

❖ 特约专栏 ❖

光谱合成激光阵列指向偏差的光束特性分析

柏 刚^{1,2}, 沈 辉¹, 杨依枫¹, 赵 翔^{1,2}, 张璟璞^{1,2}, 何 兵^{1,3}, 周 军^{1,4}

- (1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 南京先进激光技术研究院, 江苏 南京 210038;
4. 南京中科神光科技有限公司, 江苏 南京 210038)

摘 要: 保持良好光束质量的输出对实际光谱合成系统的构建至关重要。从理论上研究光纤激光阵列指向偏差对合成系统光束特性的影响, 修正了带有指向偏转角激光阵列的入射光场, 结合光谱合成的光传输模型和统计学分析, 讨论了合成激光光束质量随均匀分布随机扰动的变化规律。仿真结果表明, 指向偏差对合成系统的输出特性影响显著, 当激光阵列的最大偏转角仅为 0.05° 时, 合成系统的光束质量就会退化到 (6.49 ± 1.73) 。为实现合成光束亮度的定标放大, 逐步扩展激光阵列的阵列规模, 合成系统光束质量的变化会逐渐趋于稳定, 以变化稳定时的阵列规模(30 路子光束)作为参考, 拟合 M^2 因子随最大指向偏转角的变化趋势。

关键词: 光谱合成; 光纤激光阵列; 指向偏差; 光束质量

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0103010

Analysis of beam characteristic in spectral beam combining of laser array with pointing deviation

Bai Gang^{1,2}, Shen Hui¹, Yang Yifeng¹, Zhao Xiang^{1,2}, Zhang Jingpu^{1,2}, He Bing^{1,3}, Zhou Jun^{1,4}

- (1. Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing 210038, China;
4. Nanjing Zhongke Shengguang Technology Co. Ltd., Nanjing 210038, China)

Abstract: Maintaining excellent beam quality is very important for the construction of the experimental spectral beam combining(SBC) system. The influence of pointing deviation on the beam characteristic was studied in SBC of fiber laser array theoretically. The incident light field of the laser array with the pointing deviation was corrected, and the variation rule of the combined beam quality with uniformly distributed random perturbations was discussed by the beam propagation model and the statistical analysis. The simulation result shows that the pointing deviation has a significant effect on the output

收稿日期: 2017-06-21; 修订日期: 2017-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(61405202, 61705243); 上海市自然科学基金(16ZR1440100, 16ZR1440200);
上海市优秀技术带头人计划(17XD1424800); 上海市青年科技英才扬帆计划(17YF1421200);
江苏省重点研发计划(BE2016005-4)

作者简介: 柏刚(1991-), 男, 博士生, 主要从事光纤激光光谱合成方面的研究。Email: roy_baigang@126.com

导师简介: 何兵(1975-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事高功率光纤激光和光束合成方面的研究。

Email: bryanho@mail.siom.ac.cn

characteristics of the SBC system. When the maximum deflection angle of the laser array is only 0.05° , the beam quality of SBC system will increase to (6.49 ± 1.73) . In order to achieve the brightness scaling of combined beam and gradually expand the scale of laser array, the combined beam quality tends to stabilize. As a reference for the array scale (30 fiber lasers) with the changes of relative stability, the variation tendency of the M^2 factor and maximum pointing deflection angle is fitted for building the experimental system of SBC.

Key words: spectral beam combining; fiber laser array; pointing deviation; beam quality

0 引言

光纤激光器的输出功率扩展受非线性效应、模式不稳定性等物理因素和材料损伤阈值的限制,单根光纤的输出功率存在理论极限^[1]。为了突破这些限制,获取更高功率的激光输出,光束合成技术应运而生。多光束合成技术是实现高功率和高光束质量激光输出的重要技术途径,通过较低功率的激光阵列合成方式构建高功率激光束,提供一种模块化合束方法,成倍地提高激光输出的功率,同时还可以保证优良的光束质量^[2-3]。光谱合成技术是近年来发展迅猛的一种合成方案,采用一块或多块光学色散元件将多路子光束合成至共孔径输出,具有光束质量好、对子光束相位没有要求、结构简单稳定等优点,展现出无可替代的重要应用价值^[4-5]。早在 2000 年,林肯实验室 V. Daneu 等人就实现了 11 路、宽带条的二极管阵列的光谱合成,获得了 20 倍衍射极限的激光输出^[6]。光纤激光器的光谱合成与半导体几乎同时起步,相比于二极管激光阵列,光纤激光阵列无需复杂的光束整形系统,输出近衍射极限的高斯光场更适合应用于大规模激光阵列的合成和扩展,近年来已成为激光技术领域的前沿研究热点^[7]。

理论上光谱合成可以实现合成光束亮度的定标放大,即保持与输入激光的光束质量基本相同,而功率随合成路数成比例增加。但在实际的合成系统中,合成光的光束质量却要大于输入激光的光束质量,这主要受合成元器件的影响,包括激光阵列的扰动、转换透镜的像差以及衍射光栅的热效应。之前的研究热点主要集中在光栅角色散、刻蚀误差以及热畸变等对光栅入射面近场相位产生的调制作用,及其分布特性对合成光束的远场强度和光束质量产生的影响^[8-11]。

在这些分析中,激光阵列的排布都是理想的,但针对实际的光谱合成系统,激光输出阵列的校准难免会出现一定偏差。这些偏差可能由输出端帽的制备、装配,合成系统的调试以及周围环境的机械振动产生,进而影响到最终的合成效果,尤其是合成光的光束质量,成为评价高能激光作用效果的重要性能指标。

因此,文中从理论上研究了激光阵列指向偏差对光谱组束的影响,主要是结合子光束阵列的光传输模型和强度二阶矩方法,系统分析了合成系统光束质量的裂化情况。为实现更高功率的输出,扩展阵列规模是一个重要的方案。以一组固定的系统参数和指向偏转角($\delta\theta=0.025^\circ$)作为基准,逐步扩展阵列规模至 50 路,研究发现当子光束规模增长到 30 路时,指向偏差对光谱合成系统的影响开始趋于稳定。因此,30 路子光束的阵列规模被选为一组典型值,详细分析了合成光 M^2 因子随最大偏转角的变化趋势,拟合可得到经验性的二阶多项式 $M_0^2=10^2 \times (7.23\delta\theta^2+0.93\delta\theta)+1.0$,这将为建立实际光谱合成系统提供重要的参照标准。

1 指向偏差阵列的光传输模型

光纤激光阵列光谱合成的原理如图 1 所示。每一路光纤激光平行排布,为使各子光束经过转换透镜后在光栅入射面上的光斑尺寸较小,激光阵列和多层电介质光栅(MDG)分别位于转换透镜的前后焦点。转换透镜对所有不同波长的激光光束同时实现自准直和调节光路的功能,使单路激光以一定的角度入射到光栅表面的同一位置。介质膜衍射光栅将这些具有不同波长、不同入射角的子光束合为以相同角度输出的一束激光,继而实现功率提升且保持较好的光束质量,其中各路子光源波长由光栅方程和输出位置严格一一对应。

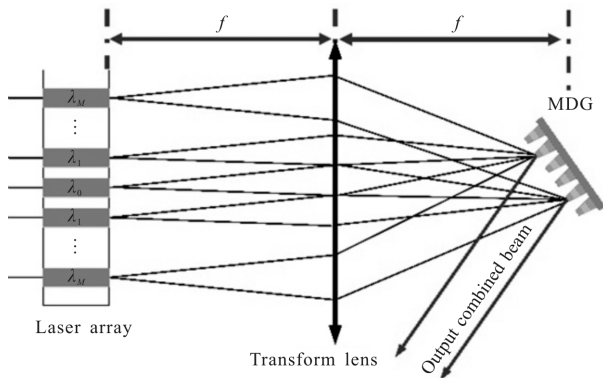


图 1 光谱合成系统的原理图

Fig.1 Schematic illustration of spectral beam combining system

激光阵列指向偏差的示意图如图 2 所示, KK' 为透镜的后焦面, N 为光栅表面的法线方向。中心位置处的两条光线分别为同一子光束指向偏转前后的传播路径; 距中心 $m\Delta p$ 位置处的光线是激光阵列中的另一子束, LL' 为其所对应的垂线, θ 为两光束传播方向之间的角度差。

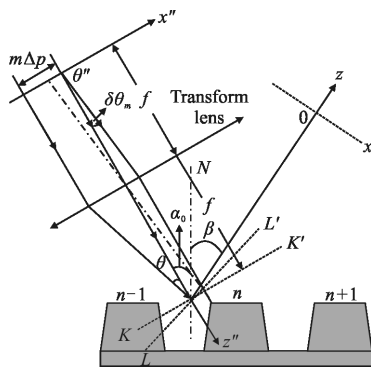


图 2 激光阵列指向偏差的简化模型示意图

Fig.2 Simplified model illustration of laser array with pointing deviation

在图 2 中, 分别为入射光束和衍射光束建立了两个不同的笛卡尔直角坐标系。在入射坐标系 $x''oz''$ 中, 以透镜的前焦面为 x'' 轴, 主光轴为 z'' 轴。对于衍射合成光, 沿着传播方向设置 z 轴, 观察平面上的 x 轴垂直于衍射光束的传播方向。 x'' 轴上分布着 $2M+1$ 个子光源, 原点处子光源编号为 0, 沿 x'' 轴的负方向到正方向的子光源编号依次为 $-M, \dots, -2, 1, 0, 1, 2, \dots, M$, 对应子光源的入射波长分别为 $\lambda_{-M}, \dots, \lambda_0, \dots, \lambda_M$, 相邻两个子光源的位置间隔为 Δp , 即编号为 M 的子光源距离原点的距离为 $p_m = m\Delta p$ 。

假设激光阵列每个独立子光源可近似为基模高斯光束, 且束腰位于 $z''=0$ 的平面, 束腰宽度为 w_0 , 振幅为 E_0 , 子光源 M 在平面 $z''=0$ 上的光场形式为标准高斯分布。而实际激光阵列的排布难以严格校准, 极易产生指向偏差, 导致整个阵列的输出光场修正为:

$$E_m(x_0, 0) = E_0 \exp \left[-\frac{[(x_0 - p_m) \cos \delta \theta_m]^2}{w_0^2} \right] \times \exp [ik(x_0 - p_m) \sin \delta \theta_m] \quad (1)$$

式中: $\delta \theta_m$ 是编号为 M 的激光器存在的指向偏转角, 附加相位因子是激光束偏转后相对于参考面 $z''=0$ 的额外光程差引起的。

多层电介质光栅被放置在透镜的后焦点上, 从阵列光源到光栅入射面之间光学系统 $ABCD$ 矩阵为:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z'' - f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: f 为转换透镜的焦距。将公式(1)代入柯林斯衍射积分公式^[12], 激光阵列发出的子光束经过 $ABCD$ 系统后, 可得到介质膜衍射光栅面上的光场分布:

$$E(x'', z'') = \sqrt{\frac{1}{i\lambda B}} \exp(ikz'') \int_{-\infty}^{\infty} E_m(x_0, 0) \times \exp \left[\frac{ik}{2B} (Ax_0^2 - 2x_0x'' + Dx''^2) dx_0 \right] = \sqrt{\frac{kw_0^2}{i(2B \cos^2 \delta \theta_m - ikAw_0^2)}} E_0 \exp(ikz'') \times \exp \left\{ \frac{ik}{2B} \left[\frac{1}{2B \cos^2 \delta \theta_m - ikAw_0^2} (2ABp_m^2 \cos^2 \delta \theta_m - 4Bp_mx'' \cos^2 \delta \theta_m + 2BDx''^2 \cos^2 \delta \theta_m + ikx''^2 w_0^2 (1 - AD) + iBk \sin \delta \theta_m w_0^2 (2Ap_m + \sin \delta \theta_m - 2x'')) \right] \right\} \quad (3)$$

式中: $k=2\pi/\lambda$ 。假设多层电介质光栅每个周期内的光波复振幅相等^[13], 则有 $x'' = nd \cos \alpha_0$, 其中, n 为光栅周期的序号数, d 为光栅常数, α_0 为中心光束 ($m=0$) 的入射角。因为已认定衍射光栅每个周期内入射光场的复振幅相等, 所以光栅面上光场复振幅仅与周期的序号数 n 有关, 记为 $E(n)$ 。在该面上 x'' 和 z'' 存在如下关系: $z'' = 2f - x'' \tan \theta = 2f + x'' m \Delta p / f$, 将上述关系及 $ABCD$ 传输矩阵代入公式(3)即可得到光栅入射面上的光场分布。

在一个周期内 x' 满足 $nd \cos \beta \leq x' \leq (n+1)d \cos \beta$, x' 平行于 x 轴, 垂直于衍射合成光的传输方向, β 为合成激光对应的衍射角。根据菲涅耳衍射积分公式,

第 j 个子光束在衍射方向横截面上的光场分布可表示为:

$$E_j(x, z) = \sum_{n=-N}^N \sqrt{-\frac{ik}{2\pi z}} \exp(ikz) \times \int_{nd\cos\beta}^{(n+1)d\cos\beta} E(n) \exp(i\phi) \times \exp\left[ik \frac{(x-x')^2}{2z} \right] dx' \quad (4)$$

式中: $2N+1$ 为光栅周期总数; ϕ 为衍射光栅对入射光场产生的近场相位调制。根据严格耦合波理论, 在多层电介质光栅表面没有热畸变的情况下, 可以认为近场等相位面是一个平面^[10]。根据非相干叠加的原理, 可将各路激光的光强分布直接数值相加, 得到合成激光的场强分布。最终再利用强度二阶矩的多点拟合对合成光束宽进行拟合, 可得 M^2 因子的计算公式^[14]:

$$w^2(z) = az^2 + bz + c, M^2 = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{ac - \frac{b^2}{4}} \quad (5)$$

2 光束特性的计算结果和分析

依据前文建立的指向偏差队列的光传输模型, 以五个子光源为例进行初步的模拟分析, 模拟组束系统所用参数取值如表 1 所示。

表 1 光谱合成系统指向偏差的仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of the spectral beam combining system with pointing deviation

Parameter	Value	Parameter	Value
w_0/mm	3	λ_0/mm	1 064
$\Delta p/\text{mm}$	5	$\alpha_0/(\text{°})$	36.25
f/mm	1	d/mm	1/960
Diffraction order q	+1	Deviation range $\delta\theta/(\text{°})$	0.005-0.05

光纤激光输出队列的工业加工、系统调试以及周边的环境扰动都会给光谱合成系统带来指向偏差, 假设整个激光队列的最大指向偏转角为 $\delta\theta$ 。由于扰动的随机性, 固可采用随机分布模型描述系统的指向偏差, 则第 M 个子光束的误差函数为:

$$\delta\theta_m = \delta\theta \cdot \text{random}(-1, 1)$$

式中: $\text{random}(-1, 1)$ 表示在区间 $(-1, 1)$ 内随机分布的扰动函数。针对最大指向偏差的扰动范围 $[0.005^\circ, 0.05^\circ]$, 对光谱合成系统的光束质量进行统计分析。为了避免统计结果的偶然性, 每一组指向偏

差的取值都被重复迭代了 1 000 次, 然后将所得的全部结果等区间划分成了 15 份, 以相对频率作为纵坐标, 画出对应的概率密度分布直方图。直方图的统计分布符合正态分布 $(f(i) \sim N(\mu_i, \sigma_i^2))$, 其中 μ_i, σ_i 分别为正态分布的均值和标准差。指向偏差扰动范围内的两个最值 0.005° 和 0.05° 被分别进行采样, 展示出其对应的统计结果, 如图 3(a) 和 (b) 所示。如果合成系统的最大指向偏转角为 0.005° , 则输出合成光的 M^2 因子会大概率落在 (1.23 ± 0.11) ; 当输出激光阵列指向偏差进一步增长到 0.05° , 合成激光的 M^2 因子会增加到 (6.49 ± 1.73) 。

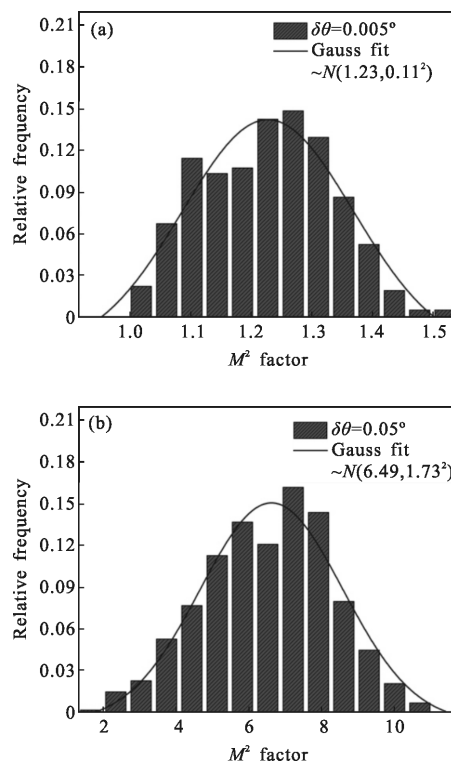


图 3 光纤激光阵列最大指向偏转角分别为(a)0.005°和(b)0.05°时合成光束 M^2 因子的统计分布

Fig.3 Statistical distribution of the combined beam M^2 factor when the maximum deflection angle of the fiber laser array are (a) 0.005° and (b) 0.05°

为了直观地显示 M^2 因子的变化趋势, 正态分布的均值被作为中心点, 标准差作为上下波动的误差区间, 描绘整个扰动范围 M^2 因子的变化曲线如图 4 所示。从图中可以看出, 随着指向偏转角的不增加, 对应的 M^2 均值和标准差都会随之同时增加, 表明合成系统的光束质量在持续不断的裂化。

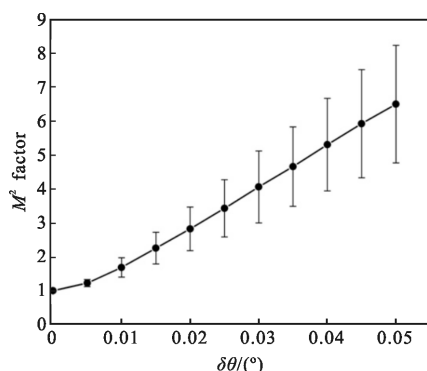


图 4 5 路激光阵列指向偏差均匀分布的 M^2 因子退化曲线

Fig.4 Degradation curve of the M^2 factor with uniform distribution of the pointing deviation of 5-fiber lasers array

为进一步实现合成激光功率的提升,大规模阵列扩展是一个很有潜力的方案,这样能有效减弱对单路窄线宽、高光束质量激光的研发需求,努力实现合成激光亮度的定标放大。因此需要进一步讨论在路数扩展时,激光阵列指向偏差对合成激光光束质量的影响。这里将前文的 5 路子光束一直扩展到 50 路,考虑某一固定指向偏转角($\delta\theta=0.025^\circ$)对光谱合成系统的影响,如图 5 所示。

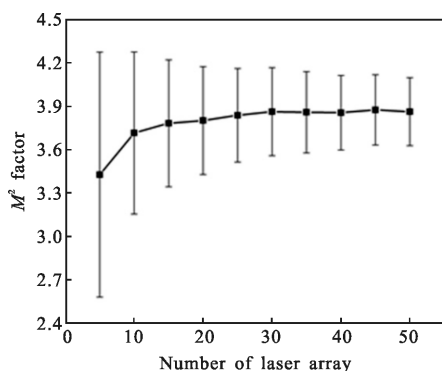


图 5 激光阵列规模扩展 M^2 因子统计结果的变化趋势 ($\delta\theta=0.025^\circ$)

Fig.5 Variation tendency of statistical M^2 factor with the expansion of the scale of laser array($\delta\theta=0.025^\circ$)

从图 5 中可以看出,随着阵列规模的不断扩展, M^2 的均值先缓慢增加最后趋于稳定,而标准差却逐渐减小最后也同样会趋于稳定。这些变化趋势表明,随着激光阵列规模的不断扩展,指向偏差对合成系统光束质量的影响不会持续恶化,而是逐渐趋于恒定,只受指向偏转角数值($\delta\theta$)的影响,在一定程度上这也符合大数据统计的规律。进一步聚焦图 5 的变

化曲线,当单路激光的阵列规模扩展至 30 路时,合成系统光束质量的变化逐渐稳定于 (3.85 ± 0.28) 。最终以合成系统光束质量变化趋于稳定时的阵列规模为参照,对大规模激光阵列的指向偏差进行统计分析,细化 30 路子光束合成光 M^2 因子随指向偏转角的变化规律,如图 6 所示。二阶多项式 $M_0^2=10^2\times(7.23\delta\theta^2+0.93\delta\theta)+1.0$ 被用作经验公式来拟合光束质量随最大指向偏转角的变化规律,为构建实际的高功率、高光束质量光谱合成系统提供帮助。

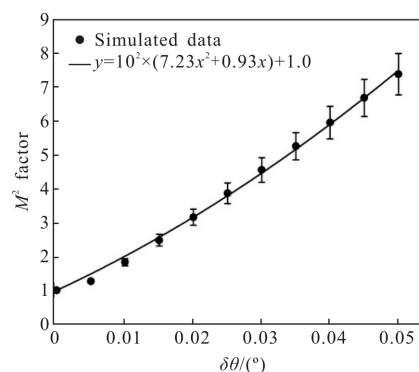


图 6 30 路激光阵列 M^2 因子退化的拟合曲线

Fig.6 Fitting curve of degraded M^2 factor of 30-fiber lasers array

3 结论

文中依据开环式密集阵列的光谱合成原理图,建立了基于激光阵列指向偏差的光传输模型,利用衍射积分方法推导出各单路激光经过谱合成系统后的光强分布,进而依据非相干叠加原理获得合成光的场强分布,并计算出对应的光束质量。分析结果表明:当激光阵列的最大偏转角仅为 0.05° 时,合成系统的光束质量就会退化到 (6.49 ± 1.73) 。因此,激光阵列的指向偏差会极大影响谱合成系统的光束质量,当阵列规模逐步扩展至 30 路时,光束质量的统计结果(均值和方差)开始逐步趋于稳定。采用高斯光场的光纤激光阵列分布,可得到大规模阵列光谱合成系统中光束质量随指向偏差的变化规律 ($M_0^2=10^2\times(7.23\delta\theta^2+0.93\delta\theta)+1.0$)。这些分析将便于优化设计光谱合成系统而获得更高功率和更好光束质量的激光输出。

参考文献:

[1] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of

- the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Opt Express*, 2008, 16 (17): 13240-13266.
- [2] Bochove E. Theory of spectral beam combining of fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38 (5): 432-445.
- [3] Augst S J, Ranka J K, Fan T Y, et al. Beam combining of ytterbium fiber amplifiers (Invited) [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(8): 1707-1715.
- [4] Klingebiel S, Röser F, Ortac B, et al. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers with high efficiency [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(8): 1716-1720.
- [5] Loftus T H, Thomas A M, Hoffman P R, et al. Spectrally beam-combined fiber lasers for high-average-power applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 487-497.
- [6] Daneu V, Sanchez A, Fan T Y, et al. Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity [J]. *Opt Lett*, 2000, 25(6): 405-407.
- [7] Zheng Ye, Yang Yifeng, Zhao Xiang, et al. Research on high power spectral beam combining technology of fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201002. (in Chinese)
- [8] Wu Z, Zhong Z, Yang L, et al. Beam properties in a spectral beam combining system based on trapezoidal multilayer dielectric gratings [J]. *J Opt Soc Am B*, 2016, 33 (2): 171-179.
- [9] Yang L, Wu Z, Zhang B. Influence of thermal deformation of a multilayer dielectric grating on a spectrally combined beam [J]. *Appl Opt*, 2016, 55(32): 9091-9100.
- [10] Li L, Jin Y, Kong F, et al. Beam modulation due to thermal deformation of grating in a spectral beam combining system [J]. *Appl Opt*, 2017, 56(19): 5511-5519.
- [11] Wu Zhen, Zhong Zheqiang, Yang Lei, et al. Analysis of characteristics of combined beam in spectral beam combining system based on multilayer dielectric grating [J]. *Acta Phys Sin*, 2016, 65(5): 0542051. (in Chinese)
- [12] Collins S A. Lens-systems diffraction integral written in terms of matrix optics [J]. *J Opt Soc Am*, 1970, 60: 1168-1177.
- [13] Zhang Yan, Zhang Bin, Zhu Songjun. Analysis of the property of the beam after spectral beam combining [J]. *Acta Phys Sin*, 2007, 56(8): 4590-4595 (in Chinese)
- [14] Siegman A E. How to (Maybe) measure laser beam quality [C]//*Diode Pumped Solid State Lasers: Applications and Issues*, 1998, 17: 184-199.