

А. Е. Городецкий, М. Е. Компан, А. Г. Сергеев

(Санкт-Петербург)

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКАЯ ЛИНЗА С ПЕРЕМЕННЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ДЕФЛЕКТОРНЫХ АЦП

Предложен новый функциональный элемент интегральной оптики — линза с переменным фокусным расстоянием — и несколько вариантов реализации такого элемента. Применение их позволяет совместить несколько функций в едином элементе, что обеспечивает выполнение оптоэлектронных элементов в рамках единой технологии и уменьшение размеров электрооптического кристалла. Рассмотрены преимущества использования линзы с переменным фокусным расстоянием в оптоэлектронных АЦП.

Оптическая обработка информации обладает неоспоримыми преимуществами и лишена ряда принципиальных ограничений, характерных для традиционных информационно-компьютерных систем. Однако принципиально высокая эффективность оптико-компьютерных систем не всегда может быть реализована без соответствующего прогресса различных интерфейсных устройств.

Подобными устройствами, функционирование которых может существенно определять эффективность указанных систем в целом, являются оптоэлектронные аналого-цифровые преобразователи (ОЭ АЦП) [1]. Ключевым элементом таких систем — элемент, осуществляющий преобразование параметров светового пучка в соответствии с характеристиками преобразуемого сигнала. В зависимости от принципа работы элемента выделяют интерференционные и дефлекторные ОЭ АЦП [1]. В устройствах последнего типа изменение параметров входного сигнала преобразуется в изменение пространственного положения светового пучка; в свою очередь, при различных положениях пучка он с помощью кодирующего элемента (голограммы, кодирующей матрицы, световодов) различным образом перераспределяется между набором фотоприемников, выходные сигналы которых и являются кодовым представлением преобразуемого сигнала.

В [2] было предложено устройство, в котором исходный световой пучок отклонялся призмением электрооптическим дефлектором и затем фокусировался на одном из кодирующих элементов строки микроголограмм, осуществлявшем перераспределение светового пучка по линейке фотоприемников. Совмещение в подобном ОЭ АЦП двух функциональных элементов интегральной оптики — дефлектора и линзы — позволило бы уменьшить габариты устройства и выполнить этот элемент в едином технологическом процессе.

Подобный элемент с комплексной функцией мог бы иметь применение и помимо возможного использования в ОЭ АЦП с учетом того, что известные управляемые линзы интегральной оптики способны лишь к изменению эффективности дифракции (линзы Брэгга и Френеля [3]), но не к изменению положения точки фокусировки. Кроме того, подобный элемент лишен некоторых недостатков известных типов линз интегральной оптики — геодезической линзы и линзы Люненберга [3].

Из общих принципов волновой оптики следует, что линзой с переменным фокусным расстоянием будет являться устройство, обеспечивающее параболический сдвиг фазы $\{\varphi(y)\}$ по сечению волнового фронта u :

$$\varphi(y) = A(U)y^2, \quad (1)$$

причем изменение фокусного расстояния должно обеспечиваться управлением константой пропорциональности $A(U)$. Очевидная аналогия этого устройства с классическими оптическими элементами позволяет рассмотреть наиболее простую из возможных реализаций такого устройства.

Новое функциональное устройство характеризуется как развитие объемного призмного электрооптического дефлектора, принцип работы и устройство которого будем считать известными [4].

Пусть верхняя пара электродов предлагаемого устройства представляет собой прямоугольник с вырезанным в нем круговым сегментом (см. рисунок). Рассмотрим малый участок такого дефлектора, для которого разрез приближенно можно считать прямолинейным, и воспользуемся выражением для сдвига фазы на единичном дефлекторе [5]:

$$\varphi = 2\pi n_i r_{jk} U l (\lambda d)^{-1}, \quad (2)$$

где n_i — показатель преломления; r_{jk} — электрооптическая константа материала; l — длина дефлектора; λ — длина волны света; U — электрическое напряжение, приложенное к слою материала толщиной d . Индексы зависят от конкретного типа материала и выбранных ориентаций осей. Из (1) для известной ширины входной грани дефлектора h легко получается выражение для угла поворота луча γ :

$$\operatorname{tg} \gamma = \varphi \lambda / h = 2\pi n_i^3 r_{jk} (U/d) (\lambda/h) (l/\lambda). \quad (3)$$

Данное выражение удобно представить с учетом подстановки величины электрического поля $E = U/d$ в слое и угла щели дефлектора α ($\operatorname{ctg} \alpha = l/h$):

$$\operatorname{tg} \gamma = 2\pi n_i^3 r_{jk} E \operatorname{ctg} \alpha. \quad (4)$$

Учитывая, что кривая разреза дефлектора по сегменту удовлетворяет уравнению

$$y^2 + (x - R)^2 = R^2 \quad (5)$$

в приближении геометрической оптики, можно записать выражение для угла поворота луча, пересекающего такой дефлектор на расстоянии x от оси сегмента

$$\operatorname{ctg} \gamma = dx/dy; \quad 2y = 2(R - x)dx/dy,$$

или для малых x ($x \ll R$ — тонкие линзы)

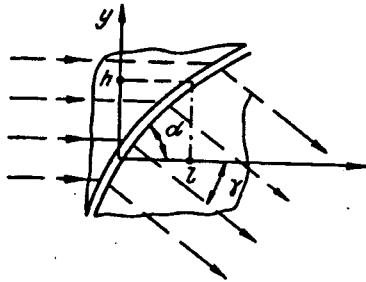
$$\operatorname{ctg} \gamma = y/R. \quad (6)$$

Поскольку для фокусировки всех лучей в одной точке угол отклонения лучей должен быть пропорционален расстоянию участка дефлектора от оси, условие (6) есть доказательство того, что предложенный дефлектор с сегментным разрезом обладает свойствами фокусировки.

Учитывая, что фокусное расстояние линзы F определяется простым соотношением $F = y \operatorname{ctg} \gamma$, и пользуясь тем, что для малых углов справедливо соотношение $\operatorname{ctg} \gamma = 1/\gamma$ из (6) и (4), имеем для F такой линзы

$$F = \frac{1}{R(2\pi E n_i^3 r_{jk})}. \quad (7)$$

Полученный результат имеет весьма простой вид, из которого сразу следует свойство рассматриваемой линзы с переменным фокусным расстоянием: линза в первом приближении ахроматична (с точностью до зависимости от длины волны констант n_i и r_{jk}). Это свойство, безусловно, является нетривиальным, так как большинство электрооптических устройств сохраняет прямую зависимость своих характеристик от λ . Интересно также заметить, что знаменатель в выражении (7) безразмерный и его величина определяет максимальный из углов поворотов лучей, проходящих через линзу, и тем самым ее предельную светосилу.



Оценим величину безразмерного знаменателя в выражении (7), представляющего собой коэффициент пропорциональности между кривизной сегмента и фокусным расстоянием. Если воспользоваться константами для наиболее технологически освоенного материала — ниобата лития ($n_e = 2,3$, $r_{33} = 30 \cdot 10^{-12}$ м/В) — и считать, что к слою 100 мкм приложено напряжение 100 В, то величина знаменателя в (7) будет порядка 0,002. Поскольку, видимо, столь длиннофокусная линза должна быть малоудобна для практических применений в оптике и обладать малой светосилой, в качестве электрооптического материала должен рассматриваться материал с более высокими значениями электрооптических констант. Например, смешанный кристалл $Ba_{0,25}Sr_{0,75}Nb_2O_6$ с электрооптической константой $r_{14} = 1340 \cdot 10^{-12}$ м/В позволит при радиусе кривизны сегмента порядка 1 мм получать фокусные расстояния до 1 см. Эта величина представляется уже приемлемой и, кроме того, по порядку величины светосилы соответствует расходимости полупроводниковых источников света.

Прежде чем исследовать полученные выражения, проанализируем возможность реализации линзы с переменным фокусом в интегральном (пленочном) варианте, так как именно этот аспект определяет перспективность элементов такого типа.

Принципиально возможно создание фокусирующего дефлектора в пленочном варианте за счет модификации волноводного призматического дефлектора. Анализ этой возможности предполагается провести в отдельной работе.

Довольно очевидным образом функцию фокусировки излучения можно реализовать на базе известного дефлектора типа решетки канальных волноводов [4]. Для этого ряд смежных световодных каналов в монолитной подложке должен иметь электроды с длинами, соответствующими выражению (1). При этом осциллирующая диаграмма направленности, свойственная такой решетке, останется без изменения. В новом варианте изменение напряжения на электродах будет не просто перераспределять интенсивности между различными углами дифракции: в этом случае будет происходить перераспределение интенсивности между точками фокусировки различных лепестков угловой диаграммы интенсивности излучения.

При этом если длины электродов $\{l(y)\}$, наложенных на решетку канальных волноводов, подчиняются закону $l(y) = ay^2$, то величина фокусного расстояния может быть получена из стандартной формулы линзы: $1/F = (n - 1)R = Un^3r_{33}(2ad)^{-1}$, что практически повторяет формулу (7).

Менее очевидно, что подобная система электродов может практически также функционировать на сплошной светопроводящей пленке без формирования в ней каналов. Отсутствие каналов скажется лишь в некотором уменьшении контраста распределения интенсивности в фокальной плоскости и приблизительно двукратном уменьшении эффективности фокусировки. Действительно, если электродная структура нанесена на сплошную светопроводящую пленку, для проходящего света можно выделить три типа условий в зависимости от конкретного положения луча относительно системы электродов.

I. Лучи, проходящие непосредственно под электродами. Эта часть пучка не испытывает действия поля, не модулируется и не фокусируется, но в силу периодичности расположения электродов дает угловое распределение, соответствующее дифракции на решетке с соответствующим периодом. Интенсивность этой части пучка пропорциональна отношению ширины собственно электрода к периоду их расположения и может быть порядка нескольких процентов.

II. Лучи, проходящие между электродами так, что поле электродов оказывает фокусирующее действие. Случай аналогичен решетке канальных волноводов, рассмотренных ранее.

III. Лучи, проходящие между электродами так, что направление поля в области прохождения обратно условию «два». В силу линейности вышеприве-

денных формул (2)—(4), (7) эта часть пучка будет расходящейся, причем расходящийся пучок соответствует мнимой фокусировке диаграммы решетки.

Поскольку вариант с электронной системой без формирования каналов привлекателен по технологическим соображениям, отметим одну его особенность, существенную при использовании его в ОЭ АЦП: при перемене знака сигнала сходящийся и расходящийся пучки подменяют один другой. В зависимости от схемного решения ОЭ АЦП это свойство может приводить либо к ошибкам, либо, наоборот, использоваться для расширения функциональных возможностей (преобразование модуля сигнала).

В любом случае идея линзы с переменным фокусным расстоянием, первоначально рассмотренная на примере объемного устройства, осуществима и в волноводном варианте. Даже довольно поверхностное рассмотрение, проведенное здесь, показало наличие различных вариантов реализации, и, несомненно, этим возможности не исчерпываются. Важна принципиальная реализуемость волноводного варианта, которая позволит использовать межэлектродные расстояния порядка 10 мкм и обеспечить функционирование устройства при напряжениях порядка 10 В. Кроме того, существенна и совместимость устройства с интегральной технологией.

Вернемся к рассмотрению свойств линзы с переменным фокусом на основе объемного призмного электрооптического дефлектора как прототипа устройств с подобной функцией.

Сканирование точки фокусировки в пространстве при изменении управляющего напряжения может быть использовано для цифровой кодировки положения выходного оптического пучка. Смещение точки фокуса в приближении малых углов (параксиальные пучки) легко получить из (7):

$$dF/dU = Rd(2\pi n_i^3 r_{jk} U^2)^{-1}. \quad (8)$$

Чувствительность V_0 ОЭ АЦП с использованием предложенного элемента будет соответствовать напряжению, перемещающему луч с одного элемента кодирующего устройства на другой на расстояние A порядка размеров светового пятна в фокусе. Очевидно, что эта величина также зависит от фокусного расстояния. В нашем случае рассматриваемое устройство (линза) по назначению является сравнительно широкоапертурным, поэтому величина пятна в фокусе будет определяться не дифракцией, а величиной изображения W источника света с размерами W_0 :

$$W = W_0 F / F_0.$$

Здесь F_0 — фокусное расстояние линзы, собирающей свет; F — фокусное расстояние управляемой линзы.

При типичных значениях $W_0 = 10$ мкм и $F_0 = 1$ см получим $W = 0,001F$, т. е. размер пятна растет с удлинением фокусного расстояния, что естественно.

Получим выражение для величины напряжения, смещающего точку фокусировки на расстояние порядка ширины светового пятна в фокусе:

$$V_0 = W dU / dF = 2\pi n_i^3 r_{jk} W_0 F U^2 (F_0 R d)^{-1} = W_0 U / F_0. \quad (9)$$

Проведенные расчеты не принимали во внимание конкретные величины углов отклонения и поэтому могут рассматриваться лишь как оценки порядков величин. Тем не менее из выражения (9) следует нелинейность чувствительности такого рода модуляторов/дефлекторов, что должно учитываться и компенсироваться при создании кодирующего устройства. Некоторые ограничения (9) налагает и на возможную разрядность ОЭ АЦП, но эти ограничения также могут компенсироваться соответствующим выбором W_0 и F_0 .

Строгое рассмотрение предела разрешения такой линзы является отдельной задачей. Из общих соображений, однако, ясно, что дифракционные ограничения разрешения будут аналогичны ограничениям обычных линз и определяются апертурой. В том случае, если в устройствах будет использоваться нецентральная часть линзы, на разрешение станут влиять эффекты толщины, и эти эффекты должны быть учтены. В частности, один из путей

коррекции в этом случае — сведение «толстой» линзы к «эффективно тонкой» за счет введения фазосдвигающих электродов аналогично [6], однако это приведет к схемному усложнению и ухудшению параметров ОЭ АЦП.

Таким образом, предложены новый функциональный элемент интегральной оптики — линза с переменным фокусным расстоянием — и несколько вариантов реализации такого элемента. Применение их позволяет совместить несколько функций в едином элементе, что обеспечивает выполнение оптоэлектронных элементов в рамках единой технологии и уменьшение размеров электрооптического кристалла. Рассмотрены преимущества использования линзы с переменным фокусным расстоянием в оптоэлектронных АЦП.

Кроме того, данное устройство, безусловно, можно использовать и как коммутатор оптических каналов или для выполнения иных функций. Важным существенным положительным отличием предлагаемой линзы от различного типа дифракционных отклоняющих устройств (в том числе френелевских или брэгговских линз [3]) является принципиально близкая к 100 % эффективность отклонения пучка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дохилян Р. Г., Евтихий Н. Н., Каринский С. С. и др. Использование оптоэлектронных методов для создания быстродействующих аналого-цифровых преобразователей // Зарубеж. радиоэлектрон.—1985.—№ 9.
2. Сергеев А. Г., Городецкий А. Е. Интегрально-оптический АЦП // II Всесоюз. конф. по оптической обработке информации: Тез. докл.—Фрунзе: Илим, 1990.
3. Хасперджер Р. Интегральная оптика /Пер. с англ.—М.: Мир, 1985.
4. Balmer C. N., Burns W. K., Gielorenzi T. G. Ultrahigh resolving electrooptic prisms array light deflectors // Appl. Opt.—1979.—18, N 19.
5. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света.—М.: Наука, 1970.
6. Ninomija Y. Performance criteria and limitations of electrooptic waveguide array deflectors // IEEE J. Quantum Electron.—1973.—QE-9, N 8.

Поступила в редакцию 8 апреля 1991 г.

УДК 681.51

А. А. Воевода, В. А. Жмудь

(Новосибирск)

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОФОКУСИРОВКИ ДЛЯ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ МЕТОДОМ РАЗДЕЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ, КОРРЕКТНОСТЬ МЕТОДА

При синтезе системы слежения за фокусом для магнитооптической дисковой памяти динамические свойства контура регулирования регламентируются международным стандартом. В связи с нестационарностью объекта эта задача решается методом разделения движений. Исследуется влияние на поведение замкнутой системы корней объекта, не учтенных при его идентификации вследствие их малого влияния на динамику объекта без регулятора.

Введение. Обеспечение большой емкости и малого времени доступа дисководных магнитооптических запоминающих устройств (например, реверсивных ЗУ на основе эффекта Керра [1]) требует создания высокоточных быстродействующих систем слежения за фокусом и дорожкой, обеспечивающих острую фокусировку светового пятна малого диаметра на рабочую поверхность диска и позиционирование его в радиальном направлении в условиях значительных радиальных и осевых биений диска. Динамические свойства систем слежения регламентируются Международным стандартом [2]. Решение задачи без учета стандарта [2] приведено в [1], где сделан вывод о том, что желаемые динамические свойства системы определены уравнением первого порядка и это приводит к завышенному коэффициенту усиления