

УДК 535.8

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ДЕФЛЕКТОРОВ ГРАДИЕНТНОГО ТИПА

Б. Б. Севрук

Для создания управляющего электрического поля в градиентном электрооптическом дефлекторе лазерного излучения вместо гиперболических электродов предлагается применить систему электродов более простой конфигурации. На основе расчета aberrаций, вносимых отклонением управляющего поля от идеального, проведен сравнительный анализ возможностей разрешающей способности обоих дефлекторов от диаметра отклоняемого светового пучка и допустимой величины управляющего напряжения.

Для получения высоких разрешений в градиентных электрооптических дефлекторах лазерного излучения требуется управляющее электрическое поле как можно более близкое к идеальному, зависимость потенциала которого от координат должна удовлетворять следующему уравнению

$$\varphi(y, z) = \frac{U_0 \varepsilon_y}{r_0^2 (\varepsilon_x + \varepsilon_y)} \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} y^2 - z^2 \right) + \frac{\varepsilon_y - \varepsilon_x}{\varepsilon_y + \varepsilon_x} \frac{U_0}{2}, \quad (1)$$

где ε_x , ε_y — компоненты тензора диэлектрической проницаемости электрооптического кристалла в направлении главных осей, U_0 — величина управляющего напряжения, r_0 — радиус апертуры устройства. При заданных величинах r_0 и U_0 поле, с распределением потенциала удовлетворяющем (1), обеспечивает максимальный угол отклонения светового пучка без искажений [1].

Для получения поля с потенциалом (1) в работе [1] предложена система четырех электродов, имеющих сложную в технологическом отношении конфигурацию в виде симметричных относительно координатных плоскостей гиперболических цилиндров, четверть перпендикулярного оси поперечного сечения которых показана на рис. 1 пунктиром. Возможности замены гиперболических поверхностей более простыми (плоскими и отрезками круговых цилиндров), а также влияние краевых явлений на конфигурацию управляющего поля исследовались в [2, 3].

В настоящей работе исследуется другая возможность приближенного получения поля с потенциалом (1). По аналогии с электронно-оптическими устройствами [4], предлагается применить многоэлектродную систему с делителем напряжения. Электроды в таком дефлекторе выполнены в виде металлических полосок, эквидистантно размещенных по поверхности электрооптического кристалла, выполненного в виде кругового цилиндра, и подключенных к делителю напряжения. Четверть поперечного сечения устройства изображена на рис. 1 для случая 20 управляющих электродов. Нетрудно показать, что для приближенного получения внутри кристалла электрического поля с потенциалом (1), на электроды, расположенные на поверхности цилиндра радиусом r_0 , должно быть подано через делитель напряжения распределение потенциала, удовлетворяющее уравнению

$$\varphi_i = \varphi_0 \cos 2\theta_i, \quad (2)$$

где θ_i — полярный угол луча, проведенного через середину i -электрода. Поле в кристалле, созданное такой системой электродов, будет тем точнее аппроксимировать поле с потенциалом (1), чем больше будет применено управляющих

электродов. Идеальное поле (1) получится в пределе при непрерывном распределении потенциала, удовлетворяющем (2).

Для оценки эффективности работы предложенного дефлектора по сравнению с дефлектором с гиперболическими электродами проведены расчеты их разрешающей способности в зависимости от диаметра отклоняемого пучка света с учетом как искажения конфигурации управляющего поля из-за конечности длины

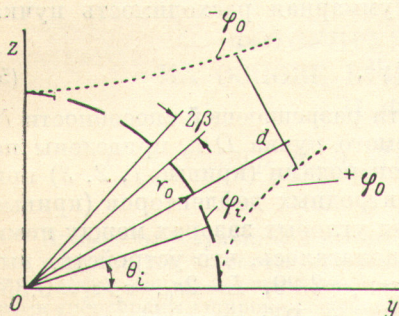


Рис. 1.

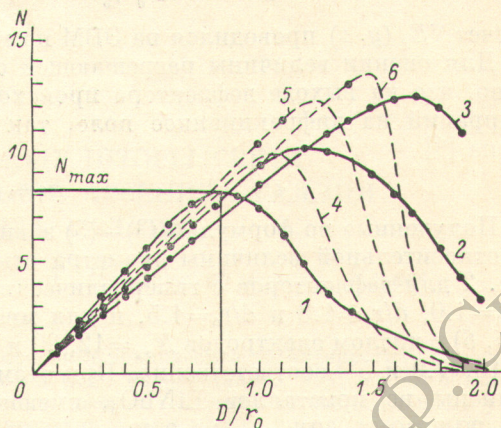


Рис. 2.

гипербол и числа электродов, так и допустимой величины управляющего напряжения, которая при постоянной максимальной величине напряженности поля $E_{\max}$ в зазоре между электродами пропорциональна его величине.

Разрешающая способность дефлекторов определялась по формулам [5]

$$N = \frac{\alpha_{\max}}{\gamma}, \quad \alpha_{\max} = \frac{1}{2} n^3 r E_{\max} \frac{\Delta}{2r_0} \frac{L}{r_0} |\nabla E_x(0, 0)|, \quad (3)$$

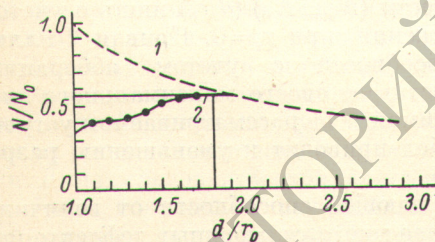


Рис. 3.

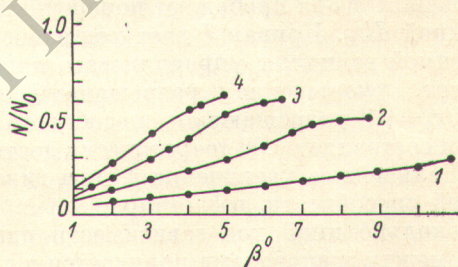


Рис. 4.

где $\alpha_{\max}$ — максимальный угол отклонения светового пучка, γ — угловая расходимость пучка на выходе из дефлектора, n — показатель преломления электрооптического кристалла в отсутствие поля, r — электрооптический коэффициент, L — длина кристалла вдоль оптической оси устройства, $\nabla E_x(y, z)$ — безразмерная величина, равная градиенту z — составляющей электрического поля при единичных значениях $E_{\max}$ и r_0 , Δ — величина зазора между электродами, которая в случае гипербол определяется расстоянием d границы кристалла, выбранной перпендикулярной асимптотам, от центра дефлектора, а в многоэлектродном дефлекторе — угловым расстоянием между электродами β (рис. 1). Обусловленные искажениями управляющего поля из-за краевых явлений отклонения градиента показателя преломления кристалла от постоянного значения приведут к увеличению угловой расходимости отклоняемого пучка света по сравнению с дифракционной $\gamma_d = \xi \lambda / D$ [5], где D — диаметр пучка, λ — длина волны, $\xi = 1.27$ — для пучка с гауссовым распределением интенсивности, и

уменьшению разрешающей способности по сравнению с теоретически достижимой при $\gamma = \gamma_d$.

Величина расходимости, наведенной искажениями управляющего поля, определяется как угол между максимально отклоненным лучом в пучке и центральным лучом

$$\gamma_i = \frac{1}{2} n^3 r E_{\max} \frac{\Delta}{2r_0} \frac{L}{r_0} \{ |\nabla E_z(y, z)|_{\max} - |\nabla E_z(0, 0)| \}. \quad (4)$$

Расчет $\nabla E_z(y, z)$ проводился на ЭВМ по методике, изложенной в [3].

Для оценки величины разрешающей способности N по (3) было предположено, что на выходе дефлектора происходит независимое наложение лучевых aberrаций на дифракционное поле, так что суммарная расходимость пучка равна [6]

$$\gamma = (\gamma_i^2 + \gamma_d^2)^{1/2}. \quad (5)$$

Полученные по формулам (3)–(5) зависимости разрешающей способности N от относительной величины диаметра отклоняемого пучка D/r_0 приведены на рис. 2 для дефлекторов с гиперболическими электродами (кривые 1, 2, 3) при $d/r_0 = 1.0$, $d/r_0 = 1.3$ и $d/r_0 = 1.5$, и для многоэлектродных дефлекторов (кривые 4, 5, 6) с числом электродов $N_{\text{эл}} = 12, 20$ и 28, при угловых зазорах между ними $\beta = 13, 7.9$ и 5° соответственно. При этом предполагалось, что устройства выполнены из кристаллов LiNbO_3 , имеющих $n = n_z = 2.29$, $L = 2r_0$, $\epsilon_z/\epsilon_y = 0.35$, $r_{zz} = 30.8 \cdot 10^{-12}$ м/В, при $\lambda = 0.63$ мкм и $E_{\max} = 10^6$ В/м. Все полученные зависимости $N(D/r_0)$ характеризуются наличием максимума $N_{\max}$ при некотором оптимальном диаметре пучка $D_0 < 2r_0$, величина которого растет по мере улучшения аппроксимации управляющего поля. Хотя дефлекторы с гиперболическими электродами и большими поперечными размерами при диаметрах пучка близких к $2r_0$ дают лучшие разрешения, максимальные значения разрешения $N_{\max}$ многоэлектродных дефлекторов, при соответствующем выборе числа электродов и углового расстояния между ними, могут быть выше.

На рис. 3 представлены зависимости отношения максимальной разрешающей способности $N_{\max}$ дефлектора с гиперболическими электродами к теоретически достижимой N_0 при отсутствии aberrаций и ограничения управляющего напряжения из-за пробоя, от поперечных размеров электродов, определяемых величиной d/r_0 . Кривая 1 дает ход зависимости $(N_{\max}/N_0)(d/r_0)$ лишь с учетом допустимой величины управляющего напряжения, при $\gamma_i = 0$. Кривая 2 иллюстрирует уменьшение разрешающей способности с учетом aberrаций. При $d/r_0 = 1.8$ разрешающая способность достигает своего максимального значения и составляет 0.56 теоретически достижимой [1] в рассматриваемом устройстве. Дальнейшее увеличение длины гипербол приводит к уменьшению разрешающей способности дефлектора.

Несколько иной ход зависимости разрешающей способности от величины зазора между электродами получается в случае многоэлектродных дефлекторов. На рис. 4 изображена зависимость $N_{\max}/N_0(\beta)$ при $N_{\text{эл}} = 12$, $N_{\text{эл}} = 20$, $N_{\text{эл}} = 28$, $N_{\text{эл}} = 36$ (кривые 1–4 соответственно). Разрешающая способность при заданном числе электродов растет с увеличением величины зазора между электродами, и при $N_{\text{эл}} = 28$ достигает значения $0.61N_0$, что превышает максимально достижимое значение для дефлекторов с гиперболическими электродами. Путем увеличения числа управляющих электродов возможно дальнейшее повышение разрешения.

Л и т е р а т у р а

- [1] Н. А. Гусак, В. Е. Лепарский. Ж. прикл. спектр., 23, вып. 1, 1975.
- [2] Р. П. Княткин. Опт. и спектр., 38, 374, 1975.
- [3] Б. Б. Севрук, Н. А. Гусак. Опт. и спектр., 45, 1168, 1978.
- [4] M. Shylágui. Optik, № 2, 121, 1978.
- [5] Ю. К. Ребрин. Управление оптическим лучом в пространстве. «Советское радио», М., 1977.
- [6] L. Beiser. J. Opt. Soc. Am., 57, № 7, 1967.

Поступило в Редакцию 27 октября 1980 г.