

文章编号: 1001-3806(2008)03-0274-04

准单色光照射轴锥镜的衍射特性

翟中生, 赵斌*

(华中科技大学 机械科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为了研究准单色光照射轴锥镜的衍射特性, 在讨论单色平面波照射轴锥镜衍射理论的基础上, 利用准单色光可以分解为不同频率单色光线性组合的特性, 得到了准单色光照射轴锥镜的衍射光斑的强度分布形式。并根据仿真和实验结果比较了准单色光和单色光产生的衍射光斑强度分布的差异。结果表明, 准单色光照射轴锥镜产生的衍射光斑的强度为不同频率单色光照射轴锥镜产生的强度之和, 衍射条纹数比单色光的少, 离轴方向的光强比单色光的衰减快。

关键词: 光学器件; 强度分布; 衍射; 轴锥镜; 准单色光

中图分类号: TG806 **文献标识码:** A

Diffraction property of an axicon in quasimonochromatic light

ZHAI Zhong-sheng, ZHAO Bin

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract For analyzing the diffraction property of an axicon in quasimonochromatic illumination, based on the analyses of the diffraction property of an axicon illuminated by a monochromatic plane wave and the property of quasimonochromatic light that it can be regarded as superposition of monochromatic components of differential frequencies, the intensity distribution of the diffraction pattern of an axicon in quasimonochromatic light was deduced. According to the numerical simulation and experimental results, the difference between the diffraction patterns generated by quasimonochromatic light and monochromatic light was compared. Results show that the intensity distribution of an axicon in quasimonochromatic light is given by the sum of intensity of individual component and the diffraction fringes are less than those produced by monochromatic light. Moreover, the off-axis intensity attenuates more rapidly than that of monochromatic waves.

Key words optical devices; intensity distribution; diffraction; axicon; quasimonochromatic light

引 言

轴锥镜由于能量利用率高、制造比较容易和成本低的特点, 是目前常用的产生近似无衍射光束的光学元件^[1]。人们对轴锥镜本身特性的研究主要在: 倾斜光照射时的衍射特性^[2-3], 不同强度的分布^[4], 加工误差对无衍射光质量的影响^[5]等方面, 研究者们还将轴锥镜应用于光学共鸣器^[6]、位移测量^[7]、直线度测量^[8]和激光三角测量系统^[9]等领域。而所有这些研究都是基于光源是单色光的情况, 但实际许多光源都是非相干的和部分相干的。SERGEI分析了全息轴锥镜在部分相干光照射下轴上不同位置光强变化情况^[10], 设计了部分相干光照射下的延长焦深的衍射轴锥镜^[11]。为了将轴锥镜用于部分相干光和非相干光

成像中, 分析了轴锥镜在准单色光下的衍射模型。

作者根据单色光照射轴锥镜的衍射特性和准单色光的相关理论, 分析了准单色光照射轴锥镜的衍射特性。通过这些特性的分析, 为轴锥镜用于非相干光和部分相干光照明的光学系统提供了依据。

1 准单色光照射轴锥镜的理论分析

1.1 准单色场理论

在单色场中, 光场分布可由复振幅完整的描述, 对于空间任一点的振动, 其振幅不变而相位随时间作线性变化; 而在非单色场中, 空间任一点的光振动的振幅和相位随时间作无规则变化。

准单色光的频谱成分所覆盖的频率范围 $\Delta\nu$ 比其中心频率 ν_0 小得多, 即:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} \ll 1 \quad (1)$$

设准单色场空间任一点 P 的光扰动和其解析信号分别为 $u_r(P, t)$ 和 $u(P, t)$, 根据准单色场理论^[12], 解析信号 $u(P, t)$ 与 $u_r(P, t)$ 的傅里叶谱 $U_r(P, \nu)$ 有如下关系:

$$u(P, t) = 2 \int U_r(P, \nu) \exp(i2\pi\nu t) d\nu \quad (2)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30470489)

作者简介: 翟中生 (1978), 男, 博士研究生, 主要从事光学、光学成像、图像处理的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhaobin63@sohu.com

收稿日期: 2007-03-20; 收到修改稿日期: 2007-05-13

(2)式表明,准单色场可分解成一系列单色波的线性组合,对每一频率为 ν 的单色光,权重因子为傅里叶谱 $U_r(P, \nu)$ 。

因此,对于准单色光照射轴锥镜的衍射情况,可以先将准单色光分解为不同频率单色光的线性组合,每个频率单色光的权重因子为其傅里叶频谱,然后利用单色光照射轴锥镜的衍射理论,可分别求得这些不同频率单色光产生的衍射光斑的强度,再将这些强度相加,所得的强度就为准单色光照射轴锥镜产生的衍射光斑的强度。

1.2 单色光照射轴锥镜

设轴锥镜的夹角为 θ 它对应的透过函数为:

$$t(r) = \begin{cases} \exp[-jk(n-1)r\theta], & (r \leq D/2) \\ 0 & (r > D/2) \end{cases} \quad (3)$$

式中, n 为轴锥镜材料的折射率, D 为轴锥镜的直径,

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, k = 2\pi/\lambda, \lambda \text{ 为波长。}$$

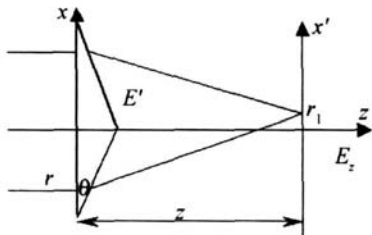


Fig 1 An axicon in monochromatic light

如图 1 所示,平面波 E_0 经轴锥镜后其输出波为:

$$E' = E_0 t(r) \quad (4)$$

由菲涅耳衍射理论可知,在轴锥镜后 z 处的衍射场为:

$$E_z = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \iint E' \exp\left\{ j\frac{k}{2z} [(x-x')^2 + (y-y')^2] \right\} dx' dy' \quad (5)$$

根据文献 [2]、文献 [13] 推导出 E_z 近似为:

$$E_z = \frac{\pi r_p}{j\sqrt{\lambda z}} J_0\left(k \frac{r_p}{z} r_1\right) \exp\left\{ jkz + j\frac{k}{2z} r_1^2 - jk \frac{r_p^2}{2z} + j\frac{\pi}{4} \right\} \quad (6)$$

式中, r_1 为 $x'y'$ 面的极半径, r_p 为稳像点, $r_p = z(n-1)\theta$ 。从 (6) 式可以看出,单色光平行入射轴锥镜产生的衍射场近似为零阶贝塞尔分布。此时 z 处的光强 I_z 为:

$$I_z = |E_z|^2 = \frac{(\pi r_p)^2}{\lambda z} J_0^2\left(k \frac{r_p}{z} r_1\right) \quad (7)$$

1.3 准单色光照射轴锥镜

准单色光照射轴锥镜的原理图如图 2 所示。用红色发光二极管 (light emitting diode LED) 作为准单色光源,为了使准单色光能以平面波入射轴锥镜,采用高倍显微物镜对 LED 发出的光波进行聚焦,使得在透镜 L 的前焦面上形成一个高倍缩小的 LED 发光面的像,作为近似的点光源,则经透镜 L 出射的光波近似为平

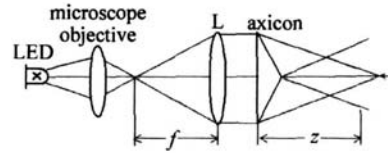


Fig 2 Schematic diagram of an axicon in quasimonochromatic light

面波。对于准单色光准直后入射轴锥镜的光场情况,不能直接利用单色光衍射理论进行分析。但根据前面准单色场的分析,可以将准单色光分解成不同频率的单色光的线性组合,然后根据单色光照射轴锥镜的理论就可以得到准单色光照射轴锥镜的衍射分布。

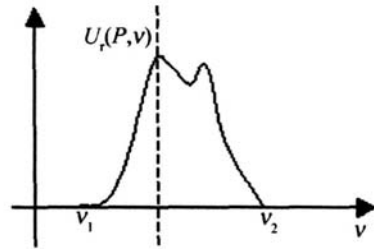


Fig 3 Spectral characteristic of quasimonochromatic light

设 $U_r(P, \nu)$ 为准单色光的光谱分布,频率分布在 (ν_1, ν_2) 区间内,如图 3 所示,则 (2) 式变为:

$$u(P, t) = 2 \int_{\nu_1}^{\nu_2} U_r(P, \nu) \exp(j2\pi\nu t) d\nu \quad (8)$$

当 $U_r(P, \nu)$ 难以确定,可将其离散化,设其由 n 个单色分量所组成,则 (8) 式变为:

$$u(P, t) = 2 \sum_{i=1}^n U_r(P, \nu_i) \exp(j2\pi\nu_i t) \quad (9)$$

式中, ν_i 为第 i 个单色分量的频率, $U_r(P, \nu_i)$ 为单色分量 ν_i 的傅里叶谱。由于频率为 ν_i 的单色光平行照射轴锥镜在 z 处产生的光强为 $\frac{\nu_i^2 (\pi r_p)^2}{cz} J_0^2\left(k \frac{r_p}{z} r_1\right)$, 其中 c 为真空中的光速,则准单色光照射轴锥镜在 z 处的光强为这些单色光衍射斑光强的线性叠加:

$$I_z = \sum_{i=1}^n \frac{\nu_i^2 (\pi r_p)^2}{cz} [U_r(P, \nu_i)]^2 J_0^2\left(k \frac{r_p}{z} r_1\right) \quad (10)$$

由于 k 与 ν 有如下关系:

$$k = \frac{2\pi\nu}{c} \quad (11)$$

则 (10) 式变为:

$$I_z = \sum_{i=1}^n \frac{\nu_i^2 (\pi r_p)^2}{cz} [U_r(P, \nu_i)]^2 J_0^2\left[2\pi\nu_i \frac{r_p}{cz} r_1\right] \quad (12)$$

从 (12) 式可知,准单色光照射轴锥镜的光强为不同频率的零阶贝塞尔函数平方的线性叠加,权重因子为不同频率的傅里叶谱的平方。频率的傅里叶谱越大,该频率分量对总的强度影响越大。

在图 2 所示的准单色光照射轴锥镜系统中,由于 LED 经高倍物镜聚焦后仍有一定的大小,因此,在 z 处

得到的是点光源衍射图与一定大小圆斑卷积的结果, 实际的强度 I_z' 近似为:

$$I_z' \approx I_z \odot \text{rect}(r_0/d) \quad (13)$$

式中, d 为圆斑直径, r_0 为圆斑所在面的极半径。

2 数值仿真与实验结果

2.1 准单色光照射轴锥镜仿真

为了证明上述理论, 选用红色高亮发光二极管作为准单色光源, 其光谱特性曲线如图 4 所示。从图 4

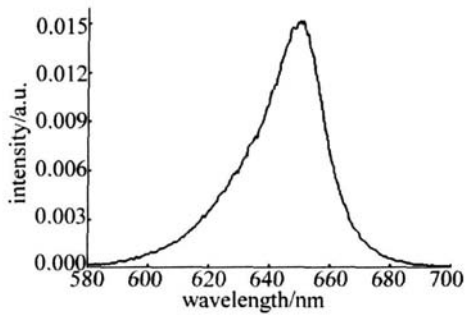


Fig 4 Spectral characteristic of red LED

中可以看出, 其中心波长为 650nm。用该 LED 产生的准单色光经透镜准直后照射轴锥镜, 取轴锥镜的夹角 $\theta = 0.01^\circ$, $n = 1.5$, $D = 20\text{mm}$, $z = 300\text{mm}$, 根据图 4 中所示光谱曲线, 仿真该 LED 照射轴锥镜的衍射图如图 5a 所示, 图 5b 为其强度剖面图。图 6a 为波长为 632.8nm 的单色光照射轴锥镜产生的衍射图, 图 6b 为其强度剖面图。比较图 5 图 6 可以发现, 准单色光照射轴锥镜的产生的衍射图的条纹要比单色光的少, 强度从中间到边缘衰减比较快。

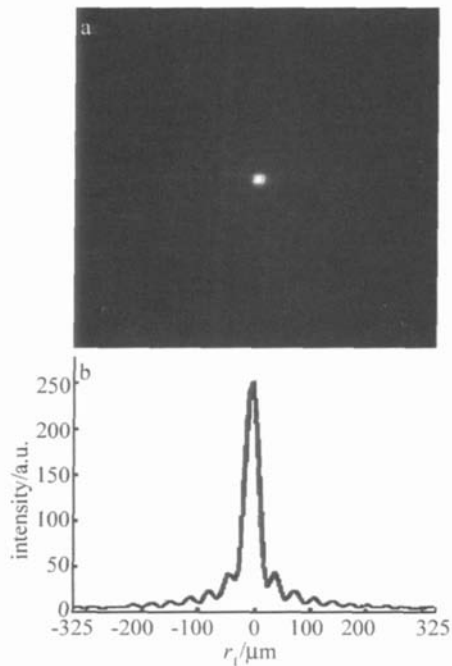


Fig 5 Simulation result and its profile of an axicon in quasi-monochromatic light

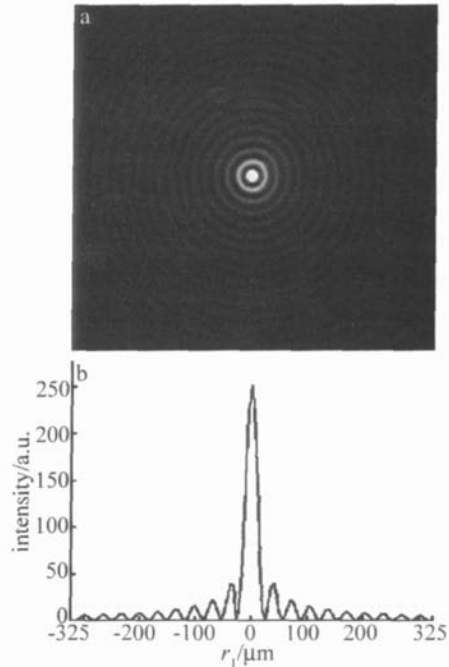


Fig 6 Simulation result and its profile of an axicon in monochromatic light

2.2 实验结果

用光谱特性如图 4 所示的红光 LED 照射轴锥镜。实验中的参数取值分别为 $\theta = 0.01^\circ$, $n = 1.5$, $D = 20\text{mm}$, $z = 300\text{mm}$, 采用面积为 $4.8\text{mm} \times 3.6\text{mm}$, 像素尺寸为 $6.5\mu\text{m} \times 6.25\mu\text{m}$ 的黑白 CCD 获得 z 处的图像如图 7a 所示, 图 7b 为其强度剖面图。图 8a 为激光照

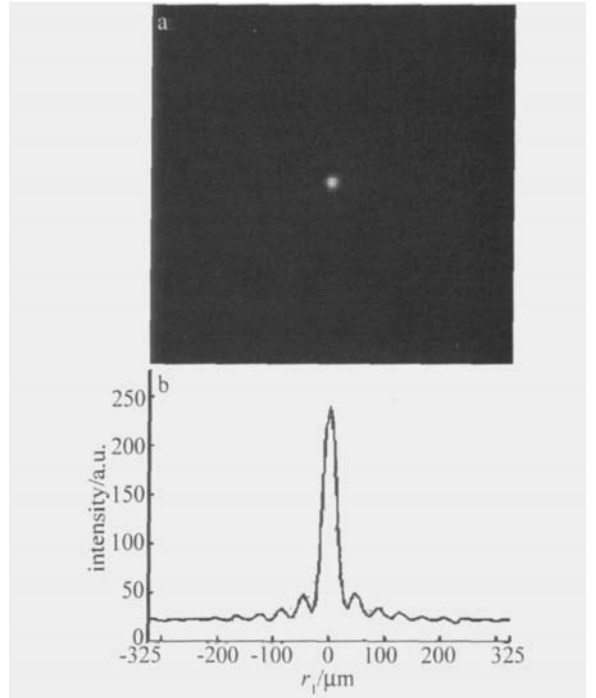


Fig 7 Experimental result and its profile of an axicon illuminated by a red LED. From Fig 7b, it can be seen that the image collected by the CCD has an intensity of about 20. From Fig 7, it can be found that the number of fringes produced by the red LED axicon at the same position is much less than that of the laser.

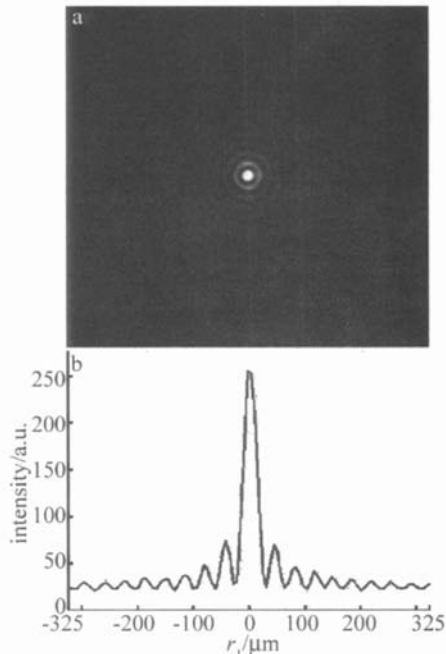


Fig 8 Experimental result and its profile of an axicon illuminated by a laser 激光照射的情况,且其强度衰减很快。

3 结 论

实验结果与仿真结果相一致,表明了准单色光透过轴锥镜产生的衍射光斑强度是由不同频率的单色光照射轴锥镜的衍射光斑的强度之和,且准单色光产生的衍射条纹数比单色光少,离轴方向的光强比单色光的衰减快。

参 考 文 献

[1] LÜ B D, ZHANG B, CAI B W, *et al*. The investigation of the diffraction

(上接第 273 页)

3 结 论

本文中给出的器件结构简单,能实现光路的 90° 转向,延迟量对入射角非常不灵敏,在入射光非严格准直的情况下,不必修正入射光线路径,可以调整使得在某一特定波长的位相延迟为 90° ,延迟量相当稳定。从下端面斜入射时,具有较好的消色差性能。基于这些特点,该器件在测量中可用作较为理想的 90° 转向相位延迟标准元件。

参 考 文 献

[1] LI J Zh, SU Sh X, ZHAO JM. Handbook of optics [M]. Xian Science Technology Press of Shanxi 1985 726 (in Chinese).
[2] WANG X, WU F Q. A fresnel rhomb type phase retarder insensitive to the incident angle [J]. Laser Technology, 2000 24 (1): 27-29 (in Chinese).

tion free beam with a finite aperture [J]. Chinese Science Bulletin 1994 39 (2): 125-128 (in Chinese).

- [2] ZHAO B, LI Zh. Diffraction property of an axicon in oblique illumination [J]. Appl Opt 1998 37 (13): 2563-2568.
[3] ZBIGNIEW J ANNA T, ARI T F, *et al*. Design of diffractive axicon doubles for variable illumination angles [J]. SPIE, 2003 5259: 92-96
[4] MARCELINO A M, MARIBEL M M O, SABIDO C C, *et al*. Different intensity distribution obtained with an axicon [J]. SPIE, 2005, 587617: 1-8.
[5] ZHOU L P, ZHAO B, LI Zh. Influence of manufacture error of an axicon on beam transmission [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 2001, 29 (3): 61-63 (in Chinese).
[6] ANATOL N K, EUGENY G K, ANATOL A R. Axicon-based Bessel resonator: analytical description and experiment [J]. J O S A, 2001, A18 (8): 1986-1992
[7] ZHANG X B, ZHAO B, LI Zh, *et al*. A method of a non-contact optical measurement for displacement based on axicon [J]. Journal of Wuhan Automotive Polytechnic University, 2000 22 (6): 51-54 (in Chinese).
[8] ZHAO B. Instrument for straightness measurement using non-diffracting beam and moiré fringe [J]. Optical Instruments 2003 25 (2): 43-46 (in Chinese).
[9] ZHOU L P, ZHAO B, LI Zh. Research on laser triangulation measurement system with non-diffraction beam [J]. Laser Technology 1998 22 (1): 22-25 (in Chinese).
[10] SERGEY P, ARI T F. Linear axicons in partially coherent light [J]. Opt Engng 1995 34 (9): 2567-2573.
[11] SERGEY P, ARI T F. Design of diffractive axicons for partially coherent light [J]. Opt Lett 1998 23 (21): 1639-1641.
[12] LÜ N G. Fourier optics [M]. 2th ed. Beijing: China Machine Press 2006 182-223 (in Chinese).
[13] ZHANG B, LÜ B D. Analyzing the propagation properties of diffraction free beams [J]. Laser Technology, 1996, 20 (1): 14-19 (in Chinese).

[3] NAGIB N N. Phase retarder highly insensitive to the input angle [J]. Appl Opt 1998 37 (7): 1231-1235

- [4] ZHAO P, LI G H. The development of 90° deflecting compound retarder [J]. Laser Technology, 2004 28 (4): 424-426 (in Chinese).
[5] ZHAO Q L, WU F Q. Optical phase retardation measurement by normalized polarizing modulation [J]. Acta Optica Sinica 2002, 23 (3): 360-362 (in Chinese).
[6] APFEL J H. Graphical method to design multiplier phase retarders [J]. Appl Opt 1981, 20 (6): 1024-1029.
[7] HOWLADER M M K, AZZAM R M A. Periodic and quasiperiodic nonquarterwave multilayer coatings for 90° reflection phase retardance at 45° angle of incidence [J]. Opt Engng 1995 34 (3): 869-875
[8] EFBRAHWY M S, NAGIB N N. Phase retarders with variable angles of total internal reflection [J]. Appl Opt 1994 33 (6): 1218-1222
[9] ZHANG W Q. Accurate formulas of phase retardation and polarization aberration for waveplates in oblique incident beam [J]. Acta Optica Sinica 1997, 17 (8): 1121-1123 (in Chinese).
[10] WANG X, WU F Q, WANG H Zh. Discussion on retardation equation for achromatic phase retarder [J]. Laser & Optoelectronics Progress 2001 (4): 14-17 (in Chinese).