

变折射率三角棱镜产生无衍射线结构光

吴志伟

(泉州师范学院物理与信息工程学院, 福建 泉州 362000)

摘要 提出一种可产生中心光斑较强的无衍射线结构光的新型光学元件——变折射率三角棱镜。变折射率三角棱镜的折射率分布呈阶跃式变化,可以用于解决折射率均匀三角棱镜产生的无衍射线结构光能量均匀分布、中心光斑能量利用率较低的问题。采用几何光学理论分析了产生中心光斑较强的无衍射线结构光的原理,计算了中心光斑较强的无衍射线结构光的相关参数。由衍射积分理论分析和模拟了新型光学元件后的光强分布特性。研究表明,平面波正面入射新型光学元件可以产生中心光斑较强的无衍射线结构光。

关键词 光学器件;线结构光;变折射率;三角棱镜;无衍射光;衍射积分;几何光学

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.042301

Step Refractive Index Triangular Prism Generating Non-Diffracting Linear Structural Beam

Wu Zhiwei

(*Institute of Physics and Information Engineering, Quanzhou Normal College, Quanzhou, Fujian 362000, China*)

Abstract A novel optical element, step refractive index triangular prism, for generating non-diffracting linear structural beam which has higher intensity in the central spot is proposed. The problem that the energy of non-diffracting linear structural beam generated by uniform refractive index triangular prism is evenly distributed and the energy efficiency of central spot is low is solved. The formation mechanism of the non-diffracting linear structural beam which has higher intensity in the central spot is analyzed by geometric optics, and the relevant parameters are also calculated. The intensity distribution is simulated by diffraction integral theory. The results show that when a plane wave illuminates the novel optical element, a non-diffracting linear structural beam which has higher intensity in the central spot is formed.

Key words optical devices; linear structural beam; step refractive index; triangular prism; non-diffracting beam; diffraction integral; geometric optics

OCIS codes 230.5480; 080.2468; 050.1960

1 引言

无衍射光束与传统高斯光束相比具有中心光斑小且强度与尺寸不随传播距离改变的优点,将其应用于测量领域可以避免反复对焦,同时可以简化测量仪器结构,因而备受关注。近年来不断有产生无衍射光的新方案被陆续报道^[1~8]。这些报道主要集中在无衍射光点光源或空心光束上,在应用于大范围测量时速度、精度受到较大影响。李虎等^[9~14]提出了无衍射线结构光的概念,将其应用于大范围测量,并给出利用三角棱镜产生无衍射线结构光的方案。但是三角棱镜法产生的无衍射线结构光能量均匀分布在若干条光斑上,中心光斑对入射光能量的利用与其他次级光斑相同,不具有优势。

本文提出一种新型光学元件,通过将两种不同折射率的光学玻璃胶合在一起,磨削成三角棱镜制成。平面光束通过该新型光学元件后的光场可以分为两部分,即由折射率较大部分形成的无衍射线结构光和由折射率较小部分形成的无衍射线结构光。这两部分光场存在一个公共区域,在这个公共区域里两个无衍射线结构光场叠加,将产生中心光强较强的无衍射线结构光。该方案在一定程度上能够改善能量均匀分布在若

收稿日期: 2011-11-04; 收到修改稿日期: 2011-11-18; 网络出版日期: 2012-01-19

作者简介: 吴志伟(1981—),男,硕士,讲师,主要从事光束传输与控制等方面的研究。E-mail: wzwqq@126.com

干条光斑上的问题,提高中心光斑能量利用率。

2 理论分析

平面光束正入射折射率均匀的三角棱镜,在三角棱镜后会产生两束关于轴线对称的平面光束。这两束同频率的平面光束在传播过程中叠加,产生明暗相间的光斑条纹,如图 1 所示。理论分析和实验^[10~13]都证明了这些明暗相间光斑的尺寸及强度在一定范围的传播过程中是保持不变的,符合无衍射光束的特性。

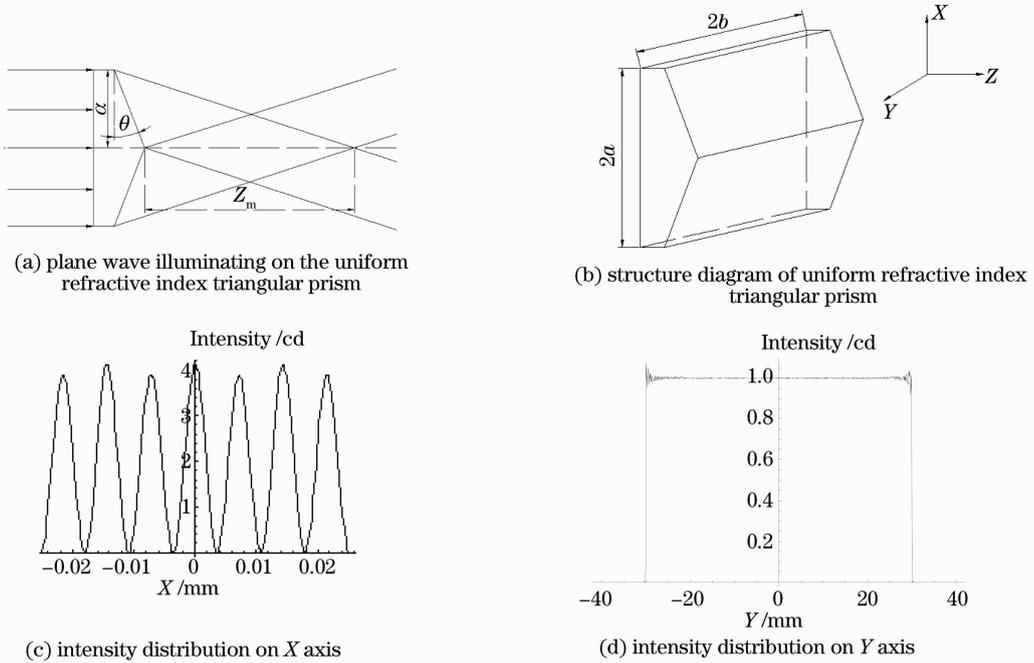


图 1 折射率均匀三角棱镜产生无衍射线结构光示意图

Fig.1 Schematic diagram of generating non-diffracting linear structured beam by uniform refractive index triangular prism

由图 1(c)可以看出光束能量在各级光斑上是均匀分布的。为了解决这一问题,让中心光斑的光强得到加强,提高能量利用率,本文提出了一种变折射率三角棱镜,如图 2 所示。该三角棱镜的折射率在 X 轴方向上的分布呈阶跃式变化。

当平面光束正入射变折射率三角棱镜时,由于棱镜各部分折射率不同,因此对光束产生的偏转角度也不一样。在底角一定的情况下,折射率越大,其产生的偏转角也越大。可以分两种情况对图 2 显示的变折射率三角棱镜进行讨论: $n_1 < n_2$; $n_1 > n_2$ 。

1) $n_1 < n_2$: 图 3 中虚线所包围的黑色区域是折射率为 n_2 的部分所形成的无衍射区域,其作用范围为 $0 \sim \frac{a_1}{(n_2 - 1)\gamma}$ (底角 γ 的单位为 rad); 实线所包围的黑色区域表示折射率为 n_1 的部分所形成的无衍射区域,其作用范围为 $\frac{a_1}{(n_1 - 1)\gamma} \sim \frac{a_2}{(n_1 - 1)\gamma}$ 。由于两部分没有交集,两块无衍射区域将保持各自原来的光场分布,即能量均匀分布在各级光斑上。因此,在这种情况下无法得到中心光斑较强的无衍射线结构光。

2) $n_1 > n_2$ 图 4 中虚线所包围的黑色区域是折射率为 n_2 的部分所形成的无衍射区域,其作用范围为 $0 \sim$

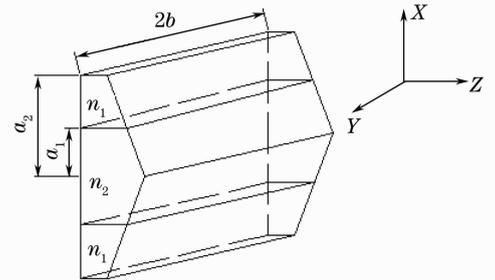


图 2 变折射率三角棱镜结构及坐标系

Fig.2 Structure of step refractive index triangular prism and coordinate system

$\frac{a_1}{(n_2-1)\gamma}$; 实线所包围的黑色区域表示折射率为 n_1 的部分所形成的无衍射区域, 其作用范围为 $\frac{a_1}{(n_1-1)\gamma} \sim \frac{a_2}{(n_1-1)\gamma}$ 。因为 $n_1 > n_2$, 所以两部分会存在一个交集, 在这块公共区域两个无衍射光场叠加, 可以得到中心光斑较强的无衍射线结构光。

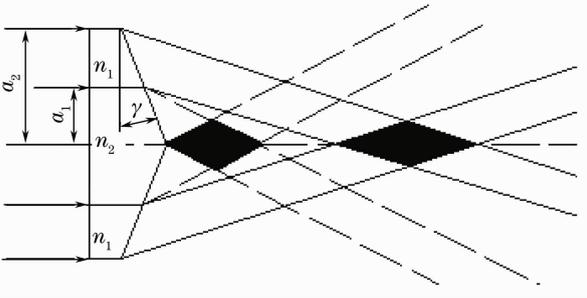


图3 $n_1 < n_2$ 情况下三角棱镜折射示意图
Fig. 3 Schematic diagram of refraction by triangular prism while $n_1 < n_2$

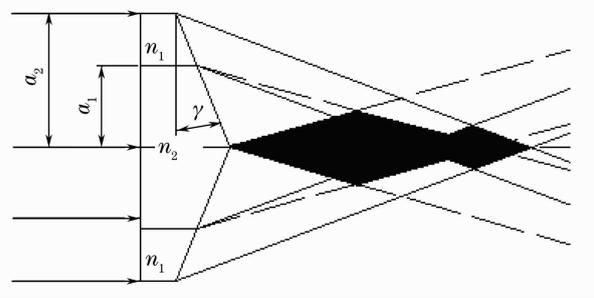


图4 $n_1 > n_2$ 情况下三角棱镜折射示意图
Fig. 4 Schematic diagram of refraction by triangular prism while $n_1 > n_2$

根据几何光学的理论可以计算出中心光斑较强的无衍射线结构光作用范围为 $\frac{a_1}{(n_1-1)\gamma} \sim \min\left[\frac{a_1}{(n_2-1)\gamma}, \frac{a_2}{(n_1-1)\gamma}\right]$ 。例如, 可以取参数 $a_1 = 15$ mm, $a_2 = 22$ mm, 底角 $\gamma = 5 \times \frac{\pi}{180}$ rad, $n_1 = 1.7$, $n_2 = 1.5$, 求得中心光斑较强的无衍射线结构光作用范围为 245.7~343.9 mm。由以上分析可知, 通过改变三角棱镜底角、折射率等参数可以实现对无衍射区域尺寸的控制。

3 数值模拟

根据菲涅耳衍射积分^[15,16]的理论以及三角棱镜的透射率函数^[17,18], 可以得到振幅为 1 的平面光束通过折射率均匀三角棱镜后的光场表达式:

$$E(x_1, y_1) = \frac{\exp[jk(z + nar)]}{j\lambda z} \iint_{\Sigma} \exp\left\{jk\left[\frac{(x_1-x)^2}{2z} + \frac{(y_1-y)^2}{2z} - (n-1)|x|\gamma\right]\right\} dx dy, \quad (1)$$

式中 n 为三角棱镜折射率, 棱镜底角 γ 单位为 rad。

当振幅为 1 的平面光束正入射变折射率三角棱镜, 三角棱镜后的光场可以分为两部分, 一部分是折射率为 n_1 部分产生的无衍射光场 E_1 , 另一部分是折射率为 n_2 部分产生的无衍射光场 E_2 :

$$E_2(x_1, y_1, z) = \frac{\exp[jk(z + n_2 a_1 r)]}{j\lambda z} \int_{-a_1}^{a_1} \exp\left\{jk\left[\frac{(x_1-x)^2}{2z} - (n_2-1)|x|\gamma\right]\right\} dx \int_{-b}^b \exp\left[jk\frac{(y_1-y)^2}{2z}\right] dy, \quad (2)$$

$$E_1(x_1, y_1, z) = \frac{\exp\{jk[z + n_1(a_2 - a_1)\gamma]\}}{j\lambda z} \left\{ \int_{a_1}^{a_2} \exp\left\{jk\left[\frac{(x_1-x)^2}{2z} - (n_1-1)|x|\gamma\right]\right\} dx \times \int_{-b}^b \exp\left[jk\frac{(y_1-y)^2}{2z}\right] dy + \int_{-a_2}^{-a_1} \exp\left\{jk\left[\frac{(x_1-x)^2}{2z} - (n_1-1)|x|\gamma\right]\right\} dx \int_{-b}^b \exp\left[jk\frac{(y_1-y)^2}{2z}\right] dy \right\}. \quad (3)$$

中心光斑较强的无衍射线结构光光场为 E_1 、 E_2 的叠加, 根据(2)、(3)式可以得到该部分光强分布表达式为

$$I(x_1, y_1, z) = |E_1(x_1, y_1, z) + E_2(x_1, y_1, z)|^2. \quad (4)$$

作为一个应用实例, 可以选择变折射率三角棱镜参数为: $a_1 = 15$ mm, $a_2 = 22$ mm, $b = 30$ mm, $n_1 = 1.7$ (德国肖特集团 N-BASF64 光学玻璃), $n_2 = 1.5$ (K9 光学玻璃), $\gamma = 5 \times \frac{\pi}{180}$ rad, 入射光波长 $\lambda = 632.8$ nm。

在上述参数条件下,根据几何光学理论计算出中心光斑较强的无衍射线结构光作用范围为 245.7~343.9 mm。由图 5(a),(b)可以看出衍射积分的结论和几何光学计算的结论是相符的;另一方面,由图 5(a),(b)可以看出当传播距离改变时,光斑尺寸没有发生变化,符合无衍射光束特性。图 1(c)是在 $a=15$ mm, $b=30$ mm, $n=1.5$, 入射光波长 $\lambda=632.8$ nm 条件下得到的 X 轴光强分布,对比图 5(a),(b)可以看出采用变折射率三角棱镜后,光强均匀分布、中心光斑能量利用率较低的问题得到改善,能量主要集中在中心和次级光斑上。由图 5(c),(d)可以看出光强分布在 Y 方向上也符合无衍射光束的特性,同时在 Y 方向上线结构光束强度具有一定的均匀性。

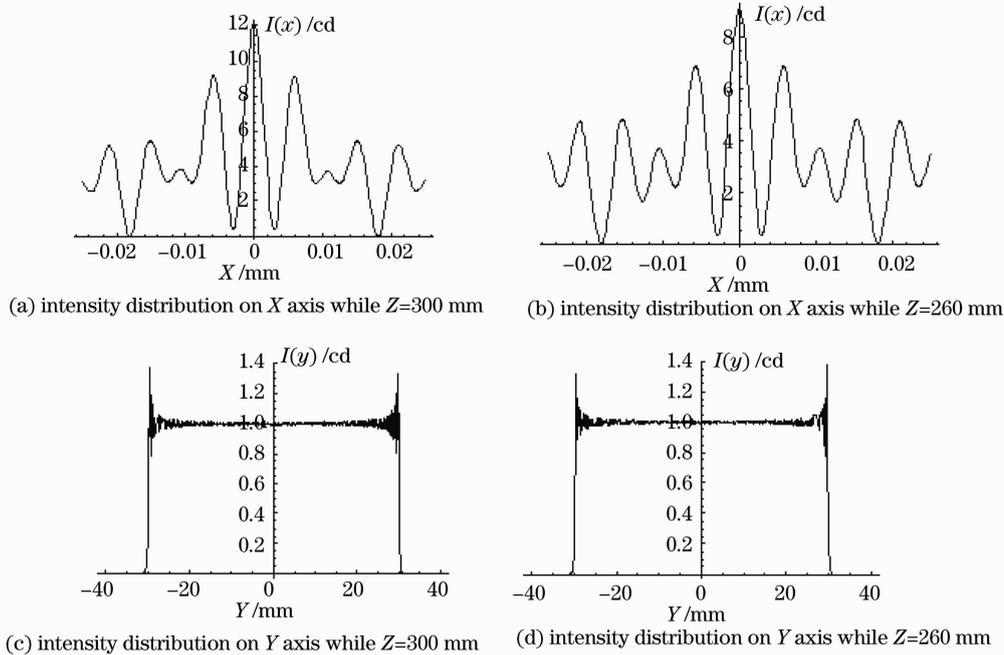


图 5 平面波通过变折射率三角棱镜的光强分布

Fig. 5 Intensity distribution of a plane wave after transmitting through a step refractive index triangular prism

4 结 论

采用几何光学和衍射积分理论分析的结果证明利用变折射率三角棱镜可以得到一种中心光斑较强的无衍射线结构光束,在一定程度上解决了折射率均匀三角棱镜产生无衍射线结构光光强均匀分布、中心光斑能量利用率较低的问题。这种新的无衍射线结构光在应用于精密测量时可以解决分辨率和测量范围之间存在的矛盾,同时又可以保证较高的速度和精度。因此,可以利用变折射率三角棱镜设计出大测量范围、高分辨率的精密测量系统,具有较高实用价值。

参 考 文 献

- 1 Wang Haitao, Yin Chunyong, Wang Dongsheng. 100 m diffraction-free alignment beam [J]. *Opt. Tech.*, 1999, **25**(3): 32~37
王海涛, 殷纯永, 王东生. 100 m 无衍射光束的实现[J]. *光学技术*, 1999, **25**(3): 32~37
- 2 Ma Liang, Wu Fengtie, Huang Qilu. A new type of combined axicon for generating non-diffracting Bessel beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2417~2420
马 亮, 吴逢铁, 黄启禄. 一种产生无衍射贝塞尔光束的新型组合锥透镜[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2417~2420
- 3 Wu Fengtie, Lu Wenhe, Ma Baotian. The beam propagation and transformation in axicon-lens system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2557~2560
吴逢铁, 卢文和, 马宝田. 轴棱锥一透镜系统的光束传输与变换[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2557~2560
- 4 Zhang Qianan, Wu Fengtie, Ma Liang. Bottle beam generated by novel axicon[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(10):

107901

张前安, 吴逢铁, 马亮等. 新型锥透镜产生局域空心光束[J]. 物理学报, 2011, **60**(10): 107901

- 5 Ma Liang, Wu Fengtie. A bottle beam generated by a step refractive index axicon[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(9): 6096~6099
- 马亮, 吴逢铁. 阶变折射率轴棱锥产生局域空心光束[J]. 物理学报, 2010, **59**(9): 6096~6099
- 6 Cheng Zhiming, Wu Fengtie, Zhang Qianan *et al.*. Liquid axicon for generating single bottle beam with size adjustable[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 94~98
- 程治明, 吴逢铁, 张前安等. 液体轴棱锥产生尺寸可调的单个局域空心光束[J]. 光学学报, 2011, **31**(10): 94~98
- 7 Lu Wenhe, Wu Fengtie, Zheng Weitao. Generation of non-diffraction Bessel-like beam using a lens axicon[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1618~1621
- 卢文和, 吴逢铁, 郑维涛. 透镜轴棱锥产生近似无衍射贝塞尔光束[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1618~1621
- 8 Ma Liang, Wu Fengtie. Bottle beam generated by reconstruction of Bessel beam with an annular obstacle[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0202011
- 马亮, 吴逢铁. 环形障碍物后的无衍射光重建产生局域空心光束[J]. 中国激光, 2011, **38**(2): 0202011
- 9 Li Hu. A New Realization Method of the Long Distance Non-Diffracting Beam and Its Applications Research[D]. Wuhan. Huazhong University of Science and Technology, 2003. 3~41
- 李虎. 一种新型长距离无衍射光的实现方法及其应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003. 3~41
- 10 Zhang Wen. Research of Theory and Realization Method with Non-Diffracting Structured Light[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. 8~14
- 张文. 无衍射结构光理论及实现方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005. 8~14
- 11 Zhang Wen, Zhou Liping, Xu Long. A non-diffracting structured light introduction [J]. *Opt. Instrum.*, 2005, **27**(2): 32~36
- 张文, 周莉萍, 徐龙. 一种无衍射结构光研究[J]. 光学仪器, 2005, **27**(2): 32~36
- 12 Xu Long, Qu Dan, Zhang Wen *et al.*. Study on a kind method of realizable linear non-diffraction structured light[J]. *Opt. Instrum.*, 2010, **32**(5): 29~34
- 徐龙, 瞿丹, 张文等. 一种实现线性无衍射结构光的方法研究[J]. 光学仪器, 2010, **32**(5): 29~34
- 13 Qu Dan, Zhou Liping, Xu Long *et al.*. Approximate non-diffracting grating structured light and implementation method[J]. *Opto-Electron. Engng.*, 2010, **37**(9): 140~144
- 瞿丹, 周莉萍, 徐龙等. 一种新型近似无衍射栅型结构光及其实现方法[J]. 光电工程, 2010, **37**(9): 140~144
- 14 Gan Jianghong, Zhou Liping, Chen Liangzhou. Novel non-diffracting grating structured for light projection system[J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Technol. (Nature Science Edition)*, 2011, **39**(5): 14~17
- 干江红, 周莉萍, 陈良洲等. 新型无衍射栅型结构光投影系统[J]. 华中科技大学学报, 2011, **39**(5): 14~17
- 15 Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics (6th ed.) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997
- 16 W. Joseph. Goodman. Introduction to Fourier Optics[M]. New York: McGraw-Hill, 1996
- 17 M. V. Perez, C. Gomez-Reino, J. M. Cuadrado. Diffraction patterns and zone plates produced by thin linear axicons[J]. *Optica Acta*, 1986, **33**(9): 1161~1176
- 18 Z. Jaroszewicz, J. F. Roman Dopazo, C. Gomez-Reino. Uniformization of the axial intensity of diffraction axicons by polychromatic illumination[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(7): 1025~1031