

文章编号: 1001-4322(2008)05-0739-05

光栅角色散和制作误差对谱合成光束特性的影响*

阴素芹, 张 彬, 潘雷雷

(四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

摘 要: 考虑光束的发散、光栅角色散以及光栅制作过程中存在的刻槽倾角误差,应用光线追迹方法,建立了激光束入射到光栅时相位变化的计算模型。利用衍射积分方法和光束非相干叠加原理,推导出阵列光源各子光束经谱合成系统后合成光束的光强分布解析表达式。在此基础上,利用强度二阶矩方法,计算了合成光束的 M^2 因子,并定量分析了光栅角色散和光栅刻槽倾角误差对谱合成光束特性的影响。研究表明:光栅角色散和光栅刻槽倾角误差的存在均会导致谱合成光束的光束质量变差,光栅刻槽倾角误差的影响比光栅角色散的影响更为明显。

关键词: 光束谱合成; 光栅角色散; 光栅刻槽倾角误差; 光束质量

中图分类号: O436.1 **文献标识码:** A

随着激光应用对高功率激光器的需求,光束的合成已成为激光技术中急待解决的关键技术之一^[1-2]。光束谱合成技术作为典型的非相干合成技术,其激光器单元可以独立调节而不需对其相位、偏振态以及振幅进行控制,从而可实现非相干的功率标定^[3-4]。此外,光束谱合成技术使得合成光束的光强分布不随合成单元数目而改变^[5],且在远场和近场均能保持较好的重叠,这一优势拓展了该技术的实际应用领域。本文在考虑光栅角色散以及光栅制作过程中存在的刻槽倾角误差的情况下,建立了光束谱合成系统光束特性研究的理论模型,并详细讨论了光栅角色散和光栅刻槽倾角误差对谱合成光束特性的影响。

1 计算模型

光束谱合成的原理如图 1 所示。谱合成系统主要由光源阵列、变换透镜、闪耀光栅以及输出耦合镜组成,阵列光源和闪耀光栅分别处于变换透镜的前后焦点。从阵列光源不同单元发出的波长略微不同的子光束经透镜变换为不同倾角的子光束入射到闪耀光栅上,再利用闪耀光栅将这些波长和入射角不同的子光束合成为一束以相同角度输出的光束,从而实现功率合成,并保持较好的光束质量。

在透镜前焦平面上建立 x'' 轴并以透镜光轴为 z'' 轴建立坐标系。假设光源为激光阵列,各阵列单元按其波长长短从上到下依次用 $\lambda_M, \dots, \lambda_1, \lambda_0, \lambda_{-1}, \dots, \lambda_{-M}$ 表示,共有 $2M+1$ 个阵列单元,每个子光源中心到透镜的距离为 f 。为了讨论方便,假设各子光束可近似为基模高斯光束,其束腰位于 $z''=0$ 平面,束腰宽度为 ω_0 ,则编号为 j 的子光束在阵列面上的光场分布为

$$E_j(x_0, 0) = \exp[-(x_0 - p_j)^2 / \omega_0^2] \quad (j = -M, \dots, -1, 0, 1, \dots, M) \quad (1)$$

式中: $p_j = j\Delta p$, 相邻子光源的间距为 Δp 。

将式(1)代入衍射积分公式,可推导出阵列面发出的子光束经过从光源到闪耀光栅入射面间光学系统传输后,在光栅面上(x'', z'')处的光场分布为^[6]

$$E_j(x'', z'') = \sqrt{\frac{ik\omega_0^2}{2B - ikA\omega_0^2}} \exp(ikz'') \exp\left\{ \frac{ik}{2B} \left[\frac{2ABp_j^2 - 4Bp_jx'' + 2BDx''^2 + ikx''^2\omega_0^2(1 - AD)}{2B - ikA\omega_0^2} \right] \right\} \quad (2)$$

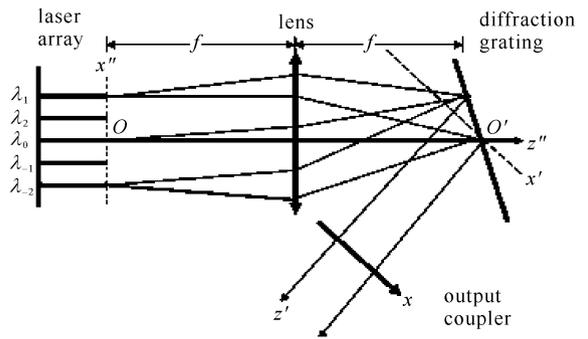


Fig. 1 Spectral beam combining system

图 1 光束谱合成系统示意图

* 收稿日期:2007-11-07; 修订日期:2008-01-28

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-05-0784)

作者简介:阴素芹(1982—),女,硕士研究生,从事激光物理与技术方面的研究; yin-su-qin@163.com。

联系作者:张 彬(1969—), zhangbinff@sohu.com。

式中: $z'' = 2f + x''j\Delta p/f$; $x'' = nd\cos\alpha$, α 为光束入射到光栅的入射角; A, B, C, D 分别为光源到闪耀光栅入射面的传输矩阵元, 可表示为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (2f - z'')/f & f \\ -1/f & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

在光束谱合成方案中, 反射式闪耀光栅实质是相位元件。由阵列光源发出的有一定线宽的子光束入射到光栅面时, 由于光栅的角色散特性, 经光栅衍射后的出射光束会有一定的角展宽。图 2 和图 3 分别给出了考虑了光栅角色散后槽内光程差和槽间光程差的示意图。图中, 假设以衍射方向为出射光束的传输方向 z' 轴, 接收屏 x 垂直于光束传输方向 z' 轴建立出射光束的坐标系。入射角和衍射角分别为 α 和 β , 闪耀光栅周期为 d , 刻槽宽度为 a , 刻槽倾角为 γ_0 , N_g 表示光栅法线, N_c 为光栅槽面的法线。

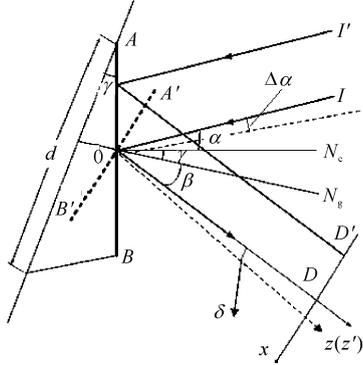


Fig. 2 Optical path differences in groove

图 2 槽内光程差示意图

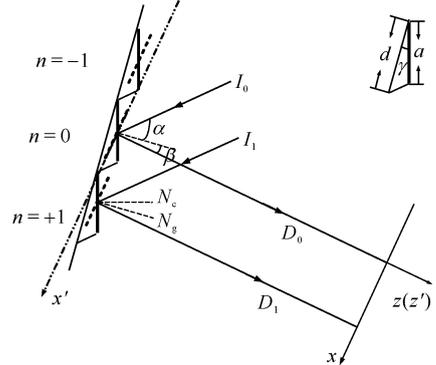


Fig. 3 Optical path differences between grooves

图 3 槽间光程差示意图

考虑一线宽为 $\Delta\lambda$ 的基模高斯光束入射到闪耀光栅的情况^[7], 假设在线宽范围内光谱是均匀的, 由光栅的角色散公式可得到线宽引起的衍射光束角展宽为

$$\delta = \Delta\lambda/d\cos\beta \quad (4)$$

于是, 光栅角色散引起的光程差为

$$\Delta_e = z(1/\cos\delta - 1) \quad (5)$$

用于大功率激光器的金属基底闪耀光栅必须为原刻光栅^[8], 原刻光栅在加工过程中存在光栅刻槽倾角误差。假设光栅刻槽倾角的最大误差范围为 $\Delta\gamma$, 光栅刻槽倾角的误差采用均匀随机分布模型, 则第 n 个光栅槽面引起的光栅刻槽倾角的误差为

$$\Delta\gamma_n = \Delta\gamma\text{random}(-1, 1) \quad (6)$$

于是, 第 n 个光栅刻槽倾角可表示为

$$\gamma_n = \gamma_0 + \Delta\gamma_n \quad (7)$$

式中: γ_0 为无误差时的光栅刻槽倾角。

在闪耀光栅面处由于光束发散引起光束入射角的展宽, 假设它与平行光入射情况存在的偏差为 $\Delta\alpha$, 则光束发散引起的光程差为

$$\eta = [(x' - nd\cos\beta)\sin(\alpha - \gamma_n)/\cos(\gamma_n + \beta)][1/\cos(\Delta\alpha) - 1] \quad (8)$$

利用光线追迹方法, 将由光束的发散、光栅角色散和光栅刻槽倾角误差引起的光程差引入到槽内光程差和槽间光程差中, 通过定量分析考虑光束的发散、光栅角色散和光栅刻槽倾角误差情况下光栅槽内和槽间光程差, 即可得到光束经光栅衍射后的相位变化。

按照与文献[6]相同的方法, 在考虑光束的发散、光栅角色散和光栅刻槽倾角误差的情况下, 一束倾斜的光束经光栅衍射后造成的槽内光程差 Δ_1 和槽间光程差 Δ_2 可分别表示为

$$\Delta_1 = (x' - nd\cos\beta) \frac{\sin(\alpha - \gamma_n) - \sin(\gamma_n + \beta)}{\cos(\gamma_n + \beta)} + z\left(\frac{1}{\cos\delta} - 1\right) + (x' - nd\cos\beta) \frac{\sin(\alpha - \gamma_n)}{\cos(\gamma_n + \beta)} \left[\frac{1}{\cos(\Delta\alpha)} - 1\right] \quad (9)$$

$$\Delta_2 = nd\sin\alpha \quad (10)$$

于是,在考虑光束的发散、光栅角色散和光栅刻槽倾角误差的情况下,可得到光束经光栅衍射后的相位变化

$$\varphi = k(\Delta_1 + \Delta_2) = k[\Delta_0 + C(x' - \Delta_x) + \Delta_\varepsilon] \quad (11)$$

式中:波数 $k = 2\pi/\lambda$; $\Delta_0 = nd \sin\alpha$; $\Delta_x = nd \cos\beta$; $C = [\sin(\alpha - \gamma_n)(1/\cos\Delta\alpha) - \sin(\gamma_n + \beta)]/\cos(\gamma_n + \beta)$; $n = -N, \dots, -1, 0, 1, \dots, N$, N 为光栅刻槽数; $[\Delta_x - (a/2)\cos(\gamma_n + \beta)] \leq x' \leq [\Delta_x + (a/2)\cos(\gamma_n + \beta)]$ 。

将式(2),(3)和(11)代入衍射积分公式^[9],计算得到 j 个子光束在衍射屏上 x 处的光场分布为

$$E_j(x, z) = \sum_{n=-N}^N \sqrt{-\frac{ik}{2\pi z}} \exp(ikz) \int_{\Delta_x - (a/2)\cos(\gamma_n + \beta)}^{\Delta_x + (a/2)\cos(\gamma_n + \beta)} E_j(x'', z'') \exp(i\varphi) \exp\left[ik \frac{(x - x')^2}{2z}\right] dx' =$$

$$\sum_{n=-N}^N \left(-\frac{1}{2}\right) \sqrt{-\frac{i\pi f^2 \omega_0^2}{\lambda f^3 + i\pi nd \cos\alpha p_j \omega_0^2}} \exp\left[-\frac{i\pi(nd \cos\alpha p_j^3 - 4f^4)}{\lambda f^3 + i\pi nd \cos\alpha p_j \omega_0^2}\right] \times$$

$$\exp\left\{\left(-\frac{\pi}{\lambda f}\right) \left[\frac{\pi nd \cos\alpha \omega_0^2 [4f^2 p_j + nd \cos\alpha (f^2 + 2p_j^2)]}{\lambda f^3 + i\pi nd \cos\alpha p_j \omega_0^2}\right]\right\} \exp\left\{ik \left[\left(1 - \frac{C^2}{2}\right)z + \Delta_0 + \Delta_\varepsilon + C(x - \Delta_x)\right]\right\} \times$$

$$\left\{\operatorname{erf}\left[\left(\frac{i-1}{4}\right) \sqrt{\frac{k}{z}} [a \cos(\gamma_n + \beta) + 2(x - \Delta_x - Cz)]\right] + \operatorname{erf}\left[\left(\frac{i-1}{4}\right) \sqrt{\frac{k}{z}} [a \cos(\gamma_n + \beta) - 2(x - \Delta_x - Cz)]\right]\right\} \quad (12)$$

式中: erf 表示误差函数。

于是,根据非相干叠加原理,可得到合成光束的光强分布为

$$I(x, z) = \sum_{j=-M}^M |E_j(x, z)|^2 \quad (13)$$

利用强度二阶矩定义,采用多点拟合法对合成光束的束宽进行双曲线拟合,可计算得到 x 方向的 M^2 因子为^[10]

$$D_x^2(z) = Az^2 + Bz + C, \quad M_x^2 = (\pi/4\lambda) \sqrt{AC - B^2/4} \quad (14)$$

2 光栅角色散对谱合成光束特性的影响

根据建立的光束谱合成传输模型,以5个子光束为例进行了模拟分析。计算所用参数为:子光束的束宽 $\omega_0 = 100 \mu\text{m}$,光栅线密度 $l = 600/\text{mm}$,光栅刻槽数 $N = 1000$,光栅刻槽倾角 $\gamma_0 = 15.8^\circ$,中心光束相对于光栅法线的夹角 $\alpha_0 = 27^\circ$,中心单元的波长 λ_0 约为 808.7 nm 。

图4给出了未考虑光栅角色散和考虑光栅角色散情况下,合成光束直径平方 D^2 随传输距离 z 的变化。可以看出,与未考虑光栅角色散的情况相比,考虑光栅角色散后,合成光束在近场的光斑尺寸变化不太明显,然而,随着传输距离的增大,光斑尺寸变化将逐渐变大,合成光束的发散角增大,从而使光栅角色散导致合成光束质量变差。

针对本文的数值计算例,对于未考虑光栅角色散的情况,当中心波长 $\lambda_0 = 808.7 \text{ nm}$ 时,经计算得到的合成光束束宽双曲线拟合曲线系数为 $A = 1.3242 \times 10^{-6}$, $B = 3.4114 \times 10^{-12}$, $C = 8.2072 \times 10^{-7}$,计算出合成光束的 $M^2 = 1.0$ 。考虑光栅角色散后,当 $\Delta\lambda = 3 \text{ nm}$ 时,经计算得到拟合曲线系数为 $A' = 1.5244 \times 10^{-6}$, $B' = 3.4114 \times 10^{-12}$, $C' = 8.3072 \times 10^{-7}$,计算出合成光束的 $M^2 = 1.1$ 。

3 光栅制作误差对谱合成光束特性的影响

光栅作为光束谱合成中的重要元件,其类型选择和性能将直接影响整个谱合成系统的性能。在光束谱合成中,一般要求针对合成光束的中心波长选择光栅的闪耀波长,此外,还要求闪耀光栅具有高衍射效率、高分辨率和高质量的面形结构。此外,针对不同工作波长的激光阵列,在实际谱合成系统中对闪耀光栅的材质、制作

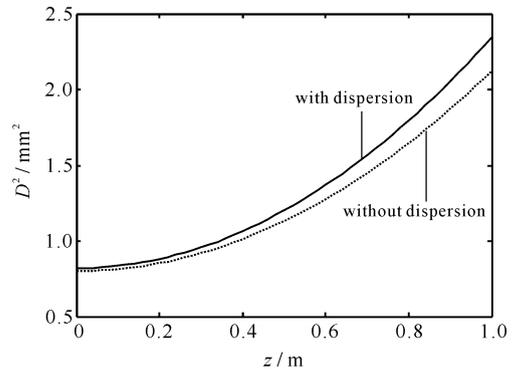


Fig. 4 Variations of the square of the diameter of the combined beam with the propagation distance

图4 合成光束直径平方随传输距离的变化

工艺等还有不同要求。

对于大功率红外激光阵列系统,必须采用金属基底原刻光栅。由于刻划光栅要经过毛坯加工→蒸镀(或电镀)金属膜(铬膜+铝膜)→光栅刻划→效率检验→附着保护膜等复杂的工艺过程^[8],光栅在加工过程中存在容易造成随机误差(主要是光栅刻槽倾角的误差),从而对谱合成光束的合成效率和光束质量均造成影响。本文主要从理论上分析光栅刻槽倾角误差对谱合成光束质量的影响。

图 5 给出了不同光栅刻槽倾角误差对合成光束的横向光强分布的影响。由图 5 可以看出,与无光栅刻槽倾角误差的理想情况相比,光栅刻槽倾角的误差对合成光束的光强分布影响较大,并且,随着刻槽角度误差的增大,合成光束的峰值光强明显减小,光斑尺寸增大,光强分布出现随机起伏。

图 6 给出了不同光栅刻槽倾角的误差情况下,合成光束直径随传输距离的变化。由图 6 可以看出,与无光栅刻槽倾角误差的情况相比,随着光栅刻槽倾角误差的增大,合成光束的光斑尺寸和发散角均明显增大,从而导致光束质量明显变差。

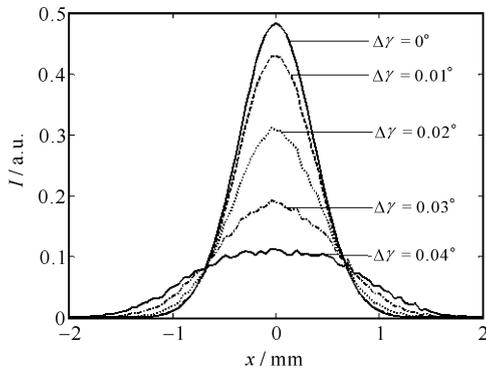


Fig. 5 Transverse intensity distributions at $z=1$ m for different errors of grating groove angle

图 5 不同的光栅刻槽倾角误差时,在 $z=1$ m 处的横向光强分布

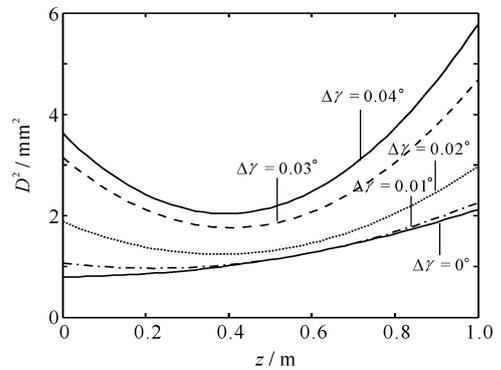


Fig. 6 Variations of square of diameters of combined beams with propagation distance for different errors of grating groove angle

图 6 光栅刻槽倾角误差不同时,光束直径平方随传输距离的变化

图 7 给出了不同光栅刻槽倾角误差的情况下,合成光束的远场发散角随光栅刻槽倾角误差的变化。可以看出,合成光束的远场发散角随着光栅刻槽倾角误差的增大而明显增大。

图 8 给出了合成光束的 M^2 因子随光栅刻槽倾角误差的变化。从图 8 可以看出,合成光束的 M^2 随着光栅刻槽倾角误差的增大而明显增大,光栅刻槽倾角误差将导致合成光束的光束质量明显变差。

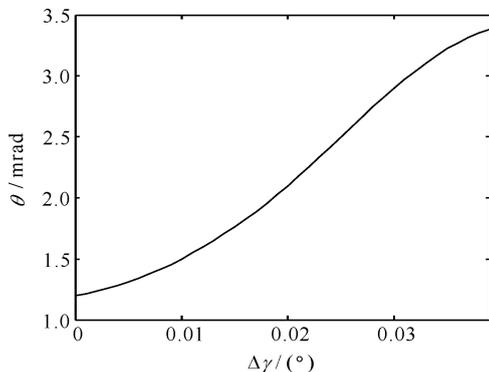


Fig. 7 Variations of far-field divergence angle of combined beam with different errors of grating groove angle

图 7 合成光束的远场发散角随光栅刻槽倾角误差的变化

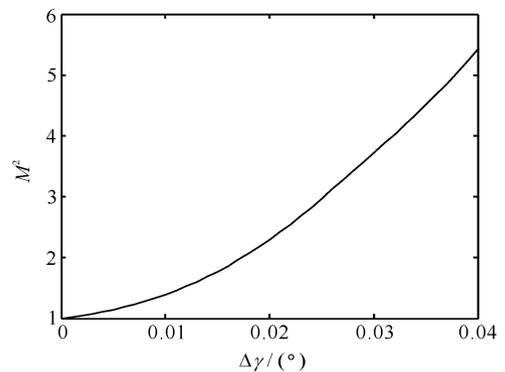


Fig. 8 Variations of the M^2 -factor of combined beam with different errors of grating groove angle

图 8 合成光束的 M^2 因子随光栅刻槽倾角误差的变化

此外,进一步的数值计算结果表明,光束的发散对谱合成光束质量的影响很小,几乎可以忽略。这主要是由于谱合成系统的特殊结构,即光源阵列与闪耀光栅分别位于变换透镜的前后焦平面,导致闪耀光栅入射面处各子光束的发散角很小的缘故。

4 结 论

本文将光束的发散、光栅角色散和光栅刻槽倾角误差引起的光程差引入到光栅槽内光程差和槽间光程差中,建立了激光束入射到闪耀光栅时相位变化的计算模型,给出了阵列光源各子光束经谱合成系统的传输公

式。在此基础上,利用强度二阶矩方法,计算了合成光束的 M^2 因子,并对光栅角色散以及光栅刻槽倾角误差对谱合成光束特性的影响进行了详细分析。研究表明,光栅角色散以及光栅刻槽倾角误差均会造成谱合成光束的光束质量变差,其中,光栅角色散的影响相对较小,而光栅刻槽倾角误差的影响则相对较大。因此,在谱合成系统中,必须采用加工质量很高的闪耀光栅,以减小光栅加工误差对光束质量的影响,从而保证输出的合成光束具有很好的光束质量。

参考文献:

- [1] 李艳红,任向军. 光束合成技术研究及应用[J]. 激光与光电子进展, 2002, **39**(7):22-25. (Li Y H, Ren X J. Research and application of light beam combination. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2002, **39**(7):22-25)
- [2] 徐毓光. 多束激光的合成和传输[J]. 中国激光, 1991, **18**(2):98-99. (Xu Y G. Composition and propagation of four laser beams. *Chinese Journal of Lasers*, 1991, **18**(2):98-99)
- [3] Salet P, Lucas-Leclin G, Roger G, et al. Spectral beam combining of a 980-nm laser array for EDFA pumping[J]. *Quantum Electronics and Laser Science Conference*, 2005, **2**:1313-1315.
- [4] Salet P, Lucas-Leclin G, Roger G, et al. Spectral beam combining of a single-mode 980-nm laser array for pumping of erbium-doped fiber amplifiers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(4):738-740.
- [5] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, **11**(3):567-577.
- [6] 张艳,张彬,祝颂军. 谱合成光束特性的模拟分析[J]. 物理学报, 2007, **56**(8):4590-4595. (Zhang Y, Zhang B, Zhu S J. Analysis of property of the beam after spectral beam combining. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(8):4590-4595)
- [7] 李立波,楼祺洪. 光纤激光器的谱叠加技术[J]. 激光与光电子进展, 2006, **43**(10):37-41. (Li L B, Lou Q H. Spectral combining techniques of fiber lasers. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(10):37-41)
- [8] 巴音贺希格,高键翔,齐向东,等. 9.77 μm 激光器零级耦合输出选频振荡光栅的设计和研制[J]. 中国激光, 2005, **32**(3):301-305. (Bayan-heshig, Gao J X, Qi X D, et al. Design and manufacture for select frequent oscillation grating in the zero-order coupling output of 9.77 μm laser. *China Journal of Lasers*, 2005, **32**(3):301-305)
- [9] 吕百达. 激光光学[M]. 北京:高等教育出版, 2003. (Lü B D. Laser optics. Beijing: Higher Education Press, 2003)
- [10] 赵长明. 激光光束质量参数测量的试验研究[J]. 激光技术, 2000, **24**(6):341-344. (Zhao C M. Investigation on the experimental measurement of laser beam quality. *Laser Technology*, 2000, **24**(6):341-344)

Effects of angle dispersion and fabrication errors of gratings on beam characteristics of spectral combining systems

YIN Su-qin, ZHANG Bin, PAN Lei-lei

(College of Electronics Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Considering the beam divergence, the angle dispersion and the fabrication errors of groove angle of the grating and using ray tracing method, the calculation model for the phase change of the laser beam obliquely incident on the grating has been built up. Then, making use of the diffraction integral method and the principle of incoherent superposition of laser beams, the analytical expression for the output intensity distribution of each emitter after passing through the spectral beam combining system has been derived. Finally, according to the intensity second-order moments method, the M^2 -factor of the combined beam has been calculated and the effects of the angle dispersion and the fabrication errors of grating groove angle on the beam characteristics of the spectral combining system have been analyzed quantitatively. The results show that the angle dispersion and the fabrication errors of grating groove angle will both degrade the beam quality of combined beam, and the effect of the latter on the beam quality of combined beam is more obvious than that of the former.

Key words: Spectral beam combining; Angle dispersion of grating; Error of grating groove angle; Beam quality