

Рис. 3.

Последний, девятый импульс РИЧ выводит машину из состояния разрыва, возвращая к программному управлению.

Управляющая программа позволяет прогнать все тесты подряд, вызвать любой из них и повторить его заданное число раз или запустить любой тест в циклическом режиме для наблюдения сигналов на экране осциллографа. Результаты тестирования выводятся на экран в двоичном коде с указанием ошибки.

В заключение приведем технические характеристики установки: размер оптической тестовой структуры 8×8 ; длина волны светящихся диодов 670 мкм; максимальная оптическая мощность в одном бите 0,5 мкВт; минимальное время смены теста 30 мкс; время считывания фотоматрицы 16—64 мкс; длительность считывающих импульсов 2—8 мкс.

Поступила в редакцию 21 мая 1976 г.

УДК 535.8 : 535.241.13 : 535.315

И. С. ГИБИН, Н. Н. КАМЕНЕВ, Ю. Н. ТИЩЕНКО,
А. В. ТРУБЕЦКОЙ
(Новосибирск)

ПРИЗМЕННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДВУХКООРДИНАТНЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ДЕФЛЕКТОРОВ СВЕТА

В акустооптических дефлекторах (АОД) для согласования геометрии отклоняющих ячеек с геометрией освещающего светового пучка, а также для увеличения углов отклонения и уменьшения диаметров отклоненных световых пучков необходимо применять специальные оптические системы. В зависимости от размеров и типов акустооптических ячеек (АОЯ) параметры и геометрия оптических систем могут быть различными. Известны АОД с использованием квадратных [1] и прямоугольных [2] АОЯ.

В силу того что применение АОЯ с большим отношением длины ячейки к высоте звукового столба позволяет уменьшить мощность управляющих сигналов и упрощает технологию изготовления АОЯ, разработка дефлекторов с прямоугольными АОЯ является более целесообразной. В оптических системах таких дефлекторов могут быть использованы элементы линзовой цилиндрической оптики [2, 3] или призмные элементы [4, 5].

Результаты экспериментального исследования и опыт эксплуатации АОД с оптическими системами на основе цилиндрической оптики [2, 3] показывают, что собственные аберрации линз в этих системах приводят к уширению отклоненных световых пучков и деформации выходного раstra, в результате чего падает разрешение дефлектора. Аберрации системы уменьшаются, если применять линзы с малым отношением ее размеров. Эти недостатки устраняются в призмных оптических системах. Призмы удобны тем, что они осуществляют анаморфотное преобразование светового пучка без существенных искажений волнового фронта и позволяют значительно уменьшить размеры оптической системы.

В таких системах для согласования с прямоугольной АОЯ световой пучок круглого сечения с помощью преломляющих призм преобразуется в пучок эллиптического сечения. При этом отношение длины АОЯ к высоте звукового столба должно быть равно отношению размера длинной оси эллипса в сечении светового пучка к размеру короткой оси. (Отношение размеров осей эллипса далее будем называть коэффициентом анаморфозы призмной системы [6].)

В известных вариантах призмных оптических систем [5] преломляющие поверхности призм расположены под углом Брюстера по отношению к преобразуемому световому пучку. При этом для пучка, поляризованного в плоскости падения на призму, отсутствуют потери света при отражении от преломляющих поверхностей. Однако вследствие небольших значений углов преломления в таких системах осуществляется преобразование световых пучков с малым коэффициентом анаморфозы, тогда как для получения наибольшего выигрыша в величине управляющей мощности необходимо увеличивать отношение длины ячейки к высоте звукового столба, а следовательно, и коэффициент анаморфозы.

Повысить коэффициент анаморфозы в призмных системах АОД можно или путем увеличения числа призм с углом Брюстера, или путем применения призм с большим углом преломления. В первом случае существенно усложняется конструкция оптической системы и ее юстировка, во втором — возрастают потери света на отражение, однако они могут быть устранены просветлением поверхностей призм. Поэтому второй путь предпочтительнее с конструктивной точки зрения.

Следует отметить, что при увеличении коэффициента анаморфозы в призмных системах появляются аберрации отклонения, обусловленные нелинейным характером преобразования призмами световых пучков. Анализ подобных искажений в призмных системах двухкоординатных АОД ранее не проводился. Не проводились также и разработки призмных оптических систем дефлекторов, в которых такие искажения исправлены.

В связи с этим настоящая работа посвящена исследованию искажений, возникающих при отклонении световых пучков в двухкоординатных АОД с призмными оптическими системами, изучению методики просветления призм с большими углами преломления, а также разработке и экспериментальному исследованию вариантов призмных систем с исправленными искажениями и малыми световыми потерями.

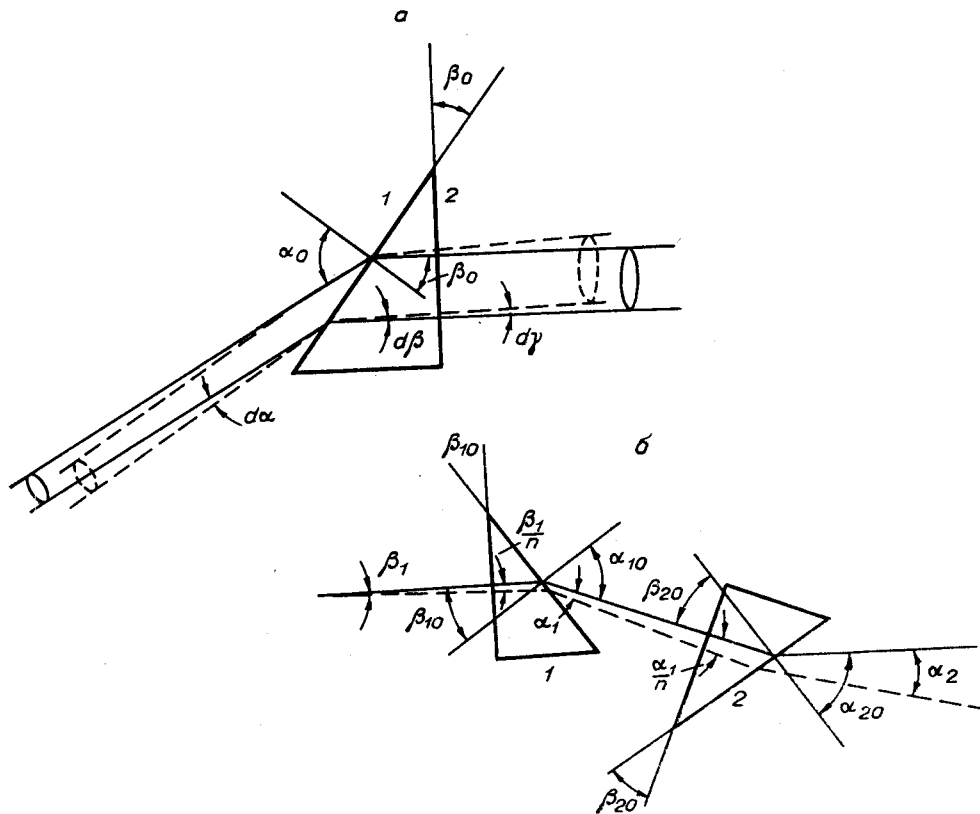


Рис. 1.

Анализ искажений призмных оптических систем. В призмной оптической системе световой пучок эллиптического сечения формируется из параллельного пучка круглого сечения, падающего наклонно на преломляющую поверхность призмы (рис. 1, а). После преломления ширина пучка в плоскости преломления увеличивается, а в плоскости, перпендикулярной плоскости преломления, остается без изменения. При этом коэффициент анаморфозы

$$A = \cos \beta_0 / \cos \alpha_0 = [(1 - \sin^2 \alpha_0 / n^2)]^{1/2} / \cos \alpha_0, \quad (1)$$

где α_0 , β_0 — углы падения и преломления, а n — показатель преломления материала призмы [4, 6]. В частном случае при угле α_0 , равном углу Брюстера ($\operatorname{tg} \alpha_0 = n$), $A = n$ [5]. Поверхность 2 призмы на рис. 1, а устанавливается перпендикулярно по отношению к световому пучку и не изменяет его размеров.

Другое важное свойство преломляющей призмы — ее способность преобразовывать угол отклонения светового пучка в главной плоскости призмы. Применяя закон преломления на поверхностях 1 и 2 призмы, можно показать, что для бесконечно малых углов отклонения справедливо соотношение

$$d\alpha / d\gamma = A, \quad (2)$$

где $d\alpha$, $d\gamma$ — углы отклонения светового пучка от первоначального направления на входе и выходе призмы. Система нескольких преломляющих призм, установленных одна за другой в общей плоскости, имеет коэффициент анаморфозы, равный произведению коэффициентов каждой призмы. Например, система двух призм рис. 1, б имеет общий коэффициент анаморфозы A_0 , равный $A_0 = A_1 A_2$, где A_1 , A_2 — коэффициенты анаморфозы призм 1, 2.

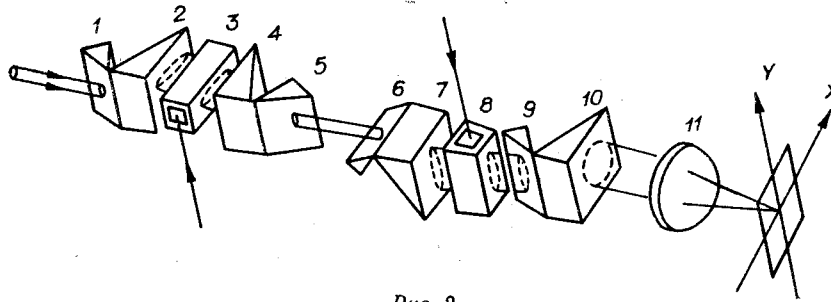


Рис. 2.

На рис. 2 показана призмная оптическая система АОД, в которой преобразование светового пучка осуществляется повторяющимися комбинациями двух призм с углом Брюстера [5], где элементы 3, 8 — АОЯ, 1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10 — призмы; 11 — сферический объектив. В общем случае в этой системе имеется два вида искажений. 1) При отклонении светового пучка ячейкой 3 изменяются углы падения светового пучка на преломляющие поверхности призм 4 и 5 (см. рис. 2), вследствие чего по закону (1) изменяются коэффициенты анаморфозы призм 4, 5 и, как следствие, нелинейно изменяются углы отклонения, что приводит к ошибкам в положении выходных пучков дефлектора. 2) При работе ячейки 3 световой пучок, проходящий через призмы 6 и 7, смещается по углу в плоскости, перпендикулярной главной плоскости этих призм, что приводит к искажениям при преломлении косых световых пучков.

Рассмотрим первый вид искажений. На рис. 1, б показана система двух призм, которая преобразует световой пучок, отклоняющийся по углу в главной плоскости призм.

В среднем положении световой пучок преломляется призмами 1 и 2 при углах падения β_{10} и β_{20} соответственно (см. рис. 1, б). При отклонении светового пучка на угол β_1 относительно среднего положения угол падения на преломляющую поверхность призмы 1 изменяется на величину β_1/n . После прохождения призмы 1 световой пучок отклоняется на угол α_1 относительно среднего угла преломления α_{10} , а после прохождения призмы 2 — на угол α_2 относительно среднего угла α_{20} . Для малых углов β_1 коэффициент анаморфозы призмы 1 в окрестности угла падения β_{10} можно аппроксимировать линейной зависимостью

$$A_1(\beta_{10} + \beta_1/n) \simeq A_1(\beta_{10}) + \left. \frac{\partial A_1}{\partial \beta_0} \right|_{\beta_0 = \beta_{10}} \beta_1/n = \frac{d\alpha_1}{d\beta_1}.$$

Отсюда

$$\alpha_1 \simeq A_1(\beta_{10}) \beta_1 + \left. \frac{\partial A_1}{\partial \beta_0} \right|_{\beta_0 = \beta_{10}} \beta_1^2/(2n). \quad (3)$$

Аналогичная зависимость справедлива и для призмы 2. Используя (3) и учитывая, что приращения углов падения светового пучка на преломляющие поверхности призм 1 и 2 имеют разные знаки, получим

$$\alpha_2 = -A_1 A_2 \beta_1 + (a_2 A_1^2 - A_2 a_1) \beta_1^2/(2n) + a_1 a_2 A_1 \beta_1^3/(2n^2) + a_1^2 a_2 \beta_1^4/(8n^3), \quad (4)$$

где

$$A_1 = A_1(\beta_{10}), \quad A_2 = A_2(\beta_{20}), \quad a_1 = \left. \frac{\partial A_1}{\partial \beta_0} \right|_{\beta_0 = \beta_{10}}, \quad a_2 = \left. \frac{\partial A_2}{\partial \beta_0} \right|_{\beta_0 = \beta_{20}}.$$

Из (4) видно, что зависимость выходного угла отклонения от входного нелинейна. Это приводит к угловым ошибкам в положении отклоненного акустооптической ячейкой светового пучка. Нелинейность, обусловленная вторым членом в (4), может устраняться выбором углов

β_{10} и β_{20} (также α_{10} и α_{20}) в системе двух призм таких, что выполняется условие

$$a_2 A_1^2 = A_2 a_1. \quad (5)$$

Для малых углов отклонения основной вклад в угловую ошибку положения светового пучка дает третий член в выражении (4). Нетрудно показать, что в этом случае угловая ошибка δ в положении светового пучка в процентах по отношению к шагу между позициями отклонения

$$\delta \simeq \frac{N a_1 a_2 \beta_1^2}{4 n^2 A_2} 100\%, \quad (6)$$

где N — число позиций.

На рис. 3 приведены расчетные зависимости угловой ошибки от величины максимального угла отклонения β_1 светового пучка акустооптической ячейкой. Расчет производился на ЭВМ по точным формулам преломления луча в системе двух призм для 32 позиций отклонения. Кривая 1 рассчитана для системы двух призм ($n=1,516$), имеющих одинаковые углы $\beta_{10}=\beta_{20}=38,6^\circ$ ($\alpha_{10}=\alpha_{20}=71,5^\circ$). Кривая 2 относится к системе двух призм, углы которых выбирались в соответствии с условием (5) и равны $\beta_{10}=40^\circ$, $\beta_{20}=37^\circ$ ($\alpha_{10}=75,8^\circ$; $\alpha_{20}=65,5^\circ$). При этом обе системы призм обеспечивают одинаковый коэффициент анаморфозы $A_0=6$. При работе АОД в составе голограммного ЗУ ошибка в положении отклоненного светового пучка, как правило, не должна превышать 10% от шага между позициями. Из рис. 3 можно видеть, что в случае одинаковых призм (кривая 1) диапазон допустимых углов отклонения оказывается слишком узок, особенно для большого числа позиций отклонения. В случае разных призм (кривая 2) диапазон допустимых углов отклонения расширяется. Кривая 2 достаточно хорошо описывается приближенным выражением (6).

На рис. 4, а приведены результаты расчета углов α_{10} и α_{20} в системе двух призм для $n=1,516$ в соответствии с условием (5) и значения общего коэффициента анаморфозы A_0 системы двух призм при выбранных углах α_{10} и α_{20} . Таким образом, задавая необходимое значение A_0 , по рис. 4, а можно найти углы α_{10} и α_{20} призм, требуемые для компенсации нелинейности передачи угла отклонения. Заметим, что выбор углов α_{10} и α_{20} в соответствии с условием (5) необходим при больших значениях A_0 в системе двух призм, для малых A_0 коэффициенты при нелинейных членах в (4) становятся малы и диапазон допустимых углов отклонения расширяется. В этом случае удобнее брать $\alpha_{10}=\alpha_{20}$, например, для системы двух призм с углом Брюстера ($\alpha_{10}=\alpha_{20}=56,59^\circ$; $n=1,516$; $A_0=2,3$) допустимый диапазон углов отклонения составляет ~ 30 мрад ($N=32$), что вполне достаточно. Однако если преобразование светового пучка в оптической системе АОД осуществляется одной призмой, то даже при небольших коэффициентах анаморфозы $A=2 \div 3$ квадратичная нелинейность в (4) приводит к значительным угловым ошибкам. Поэтому в призмных оптических системах АОД необходимо отдать предпочтение системам из двух призм.

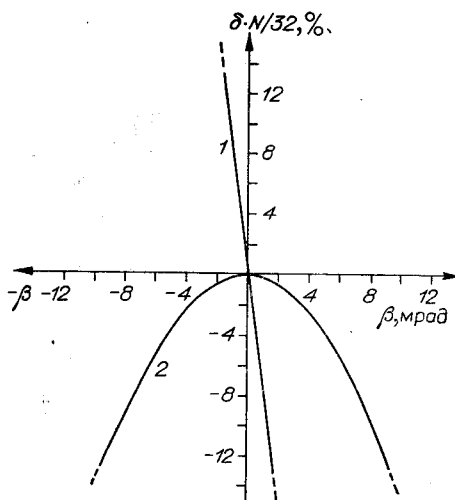


Рис. 3.

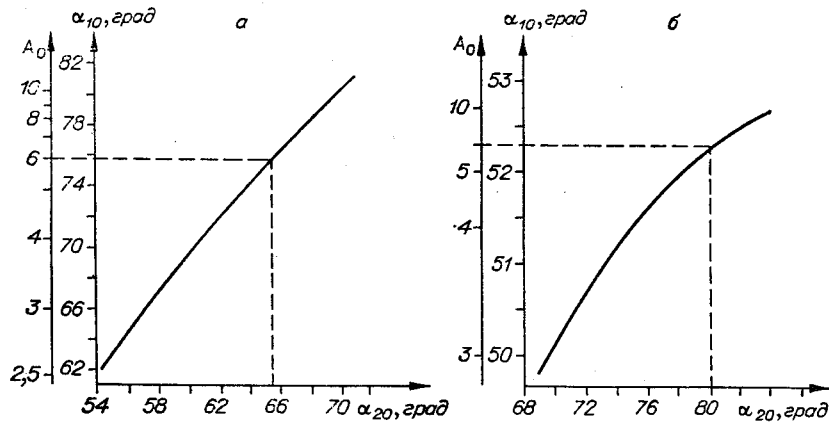


Рис. 4.

Нелинейность передачи угла системой призм 4, 5 на рис. 2 может полностью компенсироваться с помощью аналогичной нелинейности выходных призм 9, 10. Для этого необходимо ориентировать призмы 9, 10 так, чтобы преломляющие поверхности призм 5, 9 и 4, 10 были взаимно параллельны.

Рассмотрим второй вид искажений. В системе на рис. 2 при отклонении светового пучка ячейкой 3 на угол β_1 угол светового пучка с главной плоскостью призм 6, 7 равен $\kappa = A_0 \beta_1$, где A_0 — общий коэффициент анаморфозы призм 4, 5. Известно [6], что световые пучки, лежащие в плоскости, перпендикулярной главной плоскости преломляющей призмы и образующие с ней разные углы κ , после преломления в призме уже не лежат в одной плоскости. При этом на выходе призмы угол пучков с главной плоскостью призмы сохраняется, а проекции световых пучков на главную плоскость призмы не совпадают по направлению. Если луч в главном сечении отклоняется призмой на угол Θ от исходного направления, то проекции косых пучков отклоняются на угол $\Theta + \Delta\Theta$, причем [7]

$$\Delta\Theta = [(n^2 - 1)/2n] (\partial\Theta/\partial n) \kappa^2,$$

где $\partial\Theta/\partial n = \text{tg } \beta_0$ для частного случая преломляющей призмы, показанной на рис. 1, а. Считая, что углы преломления луча в призмах 6 и 7 на рис. 2 равны β_{20} и β_{10} соответственно (по аналогии с рис. 1, б), определим угловую ошибку $\Delta\Theta$ для системы двух призм 6, 7. Призма 6 дает угловую ошибку

$$\Delta\Theta_1 = [(n^2 - 1)/2n] \text{tg } \beta_{20} \kappa^2.$$

При прохождении луча через призму 7 величина $\Delta\Theta_1$ уменьшится в A_1 раз, где A_1 — коэффициент анаморфозы призмы 7, кроме того, призма 7 внесет собственную ошибку $\Delta\Theta_2$, которая противоположна по знаку $\Delta\Theta_1$. В результате для системы двух призм получаем

$$\Delta\Theta = \frac{\Delta\Theta_1}{A_1} - \Delta\Theta_2 = \frac{(n^2 - 1)}{2n} \left(\frac{\text{tg } \beta_{20}}{A_1} - \text{tg } \beta_{10} \right) \kappa^2.$$

Угловая ошибка Δ в положении косых световых пучков, в процентах по отношению к шагу между позициями, для N позиций отклонения

$$\Delta = \frac{N\Delta\Theta}{2\beta_1} 100\% = \frac{N(n^2 - 1)}{4n} \left(\frac{\text{tg } \beta_{20}}{A_1} - \text{tg } \beta_{10} \right) A_0^2 \beta_1 100\%. \quad (7)$$

Как следует из (7), $\Delta = 0$, если

$$\text{tg } \beta_{20}/A_1 = \text{tg } \beta_{10} \quad \text{или} \quad \text{tg } \beta_{20} = \sin \beta_{10} / [(1 - \sin^2 \beta_{10} n^2)]^{1/2}. \quad (8)$$

Условие (8), выраженное через углы падения α_{10} и α_{20} , запишется в виде

$$\operatorname{tg} \alpha_{10} = \sin \alpha_{20} / [(1 - \sin^2 \alpha_{20} / n^2)]^{1/2}. \quad (9)$$

На рис. 4, б показана зависимость углов α_{10} от α_{20} , рассчитанная из соотношения (9) для $n=1,516$; здесь же показаны значения общего коэффициента анаморфозы системы двух призм для выбранных углов α_{10} и α_{20} . Если условие (9) не выполняется, то допустимый диапазон углов отклонения находится из (7). Для $\Delta=10\%$ и $N=32$ допустимый диапазон углов отклонения в системе двух призм с $\alpha_{10} = \alpha_{20} = 71,5^\circ$ ($A_0=6$) равен $2\beta_1=1,6$ мрад, в системе двух призм с углом Брюстера ($\alpha_{10} = \alpha_{20} = 56,59^\circ$; $A_0=2,3$) $2\beta_1=25$ мрад. Отсюда ясно, что выбор α_{10} и α_{20} в соответствии с условием (9) необходим при больших коэффициентах анаморфозы в системе двух призм.

В системе на рис. 2 искажения при преломлении косых световых пучков в призмах 6, 7 могут также компенсироваться выходными призмами 9, 10, которые для этого ориентируются так, чтобы главные плоскости призм 6, 7 и 9, 10 совпадали, а преломляющие поверхности призм 6, 10 и 7, 9 были попарно параллельны.

Таким образом, анализ показывает, что призмной оптической системе присущи два вида искажений, которые сильно возрастают при увеличении коэффициента анаморфозы системы двух призм. Искажения могут исправляться либо выбором углов в системе двух призм, либо ориентацией выходных призм оптической системы дефлектора.

Просветляющие покрытия призм. Коэффициент отражения чистой стеклянной поверхности ($n=1,52$) для света, поляризованного в плоскости падения, остается менее 2,5% в диапазоне углов падения светового пучка $\sim 37 \div 66^\circ$, а при углах падения свыше 66° начинает резко возрастать [8]. Так как при достаточно больших коэффициентах анаморфозы в системе двух призм ($A_0=5 \div 6$) углы падения светового пучка на преломляющую поверхность одной из призм оказываются больше 66° (см. рис. 4, а, б), то для уменьшения потерь света преломляющую поверхность этой призмы необходимо просветлять.

Эффективное просветление поверхности стекла для наклонного падения возможно однослойными и многослойными покрытиями для световой волны, электрический вектор которой лежит в плоскости падения [9]. В случае однослойных покрытий угол падения светового пучка, на котором достигается полное просветление поверхности стекла, увеличивается с увеличением показателя преломления просветляющего покрытия (см. работу [9]).

Нами рассчитывались коэффициенты отражения двух наиболее высокопреломляющих однослойных покрытий из ZnS ($n=2,35$) и TiO_2 ($n=2,45$), нанесенных на стекло К8 ($n=1,516$) в зависимости от углов падения светового пучка. Оптическая толщина покрытий при расчетах принималась равной $\lambda/4$ (λ — длина волны света) на каждом угле падения света. Из результатов расчета, приведенных на рис. 5, видно, что покрытие из ZnS (кривая 1) полностью просветляет стекло при угле падения 73° , покрытие из TiO_2 (кривая 2) — при угле $74,3^\circ$. Для больших углов падения необходимо применять многослойные покрытия. Однако технология изготовления многослойных покрытий для наклонного падения значительно сложнее однослойных,

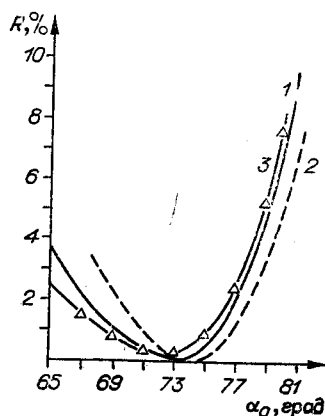


Рис. 5.

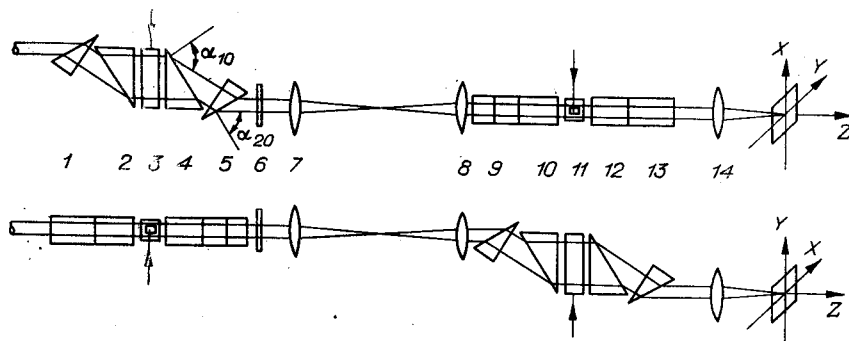


Рис. 6.

что в основном связано со сложностью контроля толщины наносимых пленок. Вследствие этого для просветления призм нами применялись только однослойные покрытия. Кривая 3 на рис. 5 представляет экспериментальную угловую зависимость коэффициента отражения изготовленного однослойного покрытия из ZnS, нанесенного на стекло К8. (Оптическая толщина покрытия равна $\lambda/4$ при угле падения света 73° .) Изготовленное покрытие обеспечивает просветление на уровне коэффициента отражения менее 2,5% в диапазоне углов падения $65 \div 77^\circ$ (кривая 3).

Если углы в системе двух призм рис. 1, б с исправлением нелинейности передачи углов отклонения лежат в диапазоне просветления покрытия из ZnS ($65 \div 77^\circ$), то, как видно из рис. 4, а, достижимые коэффициенты анаморфозы системы двух призм находятся в пределах от 3 до 7, а углы α_{20} оказываются в диапазоне, где отражение поверхности стекла достаточно мало. Поэтому для данных коэффициентов анаморфозы преломляющая поверхность призмы 1 на рис. 1, б просветляется покрытием из ZnS, а преломляющая поверхность призмы 2 может не просветляться. Если в системе двух призм рис. 1, б исправляются искажения при преломлении косых пучков, то при просветлении преломляющей поверхности призмы 2 покрытием из ZnS коэффициенты анаморфозы системы двух призм лежат в диапазоне от 2,5 до 4,6, при этом преломляющая поверхность призмы 1 в просветлении не нуждается (см. рис. 4, б).

Таким образом, при применении покрытия из ZnS система двух призм с исправлением нелинейности обеспечивает большие коэффициенты анаморфозы, чем система с исправлением искажений косых пучков.

Призменные оптические системы. Рассмотрим конкретные схемы призмённых оптических систем для двухкоординатных АОД, в которых исправлены геометрические искажения выходного растра. В призмённой оптической системе один из двух видов искажений необходимо исправлять выбором углов в системе двух призм в соответствии с условиями (7), (11), а второй вид — соответствующей ориентацией выходных призм, как описывалось выше. На рис. 6 приведена в двух проекциях призмённая оптическая система, в которой нелинейность передачи углов отклонения исправляется выбором углов β_{10} и β_{20} (а также α_{10} , α_{20}) в системе двух призм в соответствии с условием (7) (или по рис. 4, а), а искажения косых пучков исправляются выходными призмами. В этой системе элементы 3, 11 — АОЯ; 7, 8, 14 — сферические линзы; 6 — полуволновая пластинка; 1, 2, 4, 5, 9, 10, 12, 13 — призмы.

Выбранные по рис. 4, а углы α_{10} должны относиться на рис. 6 к призмам 2, 4, 10, 12, а углы α_{20} — к призмам 1, 5, 9, 13. Выходные призмы 12, 13 расположены в одной плоскости с призмами 8, 9, пре-

ломляющие поверхности призм 10 и 12, а также 9 и 13 взаимно параллельны. В этом случае система призм 9, 10, 12, 13 не вносит искажений в направлении косых световых пучков.

Оптическая система рис. 6 содержит проектирующие сферические линзы 7, 8, служащие для переноса изображения первой акустооптической ячейки 3 на вторую ячейку 11, при этом отклонение светового пучка по двум координатам происходит из одной точки. Кроме того, устраняется смещение светового пучка, отклоненного ячейкой 3 по апертуре ячейки 12. Заметим, что линзы 7, 8 не вносят значительных аберраций, так как работают в узком световом пучке.

В отличие от системы рис. 2 выходной световой пучок в системе рис. 6 имеет диаметр, равный диаметру входного лазерного пучка, а углы отклонения больше, чем углы отклонения акустооптических ячеек, в число раз, равное коэффициенту анаморфозы в системе двух призм.

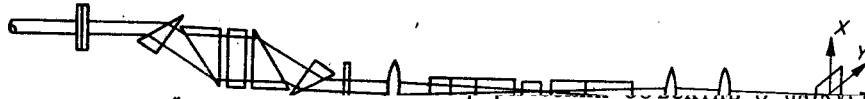
Для уменьшения потерь света входной лазерный пучок в системе на рис. 6 поляризован в главной плоскости призм 1, 2, 4, 5. Полуволновая пластинка служит для вращения плоскости поляризации света на 90° и совмещения ее с главной плоскостью призм 9, 10, 12, 13. При коэффициенте анаморфозы в системе двух призм в диапазоне от 3 до 7 преломляющие поверхности призм 2, 4, 10, 12 на рис. 6 просветляются покрытием из ZnS, а преломляющие поверхности призм 1, 5, 9, 13 могут не просветляться. Таким образом, максимальный выигрыш в величине управляющей мощности, подаваемой на ячейки в системе рис. 6, равен 7.

Нелинейность передачи углов отклонения светового пучка в системе рис. 6 исправляется для ограниченного диапазона углов отклонения ($2\beta_1 = 16,5$ мрад при $A_0 = 6$). Существует другая призмная система с компенсацией искажений, которая не накладывает ограничений на диапазон углов отклонения светового пучка. В отличие от системы на рис. 6 выходные призмы 12, 13 в этой системе повернуты на 90° вокруг оптической оси для полного устранения нелинейности передачи углов отклонения призмами 4, 5. С учетом того что проектирующие линзы 7, 8 на рис. 6 переворачивают изображение призм 4, 5, взаимная ориентация призм 4, 5, 12, 13 в этой системе должна быть такой же, как и ориентация призм 4, 5, 9, 10 на рис. 2.

Искажения при преломлении косых световых пучков в этой системе полностью устраняются выбором углов α_{10} и α_{20} в системе двух призм в соответствии с соотношением (9) (см. рис. 4, б). При этом преломляющие поверхности призм 2, 4, 10, 12, работающие при угле α_{10} , в просветлении не нуждаются, а призмы 1, 5, 9, 13, работающие при угле α_{20} , должны просветляться. При применении просветления из ZnS рассматриваемая оптическая система обеспечивает максимальный выигрыш в управляющей мощности, равный $\sim 4,6$, что меньше, чем в ранее рассмотренной системе. К недостаткам рассматриваемой системы относится необходимость применения второй полуволновой пластинки после акустооптической ячейки 11 на рис. 6. По этим причинам, если не требуется очень большой диапазон углов отклонения светового пучка, ранее рассмотренная система на рис. 6 является более предпочтительной.

Для акустооптических материалов с низким критерием качества (M_2) часто требуется обеспечить больший выигрыш в управляющей электрической мощности, чем в системе рис. 6. Для этой цели может быть применена оптическая система, сочетающая призмную и цилиндрическую оптику, которая показана на рис. 7.

В отличие от системы рис. 6 эта система содержит две ортогонально расположенные цилиндрические линзы 1, 14 и сферический объектив 8. Цилиндрическая линза 1 фокусирует световой пучок по-



ет параллельный по координате X световой пучок в плоскость ячейки 11, а по координате Y преобразует расходящийся световой пучок в параллельный, который далее преобразуется призмами 9, 10, 12, 13. Цилиндрическая линза 14 преобразует цилиндрический волновой фронт в плоский. Сферическая линза 15 фокусирует световой пучок на плоскость сканирования X, Y . Полуволновая пластинка 7 вращает плоскость поляризации света на 90° . При фокусировке световых пучков в плоскость ячеек 4 и 11 преломляющие призмы в системе рис. 7 работают в косых световых пучках, однако так как ориентация призм и все их углы в этой системе аналогичны системе рис. 6, то, как отмечалось выше, преломляющие призмы не вносят искажений при преломлении косых световых пучков. Световой пучок на поверхностях светозвукопроводов в системе на рис. 7 имеет форму узких длинных световых полосок.

Простые расчеты показывают, что отношение длины световой полоски к ее ширине может достигать значений $A_0=100$ и более. Однако реализовать такие значения выигрыша в величине управляющей электрической мощности не удастся вследствие ограничений на минимальную высоту звукового столба в акустооптических ячейках, обусловленных дифракционной расходимостью звукового пучка, а также тем фактом, что при работе ячейки 4 световой пучок смещается по высоте звукового столба в акустооптической ячейке 11 [2]. В большинстве случаев система рис. 7 обеспечивает выигрыш в величине электрической мощности, лежащий в диапазоне $A_0=10 \div 20$, что, однако, превышает выигрыш, достигаемый в системе рис. 6. Так как элементы 1, 8, 14, 15 в системе рис. 7 преобразуют световой пучок малого диаметра, то эта оптическая система может иметь небольшие габариты при полном отсутствии аберраций, вносимых этими элементами. Недостатком системы рис. 7 является то, что отклонения светового пучка по каждой координате осуществляются из разных точек на оптической оси, что приводит к взаимной непараллельности световых пучков после линзы 15.

Таким образом, существует несколько призмённых оптических схем акустооптических дефлекторов, в которых обеспечивается значительный выигрыш в управляющей электрической мощности и в то же время отсутствуют геометрические искажения выходного растра. Выбор того или иного варианта призмённой оптической системы зависит от задачи и параметров акустооптических ячеек.

Результаты экспериментов. С целью экспериментального исследования предложенных призмённых оптических систем создана система, схема которой показана на рис. 6. Призмы изготовлены из стекла К8 ($n=1,516$), углы при вершинах призм, а также углы падения и преломления световых пучков на преломляющих поверхностях выбирались в соответствии с условием (5) и равны $\alpha_{10}=75,8^\circ$, $\alpha_{20}=65,8^\circ$ ($\beta_{10}=40^\circ$, $\beta_{20}=37^\circ$). Коэффициент анаморфозы в системе двух призм $A_0=6$. Просветление преломляющих поверхностей призм с $\alpha_{10}=75,8^\circ$ производилось однослойным ($\lambda/4$) покрытием из ZnS для длины волны света $\lambda=0,63$ мкм (зависимость коэффициента отражения изготовленных покрытий от угла падения светового пучка показана

на на рис. 5, кривая 3). Преломляющие поверхности призмы с $\alpha_{20} = 65,6^\circ$ не просветлялись, так как коэффициент отражения при таком угле падения достаточно низок $\sim 1,5\%$. Поверхности призмы, на которые световой пучок падает нормально, просветлялись двухслойным покрытием из $ZnS-MgF_2$ до коэффициента отражения $\sim 0,5\%$.

В системе использованы акустооптические ячейки из монокристаллов KRS-5 [2]. Диапазон углов отклонения ячейками равен 4,5 мрад. Фокусное расстояние линз 7, 8 на рис. 6 было выбрано равным 80 мм. В этом случае при диаметре светового пучка, равном 3 мм, линзы 7, 8 не вносят значительной сферической аберрации.

На рис. 8 показана фотография раstra 16×16 отклоненных световых пучков, который был получен в призмной оптической системе двухкоординатного дефлектора при управлении от ЭВМ. Как видно из рис. 8, геометрические искажения формы раstra отсутствуют, некоторое размытие световых пятен обусловлено невысоким оптическим качеством светозвукопроводов дефлекторных ячеек. Габаритные размеры акустооптического дефлектора с призмной оптикой равны $70 \times 70 \times 500$ мм, что значительно меньше, чем для дефлектора с цилиндрической оптикой ($70 \times 70 \times 3000$ мм) [2]. Общий коэффициент пропускания оптической системы по свету $\sim 70\%$.

Заключение 1. Призмные оптические системы двухкоординатных акустооптических дефлекторов обладают искажениями, приводящими к погрешностям отклонения световых пучков.

2. В предложенных вариантах призмных систем дефлекторов эти аберрации устранены, что позволяет получить высокую точность позиционирования отклоненных световых пучков.

3. Экспериментальные исследования подтверждают правильность полученных в работе результатов и свидетельствуют о работоспособности предложенных вариантов призмных оптических систем.

Авторы выражают благодарность П. Е. Твердохлебу за помощь в работе и полезные замечания, сделанные при чтении рукописи.

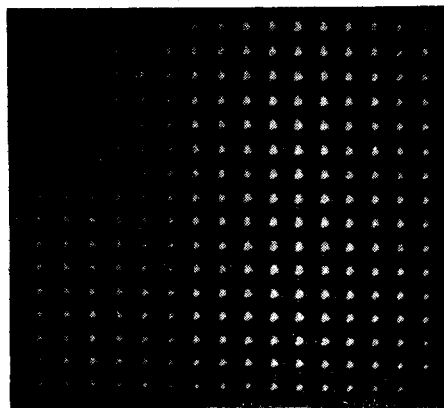


Рис. 8.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. K. Anderson. High capacity holographic optical memory.— "Microwaves", 1970, vol. 9, № 3, p. 787—794.
2. С. В. Богданов и др. Двухкоординатный акустооптический дефлектор.— «Автометрия», 1975, № 3, с. 12—18.
3. В. Н. Вьюхин, И. С. Гибин, В. В. Курочкин, В. М. Мاستихин, П. Е. Твердохлеб, Ю. Н. Тищенко, А. В. Трубецкой, Д. В. Шелопут. Система акустооптического отклонения лазерного пучка.— «Автометрия», 1976, № 6, с. 97—98.
4. R. Auffret, R. Lacroix, J. Sapriel. Mémoire holographique numérique à accès par déflexion acoustooptique.— "Tonde électrique", 1971, vol. 51, № 9, p. 62—66.
5. Tomson—CSF. Acousto-optical deflection system.— Пат. Великобритании (МКИ G 02 F1/16) № 1369309, заявл. 1971, опубл. 1974.
6. Б. Н. Бегунов. Трансформирование оптических изображений. М., «Искусство», 1965.
7. И. В. Пейсахсон. Оптика спектральных приборов. Л., «Машиностроение», 1971.
8. М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. М., «Наука», 1970.
9. Г. В. Розенберг. Оптика тонкослойных покрытий. М., ГИФМЛ, 1958.

Поступила в редакцию 19 июля 1976 г.