

УДК 778.38 : 681.327.5

А. М. Щербаченко  
(Новосибирск)

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ДИСКОВЫЙ СКАНЕР  
С ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ РАЗВЕРТКОЙ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

Рассмотрена возможность построения сканирующего устройства с прямолинейной разверткой, использующего для отклонения и фокусировки лазерного пучка синтезированную голограмму. Изготовленный на прецизионном лазерном фотопостроителе голографический диск использован в экспериментальном макете сканера, обеспечивающем отклонение сфокусированного голограммой лазерного пучка от прямой линии менее чем 75 мкм при длине сканирования 250 мм.

**Введение.** Одним из ключевых элементов лазерных принтеров является устройство отклонения пучка света (сканер). Сканеры, обычно используемые в лазерных принтерах, требуют многих оптических компонентов, таких как вращающиеся многогранные зеркала, коллимирующие линзы и  $f_e$ -линзы. Поэтому в ряде случаев, благодаря простоте и легкости тиражирования, могут быть использованы голографические сканеры. В настоящее время предложено два типа таких устройств.

В первом из них для сканирования лазерного пучка использован диск с фиксированной решеткой [1]. Такой сканер дает высокое разрешение, но требует использования традиционных цилиндрических линз. Во втором — вместо многогранного зеркала и  $f_e$ -линзы использован диск с переменной частотой [2, 3]. В качестве таких решеток применяются голографические линзы, представляющие собой модифицированные зонные пластинки Френеля. Особенность таких голограмм — возможность одновременного сканирования и фокусировки лазерного пучка. Однако сканеры, содержащие такие диски, имеют свои недостатки: требуют применения дополнительной оптики для коррекции аберраций лазерного пятна [2] или являются достаточно трудоемкими в изготовлении [3]. Более перспективный способ получения голограммы для строчного сканера предложен в [4]. Дисковые голографические сканеры, изготовленные таким способом, обеспечивают разрешение 240 точек на дюйм, при длине развертки 220 мм и отклонении траектории сканирования от прямой, лежащем в пределах 100 мкм.

Цель данной работы — исследование предложенного автором [5] способа формирования голограмм для дисковых сканеров, обеспечивающих прямолинейное и безабберационное сканирование лазерного пучка.

Структура голографического дискового сканера. На рис. 1 показана схема голографического дискового сканера. Сканер содержит всего один голографический элемент — диск. Диск разделен на целое число секторов, в каждом из которых размещена голограмма, выполненная таким образом, что ее оптическая ось располагается на расстоянии  $X_c$ , большем, чем средний радиус  $R$  голограммы диска. Голограмма представляет собой чередующиеся темные и светлые кольцевые зоны модифицированной зонной пластинки Френеля. Лазерное сканирующее устройство содержит лазер 1, световой пучок 2 которого направлен через оптический элемент 3 на прозрачный диск 4 с размещенными на нем голограммами 5—10, механизм 11 для перемещения диска

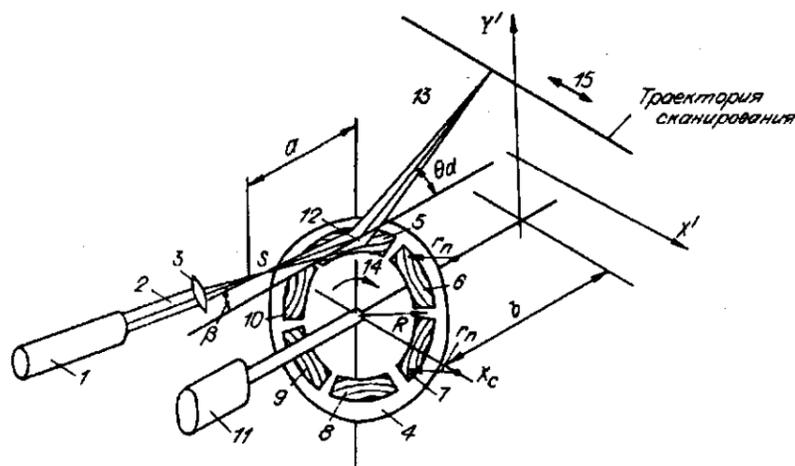


Рис. 1

4 относительно лазерного пучка 12 расходящейся сферической волны, формируемого оптическим элементом 3, причем ось вращения диска 4 расположена под углом к оптической оси оптического элемента. Направления вращения диска 4 и перемещения сканирующего пучка 13 обозначены на рисунке соответственно 14 и 15.

Лазерный пучок света 2 от лазера 1 проходит через оптический элемент 3, который в точке S формирует точечный источник света. Сферическая волна 12, пройдя через голограмму, дифрагирует под углом  $\Theta_d$  и фокусируется в плоскости сканирования. При вращении диска участки голограммы 5—10 с различной пространственной частотой последовательно появляются перед лазерным пучком 12 и вызывают повторяющиеся перемещения лазерного пучка 13 в плоскости сканирования в направлении, указанном стрелкой 15.

**Расчет голограммы.** Прежде чем приступить к расчету голограммы, используемой в дисковом сканере, выясним условия, при которых обеспечивается прямолинейное и безабберационное сканирование.

Впервые возможности использования синтезированной компьютером внеосевой зонной пластинки Френеля для лазерных сканирующих устройств дискового типа отмечены в [6]. Дисковый сканер с пластинкой, являющейся результатом интерференции плоскопараллельной и сферической волн, обеспечивал минимальные aberrации сканирующего лазерного пятна, но обладал двумя недостатками: траектория сканирования существенно отличалась от прямой линии и длина развертки не превышала длины голограммы, предъявляемой лазерному пучку. Поскольку зонную пластинку Френеля можно рассматривать как выпуклую линзу, то для входного пучка в виде расходящейся сферической волны можно получить длину развертки в плоскости сканирования, гораздо большей, чем размер голограммы. Из рис. 2 следует, что радиус сканирующего пятна в фокальной плоскости F голограммы может быть найден из выражения

$$R_f = F \tan \Theta_d + R, \quad (1)$$

где  $\Theta_d$  — угол дифракции сканирующего пучка;  $R$  — радиус диска.

Длина развертки  $l_p$  в плоскости сканирования лазерного пучка равна

$$l_p = R_f \Theta_d B / F, \quad (2)$$

где  $B$  — расстояние между голограммой и плоскостью сканирования;  $\Theta_d$  — угол поворота диска. Учитывая, что длина голограммы, освещаемой входным пучком при повороте диска на угол  $\Theta_d$ , равна

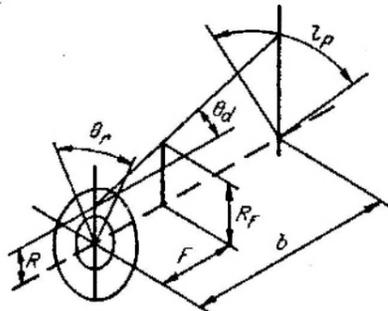


Рис. 2

$$h = R\theta_p, \quad (3)$$

коэффициент увеличения развертки  $M$  может быть определен как

$$M = l_p/h. \quad (4)$$

Подставив в уравнение (4) значения  $R_f$ ,  $l_p$  и  $h$ , взятые из (1)–(3), получим

$$M = B((\tan\Theta_d)/R + 1/F). \quad (5)$$

Уравнение (5) показывает, что чем больше угол дифракции, тем больше ко-

эффициент увеличения или, иначе говоря, тем больше длина линии развертки даже в том случае, если угол вращения мал.

Однако для зонной пластинки Френеля невозможно обеспечить приемлемую фокусировку лазерного пятна по всей траектории сканирования. С целью уменьшения aberrаций сканирующего пятна для формирования голограмм в [7] предложен метод разных длин волн. Суть метода заключается в том, что запись голограмм проводится от двух сферических пучков волн на одной длине волны, а их восстановление — на другой длине, причем длина волны восстанавливающего пучка больше, чем записывающего. Еще одной важной особенностью метода является то, что значения расстояний  $F_c$  и  $F$ , от двух точечных источников до плоскости голограммы выбираются такими, при которых в окрестностях некоторого угла дифракции существует область, где aberrации сканирующего пятна минимальны. Кроме того, такие голограммы в дисковых сканерах позволяют также частично компенсировать кривизну траектории сканирования. Как показано в [8], минимальные отклонения траектории сканирования от прямой линии достигаются тогда, когда голограммы на диске располагаются так, что для  $(X_c - R)/F$  и  $R/F$  выполняется условие

$$-0,5R/F + 0,7 < (X_c - R)/F < -0,15R/F + 0,9.$$

Эти особенности необходимо учитывать при расчете голограмм. Отметим, что существуют и другие дополнительные возможности уменьшения как aberrаций сканирующего пятна, так и погрешности отклонения траектории сканирования от прямой линии.

Так, для уменьшения aberrаций сканирующего пятна можно использовать обобщенную зонную пластинку, кольцевые зоны которой являются проекцией на плоскость диска сегментов сферической зонной пластинки, являющейся результатом интерференции двух сферических волн [5]. С учетом обозначений, принятых на рис. 3, найдем выражение для границ радиусов кольцевых зон обобщенной зонной пластинки. Уравнение, отражающее ус-

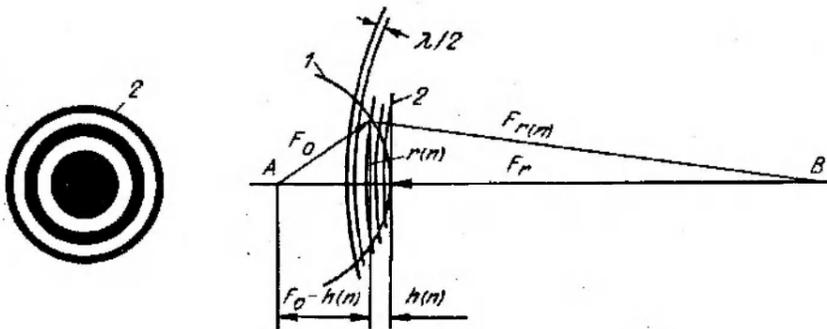


Рис. 3

ловие формирования зон голограммы на сферической поверхности  $I$  с радиусом  $F_0$  от двух точечных источников света  $A$  и  $B$ , можно записать как

$$F_{r(n)} - F_r = n\lambda/2, \quad (6)$$

где  $F_r, F_0$  — расстояния соответственно от точечных источников света  $A$  и  $B$  до сферической поверхности  $I$  вдоль прямой, соединяющей эти источники;  $n$  — номер сферического сегмента;  $\lambda$  — длина волны точечных источников света. Выразив в уравнении (6) значение  $F_{r(n)}$  через  $r(n)$  и проекцию  $F_{r(n)}$  на ось  $AB$ , обозначенную на рис. 3 как  $h(n)$ , получим

$$[(F_r + h(n))^2 + r(n)^2]^{1/2} - F_r = n\lambda/2, \quad (7)$$

где  $r(n)$  — радиус границы  $n$ -й зоны сферического сегмента голограммы  $I$  относительно оси  $AB$ .

Подставив в уравнение (7) значение  $h(n)$ , полученное при решении уравнения

$$F_{r(n)}^2 - (F_r + h(n))^2 = F_0^2 - (F_0 - h(n))^2, \quad (8)$$

найдем значения радиусов зон  $r(n)$  сферических сегментов голограммы  $I$ :

$$r(n) = \left[ \frac{\lambda F_0}{(F_r + F_0)} (nF_r + n^2\lambda/4) - \left( \frac{\lambda}{(F_r + F_0)} \right)^2 ((nF_r + n^2\lambda/4)/2)^2 \right]^{1/2}. \quad (9)$$

Так как длина волны света  $\lambda$  много меньше как  $F_r$ , так и  $F_0$ , вторым слагаемым подкоренного выражения уравнения (9) можно пренебречь. Уравнение (9) в этом случае можно записать как

$$r(n) = [(n\lambda F_0 + n^2\lambda^2 F_0/4)/(F_r + F_0)]^{1/2}. \quad (10)$$

Голограмму, формируемую от двух точечных источников на сферической поверхности  $I$ , можно рассматривать как множество параллельных друг другу плоских зонных пластинок, у которых один и тот же фокус, но разные расстояния от источника сферических волн. Как показано в [9], при восстановлении голограммы, интерференционная картина которой получена от двух сферических волн на плоскости, лазерным пучком света, длина волны которого больше, чем длина волны формирующих голограмму сферических волн, фокусировка сканирующего пятна будет осуществляться на расстоянии  $b(r)$ , определяемом из выражения

$$1/a + 1/b(r) = 1/F, \quad (11)$$

где  $a$  — расстояние от точечного источника, освещающего голограмму, до плоскости диска;  $F$  — фокусное расстояние голограммы. Это условие соответствует формированию изображения на сканируемой поверхности вблизи оптической оси для голограммы. В [9] представлена зависимость  $b(r)$  от  $\Theta_a$  для различных значений  $F_0$  и  $F_r$ , из которой следует, что в окрестности некоторого угла дифракции aberrации пятна минимальны. Можно предположить, что для каждой из зонных пластинок сферической голограммы выполняется это условие.

Однако поскольку эти зонные пластинки сведены в одну плоскость 2, то для зонных пластинок, дающих большой угол дифракции, расстояние от источника сферических волн  $A$  становится большим, а расстояние до плоскости формирования изображения — меньшим. Таким образом, в окрестности некоторого угла дифракции  $\Theta_a$  может быть достигнуто некоторое уменьшение зависимости  $b(r)$  от  $\Theta_a$ . Благодаря этому возможно осуществить дополнительную коррекцию aberrаций сканирующей точки и увеличить разрешающую способность лазерного сканирующего устройства.

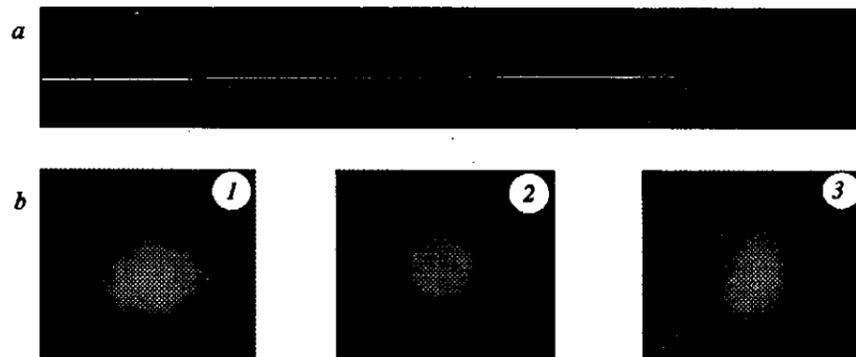


Рис. 4

**Технология изготовления.** Запись голографической решетки осуществлена на прецизионном лазерном фотопостроителе [10]. Лазерный фотопостроитель сфокусированным до микронных размеров лазерным пучком строит изображение в полярной системе координат на стеклянных подложках, покрытых тонкой пленкой хрома.

Разработанные управляющие программы позволяют вести синтез как осесимметричных радиальных голограмм, ось симметрии которых совпадает с осью вращения шпинделя, так и голограмм произвольной формы.

При записи осесимметричных радиальных решеток на время одного оборота шпинделя производится экспонирование светочувствительного материала. Кольцевая зона заданной ширины образуется при многократной засветке материала лазерным пучком, смещаемым после каждого оборота шпинделя на расстояние, меньшее, чем диаметр пятна, регистрируемого на носителе изображения.

При записи кольцевых решеток, ось которых смещена относительно оси вращения шпинделя, синтезируемое изображение формируется из дуг окружностей, границы которых определяются моментами включения и выключения лазерного пучка. Эти моменты определяются как угловые координаты дуги окружности заданного радиуса, пересекающей зоны радиальной решетки, смещенной относительно оси вращения шпинделя.

Достоинством этого способа является то, что он позволяет осуществить как многократное тиражирование на одной подложке, синтезируемой компьютером голограммы, так и запись в соответствующих секторах диска датчика углового положения. Оба указанных способа были использованы при изготовлении голограмм дисковых сканеров.

Хромовый шаблон голографического диска, изготовленный в соответствии с технологией [11], может быть тиражирован с помощью контактной печати на слой фоторезиста, нанесенный на металлизированную поверхность.

Образец диска голографического сканера, изготовленного на фотопостроителе, содержит две кольцевые зоны. Во внешней кольцевой зоне размещены десять одинаковых бинарных голограмм, во внутренней зоне нанесена линейная радиальная шкала, границы которой отмечены широкими радиальными штрихами. При расчете голограмм были взяты следующие параметры: средний радиус диска  $R = 70$  мм, расстояния  $F_0$  и  $F$ , от точечных сферических источников света  $A$  и  $B$  до плоскости диска были выбраны соответственно 40 и 640 мм, длина волны источников сферических волн  $\lambda = 0,488$  мкм, а расстояние между центром вращения диска и центром голограммы 80 мм.

**Экспериментальные результаты.** Для восстановления голограммы был использован гелий-неоновый лазер с длиной волны  $\lambda = 0,6328$  мкм. Расходящаяся сферическая волна была образована с помощью микрообъектива. Апертура пучка, освещающего голограмму, составляла 4 мм. Для уменьшения погрешности отклонения траектории сканирования от прямой линии ось вра-

щения диска была наклонена под небольшим углом к оптической оси микрообъектива.

На рис. 4 представлены траектория сканирования (а) и форма сканирующего пятна (б), полученные экспериментально: 1 — в центре, 2 — в середине, 3 — на краю.

Характеристики образца голографического сканера: длина волны освещающего лазерного пучка 632 нм, радиус диска 70 мм, длина сканирования 250 мм, число голограмм на диске 10, размер пятна (на уровне половинной интенсивности) 200 мкм, отклонение траектории сканирования от прямой  $\pm 75$  мкм, дифракционная эффективность 10 %.

Заключение. Предложен метод формирования голограмм для дисковых сканеров, разработаны технические и программные средства для компьютерного синтеза голографических дисков. Изготовлен экспериментальный образец сканера, содержащий всего один элемент — голографический диск. Экспериментально показана возможность сканирования лазерного пучка с отклонением от прямой линии, не превышающей 75 мкм, и одновременной фокусировки сканирующего пятна без использования вспомогательной оптики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krammer C. Holographic laser scanner for nonimpact printing // *Laser Focus*.—1981.—17.—P. 70.
2. Bringdal O., Lee W. H. Laser beam scanner using computer generated hologram // *Appl. Opt.*—1976.—15, N 1.—P. 183.
3. Ono Y., Nishida N. Holographic disk scanner for bow-free scanning // *Appl. Opt.*—1983.—22, N 14.—P. 2132.
4. Pat. 4378142 US. Hologram made by using a plurality of spherical waves and a device for laser beam scanning by using the hologram /Y. Ono.—Publ. 1983.
5. А. с. 1764021 СССР. Голографический дефлектор /А. М. Щербаченко.—Опубл. 1990; Бюл. № 5.
6. Щербаченко А. М., Юрлов Ю. И. Программное обеспечение лазерного фотопостроителя дифракционных оптических элементов // *Автометрия*.—1983.—№ 2.
7. Yamagishi F., Hasegawa S., Ikeda N. Holographic straight line scanner for laser printers // *Fujitsu Sci. Tech. J.*—1986.—22, N 5.—P. 416.
8. Заявка 63-39045 Японии. Устройство для развертки световых лучей // *Изобрет. стран мира: Реф. информ.*—1989.—Вып. 11, № 6.
9. Pat. 4753502 US. Holographic laser beam scanner /Y. Ono.—Publ. 1988.
10. Ведерников В. М., Вьюхин В. Н., Кирьянов В. П. и др. Прецизионный фотопостроитель для синтеза оптических элементов // *Автометрия*.—1981.—№ 3.
11. Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Чурин Е. Г., Юрлов Ю. И. Селективное травление экспонированных лазером тонких пленок хрома // *Письма в ЖТФ*.—1985.—11, вып. 3.

Поступила в редакцию 9 февраля 1994 г.