

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0678-03

实现环形光阱的多种方法及结果比较*

尹良红 李银妹 楼立人 张 达

(中国科学技术大学选键化学开放实验室/物理系, 合肥 230026)

提要 讨论了实现环形光阱的几种方法:取高级衍射光斑法、角锥透镜组法、转镜法和位相片法,并从形成的环形光束在准平行性、传输性能、实空部分能量对比度及会聚后焦斑大小方面比较了各种方法的特点,指出采用取高级衍射光斑法的合理性。证明环形光可以在 $40\times$ 物镜下实现光阱,与理论计算相吻合。

关键词 环形光阱,有效捕获力, $40\times$ 物镜

中图分类号 O435 **文献标识码** A

Multiple Methods of Forming Ring Optical Trap and the Resultant Comparison

YIN Liang-hong LI Yin-mei LOU Li-ren ZHANG Da

(Lab of Bond-Selective Chemistry, USTC/Physics Department of USTC, Hefei 230026)

Abstract This paper discusses multiple methods used to form ring optical trap: extracting high-order diffractive light component, axicons, rotating lens and phase-only mask, compares their characteristics in terms of quasi-parallelism of the formed ring beam, transfer performance, energy contrast between solid and vacant part of ring beam and the size of the focus after the $40\times$ objective, and point out the rationality of using the method of extracting high-order diffractive light component. Using ring beam makes it possible to form an optical trap through a $40\times$ objective. This is consistent with theoretical calculation.

Key words ring optical trap, effective trapping force, $40\times$ objective

1 引言

生物学等领域的大量研究表明,波长在 700 nm ~ 900 nm 之间的光波对细胞热损伤很小^[1],适用于作光阱光源。为了进一步提高光源的有效利用率,在相同的输入激光能量及相同耦合条件的情况下,得到更高的有效捕获力和更低的热损伤效应。基于光阱光场的分布特性,我们研究利用波面转换来改变光场能量分布,如环形光场,实现环形光阱。已有的光阱大都是 $100\times$ 物镜下强会聚的实心光阱,其工作距离短且要用油镜,给工作带来不便。 $40\times$ 物镜工作距离长但会聚度低,实心光情形下轴心处散射力大,不能实现轴向捕获,环形光阱即轴心处直射光场几乎为零的光阱,散射力弱。环形光阱可望实现 $40\times$ 物镜下的捕获。理论计算已表明这一方案

的可行性。环形光阱的实现关键在于高质量的环形光的产生。我们尝试了四种方法:取高级衍射光斑法、角锥透镜组法、转镜法和位相片法。实验用激光器为 SDL-5411-G1 100 mW 810 nm 单模半导体激光器(Single Mode Semiconductor Laser),显微镜为经改造的倒置显微镜。

2 实现环形光阱的方法

2.1 取高级衍射光斑法

实验中关键的光学元件是环形光阑,它能除去激光的零级衍射光斑,取高级衍射光斑,形成环形光,且可调节环宽。环形光阑的制作很容易,可用计算机绘图,再做成透明片即可。我们用这种方法获得了环形光。

图 1 为环形光阑,内环用来遮去光束中心光场形成衍射环,外环用来修正半导体激光的条形光斑。

* 国家自然科学基金(10072062、19890380)资助课题。



图1 环形光阑

Fig.1 Light diaphragm

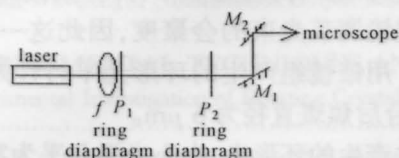


图2 实验光路示意图

Fig.2 Experimental arrangement

图2为实验光路图。激光经透镜形成微会聚光束，光阑 P_1 除去光束中心光场形成衍射环， P_2 除去零级衍射光斑，取高级衍射光斑，形成较理想的环形光束， M_1, M_2 调节光束与显微镜光轴的重合。光路调节使环形光达到最佳耦合条件，对本实验系统而言虚会聚点距耦合窗口75 cm，物镜后瞳处光束直径6 mm。

图3为环形光通过40×物镜形成光栅的离焦像。



图3 40×物镜下光栅离焦像

Fig.3 Experimental result obtained by using a 40× objective

2.2 角锥透镜组法

应用角锥透镜能将高斯光束变换成“无衍射”Bessel光束，实现实心光束和环形光束的相互转换^[2]。将棱角相同的正负角锥透镜组合可构成一种新型环形光束扩束器。其工作原理如图4所示。



图4 角锥透镜扩束器

Fig.4 The axicon beam expander

图中 h 为入射光半径， φ 为锥镜棱角， $\delta = 2\sin^{-1}[n\sin(\varphi/2)] - \varphi$ 为偏向角， d 为锥镜间距， r_1 为输出环形光外环半径，

$$r_2 = \frac{d \tan \delta}{1 - \tan \varphi \tan \delta}$$

为内环半径，环宽 $r_1 - r_2 = h$ ，恒定不变。

图5为实验用角锥透镜，棱角 $\varphi = 0.175 \text{ rad}$ ，直径300 mm。

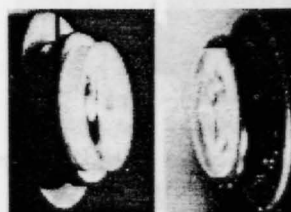


图5 角锥透镜组

Fig.5 Axicons

光束由透镜组准直，经锥镜后形成环形光，透镜 f_2 调节光束耦合入显微镜。

图7为40×物镜下光栅的离焦像。

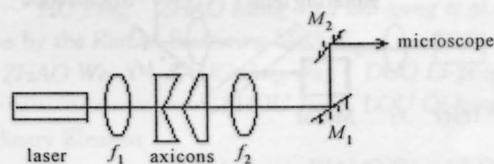


图6 实验光路示意图

Fig.6 Experimental arrangement

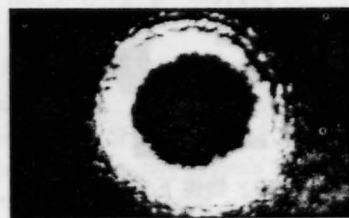


图7 40×物镜下光栅的离焦像

Fig.7 Experimental result obtained by using a 40× objective

2.3 转镜法

转镜法使用一束激光通过由电动机带动旋转的平面镜而产生动态扫描环形光束。

图8为转镜工作原理图，当 $n = 1.5, \theta = 45^\circ, h = 5 \text{ mm}$ 时光束半径均值 $r = h \sin \theta' / \cos(\theta - \theta')$ 约为2.5 mm，即经过平面镜的光束平移了2.5 mm。当平面镜旋转时，光束绕轴形成半径为2.5 mm的动态环形光。扫描速度足够快时相当于均匀的环形光束。

图9为实验用转镜。

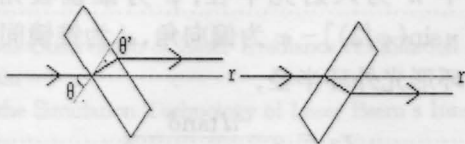


图 8 转镜工作原理图

Fig. 8 Working principle of rotating lens

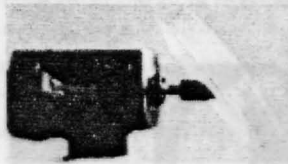


图 9 转镜

Fig. 9 Rotating lens

图 10 为实验光路图。经 f_1 准直的细激光束，通过转镜后形成环形旋转光束， f_2 调节耦合会聚角。图 11 为 $40\times$ 物镜下光阱离焦像的动态截取图片组。

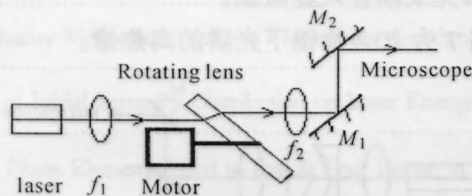


图 10 实验光路图

Fig. 10 Experimental arrangement

图 11 $40\times$ 物镜下光阱的离焦像Fig. 11 Experimental result obtained by using a $40\times$ objective

2.4 位相片法

迭代算法^[3,4]的理论已很成熟，用二元光学的方法理论上可计算出在给定入射光时要得到任意输出图形的位相片的刻蚀深度分布图，并用离子刻蚀的方法制成位相片。为了得到平行性好，在较长距离内仍保持清晰的环形光，需将位相片与透镜组合使用。但位相片的造价极其昂贵，在此只作了较浅的探讨。

3 实验结果与讨论

取高级衍射光斑法简单易行，由两枚环形光阑产生的环形光实空部分能量对比度高。光束会聚角

由扩束透镜调节，减少了光学元件，产生的环形光在 2 m 内都很清晰，传输性能好。 $40\times$ 物镜下光斑为 $6\ \mu\text{m}$ 。用这种方法实现了对酵母菌的捕获，但能量损失大。

锥镜组法在理论上可产生无衍射的平行光束，中心光场为零，几乎无能量损失。但因加工精度所限，凹锥镜中心直径 2 mm 部分有畸形，造成较大的能量损失。为减少像差，需以平行光入射锥镜，在锥镜组后加透镜调节光束的会聚度，因此这一方法光路较复杂。用锥镜组产生的环形光平行性好，可传输 3 m，耦合后焦斑直径为 $6\ \mu\text{m}$ 。

转镜法产生的环形光，中心光强几乎为零，能量损失小，但需要转镜有较高的转动频率，受制作工艺所限，镜片的重心不在转轴上，这会引起工作平台较大的振动。实验用转镜转动频率为 7.9 Hz，环形光耦合后焦斑直径 $7\ \mu\text{m}$ ，但由于转动频率过低，酵母菌在水平面上随光束转动，轴向上被排斥，形成的光阱仍保持实心光阱的特点。希望能以更大频率的转镜做进一步的尝试。

综合各方面考虑，我们的后续工作是用取高级衍射光斑法进行的。

4 结 论

用 $40\times$ 物镜形成环形光阱，在水平和轴向上都实现了对酵母菌的捕获，证实了实验和理论计算^[5]吻合。环形光有利于开发低倍物镜，具有推广价值。环形光阱低散射力的特性使其可以进行实心光阱无法完成的工作。

参 考 文 献

- 1 Zhao Youquan *et al.*. Optical parameters of biological tissues & their description. 国外医学生物学工程分册, 2000, 23(2):76~79
- 2 Cai Bangwei, Lü Baida *et al.*. Propagation and transformation properties of axicon optical system for laser beams. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1994, A21(1):21~25 (in Chinese)
- 3 R. W. Gerchberg, W. O. Saxton. A practical algorithm for determination of phase from image and diffraction plane pictures. *Optik*, 35:227~246
- 4 Yang Guozhen *et al.*. Gerchberg-Saxton and Yang-Gu algorithms for phase retrieval in a nonunitary transform system: a comparison. *Appl. Opt.*, 33(2):209~218
- 5 Cui Guoqiang, Li Yinmei *et al.*. Improvement of the effective trapping force by using ring-beam laser. *Chinese J. Laser* (中国激光), 2001, A28(1):89~92 (in Chinese)