

# 利用位错光栅实现中空光束

高伟建 王文宝 朱士群

(苏州大学物理科学与技术学院, 苏州 215006)

**摘 要** 讨论了螺旋波的特性, 利用计算机模拟螺旋波与平面波干涉形成的光学位错图案制成光栅。利用不同阶次的位错光栅得到了不同暗斑尺寸的中空光束。

**关键词** 螺旋波, 位错光栅, 中空光束。

## 1 引 言

近年来, 基于光的辐射压力对中性原子的激光囚禁与冷却, 使得微观粒子的三维操控技术得到了迅速的发展。由于中空光束具有一系列特殊的物理性质, 如强度呈圆桶形分布, 很小的暗斑尺寸(有利于高精度操控), 无加热效应, 无衍射效应(传播不变性)和无损耗效应等, 因而在原子光学中, 中空光束具有重要的应用, 将明显降低实验的复杂性和改善实验的质量。

自 90 年代以来, 国际上已有不少学者采用各种技术, 如几何光学方法、光学全息法、中空光纤的光学非线性效应等产生中空光束, 并取得了一些较好的结果<sup>[1, 2]</sup>。但在国内尚未见到有类似的报道。本文利用螺旋波中心光强为零的特点, 以及与平面波干涉产生的干涉图是位错光栅的性质, 用计算全息的方法来得到中空光束, 并取得了一定的实验结果。

## 2 理论分析

对于简单螺旋波的波前振幅在极坐标  $(r, \theta, z)$  中可表示为<sup>[3]</sup>:

$$E(r, \theta, z) \exp(-ikz) = E_0 r \exp(i\theta) \exp[F_2(z) - r^2/F_1(z)] \exp(-ikz) \quad (1)$$

式中  $E_0$  为实数,  $k = 2\pi/\lambda$  为波矢,  $\lambda$  为波长。  $\exp(i\theta)$  表示绕  $z$  轴一周, 位相改变  $2\pi$ , 函数  $F_1(z)$  和  $F_2(z)$  描述光束的发散程度和位相漂移。

在旁轴条件下,  $E(r, \theta, z)$  满足以下方程:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dE}{dr} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{d^2 E}{d\theta^2} - 2ik \frac{dE}{dz} = 0 \quad (2)$$

则  $F_1(z)$  和  $F_2(z)$  可表示为:

$$F_1(z) = A + 2z/ik, \quad F_2(z) = B - 2 \ln(z + ikA/2) \quad (3)$$

式中  $A$ 、 $B$  为常数, 由光束的初始半径和位相决定。设初始半径为  $r_0(A/2)^{1/2}$ , 初始位相为 0。

则  $B = 2 \ln (ikA/2) = 2 \ln (kA/2) + i\pi$ , 复振幅  $E(r, \theta, z)$  可表示为:

$$E(r, \theta, z) = E_0 r \exp(i\theta) \exp \left[ 2 \ln \frac{kA/2}{z + ikA/2} + i\pi - \frac{r^2}{A + 2z/ik} \right] \quad (4)$$

当此螺旋波与同方向的平面波  $E(z) = E_0 \exp(-ikz)$  相干涉, 即二者之间的夹角  $\varphi = 0$  时, 则干涉图案的光强分布( $z$  为常数)为:

$$I(r, \theta, z) = E_0^2 + [E_0 r \exp(P)]^2 + 2E_0^2 r \exp(P) \cos(\Phi) \quad (5)$$

式中:

$$P = \ln \frac{(kA/2)^2}{z^2 + (kA/2)^2} - r^2 \frac{A}{A^2 + (2z/k)^2}, \quad \Phi = \theta - r^2 \frac{2z/k}{A^2 + (2z/k)^2} - \arctan \left( \frac{Ak}{2z} \right) + \pi \quad (6)$$

干涉条纹光强极大的条件为:  $\cos(\Phi) = 1$ , 即  $\Phi = 2n\pi$ , ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ), 其干涉图为图 1 (a) 所示的螺旋形位错条纹, 螺旋方向由  $\exp(i\theta)$  的符号决定。当此螺旋波与平面波成  $\varphi$  夹角

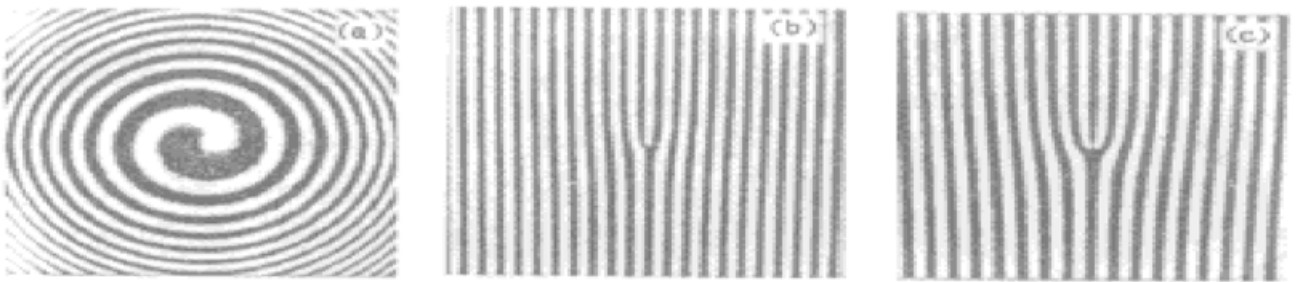


Fig. 1 The interference patterns calculated from Eq. (6) and (7). (a) Interference between screw wave and plane wave with angle  $\varphi = 0$ , (b) The same as (a) except  $\varphi \neq 0$ , (c) Interference between second order screw wave and plane wave with  $\varphi \neq 0$

相干涉时, 干涉条纹极大的条件为:

$$\arctan(y/x) - (x^2 + y^2) \frac{2z/k}{A^2 + (2z/k)^2} - \arctan(Ak/2z) - kx \sin(2\varphi) - 2kz \sin(\varphi) + \pi = 2n\pi \quad (7)$$

当  $A$  取适当的值后, 其干涉条纹是位错形条纹, 如图 1(b) 所示。当(4)式中用  $r^m \exp(im\theta)$ , ( $m = 2, 3, 4 \dots$ ) 代替  $r \exp(i\theta)$  时, 可以得到高阶螺旋波, 并由此产生高阶的(螺旋)位错光栅。图 1(c) 是  $m = 2$  的螺旋波与平面波干涉而产生的二阶位错形条纹。

从以上讨论可知, 可以用计算全息的方法得到螺旋波, 即, 在  $A$  取适当的值后, 根据(5)式用计算机程序在显示器上产生二维的干涉图, 并用相机将此干涉图缩小到胶片上, 缩小的倍数应根据显示器上干涉图的大小, 以及所需光栅的大小来考虑, 这样就制成了所需要的位错光栅; 当用平面波照射此位错光栅时, 就能得到中心光强为零的螺旋波, 也即中空光束。

### 3 实验结果

为了研究由位错光栅产生的中空光束的特性, 根据(5)式、(6)式和(7)式的结果, 用计算机分别绘制了如图 1 所示的干涉图案, 并制成位错光栅, 光栅尺寸约为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ , 密度约为  $13 \text{ l/mm}$ 。实验用 He-Ne 激光器 ( $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ ), 在光栅上束斑直径约为  $1 \text{ mm}$ , 距光栅约  $1 \text{ m}$  处记录不同光栅形成的衍射图。

实验首先用图 1(a) 的螺旋位错光栅, 在记录面上形成图 2(a) 所示的衍射图, 在零级衍射斑中形成了中空光束, 并在光斑四周有螺旋形结构; 其次用图 1(b) 的位错光栅进行实验, 在记录面上形成图 2(b) 所示的衍射图, 其零级衍射对应平面波,  $\pm 1$  级衍射斑形成中空光束;

再次用图 1(c) 的二阶位错光栅进行实验, 产生如图 2(c) 的衍射光斑, 基本上与一阶位错光栅产生的相同, 只是由于其 $\pm 1$  级衍射斑是由二阶螺旋波产生的, 因而中心暗斑尺寸较大。

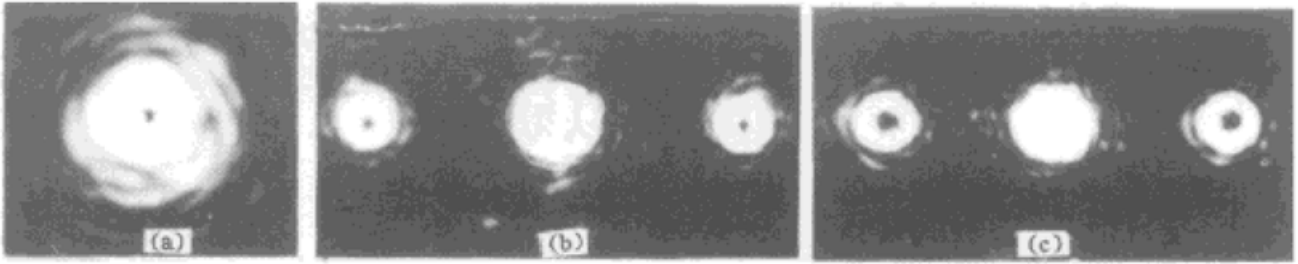


Fig. 2 (a) The dark hollow-beam produced by the dislocation grating of Fig. 1 (a). The diameter of the dark spot is about 0.5 mm with 1 m from the grating, (b) The dark hollow-beam produced by the dislocation grating of Fig. 1 (b), including  $0^{\text{th}}$  order and  $\pm 1^{\text{st}}$  order diffracting spot. The diameter of the  $\pm 1^{\text{st}}$  order dark spot is about 0.5 mm at 1 m from the grating, (c) The dark hollow-beam produced by the dislocation grating of Fig. 1 (c), including  $0^{\text{th}}$  order and  $\pm 1^{\text{st}}$  order diffracting spot. The diameter of the  $\pm 1^{\text{st}}$  order dark spot is about 1.0 mm at 1 m from the grating

**小 结** 本文讨论了螺旋波与平面波相干涉的情况。当螺旋位错波与平面波同方向干涉时, 形成螺旋位错形的干涉图案, 用这样的干涉图案制成的光栅, 经平面波衍射后在零级衍射斑中产生了中空光束; 当螺旋位错波与斜入射的平面波相干涉时, 形成的干涉图案为位错形干涉条纹, 用此干涉条纹制成的光栅, 经平面波衍射后, 在其 $\pm 1$  级衍射斑上得到中空光束; 当用高阶螺旋位错波与斜入射的平面波相干涉时, 形成高阶的位错形干涉条纹, 当用此干涉条纹制成光栅并经平面波衍射后, 在 $\pm 1$  级处的中空光束, 其暗斑数与阶数相同, 因而其暗斑的尺寸较大。由于在实际应用时, 希望暗斑尺寸尽可能小, 所以应主要考虑使用 1 阶的位错光栅。

### 参 考 文 献

- [1] H. S. Lee, B. W. Stewart, K. Choi *et al.*, Holographic nondiverging hollow beam. *Phys. Rev. (A)*, 1994, **49**(6) : 4922~ 4927
- [2] Z. Jaroszewicz, A. Kolodziejczyk, Zone plates performing generalized Hankel transforms and their metrological applications. *Opt. Commun.*, 1993, **102**(5/6) : 391~ 396
- [3] E. Abramochkin, V. Volostnikov, Spiral-type beams. *Opt. Commun.*, 1993, **102**(3/4) : 336~ 350

## Obtaining Hollow Beam Using Dislocation Grating

Gao Weijian      Wang Wenbao      Zhu Shiqun

(School of Physics and Technology, Suzhou University, Suzhou 215006)

(Received 18 July 1997; revised 10 November 1997)

**Abstract** The interference pattern between a screw wave and a plane wave is investigated and the diffraction gratings were synthesized with the aid of a computer. Using the synthesized gratings with different orders, hollow beam of different sizes is obtained.

**Key words** screw wave, dislocation grating, hollow beam.