

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Hill. Some Aspects of a Large Capacity Holographic Memory.— "Appl. Opt.", 1972, v. 11, № 1.
2. И. С. Гибин. Расчет и выбор параметров оптических систем голограммных запоминающих устройств.— «Автоматика», 1974, № 6.
3. Н. А. Костров. К вопросу оптимизации голографических запоминающих устройств.— «Квантовая электроника», 1974, т. 1, с. 2148.
4. Г. Г. Слюсарев. Методы расчета оптических систем. Л., «Машиностроение», 1969.
5. Д. Ж. Гудмен. Введение в Фурье-оптику. М., «Мир», 1970.

Поступила в редакцию 3 декабря 1974 г.

УДК 535.318; 681.327

И. С. ГИБИН, М. А. ГОФМАН, А. И. КАРАПУЗИКОВ,
Е. Ф. ПЕН, П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ
(Новосибирск)

АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ ДВУХКООРДИНАТНЫХ ШЛЕЙФОВЫХ ДЕФЛЕКТОРОВ

Двухкоординатные дефлекторы, основными элементами которых являются магнитоэлектрические светолучевые гальванометры (шлейфы), обеспечивают время отклонения световых пучков порядка 1 мс (без принятия специальных мер) и отличаются простотой, малыми потерями света и низкой стоимостью. Их целесообразно применять тогда, когда требование по быстродействию в решаемой задаче не является определяющим.

Основные параметры дефлекторов этого типа, такие, как количество разрешимых положений отклоненного пучка и точность вывода луча в заданную позицию, во многом зависят от параметров и геометрии оптической схемы.

В данной работе проведен анализ оптических схем шлейфовых дефлекторов, изучен характер aberrаций отклоняемых лучей и описаны варианты схем с минимальными aberrациями, позволяющие увеличить число разрешимых точек дефлектора.

Оптическая схема дефлектора и его aberrации. Оптическая схема шлейфового дефлектора приведена на рис. 1. Лазерный пучок линзой L_1 фокусируется на зеркальце шлейфа горизонтального отклонения $Ш_x$, затем изображение светового пятна с зеркальца $Ш_x$ проектируется линзой L_2 на зеркальце шлейфа вертикального отклонения $Ш_y$. При работе дефлектора световой пучок, отраженный зеркальцем $Ш_y$, отклоняется по двум взаимно ортогональным направлениям и направляется на плоскость Π [1]. В идеальном случае закон перемещения светового пятна в плоскости сканирования должен соответствовать закону изменения управляющих сигналов. Однако реально такого соответствия не наблюдается и световой пучок отклоняется с aberrациями. Рассмотрим характер этих aberrаций.

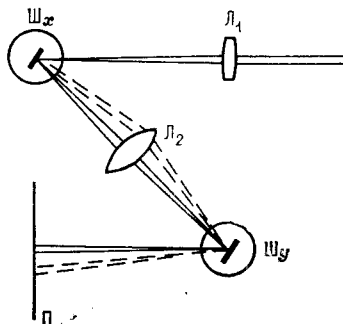


Рис. 1.

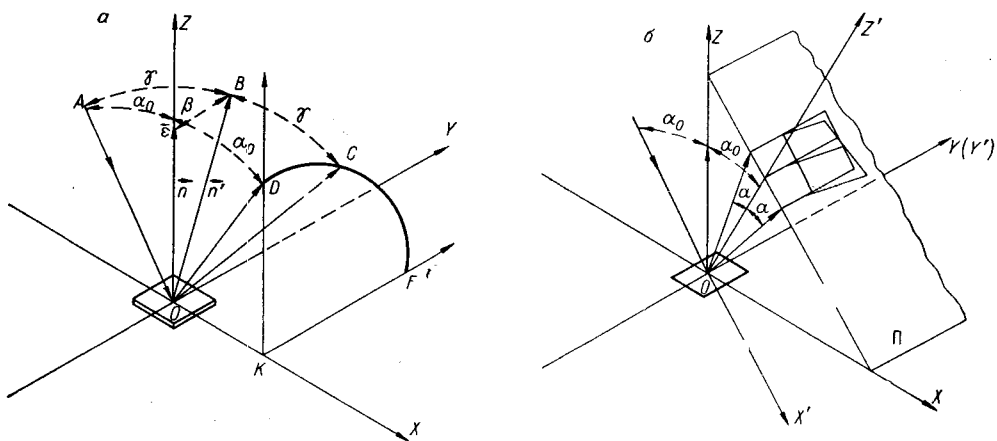


Рис. 2.

Простейшей и достаточно наглядной моделью этого устройства является зеркало, вращающееся вокруг неподвижной точки O по двум взаимно ортогональным направлениям в системе координат $XOYZ$ (рис. 2, а). Любое положение зеркала может быть охарактеризовано положением нормали \vec{n} . Действительно, при повороте зеркала вокруг оси OX на угол φ вектор нормали \vec{n} поворачивается в плоскости YOZ на тот же угол.

Пусть луч \vec{AO} , лежащий в плоскости XOZ , падает на зеркало под углом α_0 к оси OZ , что соответствует ситуации, когда управляющий сигнал на шлейфе Ш_x отсутствует. При наличии управляющего сигнала на шлейфе Ш_x угол падения луча \vec{AO} на зеркало шлейфа Ш_y меняется в пределах $\alpha_0 \pm \alpha$. В принятой модели это соответствует вращению зеркала вокруг оси OY на угол $\pm \alpha/2$.

Будем считать положение зеркала нормальным, если вектор \vec{n} совпадает с осью OZ . В этом случае отраженный луч \vec{OD} лежит в плоскости XOZ и составляет угол $\alpha_0 \pm \alpha$ с осью OZ .

Найдем уравнение движения отраженного луча при повороте зеркала вокруг оси OX на угол $\beta/2$. Новому положению зеркала соответствует вектор нормали $\vec{n}' (b_x, b_y, b_z)$ и отраженный луч $\vec{OC} (c_x, c_y, c_z)$. Согласно закону отражения, падающий $\vec{OA} (a_x, a_y, a_z)$ и отраженный $\vec{OC} (c_x, c_y, c_z)$ лучи лежат в одной плоскости (условие компланарности) и составляют одинаковые углы γ с вектором \vec{n}' . Отсюда вытекают следующие три уравнения:

$$\begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \\ c_x & c_y & c_z \end{vmatrix} = 0; \quad (1)$$

$$b_x c_x + b_y c_y + b_z c_z = \cos \gamma; \quad (2)$$

$$a_x c_x + a_y c_y + a_z c_z = \cos 2\gamma. \quad (3)$$

Уравнение (1) описывает условие компланарности рассматриваемых векторов; уравнения (2) и (3) характеризуют углы между векторами \vec{n}' и \vec{OC} и соответственно \vec{OA} и \vec{OC} .

Направляющие косинусы векторов \vec{OA} и \vec{n}' , как следует из рис. 2, равны

$$\begin{aligned} a_x &= -\sin(\alpha_0 + \alpha), \quad a_y = 0, \quad a_z = \cos(\alpha_0 + \alpha); \\ b_x &= 0, \quad b_y = \sin(\beta/2), \quad b_z = \cos(\beta/2). \end{aligned} \quad (4)$$

Для определения значений $\cos \gamma$ и $\cos 2\gamma$ воспользуемся уравнением

$$a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z = \cos \gamma,$$

откуда следует, что

$$\cos \gamma = \cos(\alpha_0 + \alpha) \cos(\beta/2),$$

а

$$\cos 2\gamma = 2\cos^2(\alpha_0 + \alpha) \cos^2(\beta/2) - 1. \quad (5)$$

Подставляя выражения (4) и (5) в уравнения (1)–(3) и решая систему трех уравнений с тремя неизвестными, получим

$$\begin{aligned} c_x &= \frac{\sin(\alpha_0 + \alpha) [1 - \cos^2(\alpha_0 + \alpha) \cos^2(\beta/2)]}{\Delta}, \\ c_y &= \frac{\sin \beta \cos(\alpha_0 + \alpha) [1 - \cos^2(\alpha_0 + \alpha) \cos^2(\beta/2)]}{\Delta}, \\ c_z &= \frac{\cos \beta \cos(\alpha_0 + \alpha) [1 - \cos^2(\alpha_0 + \alpha) \cos^2(\beta/2)]}{\Delta}, \end{aligned} \quad (6)$$

где Δ — главный определитель системы.

Составим уравнение поверхности, описываемой отраженным лучом при вращении зеркала вокруг оси OX . Для этого напишем уравнение луча \vec{OC} в параметрической форме:

$$\begin{cases} x = c_x t, \\ y = c_y t, \\ z = c_z t, \end{cases} \quad (7)$$

где t — вспомогательный параметр.

Из уравнений (7) с учетом (6) получаем уравнения кругового конуса:

$$\begin{aligned} y &= \sin \beta \cdot \operatorname{ctg}(\alpha_0 + \alpha) x, \\ z &= \cos \beta \cdot \operatorname{ctg}(\alpha_0 + \alpha) x. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, при повороте зеркала вокруг оси OX луч \vec{OC} перемещается на поверхности кругового конуса с вершиной в начале координат.

Для нахождения траектории перемещения светового пятна в плоскости сканирования Π , расположенной перпендикулярно центральному лучу \vec{OD} на расстоянии d , выполним поворот системы координат на угол α_0 вокруг оси OY . В новой системе координат $X'O'Y'Z'$ (см. рис. 2, б) уравнение плоскости сканирования принимает вид $z' = d$, а перемещение светового пятна описывается уравнениями

$$\begin{aligned} x' &= d \frac{\operatorname{tg}(\alpha_0 + \alpha) - \operatorname{tg} \alpha_0 \cos \beta}{\cos \beta + \operatorname{tg} \alpha_0 \operatorname{tg}(\alpha_0 + \alpha)}, \\ y' &= d \frac{\sin \beta}{\cos \alpha_0 \cos \beta + \sin \alpha_0 \operatorname{tg}(\alpha_0 + \alpha)}, \end{aligned} \quad (9)$$

из которых следует, что координаты отклоненных точек x' , y' связаны с углами поворота зеркал шлейфов $\alpha/2$ и $\beta/2$ сложной нелинейной зависимостью. Нелинейность различна по направлениям x' и y' , что

приводит к несимметричному искривлению рабочего поля дефлектора. В случае малых углов α_0 , α и β , при которых

$$\operatorname{tg} \alpha_0 \operatorname{tg} (\alpha_0 + \alpha) \ll \cos \beta,$$

выражение (9) принимает вид

$$\begin{aligned} x' &= d \left(\frac{\operatorname{tg} (\alpha_0 + \alpha)}{\cos \beta} - \operatorname{tg} \alpha_0 \right); \\ y' &= d \frac{\operatorname{tg} \beta}{\cos \alpha_0}. \end{aligned} \quad (10)$$

Из (10) следует, что при фиксированном α_0 рабочее поле дефлектора в направлении оси OY' деформировано пропорционально тангенсу удвоенного угла поворота зеркала β , а искривление вдоль положительной и отрицательной ветвей оси OX' несимметрично, если $\alpha_0 \neq 0$.

Характер aberrаций хорошо виден на рис. 3, а, б, где прямоугольный растр положений светового пятна при безабберационном отклонении совмещен для сравнения с растром, координаты углов которого получены из выражений (9) расчетным путем. Рис. 3, а соответствует случаю $\alpha_0 = 0^\circ$, рис. 3, б — $\alpha_0 = 10^\circ$. Смещения точек относительно идеального положения приведены в увеличенном масштабе: на рис. 3, а в 20 раз, а на рис. 3, б в 10 раз.

Погрешность и разрешающая способность шлейфового дефлектора. Искривление поля сканирования дефлектора приводит к появлению по-

грешности вывода светового пятна на заданную позицию, что ограничивает максимальный угол отклонения пучка и, как следствие, количество разрешимых положений луча при фиксированном угловом размере отклоненного пучка.

Общая относительная погрешность дефлектора может быть определена по формуле

$$\eta = \delta / \vartheta, \quad (11)$$

где δ — абсолютная угловая погрешность смещения светового пятна относительно идеального положения, ϑ — угловой размер светового пятна. Значение δ может быть найдено из выражения

$$\begin{aligned} \delta &= \\ &= \frac{1}{d} \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $x_0 = d\alpha$, $y_0 = d\beta$ — идеальные координаты отклоненного пучка.

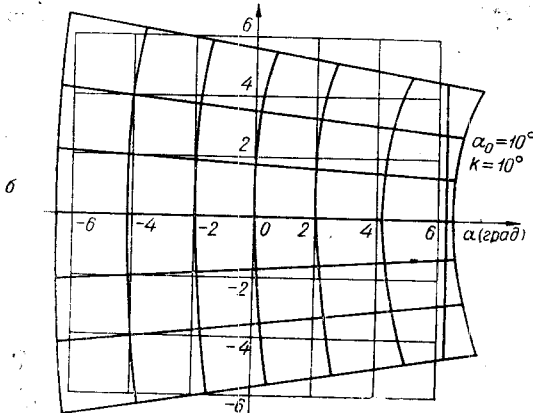
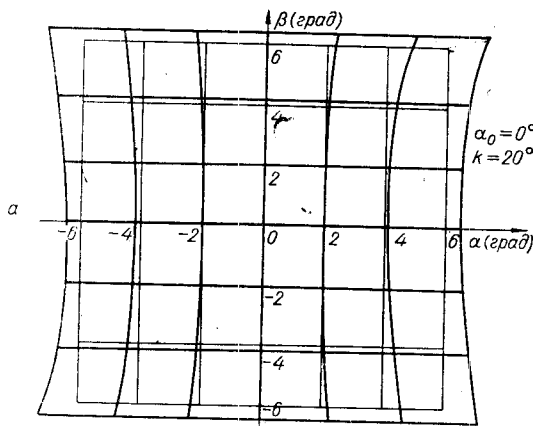


Рис. 3.

Если размер светового пятна согласован с размером зеркальца шлейфа, то угловая расходимость светового пучка

$$\vartheta = k\lambda/D_3,$$

где D_3 — размер зеркальца шлейфа, а коэффициент k зависит от характера распределения интенсивности света на отражающей поверхности зеркальца.

Разрешающая способность дефлектора в одном направлении может определяться по формуле $N = \Theta/\vartheta$, где Θ — максимальный угол отклонения светового пучка. Если задана относительная погрешность отклонения луча, то из уравнения (11) можно определить значения углов α и β , при которых погрешность отклонения не превышает заданную.

Уравнение (11) с учетом выражений (12) и (9) является трансцендентным относительно α и β и не имеет точного решения. Поэтому воспользуемся результатами его численного решения.

На рис. 4 показано изменение с ростом α_0 области допустимых значений α и β при заданной погрешности $\eta = 10\%$. Видно, что при $\alpha_0 = 0^\circ$ эта область максимальна и имеет форму правильного круга. В этом случае количество разрешимых положений пучка является максимальным. С увеличением α_0 область допустимых значений α и β существенно деформируется, что приводит к уменьшению числа разрешимых положений луча дефлектора.

Обычно рабочая область дефлектора имеет форму квадрата с центром в начале координат. В этом случае $\alpha = \beta = \Theta/2\sqrt{2}$, а количество разрешимых точек как по одной, так и по другой координате

$$N_x = N_y = \Theta D_3 / \sqrt{2} k \lambda.$$

Если значение относительной погрешности $\eta = 10\%$, то с помощью рис. 4 для $\alpha_0 = 0^\circ$ можно определить $\Theta = \pi \frac{14}{180}$. В случае, когда дефлектор применяется для отклонения гауссового светового пучка, k можно принять равным 1,27 [2]. С учетом этого получаем формулу для оценки числа разрешимых позиций шлейфового дефлектора

$$N \approx 0,136 \frac{D_3}{\lambda}.$$

Если размер зеркальца $D_3 = 0,5$ мм, а $\lambda = 0,63 \cdot 10^{-3}$ мм, то шлейфовый дефлектор обеспечивает порядка $N_x N_y = 100 \times 100$ положений луча.

Оптические схемы с минимальными aberrациями. Ранее показано, что минимальные aberrации шлейфового дефлектора и максимальное количество разрешимых положений луча обеспечиваются при выполнении условия $\alpha_0 = 0$. Это означает, что в плоскости XOZ (см. рис. 2) луч должен падать на зеркальце нормально. Практически такой ход

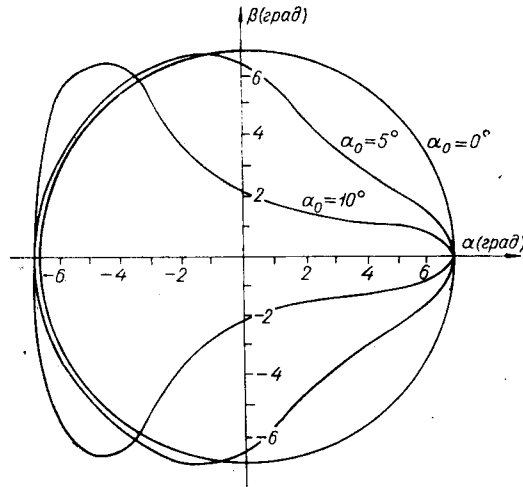


Рис. 4.

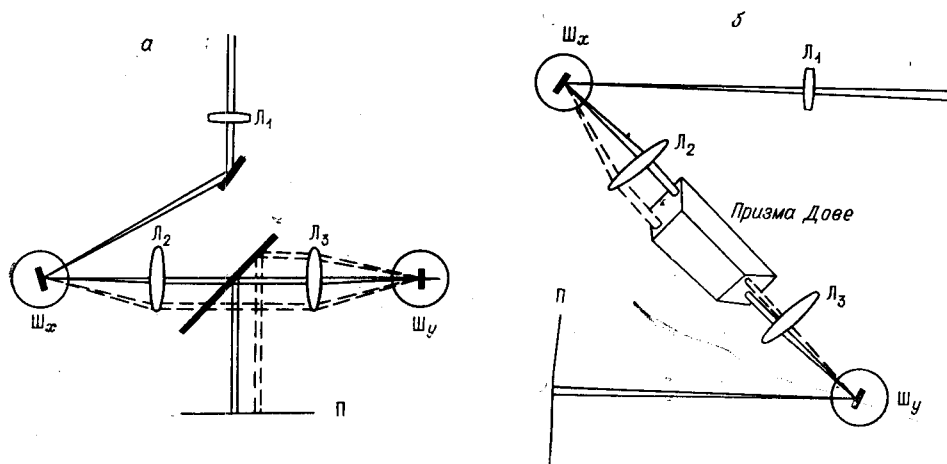


Рис. 5.

лучей реализуется в том случае, когда при нормальном положении зеркальца первого шлейфа угол падения луча на зеркальце второго шлейфа равен нулю, а ось вращения лежит в плоскости падения лучей.

На рис. 5, а, б показаны оптические схемы шлейфовых дефлекторов, реализующих требуемый ход лучей.

Первая схема (см. рис. 5, а) отличается от описанной на рис. 1 тем, что при отсутствии управляющих токов угол падения луча на зеркальце второго шлейфа равен нулю. Для вывода лучей в плоскость сканирования в схеме предусмотрено зеркало с узкой щелью, пропускающее все лучи от зеркальца Ш_х. Очевидно, что при отсутствии сигнала на шлейфе Ш_у отраженные лучи снова попадут в щель и будут отсутствовать на выходе дефлектора. Таким образом, в этой схеме «теряется» одна строка в матрице отклоненных точек.

На второй схеме (см. рис. 5, б) оба шлейфа расположены вертикально (в соответствии с техническими условиями их эксплуатации) так, что оси вращения зеркал Ш_х и Ш_у параллельны. Горизонтальное смещение луча от первого шлейфа преобразуется оборачивающей системой (например, призмой Дове), размещенной между линзами телескопической системы Л₂—Л₃, в вертикальное. В этой схеме по сравнению с предыдущей количество строк раstra не уменьшается.

Оптическая схема шлейфового дефлектора с оборачивающей призмой проверена нами экспериментально. В макете двухкоординатного дефлектора использовались шлейфы типа Н—135—1,5. В телескопе Л₂—Л₃ применялись объективы с фокусным расстоянием $f=50$ мм. Для преобразования горизонтального смещения луча в вертикальное применялась призма Дове. Максимальный угол отклонения луча в одном направлении составлял $\pm 3^\circ$. На рис. 6 показана матрица из 32×32 световых точек, полученных при работе дефлектора с управлением от ЭВМ. Алгоритм работы дефлектора описан в [1]. Можно видеть, что в указанных условиях работы существенных aberrаций в поле сканирования не наблюдается.

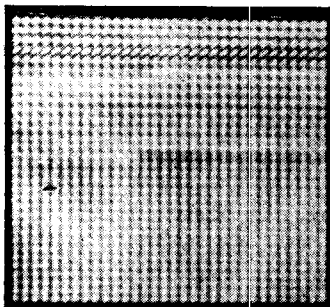


Рис. 6.

Заключение. Оптические схемы двухкоординатных шлейфовых дефлекторов обладают аберрациями, которые приводят к погрешности отклонения светового пучка и ограничивают количество разрешимых положений.

Минимальные аберрации имеют оптические схемы дефлекторов, у которых ось вращения зеркальца второго шлейфа лежит в плоскости падения лучей от первого шлейфа. В этом случае при заданной относительной погрешности/отклонения $\eta=10\%$ количество реально разрешимых положений луча дефлектора может достигать величины порядка 100×100 .

Дальнейшее уменьшение аберраций и вместе с тем увеличение рабочего поля дефлектора возможно за счет функционального управления работой дефлектора. Формирование управляющих сигналов должно производиться с учетом уравнений (9).

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. В. Выдрин, И. С. Гибин, Э. Л. Кашеев, Т. Н. Мантуш, Ю. Е. Нестерихин, Б. Н. Панков, Е. Ф. Пен, П. Е. Твердохлеб. Голограммное запоминающее устройство, взаимодействующее с ЭВМ.— «Автоматика», 1974, № 1.
2. Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. Оптическая голография. М., «Мир», 1973.

Поступила в редакцию 31 июля 1974 г.

УДК 621.315.4/61 : 535

**Н. Г. ГАРБУЗ, В. А. ЖАБОТИНСКИЙ, И. Н. КОМПАНЕЦ,
Т. М. КОСТИНА, П. Н. СЕМОЧКИН, А. Г. СОБОЛЕВ,
Э. М. ЯШИН**
(Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОЗРАЧНОЙ ЦТСЛ-КЕРАМИКИ

Введение. За последние годы внимание многих исследователей, работающих в области модуляции лазерного излучения, привлекла оптически прозрачная керамика на основе твердого раствора цирконата-титаната свинца с лантаном (ЦТСЛ). Этот пьезоэлектрический материал обладает ярко выраженными электрооптическими свойствами, в нем наблюдаются эффекты наведенного двулучепреломления и рассеяния. Очень важно, что упомянутыми свойствами можно эффективно управлять, поскольку они зависят от процентного содержания компонентов керамики, а последние легко варьировать в широких пределах. По своим параметрам керамика ЦТСЛ в настоящее время является одним из наиболее перспективных материалов для устройств оптической обработки информации [1, 2].

ЦТСЛ-керамика представляет собой поликристаллическое вещество. Сведения о его кристаллической структуре даны в [3, 4]. Зависимость некоторых физических свойств (двулучепреломления, диэлектрической проницаемости, прозрачности и других) от состава и технологии приготовления материала приводится в [5—9].

Среди различных составов ЦТСЛ особое внимание привлекает состав 8/65/35 (8% La, 65% Zr, 35% Ti), отличающийся при высокой прозрачности большими значениями наведенного двулучепреломления