

激光微束装置中的聚焦系统

朱延彬 马俊富

(华南师范大学量子电子学研究所, 510631)

摘要: 本文提出一种新的激光聚焦系统, 用于激光微束装置能获得小于 $1\mu\text{m}$ 的聚焦光斑。它由一个具有一定倍率的空间滤波系统和一组短焦距、长工作距离的聚焦物镜组成。文中最后给出了测试结果。

关键词: 微束装置, 聚焦系统, 空间滤波系统

Laser focusing system in laser-microbeam

Zhu Yanbin, Ma Junfu

(Quantum Electronics Institute, South China Normal University, Guangzhou)

Abstract: In this paper a new laser focusing system is presented. Using this system in the laser-microbeam device, focal spot size of less than $1\mu\text{m}$ was easily obtained. This system composed of a spatial filter and a focusing objective lens with long working distance ($l > 9\text{mm}$) and short focal length ($f_0 \leq 3.25\text{mm}$). Finally, the test results are given.

Key words: laser microbeam device, focusing system, spatial filter system

近十年来,激光在分子生物工程及生物医学中获得了广泛的应用^[1]。Tsukakoshi 采用激光微束外科技术发展了 DNA 渗入细胞的新技术^[2], 将激光微束装置的应用推进到一个新阶段。激光微束技术的一个关键问题就是要获得小于 $1\mu\text{m}$ 的聚焦光斑。本文作者之一于 1980 年提出一种带有空间滤波器的激光聚焦系统, 这个系统成功地应用于激光微区光谱分析仪器^[3,4]。最近经过改进设计, 已能用于激光微束装置中。

图 1 所示为带有空间滤波器的激光聚焦系统示意图。图中, 1—空间滤波器输入透镜; 2—空间滤波器输出透镜; 3—针孔光阑; 4—聚焦物镜。空间滤波器系统由 1、2、3 组成。

进入空间滤波器的单模激光束一维径向振幅分布函数为

$$A(x) = A \cdot \exp(-x^2/2\sigma^2) \quad (1)$$

当空间滤波系统光阑直径 $d \geq 6 \cdot \frac{\lambda f_1}{2\pi\sigma}$ 时, 经过空间滤波系统及聚焦物镜后的激光束振幅分

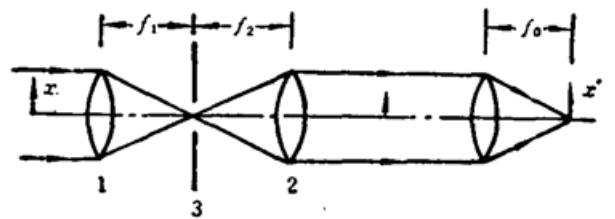


Fig. 1 Schematic diagram of the laser focusing system

布为^[4]

$$I(x') = I_0 \exp - 2(\pi^2 \sigma^2 \cdot f_2^2 / f_1^2 \cdot x'^2 / \lambda^2 f_0^2) \quad (2)$$

通常, 由于激光微束装置要求获得的聚焦光斑直径很小, 因此我们要研究的对象是针孔光阑直径较小的情况, 即 $d < 6 \cdot \frac{\lambda f_1}{2\pi\sigma}$ 时的情况, 此时在聚焦平面的振幅分布可以看做是由两部分组成: 第一部分是空间滤波器输出的激光束被聚焦物镜形成的聚焦光斑; 第二部分是针孔光阑被空间滤波系统输出透镜和聚焦物镜耦合组成的物镜组 (以下均简称为耦合物镜组) 成的像。根据这一观点, 聚焦平面上的振幅分布将是这两部分成像过程的合成, 即

$$I(x') = I_0 \left\{ \exp \left[-2 \left(\pi \sigma \frac{f_2}{f_1} \frac{x'}{\lambda f_0} \right)^2 \right] \right\} * K(x') \quad (3)$$

式中, 符号 * 表示卷积, $K(x')$ 是耦合物镜组对针孔光阑成的像的振幅分布函数, 且有

$$K(x') = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{df_2}{2f_0} \left[\int_{-\infty}^{\infty} k(\xi) \exp - \frac{2\pi i}{\lambda} \cdot \frac{x' \xi}{s} d\xi \right] dx' \quad (4)$$

(4) 式中第一项是针孔光阑在聚焦平面上的几何像, $k(\xi)$ 是耦合物镜组的光瞳函数, $[]$ 是耦合物镜组的振幅扩散函数, 由于

$$k(\xi) = \begin{cases} \exp \left(\frac{2\pi i}{\lambda} \cdot \phi(\xi) \right); & \text{当 } |\xi| \leq a \\ 0. & \text{当 } |\xi| > a \end{cases} \quad (5)$$

(5) 式中, ξ 是耦合物镜组光瞳平面坐标; $2a$ 是光瞳直径, $\phi(\xi)$ 是波像差函数, 如假定耦合物镜组是理想的, 则 $\phi(\xi) = 0$, 所以

$$K(x') = \frac{df_2}{2f_0} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-a}^a \exp - \frac{2\pi i}{\lambda} \cdot \frac{x' \xi}{s} \cdot d\xi \cdot dx' \quad (6)$$

(6) 式中 $\int_{-a}^a \exp - \frac{2\pi i}{\lambda} \cdot \frac{x' \xi}{s} \cdot d\xi$ 是非涅尔衍射积分。如果耦合物镜组的光瞳无限大, 即 $a \rightarrow \infty$, 则

$$\lim_{a \rightarrow \infty} \{K(x')\} \simeq \frac{df_2}{f_0} \quad (7)$$

将(7)式代入(3)式中, 得到

$$I(x') = \begin{cases} \frac{df_2}{2f_0} \cdot I_0 \int_{-\infty}^{\infty} \exp - 2 \left(\pi \sigma \frac{f_2}{f_1} \cdot \frac{x'}{\lambda f_0} \right)^2 \cdot dx; & \text{当 } |x'| \leq \frac{df_2}{2f_0} \\ 0. & \text{当 } |x'| > \frac{df_2}{2f_0} \end{cases} \quad (8)$$

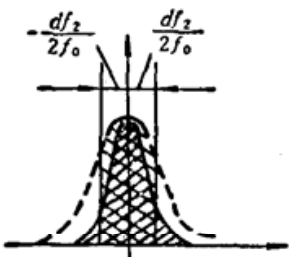


Fig. 2 The focal spot intensity distribution

此时, 聚焦平面的光斑强度分布如图 2 剖面线部分所示。

但在实际上, 耦合物镜组的光瞳是有限大小的, 此时可利用菲涅尔积分表求解(6)式, 于是, 实际的聚焦光斑强度分布将如图 2 的阴影部分所示。

由(8)式及图 2 可见: 1) 忽视菲涅尔衍射的影响, 带有空间滤波器的激光聚焦系统的聚焦光斑如图 2 虚线所示, 是一个确定的曲线, 而针孔光阑的直径好象是一个“闸门”, 可以控制聚焦光斑的直径, 当“闸门”

大于某一定值, 如前述, $d > 6 \cdot \frac{\lambda f_1}{2\pi\sigma}$, 则聚焦光斑直径几乎不变, 保持图 2 所示的虚线分布。当

$d < 6 \frac{\lambda f_1}{2\pi\sigma}$, 聚焦光斑直径将随 d 值减少而减少, 由于实际上菲涅尔衍射的存在, 聚焦光斑的实际强度分布将如图 2 的阴影部分所示; 2) 从(8)式可见, 聚焦光斑直径和 f_2/f_1 及 f_0 有关, 当 f_2/f_1 越大, 聚焦光斑直径越小; 当 f_0 越小, 聚焦光斑也越小。因此, 设计一个 f_0 小的短焦距物镜对于这个系统是完全必要的。

二

用于微束装置的短焦距物镜如采用通常的透射式光束系统, 当其焦距 f_0 小到几 mm 时, 工作距离已很小, 几乎无法用来分析样品。因此必需设计短焦距、长工作距离的聚焦物镜。

我们研制了两种可用于激光微束装置的短焦距、长工作距离的物镜。图 3 所示为基于双反射球面系统的工作原理而设计的聚焦物镜, 它具有结构简单的优点。

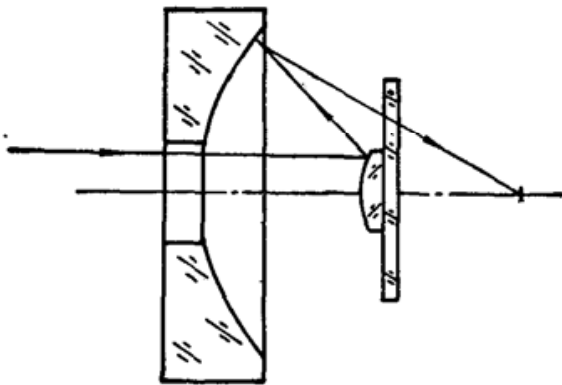


Fig. 3 Double-reflective sphere type focusing objective

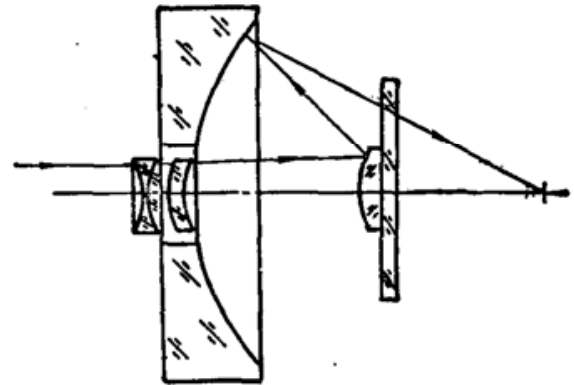


Fig. 4 Refractive-reflective type focusing objective

图 4 所示为折-反式双球面聚焦物镜, 它在图 3 所示系统中增加了一个负透镜组, 其作用在于: (1) 平衡保护玻璃的色差; (2) 利用它残留的部分初级慧差来平衡双反射球面组产生的高级慧差。因此, 这种聚焦物镜的像质较好。

上述两种物镜于焦距 $f_0 = 3.25\text{mm}$ 时, 工作距离 $l \geq 9\text{mm}$ 。

三

图 5 给出的一组实验曲线表明了这种带空间滤波器的激光聚焦系统的聚焦性能。

实验条件是采用一个 $\beta = f_2/f_1 = 2.6$ 的空间滤波器系统, $f_1 = 30\text{mm}$; 聚焦物镜采用图 3 所示系统, $f_0 = 3.12\text{mm}$; 输入激光束为 He-Ne 激光。

为了定量地测量尺寸为微米量级的激光聚焦光斑的强度分布, 先用高分辨率的航空摄影胶片置于聚焦平面曝光之后, 对胶片上的聚焦光斑放大 50 倍再次曝光于航摄胶片上, 然后在显微密度计上测量其强度分布。测量结果示于图 5。

由图 5 可见, 当针孔光阑直径为 $20\mu\text{m}$ 时, 聚焦光斑的直径约为 $1\mu\text{m}$; 未加针孔光阑或针孔光阑直径 d 大于 $100\mu\text{m}$ 时, 聚焦光斑直径约为 $5\mu\text{m}$ 。这也就是说, 利用这种带空间滤

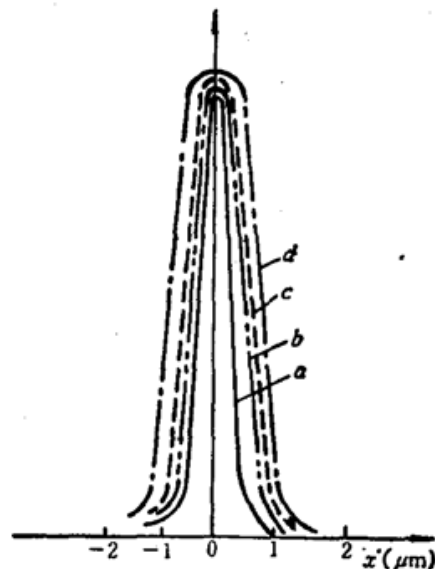


Fig. 5 Focal spot intensity distribution formed by laser focusing system with spatial filter

a—pinhole diaphragm diameter $\phi 20 \mu\text{m}$; b—pinhole diaphragm diameter $\phi 50 \mu\text{m}$; c—pinhole diaphragm diameter $\phi 100 \mu\text{m}$; d—pinhole diaphragm is not used

波器系统的激光聚焦系统很容易获得小于 $1 \mu\text{m}$ 的聚焦光斑, 因此, 它用于激光微束装置中是十分有效的。

参 考 文 献

- 1 M. L. Wobarsht *et al.*, *Laser Applications in Medicine and Biology*, 1~3, (Plenum Press, New York, 1971)
- 2 M. Tsukakoshi *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **B35**, 135 (1984)
- 3 朱延彬, *仪器仪表学报*, **1**, 28 (1980)
- 4 朱延彬, *分析化学*, **10**, 374 (1982)

全国弱激光光针灸学术研讨会将在福州召开

由中国光学学会、淮海经济区医学协作委员会激光协作组和江苏省激光与光学工程学会联合举办的全国弱激光光针灸学术研讨会将于 1991 年第三季度在福州市召开, 主要内容包括弱激光针灸基础研究、各科的临床应用以及弱激光光针灸器械的研制、原理、使用、维修和防护等。

(吉 禾)