

用衍射相位元件分离并聚焦偏振光*

刘 娟 杨国桢 顾本源 董碧珍
(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

摘 要 通过相位恢复的原理, 设计了在平行光的照明下单轴双折射晶体做成的衍射相位元件以实现分离并聚焦 o 偏振光和 e 偏振光。讨论了相位量化对结果的影响。理论计算表明: 这种方法可成功地实现偏振光的分离和聚焦。

关键词 衍射相位元件, 聚焦, 刻蚀深度, 复振幅。

1 引 言

近年来, 随着计算机产生全息图与相息图设计技术的完善和微电子加工技术的发展, 应用光学衍射原理, 已能够设计并制作各种高性能的衍射光学元件^[1-6]。衍射光学元件利用衍射原理有效地控制传播光波的波前, 从而实现各种所需要的功能。衍射光学元件以其聚多种光学功能于一体和可复制的特点, 使得光学系统向轻型化、微型化和集成化发展, 已广泛应用于激光波面校正、光束剖面成型、光束阵列发生器、光学互连、微型光通信和激光加工等方面^[1, 3]。光的偏振特性在信息处理、通信、神经网络等许多领域都有广泛的应用^[7-12]。

光学元件一般同时兼有振幅调制和相位调制能力。然而, 纯相位调制元件更具吸引力, 因为使用纯相位元件没有光能损失, 可获得极高的衍射效率。

本文利用相位恢复理论和杨-顾算法^[4, 6]来设计纯相位元件, 这种元件既能分开 o 偏振光和 e 偏振光, 又能使 o 光和 e 光分别聚焦到任意预定的位置上。

2 设计原理

图 1 为典型的衍射光学系统, 由输入面 P_1 、紧靠着 P_1 的单轴双折射晶体以及输出面 P_2 组成。 P_1 与 P_2 之间的距离为 l , 系统的光轴与系统所选坐标系的 z 轴方向一致。单轴双折射晶体的光轴平行于晶体表面, 用一束平行光垂直照射在晶体上。众所周知, 由于折射率不同, 当入射光通过双折射相位元件时会产生不同的相位调制, 并分离出互相垂直的两线偏振光, 即 o 偏振光与 e 偏振光。

在一定波长照射下, 输入平面 $P_1(z = 0)$ 上的波函数为

$$U_1 = U_1(X_1) = \rho_1(X_1) \exp [i\phi_1(X_1)], \quad (1)$$

* 国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1998-08-06; 收到修改稿日期: 1998-10-12

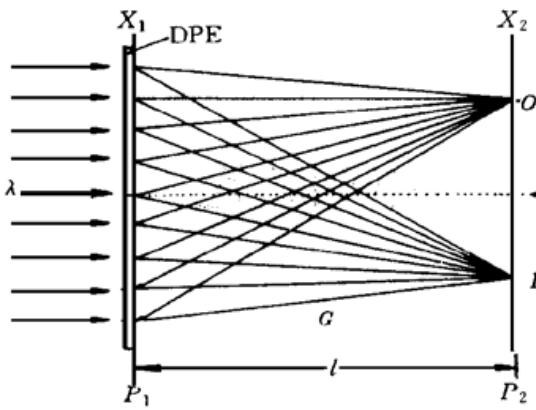


Fig. 1 Schematic diagram of the diffractive optical system containing the polarization-selective DPE made of birefringent crystal material

输出面 $P_2 (z = l)$ 上的波函数为

$$U_2 = U_2(X_2) = \rho_2(X_2) \exp [i\phi_2(X_2)], \quad (2)$$

在输入和输出平面上点的坐标分别用矢量 $X_1 = (x_1, y_1)$ 和 $X_2 = (x_2, y_2)$ 表示, 根据光学变换的一般理论, 输入和输出波函数由给定系统的变换函数 $G(X_2, X_1)$ 联系起来。

$$U_2(X_2) = \int G(X_2, X_1) U_1(X_1) dX_1, \quad (3)$$

(3) 式可写成:

$$U_2(X_2) = \hat{G}(X_2, X_1) U_1(X_1), \quad (4)$$

其中 $\hat{G}(X_2, X_1)$ 代表一积分算子。

对于实际的光学系统, 可认为所涉及的波函数和变换函数是有限的, 根据 Whittake-Shannon 的取样定理^[13], 原始连续函数可借助于一组分立取样点上的值来表示。为了描述简单起见, 此处仅考虑一维情况, 不难直接推广到二维情况。在一维情况下, 输入和输出波函数的取样点数目分别为 N_1 和 N_2 , 则 $U_1(x_1)$ 和 $U_2(x_2)$ 可分别表示为 N_1 和 N_2 的单列矩阵, 算符 G 则对应于 $N_2 \times N_1$ 矩阵, 可得到方程的离散表示为:

$$U_{1n\alpha} = \rho_{1n\alpha} \exp (i\phi_{1n\alpha}), \quad (5)$$

$$U_{2m\alpha} = \rho_{2m\alpha} \exp (i\phi_{2m\alpha}), \quad (6)$$

$$U_{2m\alpha} = \sum_{n=1}^{N_1} G_{mn} U_{1n\alpha}, \quad (7)$$

$$n = 1, 2, \dots, N_1, \quad m = 1, 2, \dots, N_2, \quad \alpha = 1, 2.$$

其中 α 分别代表 o 光和 e 光, 而 n_α 分别表示 o 光和 e 光的折射率 n_o 、 n_e 。定义逼近距离

$$D^2 = \| U_2 - \hat{G}G U_1 \|^2, \quad (8)$$

设计问题可描述为: 如果已知系统的线性变换核 G 和输入波函数 $\rho_{1n\alpha}$ 、输出波函数 U_2 的振幅分布, 如何确定衍射相位元件的相位分布 $\phi_{1n\alpha}$, 使得(7)式得到高精度的满足, 即: 使(8)式极小化?

衍射相位元件的相位分布 $\phi_{1n\alpha}$ 和输出平面上的相位分布 $\phi_{2m\alpha}$ 是未知量, 欲求 D^2 对函数变量 $\phi_{1n\alpha}$ 和 $\phi_{2m\alpha}$ 的极小值, 则

$$\delta_{\phi_{1n\alpha}} D^2 = 0, \quad \delta_{\phi_{2m\alpha}} D^2 = 0. \quad (9)$$

其中用 $\delta_\xi D^2$ 表示 D^2 对函数变量 ξ 的泛函变分。通过严格的数学推导, 可得到一组 $\phi_{1n\alpha}$ 和 $\phi_{2m\alpha}$ 所满足的联立方程组:

$$\phi_{2m\alpha} = \arg [\sum_n G_{mn} \rho_{1n\alpha} \exp (i\phi_{1n\alpha})]. \quad (10)$$

$$\phi_{1n\alpha} = \arg [\sum_m \rho_{2m\alpha} \exp (i\phi_{2m\alpha}) G_{mn} - \sum_{n \neq k} A_{nk} \rho_{1k\alpha} \exp (i\phi_{1k\alpha})]. \quad (11)$$

其中 $A_{nk} = \sum_m G_{nm} \times G_{mk}^*$ 。一般来说, (10) 式和(11) 式不存在解析解。应用杨-顾迭代算法对 (10) 式和(11) 式进行数值求解, 可得到 $\phi_{1n\alpha}$ 的收敛解来设计 o、e 光分离并聚焦的衍射相位元件。

设计方法如下: 首先, 假设 o、e 偏振光的强度相等, 预定 o、e 光的聚焦位置。分别设计 o

光、e 光的相位分布得到 ϕ_o 和 ϕ_e , 两者都在 $[0, 2\pi]$ 范围内; 然后, 对两相位通过增加 2π 的整数倍来比较两相位相应的深度, 使得

$$h_1 \approx \frac{\phi_e + 2m\pi}{2\pi(n_e - 1)} \lambda \approx \frac{\phi_o + 2n\pi}{2\pi(n_o - 1)} \lambda$$

在误差允许范围内成立, 从而得到此相位元件的刻蚀深度。其中 m 、 n 为比较小的整数, 目的是使刻蚀深度比较小, 因此实验上较容易做到。

为了评估所设计相位元件的性能, 定义衍射效率和互串率, 衍射效率定义为:

$$\eta = \frac{\rho_o + \rho_e}{\rho_{in}}$$

其中 ρ_o 、 ρ_e 、 ρ_{in} 分别代表输出面上 o 偏振光在其预定点处的能量、输出面上 e 偏振光在其预定点处的能量和输入总能量。

互串率定义为:

$$T = \frac{\rho_o(x_e) + \rho_e(x_o)}{\rho_{in}}$$

其中 $\rho_o(x_e)$ 和 $\rho_e(x_o)$ 分别代表输出面上 o 光在 e 光预定点的能量和输出面上 e 光在 o 光预定点的能量。

3 具体设计和数值模拟

在图 1 中, 根据光传播的一般理论, 在傍轴近似条件下, 系统的变换函数为:

$$G(x_2, x_1) = \left(\frac{1}{i\lambda l}\right)^{1/2} \exp\left\{\frac{i2\pi l}{\lambda}\right\} \exp\left\{\frac{i\pi(x_2 - x_1)^2}{\lambda l}\right\}$$

选取二氧化钛晶体为单轴双折射晶体为, 用波长为 $\lambda = 514.5 \text{ nm}$ 平行光照明, 输入窗口大小为 6 mm , 取样点为 256 个; 为了更清楚地反映输出平面光强的分布情况(如背景噪音、互串等), 本文按 o、e 光分开距离的大小分别取相对较大的输出窗口, 输出窗口大小依次分别取为 18 mm 和 28 mm , 取样点为 3200 个。输入平面与输出平面间的距离为 $l = 400 \text{ mm}$ 。

第一个设计的实例是假定 e 光和 o 光分离 5 mm , 即 e 光聚焦在 -2.5 mm 处而 o 光聚焦在 2.5 mm 处。图 2(a) 为相位连续分布时输出面上的光强分布。可以看出, o 光和 e 光恰好聚焦在预定的位置并且强度几乎相等, 计算所得衍射效率为 91.08% , 其中 o 光占 45.74% , e 光占 45.34% , 互串率为 0.21% ; 当相位 2^5 量化[如图 2(d)], 对应的输出面上的光强分布如图 2(b) 所示, 由图 2(b) 可见, e 光聚焦点强度明显降低, 此时衍射效率和互串率分别为 80.8% 和 0.496% , 其中 o、e 光的衍射效率分别为 43.2% 和 37.6% ; 当相位进行 2^4 量化时对应的输出面上光强分布为图 2(c), 此时的衍射效率和互串率分别为 64.75% 和 1.26% , 其中 o 光 e 光衍射效率分别为 42.95% 和 21.8% 。

为了说明可以任意选定分离后 o 光、e 光的位置, 第二个例子假定 o、e 光分离 8 mm , 即 e 光聚焦在 -4 mm 处而 o 光聚焦在 4 mm 处。

图 3(a) 给出了相位连续分布时输出面上的光强分布; 相位连续分布时衍射效率为 90.08% , 其中 o 光占 45.05% , e 光占 45.03% , 互串率为 0.186% ; 当相位 2^5 量化时的光强分布如图 3(b), 此时衍射效率和互串率分别为 80.14% 和 0.45% ; 其中 o 光 e 光分别占 42.5% 和 37.6% ; 相位 2^4 量化时的输出面上的光强分布如图 3(c) 所示, 此时衍射效率和互串率

分别为 60.82% 和 1.355%，图 3(d) 给出了 16 个等级量化相位的相位分布图。

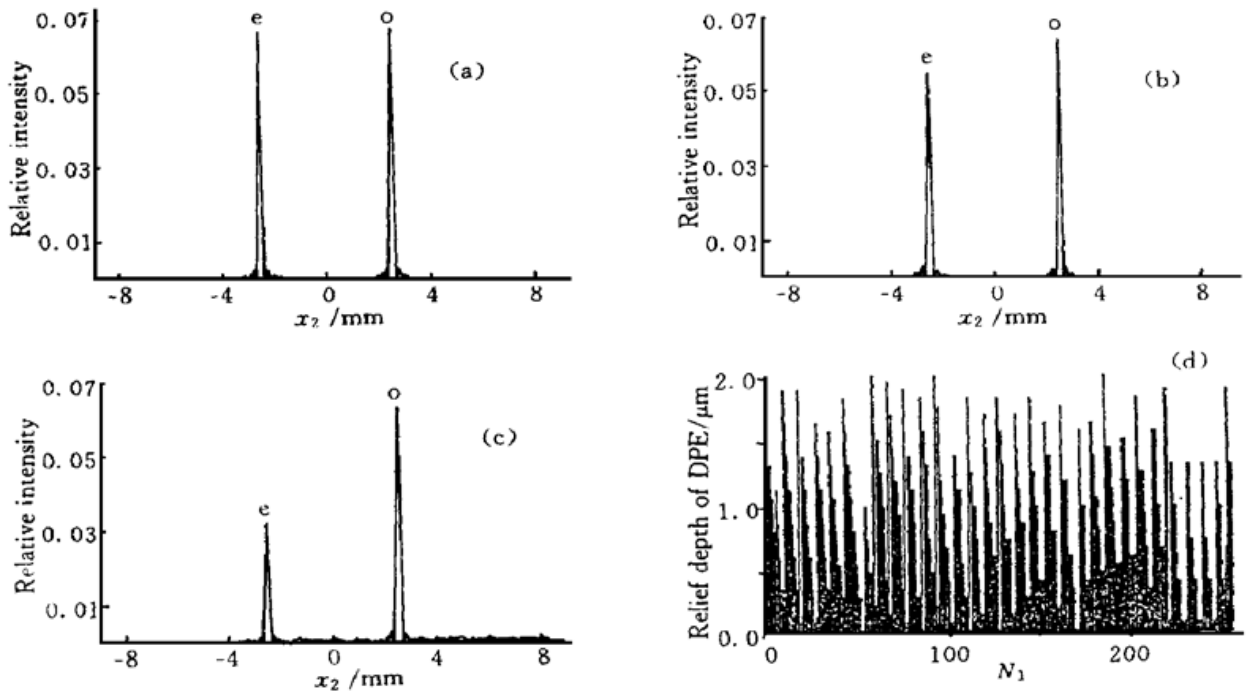


Fig. 2 (a) Distribution of the relative intensity on the output plane, generated by the continuous phase. The distance between o-ray and e-ray is 5 mm, (b) Distribution of the relative intensity on the output plane, generated by the quantized 32 level phase. The distance between o-ray and e-ray is 5 mm, (c) Distribution of the relative intensity on the output plane, generated by the quantized 16 level phase. The distance between o-ray and e-ray is 5 mm, (d) Distribution of the surface-relief depth of quantized 32 level DPE, which can depart o-ray from e-ray 5 mm

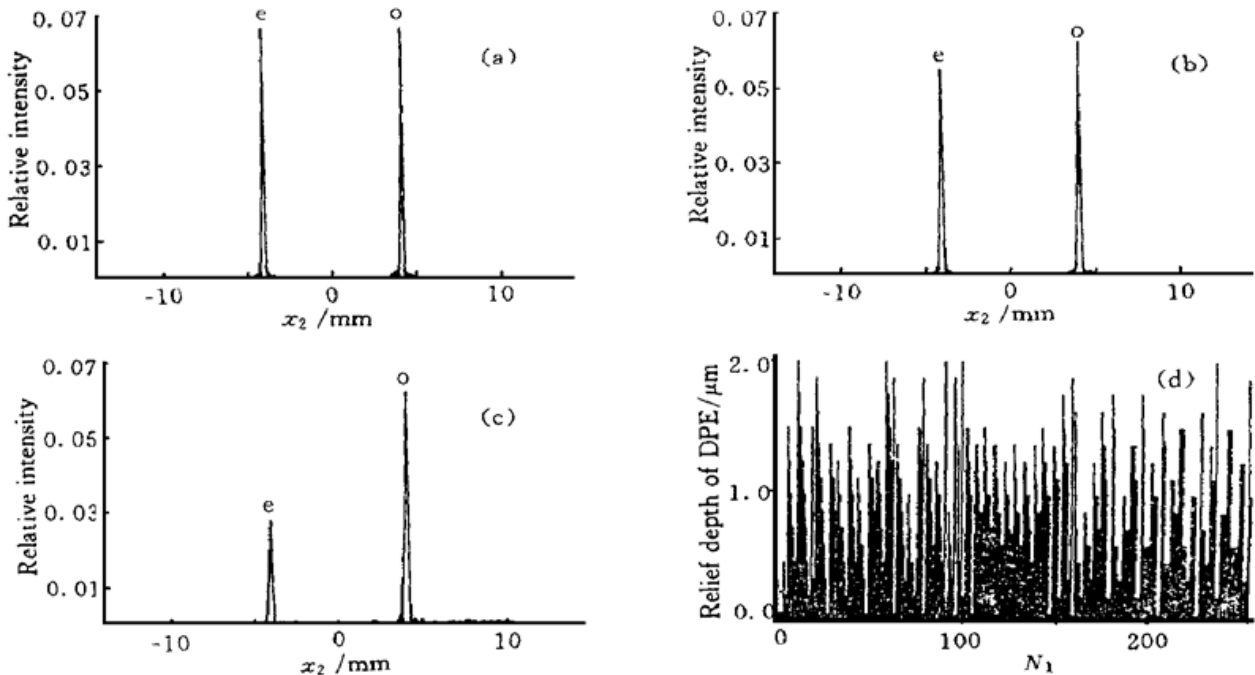


Fig. 3 (a) Distribution of relative intensity on the output plane, generated by the continuous phase. The distance between o-ray and e-ray is 8 mm, (b) Distribution of the relative intensity on the output plane, generated by the quantized 32 level phase. The distance between o-ray and e-ray is 8 mm, (c) Distribution of the relative intensity on the output plane, generated by the quantized 16 level phase. The distance between o-ray and e-ray is 8 mm, (d) Distribution of the surface-relief depth of quantized 16 level DPE, which can depart o-ray from e-ray 8 mm

从以上的设计可以看出,用双折射晶体制成的衍射相位元件可以实现 o 光和 e 光的分离并聚焦到任意设定位置。比起传统分离偏振光的元件来,这种元件具有衍射效率高、外型小而轻便、可实现多种光学功能、没有传统光学散件在传递中出现的光损失和散射问题等优点,因而是一种可行性的设计方案。

结 论 本文提出了一种用相位光学元件来分离并聚焦偏振光的一种设计方法。该元件可将偏振光分离成两线偏振光并聚焦于任意所需位置。利用相位恢复的一般理论,严格地推导了决定衍射相位元件相位分布的一系列方程,并进行了相关的数值模拟,计算结果表明,由所设计的衍射相位元件所产生的衍射图样与所期望的图样符合得很好,同时也讨论了相位量化对结果的影响。由于这种方法设计的相位元件具有衍射效率高、可实现分离并聚焦的双重功能,并且相位元件可大量复制、造价低,因此优越于传统的光学元件,可能成为微光学系统中衍射光学元件设计的一种有效方法。

参 考 文 献

- [1] Dames M P, Dowling R J, Mckee P *et al.*. Efficient optical elements to generate intensity weighted spot arrays: design and fabrication. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(19) : 2685~ 2693
- [2] Mendlovic D, Zalevsky Z, Shabtay G *et al.*. High-efficiency arbitrary array generator. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(35) : 6875~ 6880
- [3] Veldkamp W B. Laser beam profile shaping with interlaced binary diffractive gratings. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(17) : 3209~ 3212
- [4] Gu B, Yang G, Dong B. General theory for performing an optical transform. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(18) : 3197~ 3206
- [5] Yang G Z, Dong B Z, Gu B Y *et al.*. Gerchberg-Saxton and Yang-Gu algorithms for phase retrieval in a nonunitary transform system: A comparison. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(2) : 209~ 218
- [6] Yang G, Gu B, Tan X *et al.*. Iterative optimization approach for the design of diffractive phase elements simultaneously implementing several optical functions. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1994, **11**(5) : 1632~ 1640
- [7] Liu S Q, Chen Y S. Multilevel binary phase grating polarization device with a birefringent substrate. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(17) : 1832~ 1834
- [8] Richter I, Sun P C, Xu F *et al.*. Design considerations of form-birefringent microstructures. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14) : 2421~ 2429
- [9] Liu R, Dong B Z, Yang G Z *et al.*. Optimal design of polarizing beam splitters with a birefringent substrate. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1997, **14**(1) : 49~ 53
- [10] Fainman Y, Xu F, Tyan R *et al.*. Polarization Selective Diffractive Optical Elements and Applications. in *Proceeding on Diffractive Optics and Micro-Optics, Technical Digest Series*, 1998, **10** : (June 8~ 11, 1998, Kailua-Kona, Hawaii, USA), 50~ 52
- [11] Moreau V, Habraken S, Renotte Y *et al.*. Substrate-Mode Polarization-Controlled Optical Switch with Sandwich Reflection Hologram. in *Proceeding on Diffractive Optics and Micro-Optics, 1998 Technical Digest Series*, 1998, **10** : (June 8~ 11, 1998, Kailua-Kona, Hawaii, USA), 53~ 55
- [12] Thienpont H, Nieuborg N, Goulet A *et al.*. Reconfigurable Optical Interconnects in Free-Space Optical Processing Modules Based on Polarization-Selective Diffractive Optical Elements. in *Proceeding on Diffractive Optics and Micro-Optics, Technical Digest Series*, 1998, **10** : (June 8~ 11, 1998, Kailua-Kona, Hawaii, USA), 105~ 107
- [13] Goodman J W. *Introduction to Fourier Optics*. San Francisco: McGraw-Hill, 1968.

Polarization Demultiplexing and Spatial Focusing with Diffractive Phase Element

Liu Juan Yang Guozhen Gu Benyuan Dong Bizhen
(*Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)
(Received 6 August 1998; revised 12 October 1998)

Abstract The design of diffractive phase elements (DPE's) with polarization selectivity is presented, which can realize polarization demultiplexing and spatial focusing simultaneously. The design scheme is based on the general theory of amplitude-phase retrieval and Y-G iterative algorithm. A set of equations for determining the modulation depth distribution of the surface-relief DPE is derived. Two model designs are carried out. The numerical simulations show that this suggested approach can achieve successfully the design of desired pattern.

Key words diffractive phase element, spatial focusing, relief depth, complex amplitude.

第八届全国光电技术与系统学术会议在郑州举行

由中国光学学会光电专业委员会主办、郑州大学物理工程学院与河南省激光应用技术重点实验室承办的第八届全国光电技术与系统学术会议于 1999 年 10 月 14 至 18 日在河南省郑州市举行。约 120 名代表出席了会议,收到论文 100 多篇。

在开幕式上,光电专业委员会主任张以谟教授致开幕词,然后四位代表作了精彩的特邀报告。张以谟教授在“计算机光互连中的光电子技术”的报告中着重指出了信息时代的到来给光电子技术提出的挑战与机遇。南开大学的张延焯教授在题为“光电信息处理与 3T 目标'的实现”的报告中提出,科研工作者除了专注于自己的课题以外,还要跳出自己的课题看一看本领域以致社会上发生了什么变化,这样更能抓住问题的要害而做出更有价值的工作。中国科学院上海技物所的刘普霖教授则提纲契领地综述了我国在同步辐射与自由电子激光器方面的发展概况及其应用。来自台湾的敏通公司的杨隆荣先生指出,在台湾搞科研一定要考虑所从事的研究项目能否转化为批量生产的产品,目前敏通公司的主要产品 CCD 在全球已占有一定的份额,并在与国际商用机器公司、微软公司的合作中进一步开发具有“幸福感”的产品。

会议设三个分会场,代表们就以下课题展开了广泛的交流:1) 新光学现象、新型光电子器件与系统;2) 光学纪录、存储与再现技术,全息光学信息处理,模式识别、图像处理 and 智能机器视觉;3) 激光材料处理技术及其应用;4) 生物、医疗、环境、公共安全、灾害检测中的光电技术与系统;5) 信息高速公路计划中的光电技术与系统;6) 先进光电计量测试及控制技术。与会代表一致认为,处于世纪之交的光电技术是信息产业的基础,信息产业的迅猛发展为光电技术创造了很大的发展余地。

会议期间,还召开了与会专业委员会,对以往的工作与明后年的学术活动进行了讨论。

(傅 歆)