

文章编号: 0258-7025(2010)07-1734-05

离轴型全息衍射光学元件多波长激光合束研究

冯远明 王兴平 杨欢 周崇喜

(中国科学院光电技术研究所微细加工国家重点实验室, 四川 成都 610209)

摘要 基于全息光学成像理论,提出了一种用于光纤耦合输出多波长激光的合束方法。该方法具有结构简单、合束效率高的特点。结合编程计算,设计了离轴型全息光学元件,给出了该元件的相位分布,并通过仿真软件 Zemax 和衍射的角谱理论对合束光束的发散角和光束质量进行了计算。结果表明,对 635,808,975 nm 3 种波长的光纤耦合输出激光进行合束,光束质量因子 M^2 由 23.5 增加到 47.9,理论效率 95%。

关键词 激光技术;全息光学元件;衍射;多波长激光合束

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103707.1734

Study of Wavelength Beam Combining Using Off-Axial Holographic Diffraction Optical Element

Feng Yuanming Wang Xingping Yang Huan Zhou Chongxi

(State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract Based on holographic optical holographic imaging theory, a wavelength beam combining approach of fiber coupling lasers using off-axial holographic optical elements is proposed in this paper. This method for beam combining is easy constructed and high efficiency. This paper designs the off-axis holographic optical element (HOE), and gives the phase distribution of the element. We use the stimulation software Zemax and angular spectrum theory to calculate the combined beam divergence angle and the beam quality. The stimulation shows that for fiber lasers with wavelength at 635,808,975 nm, maximum M^2 increases from 23.5 to 47.9 and the theoretical efficiency is 95%.

Key words laser technique; holographic optical elements; diffraction; wavelength beam combining

1 引言

随着激光技术的广泛应用,人们对激光器及激光的性能也提出了更高的要求,其中主要包括光束质量和激光功率。而高功率激光器是当今激光技术的一大研究热点。固体激光器由于光热效应的存在^[1],即随着输出功率的提高,工作物质的损耗阈值也相应提高,当损耗达到一定值时,工作物质会被烧毁,因此凭借单一激光器实现高功率是很困难的。

为了获得高功率激光,一个较好的解决途径是合束。合束分为相干合束与非相干合束,其中相干合束^[2~4]是将多束相干光合为一束,如果能较好地控制各光束的相对相位,在某些特定位置使多束光

相干叠加,输出光的强度是单束光的 N^2 倍。相干合束的难点在于需要将相位控制在 $\lambda/10$,因此能够参与合束的光束数目有限^[5]。非相干合束^[6]包括同波长叠加与谱叠加^[7]。谱叠加,又称为波长叠加(WBC),是将光束以非相干的方法叠加在一起,因此光强是各光束光强的和,由于光路控制简单,应用较广。

多波长合束主要是基于物质对光的色散作用实现的,通常使用的是棱镜色散和光栅色散^[8]。本文针对具有一定数值孔径的光纤耦合输出激光,设计了一种离轴型全息衍射光学元件^[9],可实现高效率、高光束质量的多波长激光合束。

收稿日期: 2009-10-13; 收到修改稿日期: 2009-11-09

基金项目: 中国科学院功能晶体与激光技术重点实验室开放课题资助课题。

作者简介: 冯远明(1984—),男,硕士研究生,主要从事光束整形方面的研究。E-mail: ymfeng@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 周崇喜(1970—),男,博士,研究员,主要从事激光光束整形变换技术方面的研究。E-mail: cxzhou@ioe.ac.cn

(通信联系人,中国光学学会会员号:SO4OM620)

2 原理及方法

全息衍射光学多波长激光合束的原理是光学全息成像^[10]。如图 1 所示,设波长为 λ_0 的参考光波为一位于 $O(x_0, y_0)$ 的点光源,距离全息图 $\varphi(x, y)$ 位置 z_0 处,与距离全息图 z_r 位置处 $R(x_r, y_r)$ 物体波长为 λ_0 的球面波相干涉,那么两光波形成的相息图的

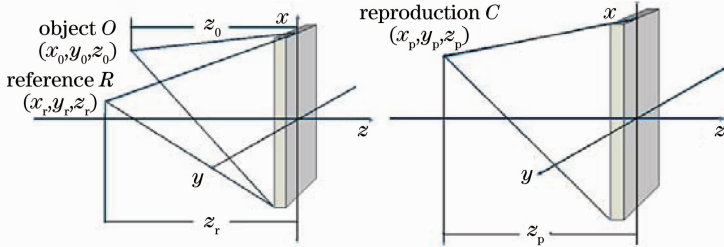


图 1 全息光学元件(HOE)记录及再现光路

Fig. 1 Schematic diagram of holographic recording and reproduction of holographic optical element

若采用离轴全息图记录,当物光位于光轴上时, $O(x_0, y_0) = (0, 0)$, 相息图的相位分布为

$$\varphi(x, y) = \frac{\pi}{\lambda_0} \frac{1}{z_r} (x^2 + y^2 - 2xx_r - 2yy_r) - \frac{\pi}{\lambda_0} \frac{1}{z_0} (x^2 + y^2). \quad (2)$$

如果物体为一位于无穷远点的球面波,则 $z_0 = \infty$, 相息图的相位可以进一步简化为

$$\varphi(x, y) = \frac{\pi}{\lambda_0} \frac{1}{z_r} (x^2 + y^2 - 2xx_r - 2yy_r). \quad (3)$$

从公式分布可以看出,该相息图的相位分布实际上是一个离轴抛物面型光学元件,进一步做量化,即成为纯相位型全息光学元件。

当采用波长为 λ_p 的点光源再现物体时,为了再现物体,该再现球面波的位置 $P(x_p, y_p, z_p)$ 应该满足条件^[11]

$$\begin{aligned} x_p &= x_r, \\ y_p &= y_r, \\ z_p &= \frac{\lambda_0}{\lambda_p} \cdot z_r, \end{aligned} \quad (4)$$

由于再现波长不同而引起的再现球面波的水平位置差(即色散)为

$$dz_p = -\frac{\lambda_0}{\lambda_p^2} z_r d\lambda = -\frac{d\lambda}{\lambda_p} z_p. \quad (5)$$

3 设计计算及模拟

针对 3 种不同波长的光纤输出的激光进行合束计算。以需要合束的输入光作为再现光,那么再现像即为合束的输出光。首先设计全息光学元件,设记录物光波长为 808 nm,位于无穷远点的光轴上,

相位函数为

$$\varphi(x, y) = \frac{\pi}{\lambda_0} \frac{1}{z_r} (x^2 + y^2 - 2xx_r - 2yy_r) - \frac{\pi}{\lambda_0} \frac{1}{z_0} (x^2 + y^2 - 2xx_0 - 2yy_0). \quad (1)$$

参考光为一离轴球面波,波长也为 808 nm。再现激光是从光纤输出的 3 种激光,波长分别为 635, 808, 975 nm, 光纤的数值孔径为 0.12。为了能够在空间上将 3 种再现激光分开,令 $dz_p \geq 10$ mm, 以中央激光波长 808 nm 作为 z_p , 那么从(5)式可计算出 $z_p = 60$ mm, 由光纤数值孔径可知,相应的 HOE 的口径为 14.5 mm。为了使离轴 HOE 制作容易,离轴量不宜过大,选取 $x_p = 4.5$ mm, 那么根据(3)式,即可获得全息衍射光学元件的相位函数。此时从(4)式获得 3 种再现激光轴向位置 z_p 分别为 76.5, 60 及 49.7 mm。

因为光纤的数值孔径为 0.12, 所以入射光束的最大半角发散角 $\theta = 0.12$ rad。由抽样定理 $\Delta x \leq \lambda d / L_0$ ^[12], 其中 Δx 为抽样间隔, $\lambda = 808$ nm, $d = z_p$ 为衍射距离, L_0 是 HOE 的口径。因此取样的份数为 $L_0 / \Delta x \geq L_0^2 / (\lambda d) = 4333$, 为计算方便,将取样份数定为 4096 即可近似满足抽样定理。

抽样结果如图 2 所示,其中相位分布范围为 $0 \sim 2\pi$, 由(3)式,高于 2π 的值除以 2π 取余,图中已作归一化。由于抽样间隔较大,图中某些细节无法显示。

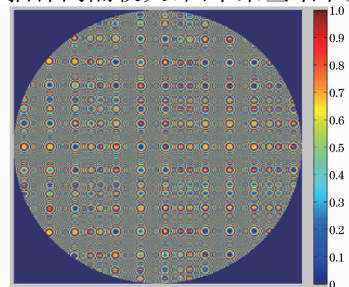


图 2 离轴型 HOE 的相位分布

Fig. 2 Phase distribution of abaxial HOE

为检测器件的合束能力并验证对不同波长光的焦距,使用 Zemax 软件及衍射的角谱理论对所设计的多波长合束器进行仿真^[12]。

先对该 HOE 的焦距进行计算,以便确定再现准直光束时再现光的位置。根据光路可逆原则,计算焦距的过程使用平行光照明全息光学元件,确定焦点位置。

在确定好焦距之后,采用 Zemax 软件对合束的发散角等进行计算。准直再现光时,因为光纤端面有一定的大小,这里使用的光纤芯径为 0.1 mm,所以在 Zemax 中选取 3 个点光源来模拟面光源。为

检测各输出光的发散角,在系统后加一级焦距为 100 mm 的理想透镜,通过计算焦面聚焦光斑的大小来计算发散角。

3.1 635 nm 光纤激光的准直仿真

当再现波长为 635 nm 时,由角谱理论编程计算得到的结果是焦距 $z_p = 76.43$ mm,如图 3(a)所示。使用 Zemax 仿真结果为焦距 $z_p = 76.43$ mm,对应 HOE 口径 $L_0 = 18.6$ mm,如图 3(b)所示。物高视场分别为 0.05, 0, -0.05 mm 时经过理想聚焦透镜后在焦面的位置及形成的光斑如图 3(c)所示,经过计算 3 个视场对应的总光斑直径为 0.194 mm。

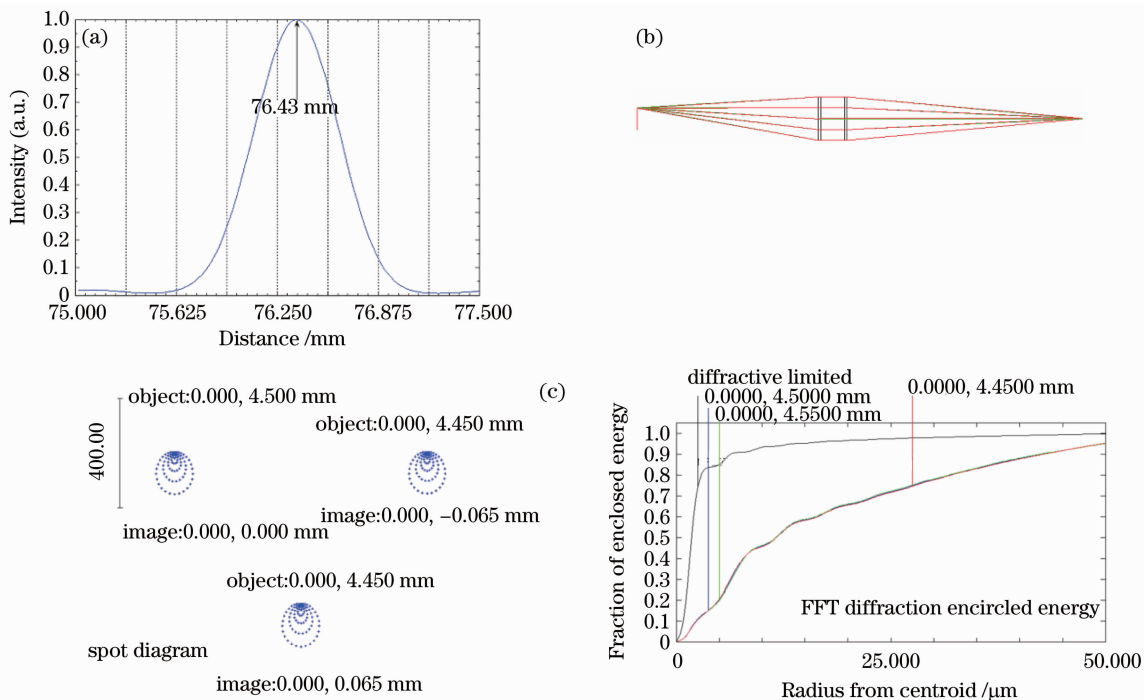


图 3 波长为 635 nm 光纤耦合输出激光再现结果。(a)中心光强随衍射距离的变化;

(b)光经过理想透镜的光路;(c)光经过理想透镜焦点位置和光斑分布

Fig. 3 Reproduction of fiber laser beam at 635 nm. (a) variation of the central intensity with diffraction distance;

(b) focusing path; (c) location of focus and distribution of intensity

由图 4 可知,为计算光线 1 与光轴的夹角,可以过透镜中心做一条与该光线平行的光线 2。由几何光学的知识可知,光线 1 和 2 在像方焦平面上交于一点,且光线 2 经过透镜后不会发生偏折。那么光线 1 与光轴的夹角可以通过光线 2 来求解,即夹角 $\theta = \arctan(r/f)$ 。其中 r 为交点与光轴的距离, f 为透镜焦距, L 为完美透镜。

由于光线与光轴夹角越大, r 的值也越大,所以为了计算光束的发散角,只需计算使光斑最大的光线与光轴夹角,即为光束发散角。因此光束发散角为 $\theta = \arctan(r/f) = \arctan(0.194/100) = 0.194$ mrad,

由 M^2 因子的定义^[13],相应的 M^2 为 44.7。

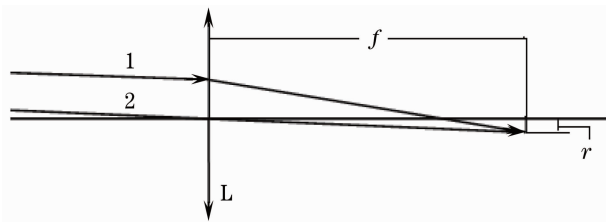


图 4 发散角计算方法

Fig. 4 Calculation of divergence angle

3.2 808 nm 光纤激光的准直仿真

当再现波长为 808 nm 时,由角谱理论编程计

算得到的结果是焦距 $z_p = 60$ mm, 如图 5(a) 所示。使用 Zemax 仿真结果为焦距 $z_p = 60$ mm, 对应的 HOE 口径 $L_0 = 14.5$ mm, 如图 5(b) 所示。3 个视场经过理想聚焦透镜后在焦面的位置及形成的光斑

如图 5(c) 所示, 经过计算 3 个视场对应的总光斑直径为 0.176 mm, 因此光束发散角为 1.76 mrad, 相应的 M^2 为 25.0。

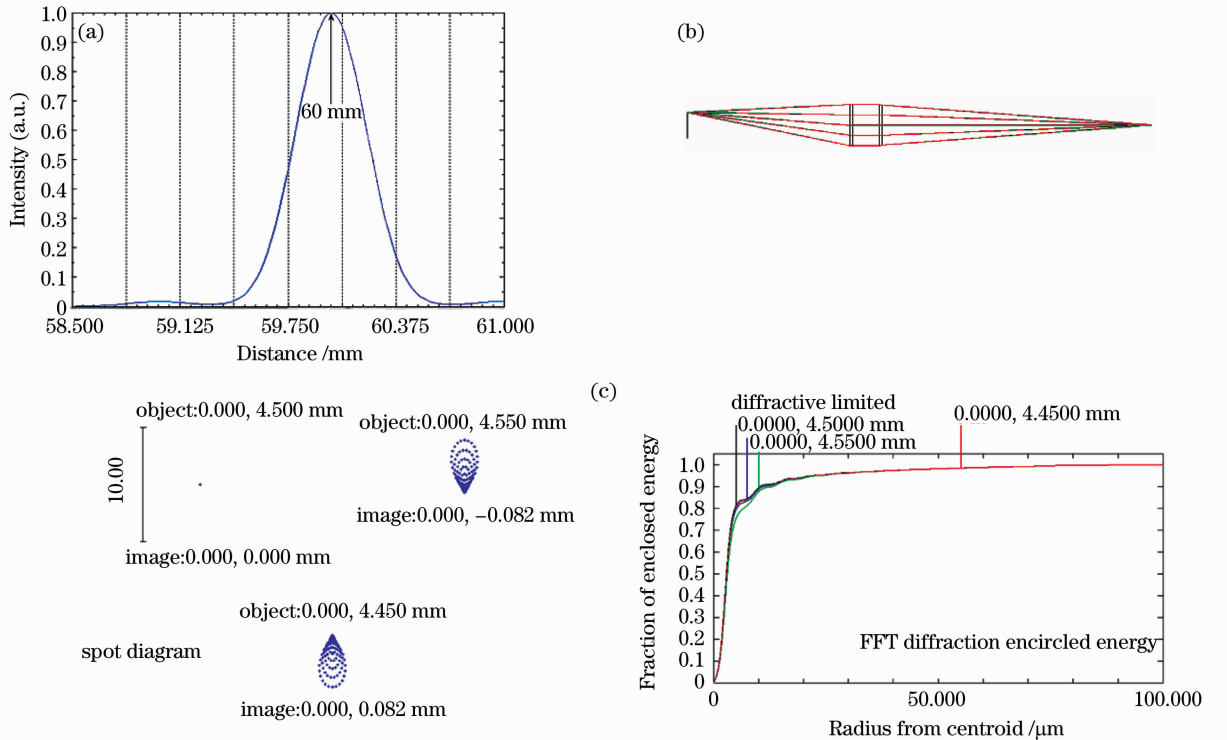


图 5 波长为 808 nm 光纤耦合输出激光再现结果。(a) 中心光强随衍射距离的变化;

(b) 光经过理想透镜的光路; (c) 光经过理想透镜的焦点位置和光斑分布

Fig. 5 Reproduction of fiber laser beam at 808 nm. (a) variation of central intensity with diffraction distance;

(b) focusing path; (c) location of focus and distribution of intensity

3.3 975 nm 光纤激光的准直仿真

当再现波长为 975 nm 时, 由角谱理论编程计算得到的结果是焦距 $z_p = 49.71$ mm, 如图 6(a) 所示。使用 Zemax 仿真结果为焦距 $z_p = 49.71$ mm, 对应的 HOE 口径 $L_0 = 12$ mm, 如图 6(b) 所示。3 个视场经过理想聚焦透镜后在焦面的位置及形成的光斑如图 6(c) 所示, 经过计算 3 个视场对应的总光斑直径为 0.258 mm, 因此光束发散角为 2.58 mrad, 相应的 M^2 为 25.0。

结果表明, 当 3 种光纤耦合输出再现激光位于给定的位置, 通过 HOE 后, 合束最大光束口径为 18.6 mm, 最大光束发散角为 2.58 mrad, 达到预定的目的。

4 结 论

采用离轴型全息衍射光学元件能够实现多波长光纤耦合输出激光的合束, 而且具有体积小、结构简单的优点。同时由于采用纯相位型结构, 其理论衍射效率在 8 台阶量化时可达 95%^[14], 因此合束效率高。由于使用光纤耦合输出的激光时, 各光纤处于同一水平线上, 存在前后挡光的问题, 经过离轴后, 光纤的延长线与光轴交于全息光学元件上, 光纤与光轴有一定夹角。又因为光纤输出激光的强度分布可近似为高斯分布, 所以被挡光的部分为波面上的弱光部分, 因此合束效率仍然很高。

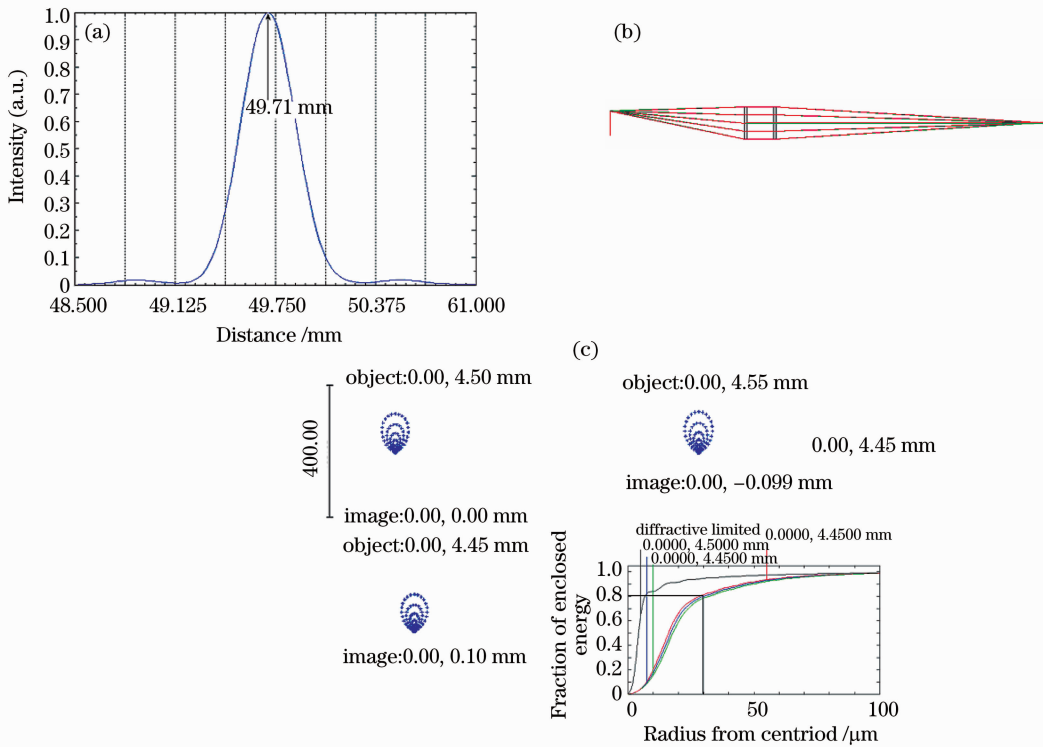


图 6 波长为 975 nm 光纤耦合输出激光再现结果。(a)中心光强随衍射距离的变化；
(b)光经过理想透镜的光路；(c)光经过理想透镜的焦点位置及光斑分布

Fig. 6 Reproduction of fiber laser beam at 975 nm. (a) variation of central intensity with diffraction distance;
(b) focusing path; (c) location of focus and distribution of intensity

参 考 文 献

- 1 C. M. Stickley, M. E. Filipkowski, E. Parra *et al.*. The future of high-efficiency diode lasers[C]. *SPIE*, 2006, **5591**: 505~514
- 2 Cao Jianqiu, Lu Qisheng, Hou Jing *et al.*. Influence of combining errors in the system for coherent combining of fiber lasers on the far field of output[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 351~358
曹涧秋, 陆启生, 侯静等. 光纤激光器相干合成系统中组束误差对远场光场的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 351~358
- 3 Wang Jingquan, Fang Liang, Zhang Zhiyou *et al.*. Implementation of coherent array beam combination using two-dimensional sine phase grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 39~43
王景全, 方亮, 张志友等. 用二维正弦相位光栅实现阵列激光相干并束[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 39~43
- 4 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun *et al.*. Feasibility analysis and effect evaluation of partially coherent combining of high power fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 730~733
周朴, 刘泽金, 许晓军等. 高功率光纤激光部分相干合成的可行性及效果分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 730~733
- 5 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 2005, **41**(3): 567~577
- 6 Zhu Songjun, Zhang Bin, Yin Suqin *et al.*. Analysis of combining efficiency of spectral combining technique for fiber lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 11~15
祝颂军, 张彬, 阴素芹等. 光纤激光器谱合成系统合成效率的计算分析[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1): 11~15
- 7 P. Madasamy, T. Loftus, A. Thomas *et al.*. Comparison of spectral beam combining approaches for high power fiber laser systems[C]. *SPIE*, 2008, **6952**: 695207
- 8 A. Sevan, O. Andrusyak, I. Ciapurin *et al.*. Spectral beam combining with volume Bragg gratings: cross-talk analysis and optimization schemes[C]. *SPIE*, 2006, **6216**: 62160V
- 9 Sun Qiang, Yu Bin, Wang Zhaozhe *et al.*. Application of binary optics in the detection of infrared super spectrum[J]. *Science in China (Series E)*, 2003, **33**(9): 839~844
孙强, 于斌, 王肇折等. 二元光学在红外超光谱探测中的应用[J]. *中国科学(E辑)*, 2003, **33**(9): 839~844
- 10 Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics[M]. Beijing: Science Press, 1999
苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- 11 Lü Naiguang. Fourier Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1999
吕乃光. 傅立叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999
- 12 Li Junchang. The Calculation of Laser Diffraction and Thermal Affection[M]. Beijing: Science Press, 2008
李俊昌. 激光的衍射及热作用计算[M]. 北京: 科学出版社, 2008
- 13 Zeng Bingbin, Xu Deyan, Wang Runwen. Physical concept and measurement on laser beam quality factor M^2 [J]. *Applied Laser*, 1994, **14**(3): 104~108
曾秉斌, 徐德衍, 王润文. 激光光束质量因子 M^2 的物理概念与测试方法[J]. *应用激光*, 1994, **14**(3): 104~108
- 14 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. Binary Optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998
金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998