

doi: 10.3788/gzxb20124108.0956

新型棱镜产生近似无衍射线结构光

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:为了改善三角棱镜系统产生近似无衍射线结构光的能量均匀分布在若干条光斑上, 不适合直接应用于三维表面测量且中心光斑对能量利用率较低的问题, 提出了一种新型光学元件. 该元件在三角棱镜的基础上, 通过在其底部胶合一个与原三角棱镜底面大小相等, 横截面为等腰梯形的凸台制成. 采用几何光学的理论对新型光学元件的光束变换特性进行分析, 结果表明其可以等效为两个不同底角三角棱镜的组合, 平面光束通过新型光学元件后将产生中心光斑较强的近似无衍射线结构光. 由衍射积分理论分析和模拟了新型光学元件后的空间光强分布特性. 仿真的结果表明, 衍射积分分析的结果与几何光学分析的结果是一致的: 新型光学元件可以产生一种性能更好的近似无衍射线结构光. 并且通过改变棱镜的结构参量, 能够方便地调节光束的中心光斑尺寸、近似无衍射范围等参量.

关键词:几何光学; 近似无衍射线结构光; 衍射积分; 三角棱镜

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)08-0956-6

束能量主要集中于中心光斑附近.

0 引言

现代加工制造业对三维表面测量技术提出了越来越高的要求, 如测量范围大、分辨率高、测量速度快等. 采用线结构光作为测量光源的传统解决方案, 已经逐渐无法适应现代技术的要求. 近似无衍射光技术的出现^[1-2]和发展^[3-12]为测量系统提供了一种良好的光源. 2001年周莉萍等人^[13]提出以近似无衍射点光源作为测量光源, 但是该系统在测量速度、测量范围上仍受到限制. 近年来, 张文等人提出一种利用以三角棱镜为主体的光学系统产生近似无衍射线结构光的方案^[14-17], 但是这种近似无衍射线结构光由于其能量是均匀分布在若干条光斑上, 不适合将其直接应用于三维表面测量而且对能量的利用率较低.

本文提出一种新型光学元件, 通过在三角棱镜的底部胶合一个与原三角棱镜底面大小相等, 横截面为等腰梯形的凸台制成. 平面光束通过该新型光学元件后的光场可以分为两部分: 一部分是通过凸台中间平面部分所形成的近似无衍射线结构光, 一部分是通过凸台两端的斜面部分所形成的近似无衍射线结构光. 这两部分光场存在一个公共区域, 在这个公共区域里两个近似无衍射线结构光场叠加, 将产生中心光斑较强的近似无衍射线结构光, 该类光

1 理论分析

理论分析和实验都证明了平面光束正入射三角棱镜, 在三角棱镜后会产生明暗相间的光斑条纹, 这些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, 符合近似无衍射光束的特性^[14-15].

由图 1 可以看出光束能量在各级条纹上是均匀分布的, 为了克服上述现象的发生, 使中心光斑的能量得到加强, 提高能量利用率, 本文提出了一种新型棱镜, 如图 2. 图 2 中, r_1 为等腰梯形截面的底角, r_2 为三角形截面的底角, a_1 、 a_2 为新型棱镜的两个底部尺寸. 设计要求 $a_1 > a_2$, r_1 、 r_2 通常小于 10° .

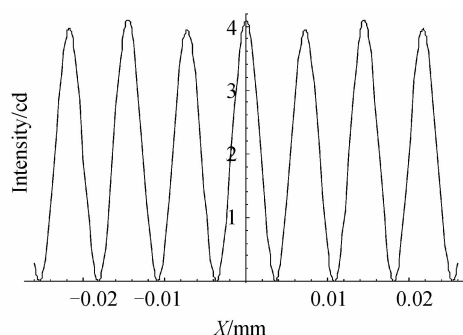


图 1 平面波通过三角棱镜后的光强分布
Fig. 1 Intensity distribution behind the triangular-section prism illuminated by a plane wave

第一作者: 吴志伟(1981-), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为激光技术、光束的传输与变换. Email: wzwqq@126.com

收稿日期: 2012-02-07; 修回日期: 2012-03-24

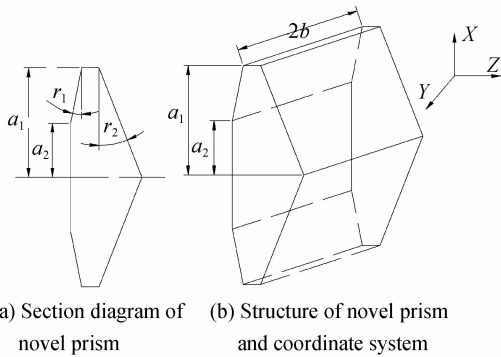


图 2 新型棱镜示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a novel prism

可以将新型棱镜的结构分为两个部分进行讨论,一部分为中间平面部分,另一部分为其两端斜面部分.中间平面部分对平面光束来讲,相当于一个底角为 r_2 的三角棱镜;两端斜面部分对光束的折射关系如图 3(元件结构上下对称,只画出一半表示).

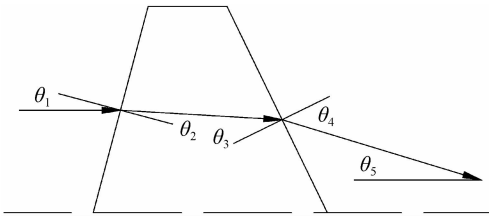


图 3 棱镜两端部分折射示意图

Fig. 3 Schematic diagram of refraction by both ends part of prism

根据斯涅耳定律可以求出底角 r_1 、 r_2 和出射偏折角 θ_5 之间的关系,设定新型棱镜的折射率为 n .

$$\theta_1 = r_1, n \sin \theta_2 = \sin \theta_1, n \sin \theta_3 = \sin \theta_4 \quad (1)$$

$$\theta_3 - (\theta_1 - \theta_2) = r_2 \quad (2)$$

$$r_2 + \theta_5 = \theta_4 \quad (3)$$

在角度较小的情况下,将式(1)、(3)代入式(2)可以得到

$$\theta_5 = (n-1)(r_1 + r_2) \quad (4)$$

由式(4)可以看出新型棱镜两端斜面部分对正入射的平面波来讲,相当于一个底角为 $r_1 + r_2$ 的三角棱镜.

由以上分析可以得到结论:当平面波正入射新型棱镜,新型棱镜的两部分对光束来讲相当于两个底角分别为 r_2 和 $r_1 + r_2$ 的三角棱镜,由于底角不同,对光束产生的偏转角度也就不同.两端斜面部分的底角较大,则产生的偏转角度也较大;中间平面部分的底角较小,则产生的偏转角度也较小.因此在新型棱镜后就会产生一个由两部分出射光场叠加形成的公共部分,如图 4.

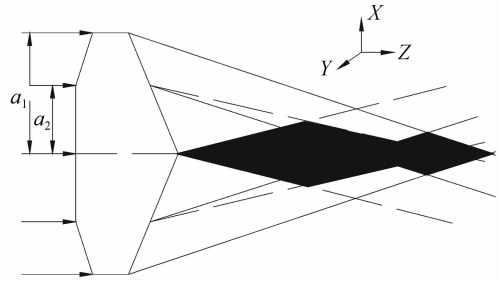


图 4 实现近似无衍射线结构光示意图

Fig. 4 Schematic diagram of generating non-diffracting linear structured beam

图 4 中虚线所包围的黑色区域为中间平面部分所形成的近似无衍射区域,其作用范围 0 到 $\frac{a_2}{(n-1)r_2}$;实线所包围的黑色区域为两端斜面部分所形成的近似无衍射区域,其作用范围 $\frac{a_2}{(n-1)(r_1+r_2)}$ 到 $\frac{a_1}{(n-1)(r_1+r_2)}$. 因为 $r_1 + r_2 > r_2$, 所以两部分会存在一个交集,在这块公共区域两个近似无衍射光场叠加,可以得到中心光斑较强的近似无衍射线结构光.

根据几何光学的理论可以计算出中心光斑较强的近似无衍射线结构光作用范围为 $\frac{a_2}{(n-1)(r_1+r_2)}$ 到

$\min\left\{\frac{a_1}{(n-1)(r_1+r_2)}, \frac{a_2}{(n-1)r_2}\right\}$. 例如,可以取参量

$$a_1 = 22 \text{ mm}, a_2 = 15 \text{ mm}, r_1 = \frac{2\pi}{180} \text{ rad}, r_2 = \frac{5\pi}{180} \text{ rad},$$

$n = 1.5$, 求得中心光斑较强的近似无衍射线结构光作用范围为 245.7 mm 到 343.9 mm. 由以上分析可知,通过改变新型棱镜的底角、折射率等参量可以实现对近似无衍射区域尺寸的控制.

2 数值模拟

根据衍射积分的理论^[18],在一定条件下三角棱镜后的光场分布可以近似表示为

$$E(x', y', z) = \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkz) \iint_{\Sigma} \exp\left\{\frac{jk}{2z}[(x-x')^2 + (y-y')^2]\right\} E(x, y) t(x, y) dx dy \quad (5)$$

式中 $E(x, y)$ 为入射光束在新型棱镜底部 XY 平面内的光场分布, $E(x', y', z)$ 为新型棱镜后光场分布, $t(x, y)$ 为新型棱镜透过率函数.

根据薄棱镜的位相变换性质^[19]及元件的形状,可以求得新型棱镜中间平面部分和两端斜面部分的透过率函数.中间平面部分的模型如图 5 所示(上下对称,只画一半表示).

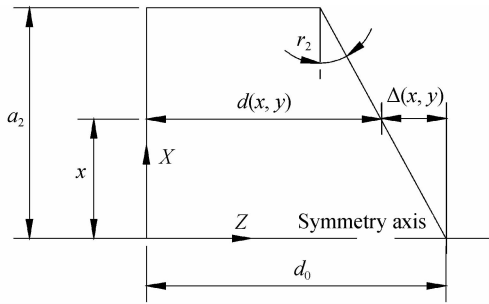


图5 新型棱镜中间部分示意图

Fig.5 Schematic diagram of middle part of a novel prism

考虑到光束正入射新型棱镜,且新型棱镜为薄棱镜,因此在距离对称轴为 x 处,出射波前与入射波前之间的相位差可以表示为

$$\varphi(x,y) = k[\Delta(x,y) + nd(x,y)] = k[nd_0 - (n-1)\Delta(x,y)] = k[nd_0 - (n-1) \cdot |x| \tan(r_2)] \quad (6)$$

在角度较小的条件下,该部分透过率函数可以表示为

$$t(x,y) = \exp[j\varphi(x,y)] \approx \exp(jknd_0) \cdot \exp(-jk(n-1)|x|r_2) \quad (7)$$

式中 r_2 为弧度单位.

两端斜面部分的模型如图6(上下对称,只画一半表示).

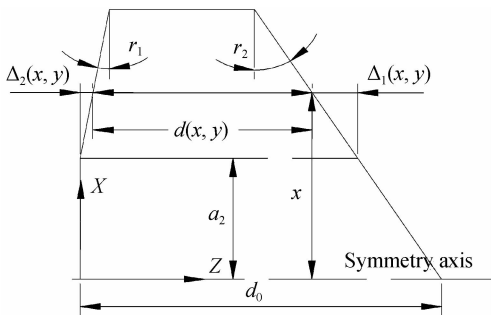


图6 新型棱镜两端部分示意图

Fig.6 Schematic diagram of both ends part of a novel prism

在距离对称轴为 x 处,出射波前与入射波前之间的相位差可以表示为

$$\varphi(x,y) = k[\Delta_1(x,y) + \Delta_2(x,y) + nd(x,y)] = k[n(d_0 - a_2 \tan(r_2) - \Delta_1(x,y) - \Delta_2(x,y)) + \Delta_1(x,y) + \Delta_2(x,y)] = k[nd_0 - na_2 \tan(r_2) - (n-1)(|x| - a_2)(\tan(r_1) + \tan(r_2))] \quad (8)$$

在角度较小的条件下,该部分透过率函数可以表示为

$$t(x,y) = \exp[j\varphi(x,y)] \approx \exp[jk(nd_0 - na_2 r_2)] \cdot \exp[-jk(n-1)(|x| - a_2)(r_1 + r_2)] \quad (9)$$

式中 r_1, r_2 为弧度单位.

设定入射光为振幅为 1 的单色平面波(光束在新型棱镜底面 XY 平面内近似均匀分布 $E(x,y) = 1$),将式(7)、(9)代入式(5)可以求出中间平面部分

产生的近似无衍射光场 E_1 和两端斜面部分产生的近似无衍射光场 E_2 .

$$E_1(x',y',z) = \frac{\exp[jk(z + nd_0)]}{j\lambda z} \int_{-a_2}^{a_2} \exp\left\{jk\left[\frac{(x-x')^2}{2z} - (n-1)|x|r_2\right]\right\} \cdot dx \int_{-b}^b \exp\left[jk\frac{(y-y')^2}{2z}\right] dy \quad (10)$$

$$E_2(x',y',z) = \frac{\exp\{jk[z + nd_0 - na_2 r_2]\}}{j\lambda z} \left\{ \int_{a_2}^{a_1} \exp\left[jk\left[\frac{(x-x')^2}{2z} - (n-1)(|x| - a_2) \cdot (r_1 + r_2)\right]\right] dx + \int_{-a_2}^{-a_1} \exp\left[jk\left[\frac{(x-x')^2}{2z} - (n-1)(|x| - a_2)(r_1 + r_2)\right]\right] dx \right\} \int_{-b}^b \exp\left[jk\frac{(y-y')^2}{2z}\right] dy \quad (11)$$

中心光斑较强的近似无衍射线结构光光场为 E_1, E_2 的叠加,根据式(10)、(11)可以得到该部分光强分布表达式为

$$I(x',y',z) = |E_1(x',y',z) + E_2(x',y',z)|^2 \quad (12)$$

可以对式(12)做进一步的分析,则

$$I(x',y',z) = |E_1(x',z) + E_2(x',z)|^2 \cdot |E_{1,2}(y',z)|^2 \quad (13)$$

$$I(x',z) = |E_1(x',z) + E_2(x',z)|^2 \quad (14)$$

$$I(y',z) = |E_{1,2}(y',z)|^2 \quad (15)$$

式(13)~(15)中

$$E_1(x',z) = \frac{\exp[jk(z + nd_0)]}{j\lambda z} \int_{-a_2}^{a_2} \exp\left\{jk\left[\frac{(x-x')^2}{2z} - (n-1)|x|r_2\right]\right\} dx$$

$$E_2(x',z) = \frac{\exp\{jk[z + nd_0 - na_2 r_2]\}}{j\lambda z} \left\{ \int_{a_2}^{a_1} \exp\left[jk\left[\frac{(x-x')^2}{2z} - (n-1)(|x| - a_2) \cdot (r_1 + r_2)\right]\right] dx + \int_{-a_2}^{-a_1} \exp\left[jk\left[\frac{(x-x')^2}{2z} - (n-1)(|x| - a_2)(r_1 + r_2)\right]\right] dx \right\}$$

$$E_{1,2}(y',z) = E_1(y',z) = E_2(y',z) = \int_{-b}^b \exp\left[jk\frac{(y-y')^2}{2z}\right] dy$$

通过对式(13)~(15)进行数值计算,可以求出平面波通过新型棱镜后在 X, Y, Z 三个方向上的光强分布.作为一个具体的实施例子,可以选择新型棱镜的结构参量为: $a_1 = 22$ mm, $a_2 = 15$ mm, $b = 30$ mm, $d_0 = 5$ mm(棱镜中心厚度), $r_1 = \frac{2\pi}{180}$ rad,

$r_2 = \frac{5\pi}{180}$ rad, $n = 1.5$ (K9 光学玻璃), 入射光波长 $\lambda = 632.8$ nm.

数值模拟的结果如图 7~9. 图 7 是给定 Z 值的条件下对式(14)数值计算的结果, 表示平面波通过新型棱镜后, 随传播距离变化, X 轴上光强分布的变化. 1) 在 $z < 245$ mm 范围, 以 $z = 3$ mm 和 $z = 100$ mm 处为例说明. 能量均匀分布在若干条条纹上, 如果以亮条纹线宽的一半来定义光斑大小, 则 $z = 3$ mm 处各个光斑的宽度大致为 0.0035 mm 左右, 同理 $z = 100$ mm 处各个光斑的宽度大致也为 0.0035 mm 左右, 由此看出随距离变化, 光斑的尺寸没有变化, 具有近似无衍射的特征. 该部分是新型

棱镜中间平面部分单独作用的结果, 在这段范围内中心光斑的能量没有得到加强. 2) 在 $245 \text{ mm} < z < 340 \text{ mm}$ 范围, 以 $z = 250$ mm 和 $z = 320$ mm 处为例说明. 由图 7(c) 看出 $z = 250$ mm 处, 中心亮条纹的线宽大致为 0.006 mm, 则中心光斑的宽度为 0.003 mm 左右, 由图 7(d) 看出 $z = 320$ mm 处, 中心亮条纹的线宽大致也是 0.006 mm, 则中心光斑的宽度也为 0.003 mm 左右, 因此在这段范围中心光斑也具有近似无衍射的特征, 且中心光斑附近的光强明显得到加强. 3) $z > 340$ mm, 光束开始分散, 中心光斑能量逐步降低. 这样的结论和几何光学分析的结果(如图 4 所示)基本上是一致.

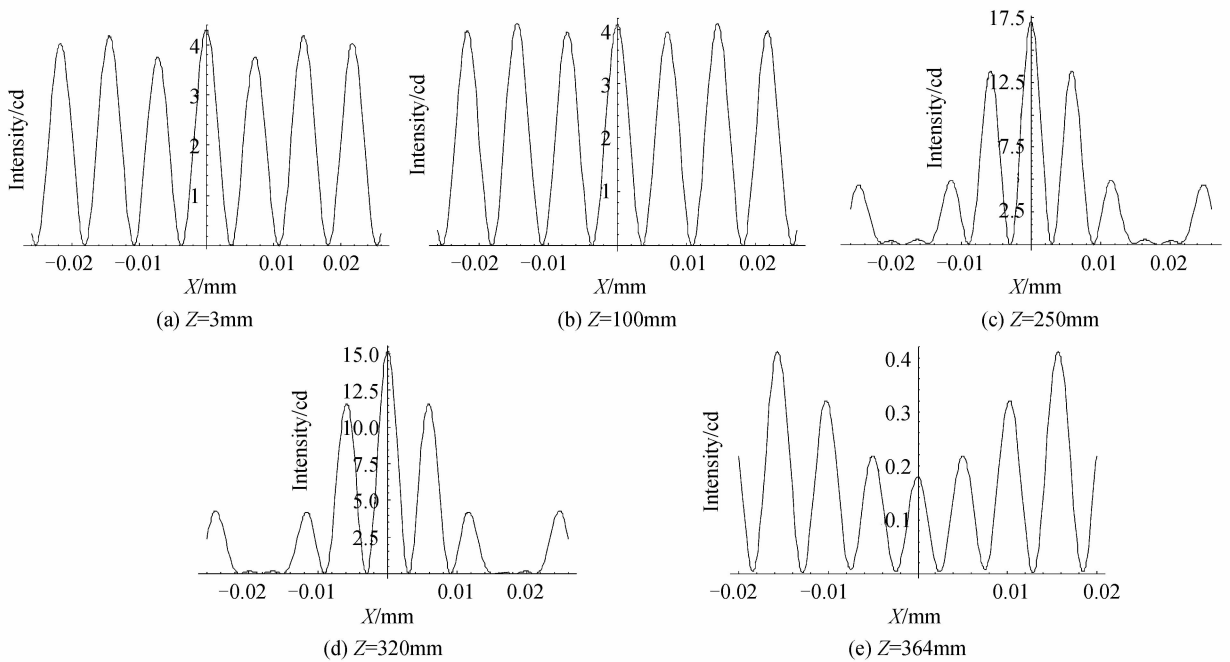


图 7 X 轴上光强分布
Fig. 7 Intensity distribution on X axis

图 8 是给定 Z 值的条件下对式(15)数值计算的结果, 表示平面波通过新型棱镜后, 随传播距离变化, Y 轴上光强分布的变化. 以 $z = 250$ mm 和 $z = 320$ mm 处为例说明, 可以看出在 Y 方向上近似无衍射线结构光束的强度具有一定的均匀性.

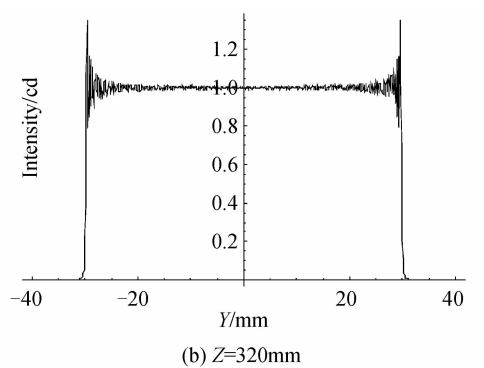
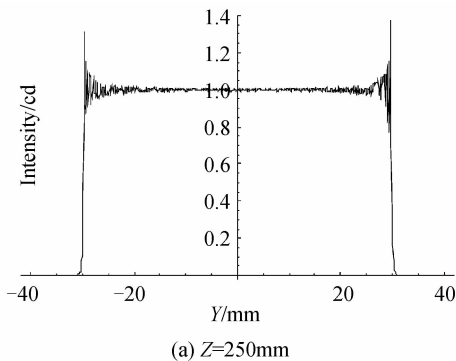


图 8 Y 轴上光强分布
Fig. 8 Intensity distribution on Y axis

图 9 是给定 $x' = 0, y' = 0, z \in \{0, 400 \text{ mm}\}$ 的条件下对式(13)数值计算的结果, 表示平面波通过新型棱镜后, Z 轴上光强分布的变化. 可以清楚看出光强阶段性的变化, $0 < z < 245$ mm 是新型棱镜中间

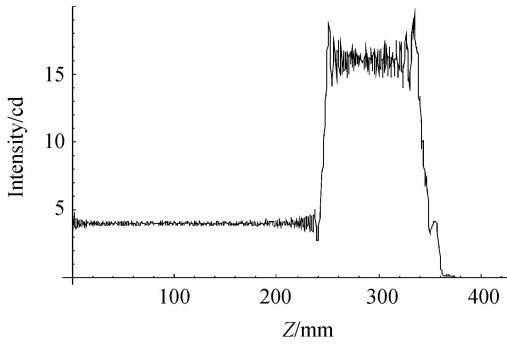


图9 Z轴上光强分布

Fig.9 Intensity distribution on Z axis

平面部分单独作用范围, $245\text{ mm} < z < 340\text{ mm}$ 光强得到明显加强是中心光斑较强近似无衍射线结构光的作用范围,之后光强逐步下降,光束开始分散.这与图7及几何光学分析的结果是基本一致的,但是也可以看出光强在传播方向上存在一定的抖动.

3 结论

提出一种用于产生近似无衍射线结构光的新型棱镜模型,通过几何光学分析及衍射积分数值模拟证明平面波通过该新型棱镜可以产生一种中心光斑较强的近似无衍射线结构光.普通三角棱镜产生近似无衍射线结构光在X轴上光强分布具有周期性,且变化的周期与三角棱镜的底角相关.本方案的实质在于让两束同频率、但是光强分布具有不同周期的近似无衍射线结构光在同一个区域叠加,起到改善光强分布,使中心光斑光强得到加强的效果.这两束不同周期的近似无衍射线结构光通过新型棱镜的两个部分产生,而这两部分可以等效为两个不同底角的普通三角棱镜.该新型棱镜通过单一元件就可以产生参量可调的近似无衍射线结构光,且结构简单、对加工技术要求不高,是对产生近似无衍射线结构光的一种有益探索.

参考文献

- [1] DUMIN J. Exact solutions for non-diffracting beams (I): the scalar theory[J]. *JOSA A*, 1987, **4**(4): 651-654.
- [2] DUMIN J. Diffractive-free beams [J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(15): 1499-1501.
- [3] TURUENEN J, VASARA A, FRIBERG A T. Holographic generation of diffraction-free beams [J]. *Applied Optics*, 1988, **27**(19): 3959-3962.
- [4] SCOTT G, MCARDLE N. Efficient generation of nearly diffraction-free beams using an axicon [J]. *Optical Engineering*, 1992, **31**(12): 2640-2643.
- [5] HERMAN R M, WIGGINS T A. Apodization of diffractionless beams[J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(28): 5913-5925.
- [6] MA Liang, WU Feng-tie, HUANG Qi-lu. 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.一种产生近似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.
- [7] WANG Xin-ai, YANG Zhen-jun, HU Wei, et al. Spatially

- induced dispersion in the propagation of bessel-like pulsed beam[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 997-1002.
- 王新爱,杨振军,胡巍等.类贝塞尔脉冲光束传输中的空间诱导色散效应[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6): 997-1002.
- [8] ZHANG Qian-an, WU Feng-tie, MA Liang, et al. Bottle beam generated by novel axicon [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(9): 320-325.
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**(9): 320-325.
 - [9] MA Liang, WU Feng-tie. 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.
 - [10] LU Wen-he, WU Feng-tie, ZHENG Wei-tao. 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.
 - [11] LIU Lan, WU Feng-tie. Reconstruction and rectification of non-diffracting beam after focusing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 789-793.
刘岚,吴逢铁.无衍射光束聚焦后的重建与矫正[J]. *光子学报*, 2008, **37**(4): 789-793.
 - [12] LEI Ming, YAO Bao-li. The explanation of bessel-like beam from axicon with three-beam interference model [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 146-148.
雷铭,姚保利.用三光束干涉模型解释锥透镜产生类贝塞尔光束[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1): 146-148.
 - [13] ZHOU Li-ping, GAO Yong-sheng, LI Zhu-hua. Triangulation system based on non-diffracting beams and virtual detector [J]. *Journal Huazhong University of Science & Technology (Nature Science Edition)*, 2001, **29**(1): 8-10.
周莉萍,高咏生,李柱华.基于无衍射光及虚拟探测器的三角测量系统[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2001, **29**(1): 8-10.
 - [14] ZHANG Wen, ZHOU Li-ping, XU Long. A non-diffracting structured light introduction [J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(2): 32-36.
张文,周莉萍,徐龙.一种近似无衍射结构光研究[J]. *光学仪器*, 2005, **27**(2): 32-36.
 - [15] XU Long, QU Dan, ZHANG Wen, et al. Study on a kind method of realizable linear non-diffraction structured light [J]. *Optical Instruments*, 2010, **32**(5): 29-34.
徐龙,瞿丹,张文,等.一种实现线性近似无衍射结构光的方法研究[J]. *光学仪器*, 2010, **32**(5): 29-34.
 - [16] QU Dan, ZHOU Li-ping, XU Long, et al. Approximate non-diffracting grating structured light and implementation method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 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.
 - [17] GAN Jiang-hong, ZHOU Li-ping, CHEN Liang-zhou, et al. Novel non-diffracting grating structured for light projection system [J]. *Journal Huazhong University of Science & Technology (Nature Science Edition)*, 2011, **39**(5): 14-17.
干江红,周莉萍,陈良洲,等.新型近似无衍射栅型结构光投影系统[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2011, **39**(5): 14-17.
 - [18] 玻恩 M, 沃尔夫 E. 光学原理[M]. 杨葭孙,译. 7版. 北京: 电子工业出版社, 2009: 342-427.
 - [19] 赵凯华. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 237-238.

Novel Prism Generating Non-diffracting-like Linear Structured Beam

WU Zhi-wei

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

Abstract: A novel optical element is presented for solving the problems that energy of non-diffracting-like linear structured beam generated by normal triangular-section prism is evenly distributed and not suitable to be used to three-dimensional surface measurement directly and energy efficiency of central spot is lower. This element is designed by gluing a platform with isosceles trapezoid section on the bottom of triangular-section prism. The beam transformation property of this element is analyzed with geometrical optics theory, and the conclusion shows that its property is the same as the combination of two normal triangular-section prisms with different bottom corner. When a plane wave illuminates on the novel optical element, non-diffracting-like linear structured beam which has higher intensity in the central spot is formed. Finally the intensity distribution is simulated by diffraction and interference theory. The results show that the conclusion of diffraction and interference theory is consistent with the conclusion of geometrical optics theory, and a better non-diffracting-like linear structured beam is generated by this novel optical element. Parameters that the central spot size of beam, non-diffracting range and so on can be adjusted easily through changing the structural parameters of the prism.

Key words: Geometrical optics; Non-diffracting-like linear structured beam; Diffraction and interference; Triangular-section prism