические преобразователи информации /Под ред. Л. Н. Преснухина. М.: Машиностроение, 1974.
5. **Топильский В. Б., Кондрашов К. К.** Автоматизированная фотомеханическая делительная машина // Научно-технические достижения: Межотраслевой научно-технический сборник. М.: ВИМИ, 1995. № 2. С. 37.
6. **Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Чуринов Е. Г., Юрлов Ю. И.** Селективное травление экспонированных лазером тонких пленок хрома // Письма в ЖТФ. 1985. 11, вып. 3. С. 144.
7. **Абрамов Ю. Ф., Кирьянов В. П., Кирьянов А. В. и др.** Модернизация оптического делительного производства Уральского оптико-механического завода на основе новейших лазерно-компьютерных и фотолитографических технологий // Оптический журнал. 2006. № 8. С. 61.
8. **Полещук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В. и др.** Методы минимизации ошибок прямой лазерной записи дифракционных оптических элементов // Автометрия. 2002. 38, № 3. С. 3–19.
9. **Полещук А. Г.** Погрешности формирования дифракционных структур лазерным термохимическим методом записи // Автометрия. 2003. 39, № 6. С. 39–45.

10. **ГОСТ РВ 52015-2003.** Преобразователи угла цифровые. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1981.
11. **Xie Y., Lu Z., Li F.** Method for correcting the joint error of a laser writer // Opt. Express. 2003. **11**, N 9. P. 975.
12. **Вейко В. П.** Лазерная обработка пленочных элементов. Л.: Машиностроение, 1986. 248 с.
13. **Никитин В. Г.** Динамика записи скрытого изображения в пленках хрома: моделирование и экспериментальные результаты // Автометрия. 2007. **43**, № 6. С. 97–107.
14. **Кириянов В. П., Никитин В. Г.** К вопросу о механизме записи изображений в пленках хрома // Автометрия. 2004. **40**, № 2. С. 59–68.

Поступила в редакцию 20 марта 2007 г.
