

文章编号: 1672-8785(2010)01-0026-04

基于 TFT-LCD 的相位型菲涅尔波带片生成的中空光束

范君柳 朱爱敏

((苏州科技学院数理学院, 江苏 苏州 215009))

摘 要: 中空光束具有特殊的物理性质, 在光信息处理、微电子学、同位素分离和分子光学等领域有着广泛的应用。本文提出采用 TFT-LCD 制作相位型菲涅尔波带片, 平面波经 TFT-LCD 衍射生成中空光束。实验结果表明, 基于 TFT-LCD 的菲涅尔波带片生成的中空光束具有实时可调、快捷和精确等优点。

关键词: TFT-LCD; 菲涅尔波带片; 中空光束

中图分类号: O439; O436.1; O438 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2010.01.006

Hollow Beam Generated from Phase-model Fresnel Zone Plate Based on TFT-LCD

FAN Jun-liu, ZHU Ai-min

(School of Mathematics and Physics, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: A hollow beam has its particular physical properties and has wide applications in the fields of optical information process, microelectronics, isotope separation and molecule optics etc.. A TFT-LCD is proposed to be used to fabricate a phase-mode Fresnel Zone Plate and hence a hollow beam can be formed by the plane wave via the TFT-LCD. The experimental result shows that the hollow beam generated from the Fresnel Zone Plate based on a TFT-LCD has the advantages of real-time adjustability, simplicity and accuracy.

Key words: TFT-LCD; Fresnel zone plate; hollow beam

1 引言

中空光束, 是指沿光束传播方向上光束中心强度或轴向强度保持为零的光束, 此光束的特点是存在相位奇点。由于中空光束具有一系列特殊的物理性质, 譬如很小的暗斑尺寸、无加热效应、强度呈圆桶形分布、无衍射效应等, 因此在光信息处理、微电子学、同位素分离和分子光学等领域有着广泛的应用前景。自从 20 世纪

90 年代以来, 国际上许多学者提出了产生中空光束的各种方法, 如几何光学法^[1,2]、模式变换法^[3,4]、光全息法^[5]、计算全息法^[6,7]、横模选择法^[8]、位相片法^[9]以及中空光纤法^[10]等, 并获得了较好的实验结果。本文根据 TFT-LCD 的相位调制原理与菲涅尔波带片的物理性质, 制作了基于 TFT-LCD 的相位型菲涅尔波带片, 使平面波经 TFT-LCD 衍射生成了中空光束。实验结果表明, 采用基于 TFT-LCD 的相位型菲涅尔

收稿日期: 2009-09-15

基金项目: 苏州科技学院教学质量工程“光电信息技术课程群教学改革与实践”项目(2008YQ-06)

作者简介: 范君柳(1983-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事信息光学、衍射光学方面的研究。E-mail: fj1280@163.com

波带片生成的中空光束具有实时可调、方便快捷和精确等优点。

2 理论分析

2.1 菲涅尔波带片^[11]

菲涅尔波带片 (FZP) 呈具有一系列同心圆环的二元振幅图形, 如图 1 所示, 其中第 m 个透明环带的半径为 $r_m = \sqrt{m\lambda r_p}$ 。显然, FZP 沿 r^2 方向周期分布, 周期为 r_p^2 (r_p 为最内层圆环半径)。当一束聚焦的高斯激光束通过此波带片时, 由于焦点附近光场的相消干涉, 产生了一束聚焦的局域中空光束。

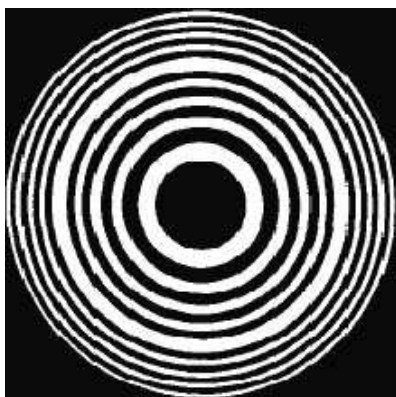


图 1 具有位相跃变的圆形菲涅尔波带片

平面波经过菲涅尔波带片后, 其焦平面上的径向振幅分布和轴向振幅分布可以在菲涅耳近似条件下通过衍射积分来计算。假定一束波长为 λ 的单色平面波垂直入射到菲涅尔波带片上, 则在焦平面上的光场振幅分布可由下式给出

$$U(\rho, f) = \frac{2\pi C_p}{\lambda f} \int_0^\infty P_t(r) J_0(2\pi r \rho) r dr \quad (1)$$

式中, $\rho = 1/\lambda f(x_0^2 + y_0^2)^{1/2}$ 为空间频率, r 为孔径平面上的径向坐标, $P_t(r)$ 为波带片的透过率函数, J_0 为零阶贝塞尔函数, C_p 为常位相因子。相应的轴向复振幅为

$$U(0, z) = \frac{2\pi C_z}{\lambda z} \int_0^\infty P_t(r) \exp[-ikr^2(1/f - 1/z)] r dr \quad (2)$$

式中, C_z 为另一个常位相因子。在图 1 所示的波带片中, 其面积被分成相等的两个对称部分,

并沿圆周在 $r = \frac{\sqrt{2}}{4}A$ 处引入 $\frac{\lambda}{2}$ 跃变 (也即 π 位相跃变), 于是波带片的透过率函数可表示为

$$P_t(r) = \text{circ}(2r/A) - 2\text{circ}(2\sqrt{2}r/A) \quad (3)$$

式中, A 为孔径直径。根据式 (1), 对于图 1 所示的具有圆形 π 位相跃变的波带片, 其焦平面上的径向光强分布可由下式给出:

$$I(\rho, f) = I_0 \left[\frac{J_1(\pi t)}{\pi t} - \frac{J_1(\pi t/\sqrt{2})}{\pi t/\sqrt{2}} \right]^2 \quad (4)$$

式中, $t = A\rho/\lambda f$, J_1 为一阶贝塞尔函数。式 (4) 给出的径向强度分布是类一阶贝塞尔光束的分布。研究发现, 当 $t=1.136$ 时, 出现第一个最大值, 且最大值的半宽度为 0.727, 这是普通聚焦光斑的半宽度的 1.414 倍。根据式 (2), 其轴向强度分布为

$$I(0, z) = I_0 \left(\frac{f}{z} \right)^2 \sin^2 c^2 \left[A^2 \left(\frac{1/f - 1/z}{16\lambda} \right) \right] \times \sin^2 \left[\pi A^2 \frac{1/f - 1/z}{16\lambda} \right] \quad (5)$$

2.2 TFT-LCD 位相调制原理^[12,13]

在 TFT-LCD 中, 液晶分子采用 TN 扭曲排列。液晶薄层两侧的基片经过适当的处理, 使分子在两基面表面处都沿面排列, 但它们的长轴方向相差 90° , 于是基片间的液晶层进一步分成许多薄层, 每一层内的分子取向基本一致, 且平行于层面; 相邻分子的取向逐渐转过一个角度, 从而形成扭曲一向列排列方式, 如图 2 所示。

TFT-LCD 相位调制是通过改变液晶盒中液晶层的折射率并使其被寻址区厚度保持恒定来实现的。液晶具有电光效应, 当改变加在液晶像素上的电压时, 即可改变被寻址像素的折射率, 这样就可以实现相应单元像素的振幅或相位的调制。如图 2(b) 所示, 取像素 A 和 B, A 为寻址区 (即通过透明电极对像素 A 施加一定的电压), B 为未寻址区, 它们的厚度 d 保持不变, 通过对寻址区施加一定的电压, 使得寻址区的折射率发生变化, 从而使得经过像素 A、B 的光

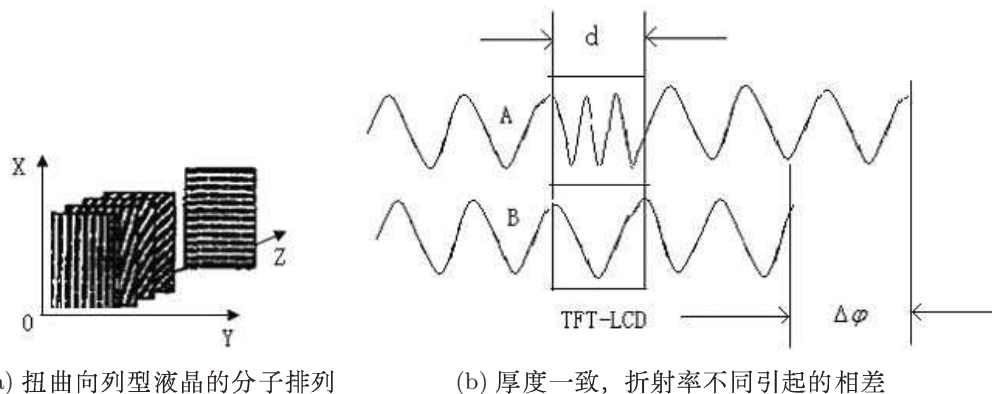


图 2 A 为寻址像素, B 为未被寻址像素

线存在相位差 $\Delta\varphi$, 该相位差由施加在寻址区的电压值所决定。假如此时像素 A 的折射率为 n_1 , 像素 B 的折射率为 n_2 , 则产生的相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda_0}(n_2 - n_1) = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda_0}\Delta n \quad (6)$$

式中, 相位差是 Δn 的函数 (λ_0 为入射波在空气中的波长, n_1 和 n_2 是层折射率)。在实际工作过程中, 通过改变输入到 TFT-LCD 上的每个像素的灰度, 达到改变每个像素的驱动电压的目的, 从而实现对光线的相位调制。

综合上面的分析, 若将菲涅尔波带片的环层结构用不同的灰度来表示, 通过计算机视频接口将其显示在 TFT-LCD 上, 即可获得实时的位相型菲涅尔波带片。当入射的单色光照射 TFT-LCD 时, 通过被寻址区与通过邻近非寻址区的光线之间会存在一定的相位差, 该相位差与 $\Delta nd/\lambda$ 成正比, 这样的相位差最后以成像强度的大小反映出来。当相位差为 $(2n+1)\pi$ ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 时, 则从近邻像素出来的光线会进行相消干涉。相反, 当相位差为 $2n\pi$ ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 时, 则从近邻像素出来的光线会进行相长干涉。通过单位像素的电压调节 (即图像灰度的调节), 波带偏相位图的环状特点可使通过 TFT-LCD 的光束在焦点附近的光场会发生相消干涉, 从而生成局域中空光束。

3 实验

实验中我们是采用如图 3 所示的光学系统来生成中空光束的。实验时, 本文使用 MATLAB

语言将波带片的相位图呈现于 TFT-LCD 上。单色光经过偏振片 P_1 后, 再经过 TFT-LCD 上显示的非涅尔波带片, 最后通过偏振片 P_2 , 这样从 CCD 上便可得到局域中空光束了。

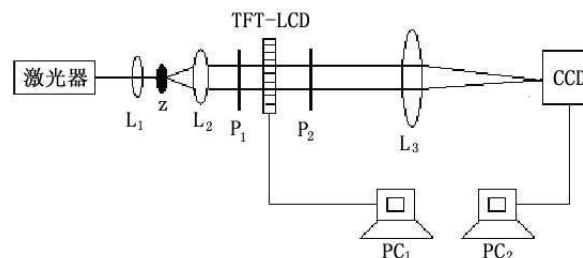
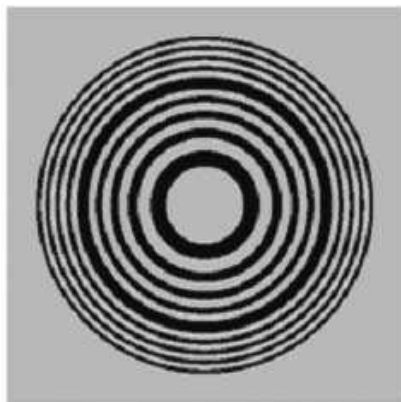
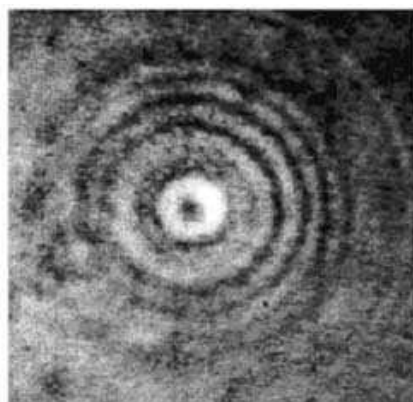


图 3 使用 TFT-LCD 的空间光调制系统

图 3 中的 TFT-LCD 由爱普生投影仪 (EPS ON-EMP-30, 800×600 像素, 0.5in) 改装而成; 光源是 LD 泵浦微型绿光激光器 ($\lambda=532\text{nm}$), Z 为针孔滤波器, 其目的是滤掉高频谐波, 从而形成分布均匀的光, 透镜 L_1 和 L_2 与针孔滤波器 Z 组成扩束系统; P_1 和 P_2 是偏振片, 计算机 (PC_1, PC_2) 分别用于控制在 TFT-LCD 上实时产生的波带片和控制 CCD 获取的衍射图样。我们通过设置参数 (见表 1), 在 TFT-LCD 上呈现如图 4(a) 所示的具有 π 位相跃变的位相型菲涅尔波带片, 其中灰度 0 和 160 所对应的相位正好相

表 1 具有 π 位相跃变的圆形菲涅尔波带片的参数表

波长	第一环带半径	主焦距	暗条纹灰度	亮条纹灰度
532nm	0.794mm	1.185m	0	160

(a) 具有 π 位相跃变菲涅尔位相型波带片

(b) 局域中空光束

图 4

差 π 。当入射激光照射该相位图时, 最终可以得到如图 4(b) 所示的结果。

4 结论

本文采用相位调制型 TFT-LCD, 并利用扭曲型排列液晶的电光效应能改变入射光相位结构的特点, 实现了对入射光位相的调制。利用 MATLAB7.0 语言制作了菲涅尔波带片, 并通过视频接口在 TFT-LCD 上实时地显示了波带片的相位图。单色光通过 TFT-LCD 时经过相位调制, 可通过衍射生成局域中空光束。采用这种方法制作实时的菲涅尔波带片, 其生成的中空光束具有实时、可调、方便、精确的优点。

参考文献

- [1] Ito H, Sakaki K, Jhe W, et al. Atomic funnel with evanescent light [J]. *Phys Rev A*, 1997, **56**(1): 712–718.
- [2] Manek I, Ovchinnikov Y B, Grimm R. Generation of a hollow laser beam for atom trapping using an axicon [J]. *Opt Commun*, 1998, **147**: 67–70.
- [3] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *Phys Rev A*, 1992, **45**(11): 8185–8189.
- [4] Wang X, Littman M G. Laser cavity for generation of variable-radius rings of light [J]. *Opt Lett*, 1993, **18**(10): 767–768.
- [5] Lee H S, Stewart B W, Choi K, et al. Holographic nondiverging hollow beam [J]. *Phys Rev A*, 1994, **49**(6): 4922–4927.
- [6] Bazhenov V Y, Soskin M S, Vasnetsov M V. Screw dislocations in light wavefronts [J]. *J Mod Opt*, 1992, **39**(5): 985–990.
- [7] Heckenberg N R, McDuff R, Smith C P, et al. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms [J]. *Opt Lett*, 1992, **17**(3): 221–223.
- [8] Paterson C, Smith R. Higher-order Bessel waves produced by axicon-type computer-generated holograms [J]. *Opt Commun*, 1996, **124**: 121–130.
- [9] Ozeri R, Khaykovich L, Davidson N. Long spin relaxation times in a single-beam blue-detuned optical trap [J]. *Phys Rev A*, 1999, **59**(3): R1750–R1753.
- [10] Yin J, Noh H, Lee K, et al. Generation of a dark hollow beam by a small hollow fiber [J]. *Opt Commun*, 1997, **138**: 287–292.
- [11] 印建平, 刘南春, 夏勇, 等. 空心光束的产生及其在现代光学中的应用 [J]. *物理学进展*, 2004, **24**(3): 336–380.
- [12] 陈怀新, 魏宏刚, 陈祯培, 等. 采用液晶空间光调制器的可控性阵列菲涅耳波带片 [J]. *光子学报*, 2001, **30**(5): 562–566.
- [13] 刘艳, 朱林泉. 激光调制技术在激光显示中的应用比较 [J]. *红外*, 2007, **28**(3): 36–40.