

# 一种 $\theta$ 可变的无衍射光束产生方法

徐荣青 王建华

倪晓武

(华东船舶工业学院, 镇江, 212003) (南京理工大学, 南京, 210094)

摘要: 提出了一种由负轴棱镜和球面透镜组成的光学系统, 该系统可产生  $\theta$  可变的无衍射光束; 论述了它的特点及基本原理, 给出了有关设计参数, 并指出它潜在的应用价值。

关键词: 轴棱镜 无衍射光束 光束变换

## Non-diffraction beam with changeable $\theta$ parameter and its optical system

*Xu Rongqin, Wang Jianhua, Ni Xiaowu\**

(East China Shipbuilding Institute, Zhenjiang, 212003)

(\* Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

**Abstract** In many fields, such as precise measurements, optical communication and laser processing, the non-diffraction beam has useful advantage. Usually, a axial prism was utilized to obtain non-diffraction beam with a fixed  $\theta$  parameter. In our investigation, we designed a novel optical system to generate a non-diffraction beam with changeable  $\theta$ -parameter. The system includes a negative axial prism and a lens system. In this paper, we proposed the design method of the system, the design parameters and the potential applications.

**Key words:** axicon non-diffraction beam beam transformation

## 引 言

无衍射光束由 Durnin 于 1987 年首次提出<sup>[1]</sup>, 它是自由空间标量波动方程的一组特殊解, 其场分布具有第一类零阶贝塞尔函数的形式。无衍射光束具有主光斑尺寸小、光斑尺寸不随传输距离而变化、强度高、方向性好、传输距离远等特点, 在高精度准则、精密测量、激光大气通讯和激光微加工领域有着广泛的应用前景, 国际上迅速地掀起无衍射光束的研究热潮, 众多的科学家相继投入到有关的理论和实验研究中, 许多有意义的结果已见报道<sup>[2~4]</sup>。生成无衍射光束的方法有多种, 其中轴棱镜法因其结构简单和能量利用率高, 而被人们广泛采用, 但轴棱镜的加工精度要求高, 价格昂贵, 且一旦轴棱镜加工好, 其产生的无衍射光束的  $\theta$  (无衍射光束的光斑尺寸由  $\theta$  决定) 固定, 这限制了它的应用范围, 我们提出了一种由负轴棱镜和球面透镜组成的光学系统, 该系统能产生  $\theta$  可变的无衍射光束, 这样扩展了轴棱镜的应用范围。

## 1 无衍射光束的基本理论

无衍射光束是自由波动方程的一组精确解<sup>[1]</sup>, 其表达式为:

$$\begin{aligned} E(x, y, z, t) &= \frac{1}{2\pi} \exp[i(\omega t - k_z z)] \int_0^{2\pi} A(\varphi) \exp[ik_{\perp}(x \cos \varphi + y \sin \varphi)] d\varphi \\ &= \exp[i(\omega t - k_z z)] J_0(k_{\perp} \rho) / (2\pi) \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $\rho^2 = x^2 + y^2$ ,  $k_{\perp} = (2\pi/\lambda) \sin \theta$ ,  $\theta$  为无衍射光束的会聚角,  $J_0$  是零阶第一类贝塞尔函数。(1) 式中的振幅部分只是  $\rho$  的函数, 与传播方向坐标  $z$  无关, 即垂直于  $z$  轴横平面上的光强不随传播距离而变化, 此现象称为无衍射特性, 因而我们称此光束为无衍射光束。无衍射光束由平面波角谱成分迭加而成, 即所有平面波对传播光轴具有相同的会聚角  $\theta$  及从  $0$  到  $2\pi$  不同的方位角, 也就是说无衍射光束位于一个锥体内, 其横向强度剖面以  $(k_{\perp}(\rho))^{-1}$  速度衰减, 它的有效宽度由  $k_{\perp}$  决定, 当  $k_{\perp} = k = 2\pi/\lambda$  时, 其中心光斑尺寸最小, 约为  $3\lambda/4$ , 十分窄, 由于  $J_0$  光束的横向分布以  $1/\rho$  衰减, 因此, 它是非平方可积的, 因而需要无穷大的能量才能产生完整的  $J_0$  光束, 但是在有限孔径下的研究表明, 能够近似地生成这类光束, 保持横向电场分布不变, 只不过传播距离为有限值。生成无衍射光束的方法有环缝法, 全息法, 谐振腔法, 轴棱镜法和球面像差法, 因轴棱镜结构简单, 能量利用率高, 能量转换效率高达  $92\%$ <sup>[2]</sup>, 所以, 用轴棱镜产生无衍射光束是最实用的。图 1a 是正轴棱镜产生无衍射光束的原理图, 可看出入射到轴棱镜前端的平面波经轴棱镜折射后形成锥体波矢, 所有这些平面波在光轴  $z$  上相交, 无数焦点产生一条与  $z$  轴互相重合的连续细线。图中  $\varphi$  为轴棱镜底面锥角,  $h$  是轴棱镜的半径,  $z_{\max}$  为光束的无衍射距离, 由几何分析可知<sup>[3]</sup>:

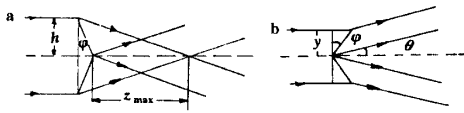


Fig. 1 Beam transforming properties by axicon

$$z_{\max} = h/\tan \theta \quad (2)$$

无衍射光束中心光斑直径  $D$  为:

$$D = 2.405 \lambda / (\pi n \sin \theta) \quad (3)$$

式中,  $\theta$  由  $\varphi$  决定,  $\theta = \arcsin(n \cdot \sin \varphi) - \varphi$ ,  $n$

为轴棱镜材料的折射率, 当  $z > z_{\max}$  时, 光束仍然是一组与  $z$  轴具有相同倾角  $\theta$  的平面波, 只不过是偏离光轴而发散, 所以, 出射光束不再在  $z$  轴上交叠成一条细线, 而形成发散的环状光束, 环的大小随  $z$  增大而变大, 环的宽度约为  $h$  (入射平行光束的半径)。平行光束通过负轴棱镜也都以等  $\theta$  角偏离光轴而发散, 形成环状光束, 如图 1b 所示。

## 2 轴棱镜组合光学系统

### 2.1 基本原理

由前面的分析可知, 描述实际无衍射光束的参数主要有  $z_{\max}$ ,  $D$  和  $\theta$ ,  $z_{\max}$  由  $\theta$  和  $h$  决定,  $D$  由  $\theta$  决定, 可见,  $\theta$  是无衍射光束最重要的参数, 而  $\theta$  又由轴棱镜的锥角  $\varphi$  决定, 那么对于确定的轴棱镜, 它所产生的无衍射光束的参数是确定的, 当然, 聚焦光斑的尺寸是确定的, 因而加工适应性差, 另外, (3) 式是在理想状况下所得的结果, 由于入射的激光束不是平面波以及轴棱镜制造和光学元件的调整存在误差, 所以, 实际产生无衍射光束的光斑与由 (3) 式计算的结果有一定的误差, 且无法事先确定, 因而要获得满足加工要求所需的光斑, 不可能一次设计加工出满足要求的轴棱镜, 需更换轴棱镜, 而非球面的光学元件加工困难, 费用高, 故我们采用负轴棱镜与球面透镜组合的光学系统产生无衍射光束, 只需制造一个轴棱镜, 就能方便地调整无衍射光束光斑的大小, 以适应不同的加工要求。

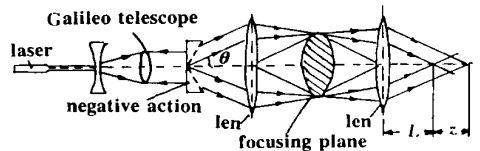


Fig. 2 Sketch of optical systems combined with an axicon and lens

图 2 是激光微加工机的光路图, 激光器的输出光束经伽利略望远镜扩束准直后的激光束经负轴棱镜变换后产生以  $\theta$  角发散的一组锥体波矢平面波, 这组平面波经透镜 4 在其像方焦平面聚焦成细圆环, 因透镜 4 的像方焦平面与透镜 6 的物方焦平面重合, 细圆环经透镜 6 变换后生成一组与  $z$  轴夹角为  $\theta'$  的锥体波矢, 会聚区为  $z$ , 在会聚区内为无衍射光束。设激光器输出的

激光光斑半径为  $\omega_1$ , 伽利略扩束望远镜的放大率为  $M$ , 扩束后的光斑半径为  $\omega_2$ , 为求会聚角  $\theta'$ 、无衍射距离  $z$  和出射光无衍射区起点的位置  $L$ , 我们把 4, 5, 6 单独画出, 如图 3 所示。根据几何光学分析可得:

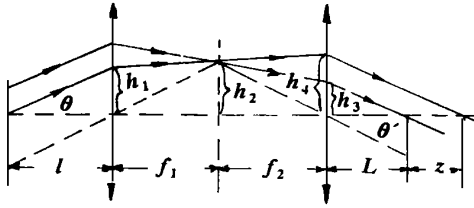


Fig. 3 Light path for non-diffraction beam with changeable  $\theta$

$$h_2 = f_1 \tan \theta \quad (4)$$

$$h_2 = f_2 \tan \theta' \quad (5)$$

由(4), (5)两式得:

$$\tan \theta' = (f_1/f_2) \tan \theta \quad (6)$$

$$h_1 = l \tan \theta \quad (7)$$

$$h_4 = (h_2 - h_1)(f_1 + f_2)/f_1 + h_1 = h_2 + f_2(h_2 - h_1)/f_1 \quad (8)$$

$$h_3 = h_1 + \omega_2 - (h_1 + \omega_2 - h_2)(f_1 + f_2)/f_1 = h_2 - f_2(h_1 + \omega_2 - h_2)/f_1 \quad (9)$$

$$z = (h_4 - h_3)/\tan \theta' = f_2 \omega_2 / (f_1 \tan \theta') = (f_2/f_1)^2 \omega_2 / \tan \theta \quad (10)$$

$$L = h_3 / \tan \theta' = f_2 - (f_2/f_1)^2 l + f_2^2/f_1 - (f_2/f_1)^2 \omega_2 / \tan \theta \quad (11)$$

应指出图 3 中用的是负轴棱镜, 似乎也可采用正轴棱镜, 但采用正轴棱镜, 若透镜 4 放在会聚区时, 一方面容易损坏透镜, 另一方面光束离透镜的光轴很近, 透镜 4 的失调灵敏度高, 所以, 透镜 4 应放在发散区, 这样整个系统的长度要增长, 采用负轴棱镜在同样的效果下可使系统的长度缩短。

## 2.2 系统有关参数的确定

考虑透镜 4 的失调灵敏度, 透镜 4 上的光束离光轴越远越好, 即设计时  $l$  要大, 由(11)式知  $l$  大,  $L$  减少, 甚至为负。若  $L$  过小或为负, 考虑到有价值的是无衍射光束, 应用的工作区即为无衍射区, 在有些应用中如激光加工, 为了保护镜面, 工作距离不宜过短, 则必有一部分无衍射区不能作为工作区, 这样未能充分利用无衍射的范围, 因而设计时应同时兼顾透镜 4 的失调灵敏度和充分利用无衍射区, 我们设定  $\omega_1 = 0.5\text{mm}$ ,  $M = 10$ ,  $\varphi = 10^\circ$ ,  $f_1 = 40\text{mm}$ ,  $l = 10\text{mm}$ , 轴棱镜的材料用 K9 玻璃, 折射率  $n = 1.5$ , 无衍射光束的距离由(10)式计算, 而光斑直径由  $D = 2.405 \lambda / (\pi \sin Q')$  计算,  $\theta'$  可根据(6)式计算, 由上述参数和前面的公式, 得出无衍射光束的光斑直径和无衍射距离随  $f_2$  变化的关系曲线如图 4 所示。可看出, 通过改变  $f_2$  的值可获得所需大小的光斑尺寸, 小的中心光斑其无衍射距离短, 另从(11)式可知, 其它参数不变时, 通过改变  $l$  可整体移动出射光的无衍射区。

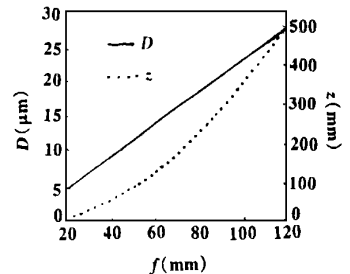


Fig. 4  $z, D$  vs  $f_2$  function curve

## 3 结束语

目前, 激光微加工的聚焦系统有发散-会聚系统和扩束-会聚系统, 采用这两种系统要使加工满足要求, 必须配有一套性能优良的激光焦点位置自动控制系统, 用以自动检测并实时跟踪激光聚焦束腰的位置和工件间的距离, 这样的控制系统必须是一个随动系统, 而且要具有较高的精度和快速响应, 该系统难以实现, 且费用昂贵。若采用我们提出的  $\theta$  可变的无衍射光束的光学系统作为激光聚焦系统, 因该系统的出射光束是无衍射光束, 聚焦光斑尺寸不随距离

# 半导体激光器三阶载波互调非线性失真

简献忠

(常德师范学院物理系, 常德, 415000)

摘要: 对半导体激光器的  $P-I$  特性曲线的非线性引起的三阶载波互调非线性失真进行了理论分析, 得出了减少非线性失真的方法, 并在实验上获得了验证。

关键词: 半导体激光器 载波互调 非线性失真

## 3rd subcarrier inter-modulation distortions of modulation performance of semiconductor laser

Jian Xianzhong

(Department of Physics, Changde Teacher's College, Changde, 415000)

**Abstract:** In order to transmitting the TV signal, we had carefully to consider the  $P-I$  relationship and the modulation performance of the semiconductor laser, and found that the main reason of 3rd subcarrier inter-modulation distortion was the nonlinear relationship between the output and the operating current of the semiconductor laser. So we designed an optical transmission system to eliminate the distortion and to transmit color TV signals.

**Key words:** semiconductor laser subcarrier inter-modulation nonlinear distortion

## 引 言

半导体激光器的非线性失真是指其调制响应的非线性, 在 80 年代中期即开始研究<sup>[1,2]</sup>, 非线性失真产生互调干扰, 影响宽带光纤传输系统的正常工作。因此, 有关半导体激光器的非线性失真一直受到各国学者的重视<sup>[3,4]</sup>。

而变化, 故加工的动态范围大, 在无衍射范围内对工件位置误差的敏感度为 0, 对工件表面的平整度适应性强, 且沿光轴方向既不需精密聚焦(无需考虑齐焦的问题), 也不需移动被加工工件, 这样可使三维工作台简化为二维工作台并可避免使用昂贵的精密机械调整装置; 另外, 只需一个轴棱镜, 通过更换价格低廉的普通球面透镜可得到不同尺寸的微米量级的无衍射光束, 适应不同的加工要求。随着激光微加工的发展, 由于我们所研究的光学系统具有实际应用的灵活性和经济性, 可以预言它在激光打微孔、精密焊接、切片及微调中都具有广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Dwrnin J. Phys Rew Lett, 1987; 58: 1499~ 1501
- 2 蔡邦维. 中国激光, 1994; A21(1): 21~ 25
- 3 Scott G. Opt Engng, 1992; 31(12): 2640~ 2643
- 4 Jaroszewice Z, Roman D J F, Gomez-Reino C. Appl Opt, 1996; 35(7): 1025~ 1031

作者简介: 徐荣青, 男, 1966 年 4 月出生。讲师。现从事激光技术及应用的研究工作。