

高能光纤激光经准直系统后的光束质量研究

陶汝茂 司 磊 马阎星 邹永超 周 朴[†]

(国防科学技术大学光电科学与工程学院,长沙 410073)

(2010年11月3日收到;2010年12月8日收到修改稿)

应用光线光学的理论,对透镜的几何像差、热非线性等因素对光纤激光光束质量的影响进行了分析和计算,给出了激光通过多透镜光学系统后,光束质量参数 M^2 与系统参数的一般关系. 研究了高能光纤激光通过准直系统后的光束质量. 研究表明,随着激光功率的增大,经准直系统后光束的光束质量存在最佳值,其对应的激光功率与准直系统参数有关,为高能光纤激光准直系统的设计提供了参考.

关键词: 高能光纤激光, 光束质量, 准直系统, 光线光学

PACS: 42.55.Wd, 42.68.-W, 42.60.-V, 42.15.-i

1. 引言

迄今为止,对高能激光在大气中的传输,特别是大气湍流和热晕对激光传输的影响已做了许多理论和实验研究^[1-6]. 光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、热管理方便、结构紧凑等优点,能够获得高功率和高光束质量的激光输出^[7,8],尤其是进入本世纪以来,高功率光纤激光技术得到迅速发展,基模千瓦级的光纤激光器已经实现商用化,其在高能激光系统中的巨大应用潜力也被各国军方和科研人员一致看好^[9-14]. 光纤激光的传输特性已有研究,但大多直接采用高斯模型^[15-17]. 对于实际的高能光纤激光系统,从光纤激光器输出的光束一般还要经过准直系统扩束后再经大气传输. 高能激光束通过准直系统时,常常会产生光学非线性效应,造成光束质量的退化. 对于高能激光系统,透射器件的非线性效应造成的光束质量的退化可能会超过湍流等大气效应的影响,对此仅有不多的研究结果报道^[18,19]. 文献[20]采用光线光学的理论,分析了透镜对高能激光光束质量的影响,本文拟推导出适用于分析多透镜系统的一般公式,并对实用于高能光纤激光的高扩束比激光准直系统进行分析,计算高能光纤激光经其准直后的光束质量,为高能光纤激光准直系统的设计和工程应用提供参考.

2. 理论分析

光线光学的理论只在波长趋近于零时成立,因而不能直接用来描述衍射,但可以通过特殊方法引进衍射^[20]:给光线叠加一个横向速度分布,使其强度曲线保持高斯型并且有正确的真空衍射角. 引进衍射后的光线光学理论就可以用来分析激光的光束质量,基本思想为^[20]

激光光斑半径定义为

$$R(z) \equiv \langle \tilde{r}^2(r_0, \mathbf{v}_0, z) \rangle^{1/2}, \quad (1)$$

式中 $\tilde{r}(r_0, \mathbf{v}_0, z)$ 为光线在轴向位置 z 处的径向位置. 其中,对于任意量

$$\langle Q \rangle = (4\pi/P) \int Q(r_0, \mathbf{v}_0, z) I(r_0, 0) \times g(\mathbf{v}_0) r_0 dr_0 d^2 v_0, \quad (2a)$$

式中 P 为激光功率, $I(r_0, 0)$ 为激光光强分布, $g(\mathbf{v}_0)$ 为叠加的横向速度分布且 $\int g(\mathbf{v}_0) d^2 v_0 = 1$. 对于高斯光束

$$I(r, 0) = (2P/\pi R_0^2) \exp(-2r^2/R_0^2), \quad (2b)$$

$$g(\mathbf{v}_0) = (1/\pi \bar{v}^2) \exp(-|\mathbf{v}_0|^2/\bar{v}^2), \quad (2c)$$

\bar{v} 为横向速度扩展,下标 0 表示初始值 ($z = 0$).

由(1)式可得

$$R''(z) = \varepsilon^2/R^3(z), \quad (3a)$$

[†] 通讯联系人. E-mail: zhoupu203@163.com

$$\varepsilon^2 \equiv \langle \tilde{r}^2 \rangle \langle (\tilde{r}')^2 + \tilde{r}\tilde{r}'' \rangle - \langle \tilde{r}\tilde{r}' \rangle^2, \quad (3b)$$

$$\partial \varepsilon^2 / \partial z = \langle \tilde{r}^2 \rangle \langle 3\tilde{r}'\tilde{r}''' + \tilde{r}\tilde{r}'''' \rangle, \quad (3c)$$

特别,在均匀介质中, $\tilde{r}'' = 0$, 即光线在其中传输角度不变.

光束质量参数定义为

$$M^2 = \pi \varepsilon / \lambda, \quad (4)$$

其中, λ 为激光波长.

真空中传播的聚焦高斯光束, 则

$$\tilde{r}(z) = r_0 + [(v_0/c) - (r_0/L_f)]z, \quad (5)$$

式中 r_0 为光线初始径向位置, v_0 为光线初始横向速度, c 为真空中光速, L_f 为聚焦长度, z 为光线传播距离.

若光束质量参数为 M^2 , 由 (3b), (4) 和 (5) 式可得

$$\bar{v} = M^2 \lambda c / (\sqrt{2\pi} R_0). \quad (6)$$

联立 (1) 和 (6) 式可得

$$R^2(z) = R_0^2 \left(1 - \frac{z}{L_f}\right)^2 + (M^2 \theta_0 z)^2, \quad (7)$$

式中 $\theta_0 = \lambda / \pi R_0$.

假设透镜的吸收系数很小且光纤激光是高斯光束, 则

$$\begin{aligned} \Delta T(r) &= T(r) - T_\infty \\ &= \bar{T} \left[\Gamma\left(0, \frac{2R_L^2}{R_0^2}\right) - \Gamma\left(0, \frac{2r^2}{R_0^2}\right) - \ln\left(\frac{r^2}{R_L^2}\right) \right] \\ &= \Delta T(0) + \bar{T} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_{T,2n} \left(\frac{r^2}{R_0^2}\right)^n, \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $T(r)$ 为透镜上 r 处温度, $\bar{T} \equiv \alpha P / (4\pi\kappa)$, α 为吸收系数, κ 为热传导系数, $\alpha_{T,2n} = (-2)^n / (nn!)$, $\Gamma(n, x)$ 为不完全伽马函数. 轴上稳态温度变化 $\Delta T(0) = \gamma(2R_L^2/R_0^2)\bar{T}$, 其中 $\gamma(x) = \gamma_0 + \Gamma(0, x) + \ln(x)$, $\gamma_0 \approx 0.58$ 为欧拉常数.

透镜后为均匀介质, 仅考虑温度改变的最低阶项, 则光线通过多透镜光学系统后的角度为

$$\begin{aligned} \tilde{r}' &= \beta_{(i-1)0} + \frac{\partial}{\partial r} [L_{ic}(r) ((n_{i0} - 1) \\ &\quad + g_i \Delta T_i(r))]_{r=r_0}, \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $\beta_{(i-1)0} = \tilde{r}'_{(i-1)0}$ 为光线通过第 $i-1$ 个透镜后的出射角, 且有 $\langle \beta_{i0}^2 \rangle = \left(M_i^2 \frac{\lambda}{\pi}\right)^2$ 和 $\langle r_{i0}^n \beta_{i0} \rangle = 0$, $n = 1, 2, 3, \dots$, M_i^2 表示通过第 i 个透镜后的光束质量, n_{i0} 为透镜的折射率, $g_i = (\partial n / \partial T)_i + (n_{i0} - 1)\alpha_{iT}$, α_{iT} 为热扩张系数, $L_{ic}(r)$ 为不存在热效应时的透镜厚度.

考虑球面透镜

$$\begin{aligned} L_{ic}(r) &= L_{i0} + R_{ic1} \left[1 - \left(1 - \frac{r^2}{R_{ic1}^2}\right)^{1/2}\right] \\ &\quad + R_{ic2} \left[1 - \left(1 - \frac{r^2}{R_{ic2}^2}\right)^{1/2}\right] \\ &\approx L_{i0} \left[1 + a_{ic,2} \left(\frac{r}{R_{i0}}\right)^2 + a_{ic,4} \left(\frac{r}{R_{i0}}\right)^4 + O\left(\frac{r^6}{R_{i0}^6}\right)\right], \end{aligned} \quad (10)$$

$(r \ll R_{ic1}, R_{ic2}),$

式中 R_{ic1} 和 R_{ic2} 为第 i 个透镜两表面的曲率半径,

$$a_{ic,2} = (R_{i0}^2 / 2L_{i0})(R_{ic1}^{-1} + R_{ic2}^{-1}),$$

$$a_{ic,4} = (R_{i0}^4 / 8L_{i0})(R_{ic1}^{-3} + R_{ic2}^{-3}),$$

L_{i0} 为透镜的中心厚度.

将 (8), (10) 式代入 (9) 式得

$$\begin{aligned} \tilde{r}'_{i0} &= \beta_{(i-1)0} + \alpha_{i1} \frac{r_{i0}}{R_{i0}} \\ &\quad + \alpha_{i3} \left(\frac{r_{i0}}{R_{i0}}\right)^3 + O\left(\frac{r_{i0}^4}{R_{i0}^4}\right), \end{aligned} \quad (11a)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{i1} &= [(n_{i0} - 1) + g_i \Delta T_i(0)] \\ &\quad \times \frac{2L_{i0} a_{ic,2}}{R_{i0}} - \frac{4L_{i0}}{R_{i0}} g_i \bar{T}_i, \end{aligned} \quad (11b)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{i3} &= [(n_{i0} - 1) + g_i \Delta T_i(0)] \frac{4L_{i0} a_{ic,4}}{R_{i0}} \\ &\quad + g_i \bar{T}_i L_{i0} \left(\frac{4}{R_{i0}} - \frac{8a_{ic,2}}{R_{ic}}\right). \end{aligned} \quad (11c)$$

联立 (3b) 和 (11a) 式, 可得迭代公式

$$\begin{aligned} M_i^2 &= [(M_{i-1}^2)^2 + \frac{\pi^2 R_{i0}^2}{2\lambda^2} \alpha_{i3}^2]^{1/2} \\ &\approx [(M_{i-1}^2)^2 + \Delta_{SA} + \Delta_T]^{1/2}, \end{aligned} \quad (12a)$$

其中

$$\Delta_{SA} = \frac{\pi^2 R_{i0}^2}{2\lambda^2} \left((n_{i0} - 1) \frac{4L_{i0} a_{ic,4}}{R_{i0}}\right)^2, \quad (12b)$$

$$\begin{aligned} \Delta_T &= \frac{4\pi^2 g_i a_{ic,4} R_{i0} \bar{T}_i L_{i0}^2}{\lambda^2} (n_{i0} - 1) \\ &\quad \times \left(\frac{4}{R_{i0}} - \frac{8a_{ic,2}}{R_{ic}}\right), \end{aligned} \quad (12c)$$

(12b) 式对应球面像差引起的光束质量最低阶修正, (12c) 式对应透镜热效应引起的光束质量最低阶修正. 推导 (12) 式时, 假设温度改变很小, 含有 $(g_i \bar{T}_i)^2$ 的项可以忽略, 并且 $g_i \Delta T_i(0) \ll (n_{i0} - 1)$. (12b), (12c) 式在 $\Delta_{SA} \gg |\Delta_T|$ 时才成立. 当 $(R_{ic1}^{-1} + R_{ic2}^{-1}) < L_{i0}/R_{i0}^2$ 时, Δ_T 和 $(R_{ic1}^{-3} + R_{ic2}^{-3})$ 同号, 即当 $(R_{ic1}^{-3} + R_{ic2}^{-3}) > 0$ 时, 热像差使 M^2 增大, 而当 $(R_{ic1}^{-3} + R_{ic2}^{-3})$

< 0 时, 温度像差使 M^2 减小. 当 $(R_{ic1}^{-1} + R_{ic2}^{-1}) > L_{i0}/R_0^2$ 时, 无论 $(R_{ic1}^{-3} + R_{ic2}^{-3})$ 的符号如何, 热像差都会使 M^2 减小. 利用 (12) 式即可计算光束通过多透镜系统后的光束质量.

3. 数值计算

利用光学系统压缩高斯光束的发散角是实际应用中遇到的一个重要问题. 由于激光束腰斑尺寸和发散角乘积具有确定值, 当腰斑尺寸达到极大值时, 发散角将达到极小值, 得到很好的准直效果^[21]. 激光准直系统结构如图 1 所示, 采用共焦的望远镜结构^[21], 由两片凸透镜或一片凹透镜与一片凸透镜组成, 能将光纤激光器输出的波长为 $1 \mu\text{m}$, 束腰为 0.5 mm 的激光^[22] 扩束到 5 cm , 则瑞利长度^[23] $z_0 = \pi\omega_0^2/\lambda \approx 2 \text{ km}$. 透镜参数如表 1 所示, 其中透镜 1、透镜 2 参数根据实际情况设计, 光纤激光器出射端距第一个透镜为 25 cm , 由 (7) 式可得 $R_{10} =$

0.525 mm , 其中 $L_f = 25 \text{ cm}$.

表 1 透镜结构参数

参数名称	透镜 1	透镜 2
R_L/mm	3	40
L_0/mm	2.20	7
R_c/mm	± 10.65	-457.76
f/mm	9	500

典型的透镜材料为 BK7 玻璃和熔融石英, 其具体参数见表 2^[21], 为计算简便, 折射率均取 $n_0 = 1.45$. 根据表 1 所给数据, 代入 (11c), (12a) 式中, 结果如图 2 所示, 其中细实线对应准直系统中透镜 1 和 2 都是熔融石英材料, 记为曲线 1; 虚点线对应将透镜 1 材料采用 BK7 玻璃而透镜 2 材料采用熔融石英不变, 记为曲线 2; 粗实线对应透镜 1 材料采用熔融石英而将透镜 2 的材料用 BK7 玻璃, 记为曲线 3; 虚线对应将两个透镜材料均采用 BK7 玻璃, 记为曲线 4.

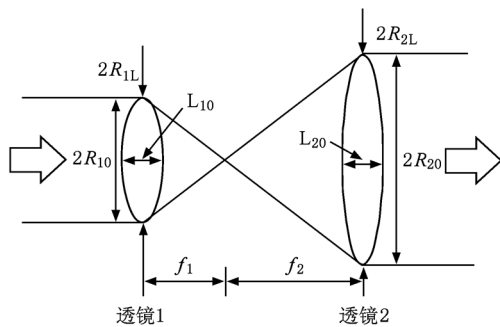


图 1 准直系统结构图

表 2 不同材料透镜的参数

透镜材料	BK7 玻璃	熔融石英
α/cm^{-1}	3×10^{-4}	5×10^{-5}
$\kappa/(\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K}))$	1.1×10^{-2}	1.4×10^{-2}
$(\partial n/\partial T)/\text{K}^{-1}$	2.3×10^{-6}	10^{-5}
$\alpha_T = L^{-1}(\partial L/\partial T)/\text{K}^{-1}$	7.1×10^{-6}	5.1×10^{-7}
$\rho_0/(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.5	2.2
$C_p/(\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K}))$	0.86	0.75

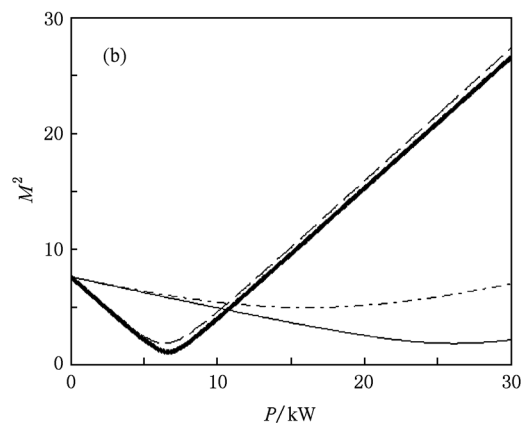
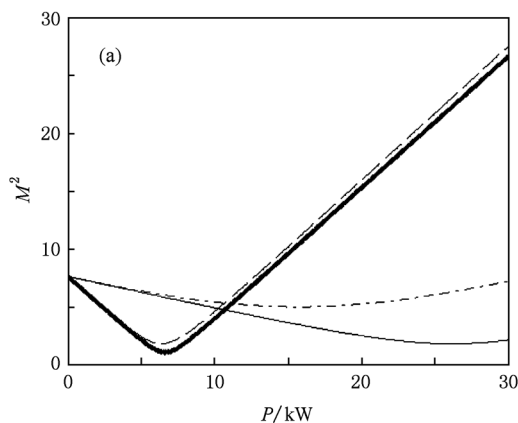


图 2 光束质量参数 M^2 与激光功率 P 的关系 (a) 两个凸透镜组成的准直系统; (b) 凹透镜和凸透镜组成的准直系统

图 2(a) 中, 随着激光功率的升高, 4 条曲线均会出现光束质量参数 M^2 下降、光束质量变好的现

象; 曲线 1 的具体数值从 7.61 开始下降, 变为 1.795 后达到最小值, 对应激光功率约为 26 kW , 之后不断

变大;曲线2从7.61开始下降,变为4.989后达到最小值,对应激光功率约为15.8 kW,之后不断变大;曲线3从7.61开始下降,变为1.051后达到最小值,对应激光功率约为6.6 kW,之后不断变大;曲线4从7.61开始下降,变为1.795后达到最小值,对应激光功率约为6.4 kW,之后不断变大.图2(b)亦有相似现象:曲线1从7.61开始下降,变为1.841后达到最小值,对应激光功率约为26 kW,之后不断变大;曲线2从7.61开始下降,变为4.952后达到最小值,对应激光功率约为16 kW,之后不断变大;曲线3从7.61开始下降,变为1.089后达到最小值,对应激光功率约为6.6 kW,之后不断变大;曲线4从7.61开始下降,变为1.841后达到最小值,对应激光功率约为6.4 kW,之后不断变大.分析可知,对于望远镜准直系统,随着激光功率的升高,均会出现 M^2 下降,光束质量变好的现象,而当激光功率超过某一阈值后, M^2 上升,光束质量变差,即存在一个最佳光束质量,其对应的最佳功率点与准直系统的透镜材料参数有关.

图2给出了典型准直系统中,光纤激光光束质量与激光功率的关系.如以输出功率为15 kW的光纤激光器为例,采用两个凸透镜组成的准直系统进行准直,其中透镜半径有如下关系^[20]

$$R_{2L} = (3/4)R_{2c} \times [1 - (1 - (L_{20}/2R_{2c}))^2]^{1/2}, \quad (13)$$

则光束质量参数 M^2 随 R_{2c} 的变化关系如图3所示,

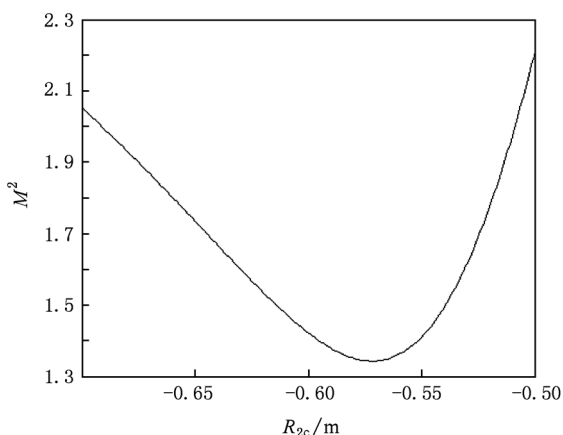


图3 光束质量参数 M^2 与曲率半径 R_{2c} 的关系

可见,光束质量还与透镜结构参数有关,当曲率半径 R_{2c} 约为-0.56 m时,光束质量最好.

取透镜2的曲率半径 R_{2c} 为-0.56 m,则 R_{2L} 为47.4 mm,其余参数与图2(a)中画出曲线1的参数相同,可得图4中结果,则在激光功率为15 kW处,可以获得最佳光束质量,因此,可以通过合理设计准直系统参数,获得最佳的近场光束质量.

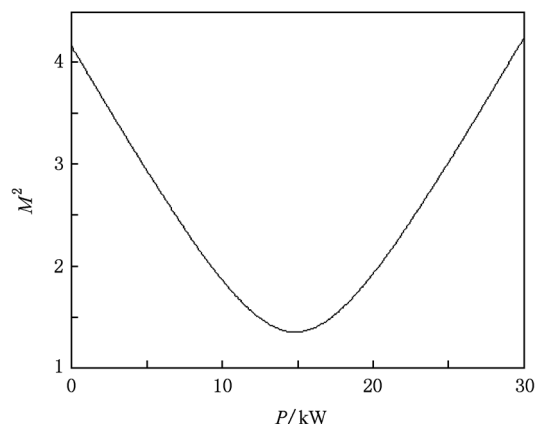


图4 光束质量参数 M^2 与激光功率 P 的关系

4. 结 论

文章对实际光学系统中几何像差、热非线性等因素对光束质量的影响进行了分析,并给出了典型准直系统中光束质量与系统中透镜参数的一般关系.计算结果表明,用望远镜系统对高能光纤激光进行准直扩束,随着激光功率的升高,光束质量并不是一直变差,而存在一个最佳值,其对应的最佳激光功率与准直系统参数有关:透镜材料、透镜结构参数等.因此,通过合理设计准直系统,可以使经系统后的光束质量达到最佳.本文考虑输出功率为15 kW的光纤激光器,对准直系统的参数选择进行了分析.文章的结果对高能光纤激光准直系统的设计提供了一定的参考.需要说明的是,由于实际透镜对高能激光传输的影响十分复杂,本文的计算结果是基于简化的数学模型,为了获取更精确的结果,需考虑几何像差和热非线性的高阶项,进一步计算.

[1] Strohbehn J W, Walsh J L, Ulrich P B 1978 *Laser Beam Propagation in the Atmosphere* (Berlin: Springer-Verlag) p223

[2] Hayes J N 1974 *Appl. Optics* **13** 2072

[3] Gebhardt F G 1975 *Appl. Optics* **15** 1479

- [4] Fleck J A, Morris J R, Feit M D 1976 *Appl. Phys.* **10** 129
- [5] Xu G Y, Wu J, Yang C P, He W G, Han Y 2008 *Laser Technol.* **32** 548 (in Chinese) [徐光勇、吴健、杨春平、何武光、韩勇 2008 激光技术 **32** 548]
- [6] Chen D Q, Li Y K, Xu X S, Zhang X W 1993 *High Power Laser and Particle Beams* **5** 243 (in Chinese) [陈栋泉、李有宽、徐锡申、张信威 1993 强激光与粒子束 **5** 243]
- [7] Ma Y X 2008 *MS Thesis* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [马阎星 2008 硕士学位论文 (长沙:国防科学技术大学)]
- [8] Liu S H 2003 *Optoelectronic Technology & Information* **16** 1 (in Chinese) [刘颂豪 2003 光电子技术与信息 **16** 1]
- [9] Zhou P, Ma Y X, Wang X L, Ma H T, Xu X J, Liu Z J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 014202
- [10] Wang X L, Zhou P, Ma Y X, Ma H T, Xu X J, Liu Z J, Zhao Y J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 094202
- [11] Galvanauskas A 2004 *Optics & Photonics News* **15** 42
- [12] Liu Z J, Zhou P, Xu X J 2008 *High Power Laser and Particle Beams* **20** 1795 (in Chinese) [刘泽金、周朴、许晓军 2008 强激光与粒子束 **20** 1795]
- [13] Lou Q H, Zhou J, Wang Z J 2003 *Laser Technology* **27** 161 (in Chinese) [楼祺洪、周军、王之江 2003 激光技术 **27** 161]
- [14] Ji H S 2005 *Land-Based Air Defence Weapons* **3** 29 (in Chinese) [姬寒珊 2005 地面防空武器 **3** 29]
- [15] Cai Y, Chen Y, Eyyuboglu H T, Baykal Y 2007 *App. Phy. B* **88** 467
- [16] X. Chu, Z. Liu, Y. Wu 2008 *J. Opt. Soc. Am. A* **25** 74
- [17] X. Ji and X. Li 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7674 (in Chinese) [季小玲、李晓庆 2008 物理学报 **57** 7674]
- [18] Ji X L, Tao X Y, Lv B D 2004 *Laser Technology* **28** 514 (in Chinese) [季小玲、陶向阳、吕百达 2004 激光技术 **28** 514]
- [19] Jin G, Liu S F, Li S M, Chen H B, Ma J G 2002 *Chinese Journal of Lasers* **29** 895 (in Chinese) [金刚、刘顺发、李树民、陈洪斌、马佳光 2002 中国激光 **29** 895]
- [20] Penano J, Sprangle P, Ting A, Fischer R, Hafizi B, Serafim P 2009 *J. Opt. Soc. Am. A* **26** 503
- [21] Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R, Chen J H 2007 *Principles of Lasers* 5th ed (Beijing: National Defense Industry Press) p82—84 [周炳琨、高以智、陈倜嵘、陈家骅 2007 激光原理 第5版 (北京:国防工业出版社) 第82—84页]
- [22] Sprangle P, Ting A Penano J, Fischer R, Hafizi B 2009 *IEEE J. Quantum Elect.* **45** 145
- [23] Lü B D 2003 *Laser Optics* 3rd ed (Beijing: Higher Education Press) p99 (in Chinese) [吕百达 2003 激光光学 第3版 (北京:高等教育出版社) 第99页]

Optical quality of high-power fiber laser beams propagating through collimating systems

Tao Ru-Mao Si Lei Ma Yan-Xing Zou Yong-Chao Zhou Pu[†]

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 3 November 2010; revised manuscript received 8 December 2010)

Abstract

Within the framework of the ray optics theory, the effects of heating effect and geometric aberration on optical quality of fiber laser beam are calculated and analyzed. An analytical expression for the beam quality parameter M^2 of fiber laser beam propagating through a multilens optical system is derived as a function of the system parameter. The optical quality of high-power laser beam propagating through a collimating system is investigated. It is shown that a best optical quality can be found as the laser power increases and the corresponding laser power depends on the collimating system parameter. The investigation presents a reference for the design of high-energy fiber laser collimating systems.

Keywords: high-power fiber laser, optical quality, collimating systems, ray optics

PACS: 42.55.Wd, 42.68.-W, 42.60.-V, 42.15.-i

[†] Corresponding author. E-mail: zhoupu203@163.com