

文章编号: 1001-3806(2007)01-0035-02

胶片扫描法精测微米光斑

张建荣, 吴逢铁*, 邢笑雪, 曾夏辉

(华侨大学 信息科学与工程学院, 泉州 362021)

摘要: 为了精确测量零阶贝塞耳光束的中心亮斑半径, 采用彩色反转胶片作为记录媒质, 通过滚筒扫描的方法将底片上的图像转为数字图像, 在对数字图像做必要的处理后, 测量出氦氖激光的零阶贝塞耳光束的中心光斑半径为 $16.77\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$, 与理论计算值 $15.16\mu\text{m}$ 吻合良好。实验结果表明, 采用胶片测量微米量级的光斑具有高精度、低成本、可测截面面积大的优点, 在 1H z 超短脉冲实验中, 可以替代甚至超越了常规的激光光束分析仪。

关键词: 图像处理; 贝塞耳光束; 激光光束参数分析仪; 滚筒扫描仪

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A

Precise laser spot measurement based on film-scanning

ZHANG Jian-rong, WU Feng-tie, XING Xiao-xue, ZENG Xia-hui

(College of Science and Technology, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract Using color reversal film as record medium, the radius of the Bessel beam central spot is measured through the analysis of the digital image by film-scanning. The experimental result $16.77\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ is consistent well with the theory result $15.16\mu\text{m}$. The result also indicates that the film-scanning method shows some advantages in lower cost, higher accuracy and larger measurable scale. Furthermore, this measurement is superior to the expensive laser beam parameter analyzer in measuring the beam size on micrometer magnitude of 1H z ultrashort pulse.

Key words image processing; Bessel beam; laser beam parameter analyzer; rotating drum image scanner

引 言

对激光光束横截面分析是评估光束质量的重要手段, 通常使用配备电荷耦合器件 (CCD) 或者互补性氧化金属半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 感光元件的激光光束参数分析仪^[1] (以下简称光束分析仪) 来测量光斑大小、轮廓和能量分布等参数。由于现在的光束分析仪功能强大, 使用方便而且有实时测量的优点, 长久以来, 使用光束分析仪几乎被认为是光束分析的唯一方法。但是, 光束分析仪带来便捷的同时也掩盖不住自身的缺陷: 精度达到微米量级的光束分析仪价格极其昂贵; CCD 或者 CMOS 感光元件自身的随机噪点和起伏的温度特性影响测量精度^[2]; 感光元件面积较小、宽容度低等问题暂时都不能得到圆满解决。

为了精确测量微米量级零阶贝塞耳光束截面的光

斑尺寸, 首先让激光光束直接在彩色反转胶片上曝光, 胶片冲洗完毕后使用滚筒扫描仪扫描获得高分辨率电子图像, 再利用计算机对图像进行必要的处理, 便可精确测量出微米量级的光斑尺寸。完成了使用顶尖公司的 LBA-780PC 型 (感光元件 CCD 尺寸为: $8.8\text{mm} \times 6.6\text{mm}$; 有效像素为: 754×488 像素单元尺寸为: $11.5\mu\text{m}(H) \times 27\mu\text{m}(V)$) 光束分析仪无法完成的工作。

1 胶片测量机理

感光胶片自 1839 年发明以来, 经过一百多年的使用和改进, 各方面性能已经达到非常完善, 除了熟悉的彩色负片、黑白负片、彩色反转片, 还有特殊用途的一些胶片, 比如彩色灯光片、红外胶片、氦氖激光 CT 胶片、X 射线胶片等等。人们熟知, 胶片的感光最小单元就是卤化银分子^[3], 那么其像素点理论上可以达到分子大小。事实上, 由于胶片的颗粒度影响, 像素点为纳米量级^[4]。而滚筒扫描仪的光学分辨率可以轻易达到 25000dpi 因此, 应用胶片和滚筒扫描仪分析和测量微米量级的光斑是完全可行的。为了使得影像便于分析, 把扫描获得的电子图像经过数字图像处理即可得到光斑尺寸、能量分布、轮廓等重要数据。

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目 (A0410017)

作者简介: 张建荣 (1976), 男, 硕士研究生, 从事激光超短脉冲及无衍射光束的研究。

* 通讯联系人。E-mail: fw_t@public.qz.fj.cn

收稿日期: 2005-11-25; 收到修改稿日期: 2005-12-29

2 零阶贝塞耳光束的中心光斑半径

利用 Collins公式的推广,由广义惠更斯-菲涅耳衍射积分理论出发,在旋转对称的柱坐标系可导出 (ρ_2, Z)处的场分布^[5,6]:

$$E_2(\rho_2, Z) = -\frac{k}{2} \exp(ikZ) \exp\left[\frac{ik\rho_2^2}{2Z}\right] \times \int_0^R E_1(\rho_1) J_0\left[\frac{k\rho_1\rho_2}{Z}\right] \exp\left[\frac{ik\rho_1^2}{2Z}\right] \rho_1 d\rho_1 \quad (1)$$

式中, ρ_1 和 ρ_2 其中分别为源点和场点的径向坐标, k 为波矢。

当一平行光 E_0 通过轴棱锥将产生贝塞耳光束,由于轴棱锥的振幅透过率为:

$$t(r) = \begin{cases} \exp[-k(n-1)\varphi r], & (r \leq R) \\ 0 & (r > R) \end{cases} \quad (2)$$

式中, n 为轴棱锥的材料折射率, φ 为轴棱锥的棱角, r 为通过轴棱锥的光束半径, R 为轴棱锥的半径。

将 (2)式代入 (1)式可得平行光通过轴棱锥后的光场分布:

$$E_2(\rho_2, Z) = -\frac{kE_0}{2} \exp(ikZ) \exp\left[\frac{ik\rho_2^2}{2Z}\right] \times \int_0^R J_0\left[\frac{k\rho_1\rho_2}{Z}\right] \exp\left[\frac{ik\rho_1^2}{2Z} - k(n-1)\varphi r\right] \rho_1 d\rho_1 \quad (3)$$

由稳相法可求得 (3)式在最大准直范围 $Z_{max} = \frac{r}{(n-1)\varphi}$ 内的近似解^[7]: $I(r) \approx r^2 \lambda |E_0|^2 Z J_0^2(\alpha R) (Z < Z_{max})$, 由此可见,当平行光经轴棱锥变换后,其输出在 Z_{max} 范围内具有近似无衍射的零阶贝塞耳光束的形式。

根据贝塞耳函数特性其中心最小亮斑半径 ρ_0 可由 $J_0(2.405) = 0$ 即 $\rho_0 = 2.405/\alpha$ 求得^[8,9], 其中径向波矢 $\alpha = k_r = k \sin\theta \approx \frac{2\pi}{\lambda} (n-1)\varphi$, 则零阶贝塞耳光束中心最小亮斑半径:

$$R = \rho_0 = \frac{2.405}{\frac{2\pi}{\lambda} (n-1)\varphi} \quad (4)$$

将相关参数: $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$, $n = 1.458$, $\varphi = 2^\circ$ 代入上式,解得 HeNe 激光通过轴棱锥后产生零阶贝塞耳光束中心最小光斑半径 $R = 15.16\mu\text{m}$ 。

3 实验及结果分析

测量贝塞耳光束中心光斑的装置见图 1,将 HeNe 激光经过准直透镜之后经过可变光阑,入射到锥角为 2° 的轴棱锥(轴棱锥材料为石英,折射率 $n = 1.458$),光束通过轴棱锥之后形成了零阶贝塞耳光束。为了测量零阶贝塞耳光束的光斑截面图样,使用了一台 nikon F型单镜头反光照相机,照相机内装了柯达 E100V S^[10]

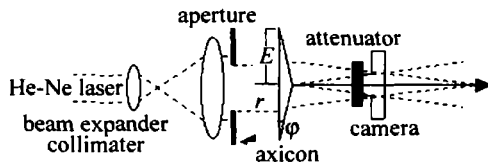


Fig 1 Experimental setup used to generate and record diffraction free beams

反转胶片,这种胶片具有反差高,易于扫描的特点。为了使得光束截面图样能够被原原本本的反映到胶片上,卸下照相机的镜头,使得在快门开启的瞬间光束能够直接在底片上曝光;同时为了保证光束强度能够被限制在照相机和胶卷能够接受的范围内,使用了两片偏振片组合成可变衰减,这样 HeNe 激光光强就能落入胶片的感光区域内了。实验时,把两片直径 62mm 偏振片旋合在一起并且靠紧在机身卡口上,这样偏振片在对入射光束起到衰减作用的同时,使得周围杂散光线被抑制。开启照相机的测光系统,调整照相机的位置,使得胶片平面和入射光束垂直。之后调整两个偏振片的偏振方向的夹角,当照相机的测光显示快门速度在照相机可以接受的范围之内的时候,就可以进行拍摄了。对于 nikon F3 型照相机,测光方式为偏重中央测光方式,因此使用曝光补偿 ± 0 ± 1 直至 ± 4 档拍摄张数是必要的,拍摄过程需在暗室中进行,同时必须 HeNe 照相机稳固,因为任何微小振动都有可能造成实验结果的误差。将底片显影之后就可以看到光束截面能量分布图样了。本次实验中使用 Linotype-hell 公司的 chima graph330 滚筒扫描仪,输出图像分辨率为 400dpi, 32bit TIFF 格式。截取底片曝光的部分即光斑轮廓部分的图样来分析,图像大小为 4628×4632 即放大约 40 倍的电子图像。用比例公式 $\frac{\text{电子图像中心亮斑直径}}{\text{电子图像光斑轮廓直径}} = \frac{\text{待测中心亮斑直径}}{\text{胶片光斑轮廓直径}}$, 可精确测出中心亮斑的半径为 $16.77\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$, 实验结果和理论值吻合良好。测量误差来自判读光斑轮廓边缘位置,此处采用多次测量平均值。图 2 为零阶贝塞耳光束中心亮斑部分电子图像的截图。

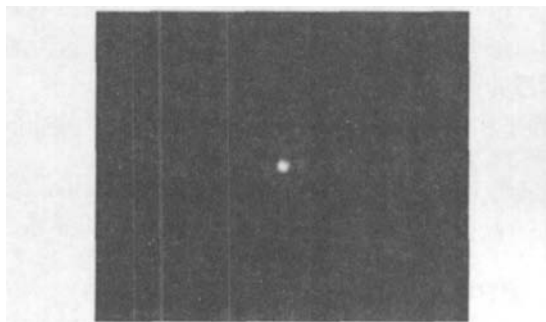


Fig 2 Central spot crop

性缺陷的一维光子晶体异质结构中, 双稳态的出现不一定要系统的负的非线性克尔系数。双稳态的产生不仅依赖于 T , 还依赖于 T_0 的大小。

2 结 论

考虑了光通过含有非线性缺陷的一维光子晶体异质结构的情况, 对非线性层的介电函数采用 δ 函数近似, 不考虑它的厚度, 给出了系统的非线性光学响应的表达式。因而对于以一定强度入射的光, 会有两种或者更多的出射光强度, 即表现出光学双稳态的性质, 系统的双稳态响应是由局域模频率受到光强的非线性调制移动而引起的。当考虑非线性层的厚度时, 得到结论与 δ 近似时大致相同。该项研究为构造零阈值的激光器和非线性光学器件的初步设计提供了有益的理论参考。

参 考 文 献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett 1987, 58(20): 2059~2062
- [2] JON S. Strong localization of photons in certain disordered physics dielectric superlattices [J]. Phys Rev Lett 1987, 58(23): 2486~2489
- [3] FANG Y T, SHEN T G, LIN G H. Photowave propagation in one-dimensional random photonic crystal [J]. Laser Technology, 2004, 28(2): 153~155(in Chinese).
- [4] CHEN W, MILLS D L. Gap solitons and the nonlinear optical response of superlattice [J]. Phys Rev Lett 1987, 58(2): 160~163.

(上接第 36页)

4 结 论

介绍了一种使用胶片分析和测量微米量级光束截面的方法, 通过实验证明了该方法具有简单可行、成本低廉的特点。而胶片的感光面积、空间分辨能力和宽容度都远远大于光束分析仪, 可以和光束分析仪形成优势互补。选用不同类型的胶片, 该方法可对可见光、红外和紫外波长光束空间能量分布做精确分析。在后续的实验, 该方法已被证明可以对 1Hz 调 Q 单脉冲 YAG 激光进行测量, 在改变衰减系数测量多次之后, 不仅精确测量出零阶贝塞尔光束截面中心亮斑的半径, 还获得了调 Q 单脉冲 YAG 激光贝塞尔光束截面能量分布的精细图样, 这是常规光束分析仪做不到的, 因此, 该方法对低重复率超短脉冲激光光束空间能量分布测量具有更加广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] ZHOU X L, CAO D H, WU Y B. The software and hardware design of laser beam parameters analyzer based on CMOS image sensor [J].

- [5] MILLS D L, TRULLINGER S E. Gap solitons in nonlinear periodic structures [J]. Phys Rev, 1987, B36(2): 947~952
- [6] HUANG X Q, CUI Y P. Study on the third harmonic generation induced by the second-order cascading in nonlinear photonic crystal [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 363~365(in Chinese).
- [7] CHRISTODOULIDES D N, JOSEPH R I. Slow Bragg solitons in nonlinear periodic structures [J]. Phys Rev Lett 1989, 62(15): 1746~1749
- [8] WENFULL H G, MARBURGER J H, GARMIRE E. Theory of bistability in nonlinear distributed feedback structures [J]. A P L, 1979, 35(5): 379~381
- [9] CHEN W, MILLS D L. Optical response of a nonlinear dielectric film [J]. Phys Rev 1987, B35(2): 524~532
- [10] GIBBS H M, CAPINSKI S, VENKATESCANT N C. Differential gain and bistability using a sodium-filled Fabry-Perot interferometer [J]. Phys Rev Lett 1976, 36(19): 1135~1138
- [11] XU B, MING N B. Experimental observations of bistability and instability in a two-dimensional nonlinear optical superlattice [J]. Phys Rev Lett 1993, 71(24): 3959~3962
- [12] WANG R Z, DONG J M, XING D Y. Dispersive optical bistability in one-dimensional doped photonic band gap structures [J]. Phys Rev 1997, E55(5): 6301~6304
- [13] LDORKE S E, SOKOULIS C M. Pulse-driven switching in one-dimensional nonlinear photonic band gap materials: a numerical study [J]. Phys Rev, 2000, E61(5): 5825~5829
- [14] ZHU S H, LU N H, ZHENG H *et al*. Time delay of light propagation through defect modes of one-dimensional photonic band gap structures [J]. Opt Commun, 2000, 174: 139~144
- [15] KNIGHT J C, BIRKST A, CREGAN R F *et al*. Photonic crystals as optical fibres: physics and applications [J]. Optical Materials 1999, 11(2): 143~151.

Optical Instruments 2004, 26(3): 38~42(in Chinese).

- [2] CAO Y L, GAO Ch Q. Analysis on the accuracy of beam parameter measurement by using CCD array [J]. Optical Technique 2004, 30(5): 583~586(in Chinese).
- [3] TAN T T. Analysis of efficiency of image formation and prediction of future of color film and digital still camera [J]. Photographic Science and Photochemistry 2001, 19(1): 48~70.
- [4] FU S L, YUE J L, U S W. Preparation and investigation of the AgBr/1 nanometer grains emulsion [J]. Photosensitive Materials 1987, 15(3): 14~20(in Chinese).
- [5] GORIE, GUATTARIG, PADOVANI C. Bessel-Gaussian beams [J]. Opt Commun, 1987, 64: 491~495
- [6] LÜ B D. Propagation and control of high-power lasers [M]. Beijing National Defence Industry Press 1999, 174~175(in Chinese).
- [7] ZHANG B, LÜ B D. Propagation of non-diffracting beams [J]. Laser Technology 1996, 20(1): 14~19(in Chinese).
- [8] ARLT J, DHALAKIA K, ALLEN L *et al*. Efficiency of second-harmonic generation with Bessel beams [J]. Phys Rev, 1999, A60(3): 2438~2441.
- [9] LÜ B D, ZHANG B, CAI B W *et al*. Study on the properties of the aperture non-diffracting beams [J]. Chinese Science Bulletin 1994, 39(2): 125~128(in Chinese).
- [10] WU J H. A new generation of Kodak E series color reversal films [J]. Photographic Technique 2001(4): 20(in Chinese).