

文章编号: 0253-2239(2006)01-0071-6

啁啾脉冲放大系统中空间滤波器小孔尺寸的设计

陆 俭^{1,2} 王二玉^{1,2} 丁良恩^{1,2}

(¹ 华东师范大学光谱学与波谱学教育部重点实验室, 上海 200062)
(² 华东师范大学物理系, 上海 200062)

摘要: 为了获得啁啾脉冲放大系统(CPA)中空间滤波器的小孔尺寸,可以利用傅里叶光学的方法和激光模式理论,通过数学上的合理近似和对能量频谱函数的数值积分,计算激光束中基横模和主要低阶横模的径向空间频谱与空间截止频率,并讨论以基横模的空间截止频率作为空间滤波器的截止频率的可行性,从而确定小孔光阑孔径的大小并得出一个具有普遍意义的结论,即小孔直径约取 6.93 倍衍射极限长度时,空间滤波器能够较好地滤去 TEM₀₀ 模以外其他横模的大部分高频能量成分,从而提高光束质量,此结果在实验上得到很好的验证。此外,以 M^2 因子为基础,可以得到一个用以辅助描述空间滤波器滤波性能的光束质量改善因子 B 。

关键词: 激光光学; 光束质量; 空间滤波; 傅里叶变换

中图分类号: TN243 文献标识码: A

Study on the Pinhole Size in the Spatial Filter of the CPA System

Lu Jian^{1,2} Wang Eryu^{1,2} Ding Liang'en^{1,2}

(¹ Key Laboratory of Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy, Ministry of Education of China, East China Normal University, Shanghai 200062)
(² Physics Department, East China Normal University, Shanghai 200062)

Abstract: To obtain the size of the pinhole in the spatial filter of the CPA system, Fourier transform and laser multimode theories are applied. And by means of reasonably mathematical approximation and numerical integration, the radial spatial frequency spectrum and the spatial close frequencies of the basic transverse mode and main low-order transverse modes are calculated. The feasibility of applying the close frequency of the basic transverse mode to determining the close frequency of the spatial filter is also discussed, thus the diameter of the pinhole is determined and a widely significant result is achieved. In conclusion, the pinhole, with the optimal diameter of about 6.93 times the diffraction limit length, can fairly filter the high frequencies of most transverse modes except for the TEM₀₀ mode, so that the beam quality is ameliorated and this result is well verified in experiments. Besides, a beam quality-improving factor called “ B ” based on M^2 factor to help describe the performance of the pinhole-lens spatial filter is introduced.

Key words: laser optics; beam quality; spatial filtering; Fourier transform

1 引 言

随着强场激光技术的广泛应用,人们对光束质量的要求越来越高,尤其在飞秒钛宝石啁啾脉冲放大系统(CPA)中,改善光束质量是提高激光系统输出性能的很实用的技术手段^[1]。空间滤波器是提高激光光束质量的重要器件,通过合理设计空间滤波器的各项参量,可以有效改善啁啾脉冲放大系统中

抽运光的光束质量和聚焦特性,从而提高多通放大级的放大效率。

目前空间滤波器小孔的设计思想大致分为两种:菲涅耳衍射积分法^[2]和汉克尔变换法^[3,4]。前者运用广义惠更斯-菲涅耳衍射积分和统计光学的方法计算了有振幅和相位畸变激光通过空间滤波器的传输情况,给出了弱截断情况下最佳滤波小孔相对

尺寸的表达式;后者是利用汉克尔变换分析高功率激光束通过空间滤波器形成的低频调制效应。在如何确定调制孔径方面,文献[2]给出了更为具体的结论,但相位畸变参量如何确定尚未提及,这给应用带来了不便。作为对文献[2]的进一步研究,我们尝试从傅里叶光学和激光模式理论出发,获得一个较为简单和实用的结论,通过比较和实验,也从另一方面来验证文献[2]的正确性。

2 基本原理

激光光束质量用衍射倍率因子 M^2 来描述,一般情况下 $M^2 \geq 1$ ^[5],它随不同类型的激光器而不同。对 YAG 激光器,在有效克服介质和窗口热透镜效应^[6]后,光束质量的下降主要是由除基横模外的其他横模引起的。于是,必须使用空间滤波器滤去其他横模中高空间频率的成分,其结构是常见的“透镜-小孔光阑-透镜”的准直系统,若聚焦后产生拉丝效应,则可置于真空管中。显然,要在基横模中把高阶横模完全滤去既不可行也不必要,因为滤去了高频成分的高阶横模已不再保留原来高阶模的特性。因此我们定义一个限度:若空间滤波器能够滤去高阶横模中高于 TEM₀₀ 模的基频成分,且多数模式下滤去的高频能量占各自的一半以上,则它具有较好的滤波性能。由此,可以利用透镜的傅里叶变换作用,在透镜的焦平面上得到光束各模式的空间频谱^[7],从而可利用一定孔径的小孔来限制频谱面上的高频“交流”成分,而保证主要的基频“直流”成分的通过,这样就能改善光束的模式特性并提高光束质量。

圆形腔镜输出的高斯光束,其 TEM₀₀ 模在横截面上的能量分布是一个高斯函数,而 TEM_{mn} ($mn \neq 0$) 模在横截面上的能量分布则满足拉盖

尔-高斯函数,具体形式如下:

$$\nu(r, \varphi) = C_{mn} \left(\sqrt{2} \frac{r}{w_{os}} \right)^m L_n^m \left(2 \frac{r^2}{w_{os}^2} \right) \times \exp \left[-\frac{r^2}{w^2(z)} \right] \cos m\varphi, \quad (1)$$

其中 C_{mn} 是归一化常量, w_{os} 是镜面光束半径, $L_n^m(\zeta)$ 是缔合拉盖尔多项式^[8], 将它代入(1)式即得这些横模的表达式,见表1左列。由(1)式,我们容易发现两个重要的特征:1) TEM_{mn} 模当 $m=0$ 且 $n \geq 0$ 时,其场分布函数是一个只含径向坐标 r 的圆对称极坐标函数;2) TEM_{mn} 模当 $m > 0$ 时,其场分布函数在径向是受 TEM_{0n} 模的函数调制的,从而可以分离变量。滤波小孔的设计主要考虑径向场分布,所以利用上述特点仅需对含有坐标 r 的分量进行频谱变换,再按要求定义积分限,从而可以得到 TEM_{mn} 模在频谱面的径向空间截止频率。

3 理论计算

经过冗长的计算,我们得到了若干低阶横模的场函数及其傅里叶变换的解析式,如表1所示。

表1中 $S^2 = r^2/w_{os}^2$, w_{os} 为入射透镜前表面的光束半径, f 为空间频率。按照高斯光束有效宽度的定义^[8],我们定义空间滤波系统对某个 TEM_{mn} 模的截止频率 f_{mn} 为该模的频谱面上,光强下降到 $1/e^2$ 时所对应的频率坐标值,即以 f_{mn} 为限的环围能量占到 TEM_{mn} 模总能量的 86.5%。如果以该截止频率所对应的空间坐标值来设定小孔半径,那么可以通过绝大部分的该种横模能量。由透镜和小孔光阑组成的空间滤波器相当于一个衍射受限系统,小孔的半径 R 取决于系统的空间截止频率 f_0 ^[7],它们之间的关系为

表1 主要低阶 TEM_{mn} 模的谱函数及其对应的傅里叶变换

Table 1 Fourier transforms of the functions of several low-order TEM_{mn} modes

$\nu_{mn}(r, \varphi)$	$F[\nu_{mn}(r, \varphi)]$	
$C_{00} \exp[-S^2]$	$w_{os} \sqrt{\pi} C_{00} \exp(-w_{os}^2 f^2 / 4)$	(2)
$C_{01} (1 - 2S^2) \exp[-S^2]$	$w_{os}^3 \sqrt{\pi} \frac{C_{01}}{2} f^2 \exp(-w_{os}^2 f^2 / 4)$	(3)
$C_{02} (1 - 4S^2 + 2S^4) \exp[-S^2]$	$w_{os} \sqrt{\pi} C_{02} \left(\frac{w_{os}^4 f^4}{8} - \frac{w_{os}^2 f^2}{2} + \frac{1}{2} \right) \exp(-w_{os}^2 f^2 / 4)$	(4)
$C_{10} \sqrt{2} S \exp[-S^2] \cos \varphi$	$-w_{os}^2 \sqrt{\pi/2} C_{10} j f \exp(-w_{os}^2 f^2 / 4)$	(5)
$C_{20} 2S^2 \exp[-S^2] \cos 2\varphi$	$w_{os} \sqrt{\pi} C_{20} \left(1 - \frac{w_{os}^2 f^2}{2} \right) \exp(-w_{os}^2 f^2 / 4)$	(6)
$C_{11} 2\sqrt{2} S (1 - S^2) \exp[-S^2] \cos \varphi$	$w_{os}^2 \sqrt{\pi/2} C_{11} j f \left(1 - \frac{w_{os}^2 f^2}{2} \right) \exp(-w_{os}^2 f^2 / 4)$	(7)

$$f_0 = R/(\lambda F), \quad (8)$$

其中 λ 为光波长, F 为第一个透镜的焦距, f_0 可以通过数值积分的方法计算 TEM₀₀ 模的空间截止频率 f_{00} 获得。表 2 计算表 1 中的各阶横模在 w_{os} 取 5.0 mm(实际测量 YAG 激光器的近场束宽得到)时所对应的 f_m , 以及它们被 f_{00} 决定的小孔滤去能量占原来能量的比重。

表 2 w_{os} 取 5.0 mm 时 TEM_{*m*} 模的空间截止频率 f_m 及该模能量被 f_{00} 所决定的小孔滤去的比重

Table 2 The close spatial frequency of TEM_{*m*} modes provided that w_{os} is 5.0 mm wide and the percentage of those energy closed by the pinhole of f_{00}

$\left[\int_0^{f_m} F_m(f) df \right] / \left[\int_0^{+\infty} F_m(f) df \right] = 86.5\%$	$\left[\int_0^{f_{00}} F_m(f) df \right] / \left[\int_0^{+\infty} F_m(f) df \right] / (\%)$	Percentage of energy closed / (%)
$f_{00} = 0.4225 \text{ mm}^{-1}, C_{00} = 0.3183$	86.5	13.5
$f_{01} = 0.6700 \text{ mm}^{-1} > f_{00}, C_{01} = 0.3179$	47.2	52.8
$f_{02} = 0.8490 \text{ mm}^{-1} > f_{00}, C_{02} = 0.3183$	23.4	76.6
$f_{10} = 0.5665 \text{ mm}^{-1} > f_{00}, C_{10} = 0.3989$	67.3	32.7
$f_{20} = 0.6535 \text{ mm}^{-1} > f_{00}, C_{20} = 0.3277$	59.5	40.5
$f_{11} = 0.7820 \text{ mm}^{-1} > f_{00}, C_{11} = 0.2789$	25.7	74.3

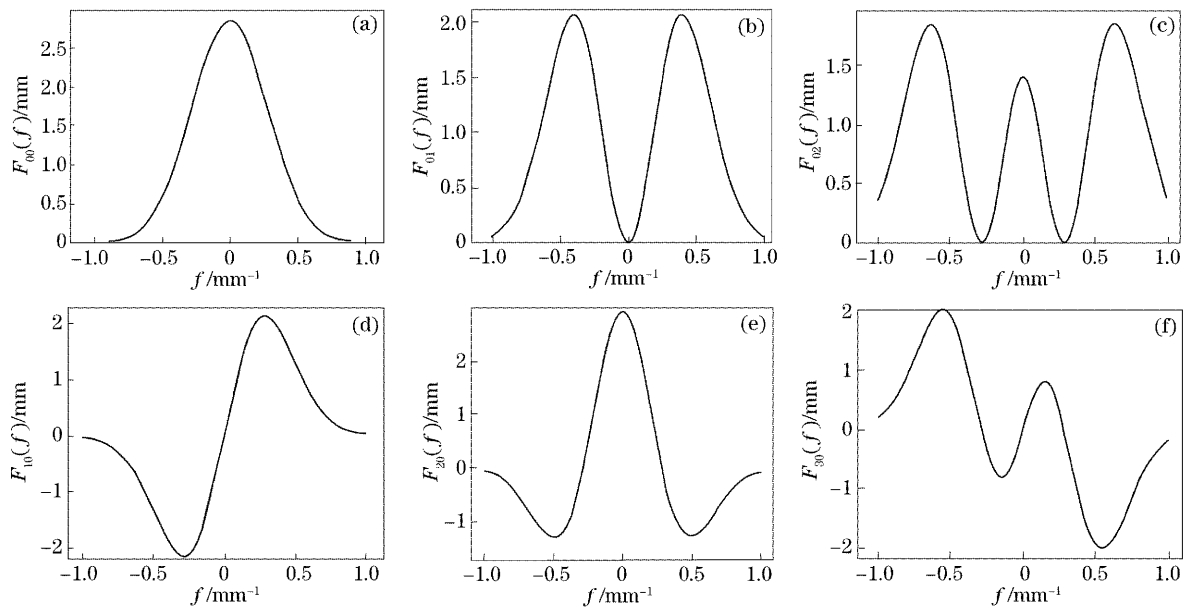


图 1 基横模和各低阶横模的频谱函数分布

Fig. 1 The frequency spectrum functions of the fundamental transverse mode and low-order TEM_{*m*} modes

由上述计算结果可知,大多数低阶横模中 50% 以上的高频成分被以 f_{00} 为截止频率的空间滤波器挡住,故以 f_{00} 作为空间滤波器的截止频率是可行的。并且可知,横模阶数 $m+2n+1$ 越高,被挡住的能量就越多^[8]。经计算得到表 3 结果,其中夫琅禾费衍射极限长度为

$$D_0(\omega_{os}) = 1.22\lambda F / (2\omega_{os}). \quad (9)$$

观察表 3 发现一个重要规律:光束的半宽度在 1~9 mm 范围内(最常用的范围)时,所设计的小孔

表 2 中 C_m 为 $F_m(f)$ 的归一化常量。观察上面各模的空间截止频率 f_m , 发现它随着 $m+2n+1$ 的增加而增加。图 1 给出这些横模经计算所得的频谱曲线, $F_{00}(f)$ 、 $F_{01}(f)$ 、 $F_{02}(f)$ 、 $F_{10}(f)$ 、 $F_{20}(f)$ 、 $F_{11}(f)$, 它们分别对应于归一化的表达式(2)、(3)、(4)、(5)、(6)、(7)。

直径与该光束经过透镜成像的衍射极限长度成正比,比值约为 6.93。即

$$D(\omega_{os}) = 6.93D_0(\omega_{os}) =$$

$$6.93 \times 1.22\lambda F / (2\omega_{os}) = 4.2\lambda F / \omega_{os}, \quad (10)$$

不难证明,这个形式与用旁轴高斯光束的传输规律所推导出的聚焦光斑尺寸表达式具有完全相同的形式^[8],系数的不同是因为我们实际处理的是较远离旁轴的情况。

表 3 光束半径 ω_{0s} 取不同值时 TEM₀₀ 模的截止频率及小孔直径与衍射极限长度的比值Table 3 The close frequency of TEM₀₀ mode when the laser beam radius ω_{0s} is different and the ratio of the pinhole diameter to diffraction limit length

ω_{0s}/mm	$\int_0^{+\infty} F_{00}(f)df/(\omega_{0s}\sqrt{\pi}C_{00})$	$\int_0^{f_{00}} F_{00}(f)df/(\omega_{0s}\sqrt{\pi}C_{00})$	f_{00}/mm^{-1}	$\frac{D(\omega_{0s})}{D_0(\omega_{0s})}$
1.00	1.7725	1.5332	2.1140	6.9311
3.00	0.5968	0.5110	0.7405	6.9295
5.00	0.3545	0.3066	0.4225	6.9262
7.00	0.2532	0.2190	0.3020	6.9311
9.00	0.1969	0.1703	0.2347	6.9256

我们将 YAG 激光器的波长 532 nm 和 $\omega_{0s} = 5.0$ mm 为例代入 (10) 式, 计算 F 取几个不同值时相应滤波小孔的直径 D 。另外, 用文献 [2] 的方法即最佳小孔直径 $2b_{\text{opt}}$ 的表达式进行计算以作参照, 其中相位畸变因子根据文献推荐在 10 到 50 之间, 所以我们取一个较合适的值 21.5, 结果如表 4 所示。

表 4 前透镜焦距取不同值时空滤波器的
小孔直径及其与文献 [2] 结果的比较

Table 4 The size of the pinhole when the front focal length is different and its comparison with the result of Ref. [2]

F/mm	$D/\mu\text{m}$	$2b_{\text{opt}}/\mu\text{m}$	$\sigma/(\%)$
500	224.9	224.8	0.04
450	202.4	202.3	0.05
400	179.9	179.8	0.06
350	157.4	157.3	0.06
300	134.9	134.9	0.00

可见本文与文献 [2] 所用方法虽然不同, 但是当相位畸变因子在正常范围内取一个合适值时两者结果符合得很好。需要指出, 本文的工作是用傅里叶光学的方法结合能量概念求解空间滤波器小孔尺寸以服务于实验, 并没有讨论系统中的衍射调制效应 [9, 10]。

为了便于评价空间滤波器对某一束光的光束质量的改善效率, 我们给出一个用于辅助描述空间滤波器滤波性能的光束质量改善因子 B 。令

$$B = \frac{P_{\text{final}}/M_{\text{final}}^2}{P_{\text{initial}}/M_{\text{initial}}^2} = \eta \frac{M_{\text{initial}}^2}{M_{\text{final}}^2}, \quad (11)$$

$$B \in [\eta, \eta M_{\text{initial}}^2],$$

其中 $\eta = P_{\text{final}}/P_{\text{initial}}$ 为光束通过空间滤波器之后与之前平均功率的比值, M_{initial}^2 与 M_{final}^2 为通过空间滤波器前后的 M^2 因子。由于 $1 < M_{\text{final}}^2 < M_{\text{initial}}^2$, 所以 B 的范围应在 η 到 $\eta M_{\text{initial}}^2$ 之间。显然, 对同一束光, 如果出射光的 M^2 因子越小 (接近于 1), 而且平均功率损失得越少, 那么 B 就越大, 就表示滤波器能在尽量减少能量损失的情况下有效地提高光束质量, 这对

保证光束在后级放大系统中的利用效率至关重要。实际应用中, 推荐入射光的 M^2 值应在 1 到 20 之间, 如果 M^2 大于 20, 这种光将难以聚焦, 应用价值不大, 对于啁啾脉冲放大系统中 YAG 激光的 M^2 值更应小于 10, η 值应在 50% 到 1 之间, η 过小可能不能满足需要。这样, 对于 YAG 激光的 B 因子应在 0.5 到 10 之间, 超出此范围应认为不符合要求。我们知道, B 因子还受到入射光的影响, 例如某入射光本身的基模成分就很少, 而滤波器能使它的基模分量很好地通过, 这样 η 值就很低, 而这并不是滤波器的问题。因此需要注意, 在入射光不变的前提下, 不同滤波器对这束光的 B 因子的大小才能够反映它们的滤波性能。由此可见, B 因子将 M^2 因子与能量传输因素相结合, 在一定条件下有助于较为全面地评价空间滤波器的滤波质量。

4 实 验

我们现有 Newport 公司的 50 μm 、60 μm 、75 μm 和 100 μm 四种尺寸的铝合金小孔光阑, 取焦距为 160 mm 的正透镜, 按 (10) 式有: 小孔直径理论值约为 72 μm , 所以用 75 μm 的小孔基本符合要求。本实验光源为 532 nm 的 YAG 激光器, 振荡和放大调到最大, 没有调 Q , 近场束宽为 10 mm。测量仪器是 Spricon 公司的 M^2 仪。经过多次测量我们得到表 5 所示结果。

表 5 加不同直径的小孔时出射光的光束质量因子

Table 5 The M^2 and B factors of output laser through pinholes of different size

$D/\mu\text{m}$	M_x^2	M_y^2	η	B_x	B_y
50	2.40	3.85	23	0.44	0.56
60	1.85	2.22	37	1.53	1.05
75	1.26	1.25	52	3.16	2.62
100	2.49	2.98	68	2.09	1.44
∞	7.67	6.29	83	0.83	0.83

由表 5 和图 2 可知, 随着孔径 D 向 75 μm 靠近,

输出光的 M^2 因子呈减小的变化趋势,传输线形所表现的远场发散角也逐渐减小;通过图 3 可以看出,输出光的光斑亮度均匀性和聚焦特性也呈改善的趋势。一般 YAG 激光器输出光的 M^2 值在 6 到 10 之间,空间滤波器若能改善 M^2 值到 2 和 3 之间已经相当不错,实验显示,当 D 取 $100 \mu\text{m}$ (约 10 倍衍射极限长

度)时,能达到这个效果;然而当 D 取 $75 \mu\text{m}$ (约 6.93 倍衍射极限长度)时, M^2 值改善到了 1.25 的程度, B 因子也有极大值。实际应用中,很难对小孔孔径加工到 $1 \mu\text{m}$ 的量级,而且几微米的差别对输出光光束质量的影响可以忽略,因此孔径取 6.93 倍衍射极限长度左右 5% 的范围内都是可以接受的。

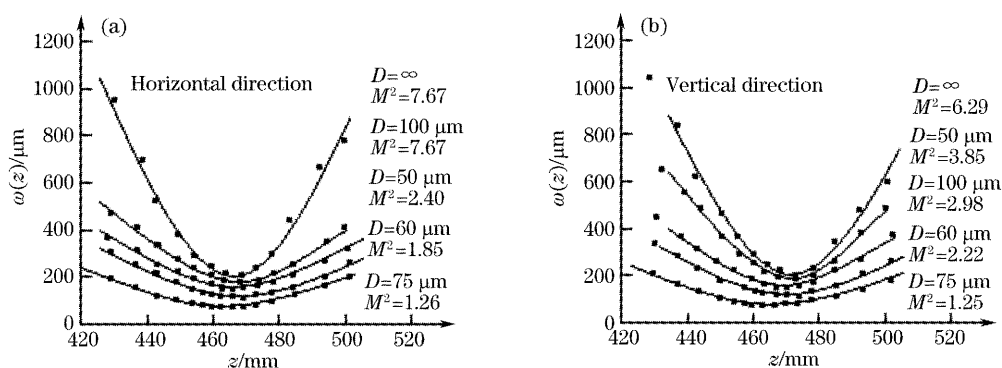


图 2 通过不同尺寸的小孔后光束轮廓的测量结果。(a)水平方向,(b)垂直方向

Fig. 2 Measured beam profile through pinholes of different size. (a) Horizontal direction, (b) vertical direction

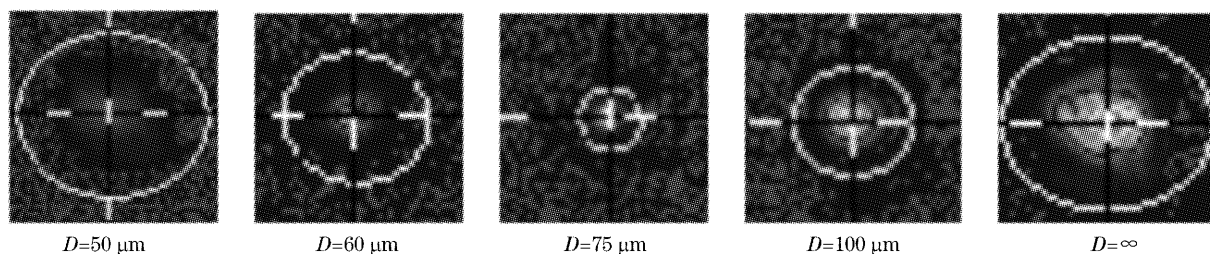


图 3 通过不同尺寸的小孔后光束的能量分布

Fig. 3 The distribution of the beam energy through pinholes of different size

5 结 论

通过另一途径给出了空间滤波器中小孔尺寸的计算公式,得到小孔直径取 6.93 倍左右的衍射极限长度将使滤波效果比较理想,该结论也从侧面验证了文献[2]结论的正确性,可以作为其很好的补充。实验证明,此结论能够指导空间滤波器的设计以明显地改善 YAG 激光器的光束质量。此外引入了光束质量改善因子 B 用以辅助描述空间滤波器的滤波效率。但是,我们也发现实际能量传输率还不够高,如何提高 B 因子需继续研究。YAG 激光器作为抽运源,如果以额定功率输出经滤波后足以提供啁啾脉冲放大系统对钛宝石进行多通放大,那么该空间滤波方案是可行的。如果该小孔材料难以承受调 Q 以后激光束聚焦的极高能量,我们可以把上述空间滤波系统在空间允许的条件下运用于 YAG 激光器振荡级的谐振腔中,从“源头”改善光束质量。

参 考 文 献

- Hu Xueyuan, Deng Jian, Zhong Fangchuan *et al.*. Beam quality measurement and amendment of the ultrashort ultraintense laser system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **A28**(5): 407~411 (in Chinese)
- 胡雪原,邓 健,钟方川等. 超强脉冲激光系统光束质量的测量和改善[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(5): 407~411
- Zhang Bin, Lü Baida. Propagation of laser beams with amplitude modulations and phase fluctuations through a spatial filter[J]. *Chin. J. Lasers*, 1997, **A24**(10): 903~908 (in Chinese)
- 张 彬,吕百达. 有振幅调制和相位畸变激光通过空间滤波器的传输[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(10): 903~908
- You Kaiming, Wen Shuangchun. Numerical study on transformation property of high power laser beam propagating through spatial filter[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(2): 147~150 (in Chinese)
- 游开明,文双春. 高功率激光束在空间滤波器中的传输特性[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(2): 147~150
- Jiang Shaoen, Liu Zhongli, Tang Daoyuan *et al.*. Inverted abel transform based on FFT and hankel transform[J]. *Acta Opica Sinica*, 1999, **19**(5): 661~664 (in Chinese)
- 江少恩,刘忠礼,唐道源等. 基于快速傅里叶变换和汉克耳变换的逆阿贝尔变换[J]. *光学学报*, 1999, **19**(5): 661~664

- 5 Yang Huanxiong, Zhao Daomu, Lu Xuanhui *et al.*. Several viewpoints related to the beam quality factor M^2 [J]. *Chin. J. Lasers*, 1997, **A24**(8): 709~714 (in Chinese)
杨焕雄, 赵道木, 陆璇辉 等. 关于光束质量因子 M^2 的几点看法 [J]. 中国激光, 1997, **A24**(8): 709~714
- 6 Sun Feng, Cheng Zuhai, Zhang Yaoning *et al.*. Thermal distortions in calcium fluoride, potassium chloride and fused silica windows at 1.315 μm [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(4): 412~416 (in Chinese)
孙 峰, 程祖海, 张耀宁 等. 在波长 1.315 μm 下的几种激光器窗口热效应比较研究 [J]. 中国激光, 2004, **31**(4): 412~416
- 7 Huang Wanyun. *Fourier Optics Lectures* [M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 1985. 123~142 (in Chinese)
黄婉云. 傅里叶光学教程 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1985. 123~142
- 8 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong. *Laser Principles* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 61~88 (in Chinese)
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘. 激光原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 61~88
- 9 Wen Qiao, Chu Xiaoliang, Zhang Bin. Generalized M^2 factor of laser beams with amplitude modulations and phase distortion passing through hard-edge apertures [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 274~278 (in Chinese)
文 侨, 楚晓亮, 张 彬. 有振幅调制和相位畸变光束通过硬边光阑的 M^2 因子 [J]. 光学学报, 2004, **24**(2): 274~278
- 10 Hongjie Liu, Daomu Zhao, Haidan Mao *et al.*. Studies of beam propagation characteristics on apertured fractional Fourier transforming systems [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(4): 206~209