

掺 Yb 光纤激光器阵列谱合成系统的光束传输模型及光束特性分析*

潘雷雷 张彬† 阴素芹 张艳

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

(2008 年 8 月 21 日收到, 2009 年 3 月 18 日收到修改稿)

建立了由掺 Yb 光纤激光器阵列、变换透镜、闪耀光栅和输出耦合镜组成的光束谱合成系统的光束传输模型。在考虑光栅角色散、光栅刻槽倾角误差和光栅衍射效率情况下, 利用光线追迹法、衍射积分方法、光束非相干叠加原理和强度二阶矩方法, 推导出高斯光束非平行倾斜入射到闪耀光栅的相位变化公式以及谱合成光束的光强分布解析表达式。分析了高斯光束非平行倾斜入射到光栅后, 光栅角色散、光栅衍射效率和光栅刻槽倾角误差对掺 Yb 光纤激光器谱合成系统输出光束特性的影响。研究表明, 谱合成光束具有与单根光纤激光器几乎相同的光束质量; 光栅角色散对合成光束特性的影响可忽略, 随着光栅刻槽倾角误差的增大, 谱合成光束的光束质量明显变差; 当光栅刻槽倾角误差较大时, 必须考虑光栅衍射效率对合成光束特性的影响。

关键词: 掺 Yb 光纤激光器, 非平行倾斜入射, 光束谱合成, 光束质量

PACC: 4255N, 2410H

1. 引 言

掺 Yb 光纤激光器由于其具有光束质量好、效率高、易于散热和易于实现高功率等特点, 近年来发展迅速, 并在高精度激光加工、激光雷达、光通信等领域具有广泛的应用价值^[1-3]。然而, 由于受到非线性效应、热负荷、光纤损伤的限制, 提高单个光纤激光器的输出功率也面临着巨大的挑战^[4]。近年来, 国内外许多学者^[5-7]提出了光束合成的方法和技术, 通过将多个光纤激光器的光束进行合成, 从而获得成倍提高的输出功率, 并使合成光束保持与单个光纤激光器接近的光束质量。光束谱合成作为典型的非相干合成技术, 采用了色散元件对波长略微不同的光束进行合成, 从而实现高的输出功率和好的光束质量。与相干合成相比, 谱合成只需要适当地对阵列单元的波长进行控制, 而不需要对阵列单元输出激光的相位和偏振态进行控制, 因而, 具有更高的可靠性和实用意义^[4-8]。

在现有的光纤激光器谱合成系统中, 通常认为高斯光束经透镜变换后平行倾斜入射到闪耀光栅

上^[4-11], 而在实际工作中, 由于光纤激光器输出端的光束尺寸很小(与纤芯尺寸相当), 即使在输出光束的 $M^2 = 1$ 的情况下, 光束的远场发散角也会很大。而且在谱合成方案中, 掺 Yb 光纤激光器阵列和闪耀光栅应分别位于变换透镜的前后焦面, 如果谱合成系统参数选取不合理, 从而使高斯光束存在一定的焦移, 则经透镜变换后入射到闪耀光栅上的高斯光束与平行光入射的情况也会存在偏差。此外, 由于用于高功率条件下的金属基底闪耀光栅通常为原刻光栅, 而原刻光栅在加工过程中不可避免地存在刻槽倾角误差, 并会出现零级衍射面。为此, 本文在综合考虑了光栅角色散、光栅刻槽倾角误差和光栅衍射效率的情况下, 推导出高斯光束非平行倾斜入射到光栅的相位变化公式以及谱合成光束的光强分布解析表达式, 并详细讨论了谱合成系统参数对掺 Yb 光纤激光器谱合成系统输出光束特性的影响。

2. 光纤激光器阵列谱合成系统的光束传输模型

光纤激光器阵列谱合成系统通常由掺 Yb 光纤

* 教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-05-0784)资助的课题。

† 通讯联系人, E-mail: zhangbinff@sohu.com

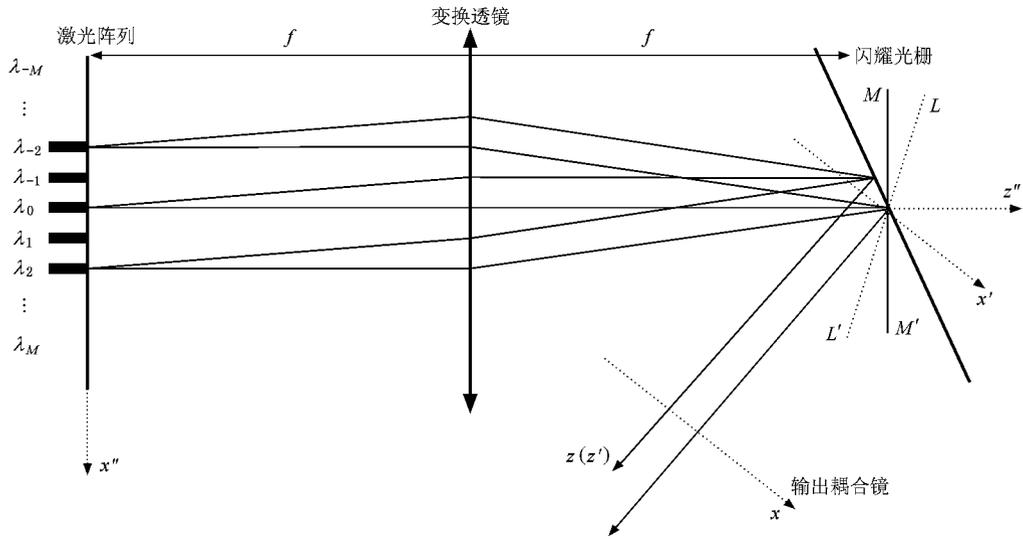


图 1 光纤激光器谱合成系统的原理图

激光器、变换透镜、闪耀光栅和输出耦合镜组成^[9-11]掺 Yb 光纤激光器阵列和闪耀光栅分别处于变换透镜的前后焦面,如图 1 所示。

首先,利用外腔式光纤激光器谱合成系统中色散元件的选频作用,使光纤激光器阵列的不同单元输出具有略微不同波长的子光束,然后,具有不同空间位置的子光束经变换透镜后变成具有不同倾角的子光束入射到闪耀光栅上,最后,利用闪耀光栅将不同波长、不同入射角的子光束以相同的衍射角出射,使输出耦合镜输出的合成光束在近场和远场均保持重叠,从而实现功率合成,并获得较好的光束质量。

2.1. 闪耀光栅的入射光波场模型

假设共有 $2M + 1$ 个光纤激光器位于透镜的前

焦面上,透镜前焦平面为 x'' 轴,透镜光轴为 z'' 轴,沿 x'' 轴从上到下依次排列为 $\lambda_{-M}, \dots, \lambda_{-2}, \lambda_{-1}, \lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M$,如图 1 所示.对于光纤激光器而言,其输出激光束可近似采用基模高斯光束来描述.于是第 j 个子光源在 $z'' = 0$ 处的光场分布为

$$E_j(x_0, 0) = \exp\left(-\frac{(x_0 - p_j)^2}{w_0^2}\right), \quad (1)$$

其中 w_0 为束腰宽度, $p_j = j\Delta p$ 为第 j 个子光源的中心坐标, Δp 为相邻两个子光源的间距。

利用衍射积分公式^[12],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 ABCD 光学系统传输后,在光栅面上(x'' , z'')处的光场分布为^[13]

$$E_j(x'', z'') = \sqrt{\frac{ikw_0^2}{2B - ikAw_0^2}} \exp(ikz'') \times \exp\left[\frac{ik}{2B} \left(\frac{2ABp_j^2 - 4Bp_jx'' + 2BDx''^2 + ikx''^2w_0^2(1 - AD)}{2B - ikAw_0^2} \right)\right]. \quad (2)$$

(2) 式中,从光源到闪耀光栅入射面之间的光学系统的 ABCD 矩阵为

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

假设闪耀光栅每个槽面上入射光波的复振幅相

等^[14],则整个光栅上入射光波的复振幅只与槽面位置 n 有关, x'' 与 z'' 的关系为

$$z'' = 2f + \frac{x''p_j}{f}. \quad (4)$$

槽序号与 x'' 之间的关系为

$$x'' = nd \cos \alpha. \quad (5)$$

2.2. 谱合成光束的传输公式

利用光线追迹方法,将由非平行光束入射到闪耀光栅、光栅角色散和光栅刻槽倾角误差引起的相位变化,用槽间光程差和槽内光程差来表示;再利用衍射积分方法计算出经光栅衍射后在接收屏上的光场分布.图 2 和图 3 分别为考虑光栅角色散后,非平行光入射到闪耀光栅引起的槽内光程差和槽间光程差的示意图.图 2 和图 3 中,闪耀光栅周期为 d ,刻槽宽度为 a ,刻槽倾角为 γ , N_g 为光栅法线, N_c 为光栅槽面法线,入射角和衍射角分别为 α 和 β ,光束发散引起的入射角度偏差为 ε ,其中以衍射角 β 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,假设每一个槽面都存在一个等效的虚拟槽面,该方向沿 x' 轴, $A'B'$ 为虚拟槽面, AB 为实际槽面^[13].

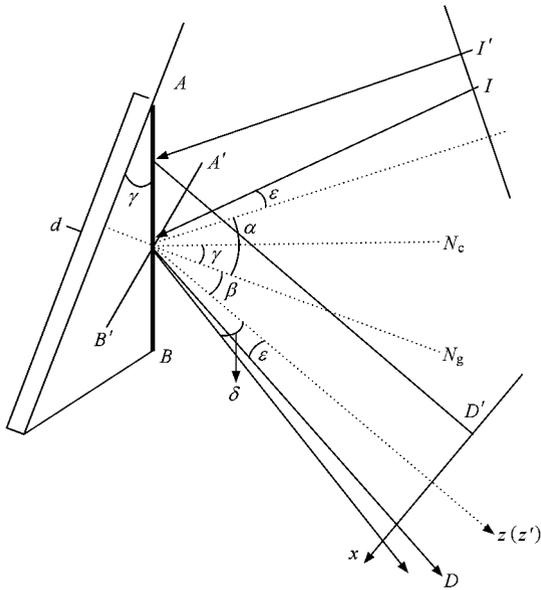


图 2 槽内光程差示意图

当光谱分布均匀的线宽为 $\Delta\lambda$ 的高斯光束入射到闪耀光栅时,由光栅的角色散公式可得到由线宽引起的衍射光束角展宽为^[15]

$$\delta = \frac{\Delta\lambda}{d \cos\beta} \quad (6)$$

(6) 式中 $\Delta\lambda = w_0 d \cos\alpha / f$. 由光栅角色散引起的光程差为

$$\Delta_\delta = z \left(\frac{1}{\cos\delta} - 1 \right) \quad (7)$$

对于高功率激光系统,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)

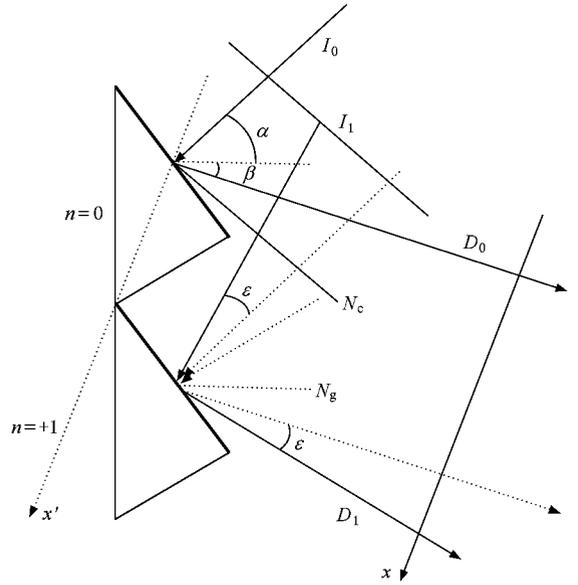


图 3 槽间光程差示意图

金属膜(Cr 膜 + Al 膜)光栅刻划、效率检验、附着保护膜等复杂的工艺过程^[16],使得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 个光栅刻槽倾角 γ_n 可表示为

$$\gamma_n = \gamma_0 + \Delta\gamma_n \quad (8)$$

(8) 式中 γ_0 为无误差时的光栅刻槽倾角, $\Delta\gamma_n$ 为第 n 个光栅槽面引起的光栅刻槽倾角误差,可表示为

$$\Delta\gamma_n = N_r \times \Delta\gamma \quad (9)$$

其中 N_r 为取值范围在区间 $(-1, 1)$ 的随机数.

在考虑光栅角色散和光栅刻槽倾角误差的情况下,一束非平行光经光栅的相位改变用槽内光程差 Δ_1 和槽间光程差 Δ_2 可分别表示为

$$\Delta_1 = (x' - nd \cos\beta) \times \frac{\sin(\alpha - \gamma_n)}{\cos\varepsilon} - \sin(\beta + \gamma_n) \times \frac{1}{\cos(\beta + \gamma_n)} + \left(\frac{z}{\cos\varepsilon} - z \right) + \left(\frac{z}{\cos\delta} - z \right), \quad (10)$$

$$\Delta_2 = nd \sin\alpha + (x' - nd \cos\beta) \times \frac{\sin(\alpha - \gamma_n)}{\cos(\beta + \gamma_n)} \left(1 - \frac{1}{\cos\varepsilon} \right). \quad (11)$$

非平行光入射到第 n 个虚拟槽面上的光程差可表示为

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \Delta_0 + C(x' - \Delta_x)$$

$$+ \Delta_\varepsilon + \Delta_\delta. \quad (12)$$

(12) 式中

$$\Delta_0 = nd \sin \alpha,$$

$$\Delta_x = nd \cos \beta,$$

$$\Delta_\varepsilon = \frac{z}{\cos \varepsilon} - z,$$

$$C = \frac{\sin(\alpha - \gamma_n) - \sin(\beta + \gamma_n)}{\cos(\beta + \gamma_n)},$$

$$\left(\Delta_x - \frac{a}{2} \cos(\gamma_n + \beta) \right) \leq x'$$

$$\leq \left(\Delta_x + \frac{a}{2} \cos(\gamma_n + \beta) \right),$$

其中 $n = -N, \dots, -1, 0, 1, \dots, N$. 若 x' 轴与 x 轴之间的距离为 z_0 , 则第 n 个虚拟槽面与 x 轴之间的距离可表示为

$$z_n = z_0 - nd \sin \beta. \quad (13)$$

进一步将(2)-(5)和(12)式代入衍射积分公式^[12], 可得到在考虑光栅角色散和光栅刻槽倾角误差的情况下, 第 j 束子光束经透镜和光栅衍射后在接收屏上光场的解析表达式为

$$\begin{aligned} E_j(x, z) &= \sum_{n=-N}^N \sqrt{-\frac{ik}{2\pi z}} \exp(ikz) \int_{\Delta_x - \frac{a}{2} \cos(\gamma_n + \beta)}^{\Delta_x + \frac{a}{2} \cos(\gamma_n + \beta)} E_j(x'', z'') \exp(ik\Delta) \exp\left\{ ik \frac{(x - x')^2}{2z} \right\} dx'' \\ &= \sum_{n=-N}^N -\frac{1}{2} \sqrt{-\frac{i\pi f^2 w_0^2}{\lambda f^3 + i\pi nd \cos \alpha_j w_0^2}} \exp\left(-\frac{i\pi(nd \cos \alpha_j^3 - 4f^4)}{\lambda f^3 + i\pi nd \cos \alpha_j w_0^2} \right) \\ &\quad \times \exp\left\{ -\frac{\pi}{\lambda f} \cdot \frac{\pi nd \cos \alpha w_0^2 (4f^2 p_j + nd \cos \alpha (f^2 + 2p_j^2))}{\lambda f^3 + i\pi nd \cos \alpha_j w_0^2} \right\} \\ &\quad \times \exp\left\{ ik \left[\left(1 - \frac{C^2}{2} \right) z + \Delta_0 + C(x - \Delta_x) + \Delta_\varepsilon + \Delta_\delta \right] \right\} \\ &\quad \times \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{i-1}{4} \sqrt{\frac{k}{z}} (a \cos(\gamma_n + \beta) + \mathcal{X}(x - \Delta_x - Cz)) \right] \right. \\ &\quad \left. + \operatorname{erf} \left[\frac{i-1}{4} \sqrt{\frac{k}{z}} (a \cos(\gamma_n + \beta) - \mathcal{X}(x - \Delta_x - Cz)) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (14)$$

式中波数 $k = 2\pi/\lambda$, $\operatorname{erf}(\cdot)$ 为误差函数. 进一步令 $\Delta_\varepsilon = 0$, 根据(14)式得到的计算公式与文献[13]给出的(8)式相一致.

对机械刻划闪耀光栅而言, 不可避免地会出现零级面, 因此在设计和制备光栅时, 兼顾零级面和有效闪耀面对衍射效率的影响是光栅制作工艺中的两个重要环节^[17]. 在一级闪耀情况下, 光栅衍射效率 η_j 可表示为^[18]

$$\begin{aligned} \eta_j &= \rho \sin^2 c^2 \\ &\quad \times \left[b \frac{\sin \beta - \sin \alpha_j - (\cos \beta + \cos \alpha_j) \tan \gamma}{\lambda_j} \right] \\ &\quad \times \left\{ \frac{\sin \left[\pi N \left(\frac{\sin \beta - \sin \alpha_j}{\lambda_j} \right) d \right]}{\sin \left[\pi \left(\frac{\sin \beta - \sin \alpha_j}{\lambda_j} \right) d \right]} \right\}^2, \end{aligned} \quad (15)$$

式中 d 为闪耀光栅周期, N 为光栅刻线数, γ 为光栅闪耀角, β 为衍射角, α_j 为第 j 个单元子光束的入射角, ρ 为与光栅结构有关的常数因子.

对于 η_j 取最大值时, 应满足关系式

$$\begin{aligned} \alpha_j &= \alpha_0 + \arctan \left(-\frac{j \Delta p}{f} \right), \\ \lambda_j &= d(\sin \alpha_j - \sin \beta). \end{aligned} \quad (16)$$

在进一步考虑闪耀光栅的衍射效率后, 谱合成光束的光强分布为

$$I(x, z) = \sum_{j=-m}^m \eta_j |E_j(x, z)|^2. \quad (17)$$

根据强度二阶矩定义^[19, 20], 采用多点拟合法对合成光束的束宽进行双曲线拟合, 计算得到相应 x 方向的光束质量因子 M^2 ,

$$\begin{aligned} D_x^2(z) &= A'z^2 + B'z + C', \\ M_x^2 &= \frac{\pi}{4\lambda} \sqrt{A'C' - \frac{B'^2}{4}}. \end{aligned} \quad (18)$$

3. 计算模拟和分析

根据建立的光束谱合成传输模型, 以中心单元

波长为 1070 nm 的掺 Yb 光纤激光器为例进行模拟和分析. 计算中假设阵列光源中相邻子光源的中心间距 $\Delta p = 250 \mu\text{m}$, 子光束的束宽 $w_0 = 20 \mu\text{m}$, 透镜焦距 $f = 3 \text{ cm}$, 光栅线密度 $l = 830/\text{mm}$, 光栅刻槽倾角 $\gamma = 27.7^\circ$, 光栅常数因子 $\rho = 0.85$, 入射光束相对于光栅法线的夹角 $\alpha = 17.2^\circ$, 光束发散引起的入射角度偏差 $\epsilon = 0.974^\circ$.

3.1. 谱合成前后光束特性的对比

图 4 给出了掺 Yb 光纤激光器阵列光源未经谱合成和经谱合成后, 在不同传输距离处的光强分布. 从图 4(a) 可以看出, 未经谱合成时阵列光源在近场的光强分布很不均匀, 呈锯齿状分布, 而在远场区域光斑尺寸迅速增大, 峰值光强急剧降低. 从图 4(b) 可以看出, 经谱合成后合成光束在近场和远场均能保持很好的重叠且随着传输距离的增加, 始终保持较高的峰值光强. 由此可见, 经谱合成后合成光束具有较高的光束质量.

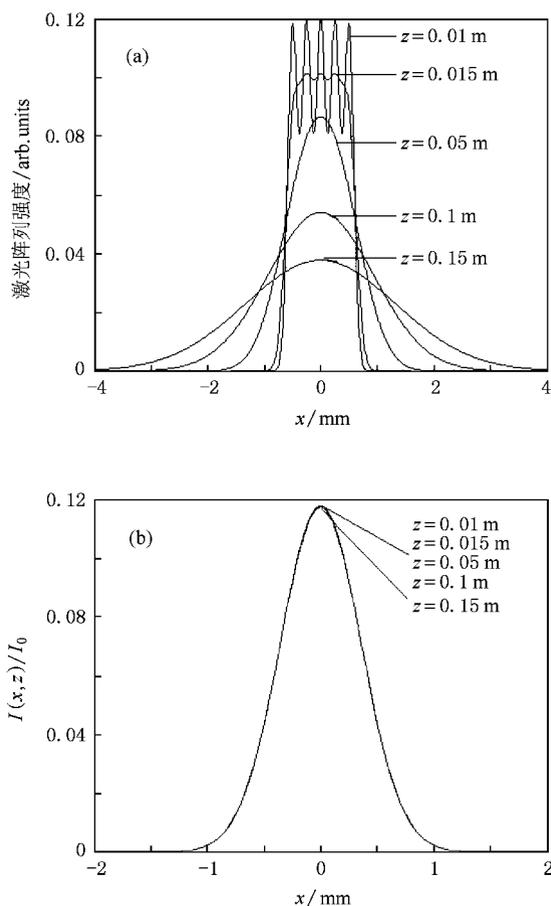


图 4 掺 Yb 激光器阵列光源在不同传输距离处的光强分布 (a) 未经谱合成 (b) 经谱合成

图 5 给出了谱合成前后光束直径随传输距离变化. 从图 5 可以看出, 未经谱合成时光纤激光器阵列输出光束的光束直径随传输距离的变化而明显增大, 而经谱合成后合成光束的光束直径随传输距离的变化则小得多.

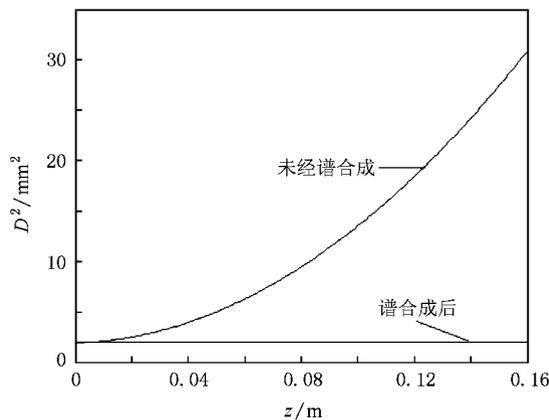


图 5 谱合成前后光束直径随传输距离变化

未经谱合成时, 经计算得到 $A' = 0.0011$, $B' = 7.6702 \times 10^{-6}$, $C' = 1.8991 \times 10^{-6}$, $M^2 = 33.2013$; 经谱合成后, 经计算得到 $A' = 9.2260 \times 10^{-7}$, $B' = 9.4203 \times 10^{-12}$, $C' = 2.0141 \times 10^{-6}$, $M^2 = 1.0006$. 由此可见, 未经谱合成时光纤激光器阵列输出光束的光束质量因子 M^2 较大, 光束质量较差, 而经谱合成后合成光束的光束质量很好, 几乎与单个光纤激光器输出光束的光束质量相同.

3.2. 光栅角色散对谱合成后光束特性的影响

图 6 给出了分别考虑光栅角色散和不考虑光栅角色散时, 谱合成光束直径随传输距离的变化. 从图 6 可以看出, 光栅角色散对谱合成光束特性的影响较小. 因此, 在计算中可忽略光栅角色散的影响.

对于光纤激光器阵列, 当子光束线宽 $\Delta\lambda = 0.5 \text{ nm}$ 时, 经光栅角色散后求出的拟合系数为 $A' = 9.2259 \times 10^{-7}$, $B' = 1.1112 \times 10^{-11}$, $C' = 2.0141 \times 10^{-6}$, 相应的光束质量因子 $M^2 = 1.0006$, 与不考虑光栅角色散时相应的光束质量因子 M^2 几乎相同.

3.3. 光栅制作误差和光栅衍射效率对谱合成光束特性的影响

图 7 给出了考虑光栅衍射效率后, 光栅存在不同刻槽倾角误差时合成光束在 $z = 1.0 \text{ m}$ 处的光强分布. 从图 7 可以看出, 随着刻槽角度误差的增大,

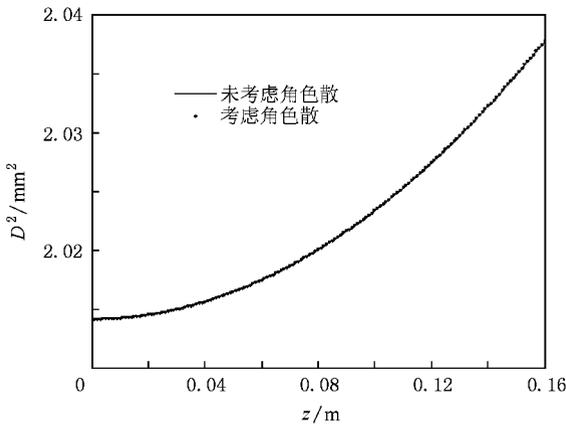


图 6 考虑光栅角色散和不考虑光栅角色散时谱合成光束直径随传输距离的变化

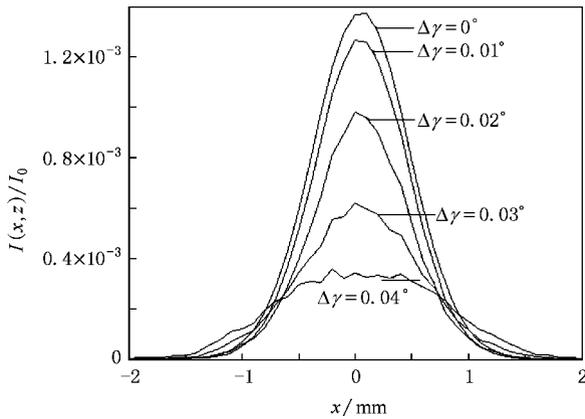


图 7 不同光栅刻槽倾角误差下合成光束的光强分布

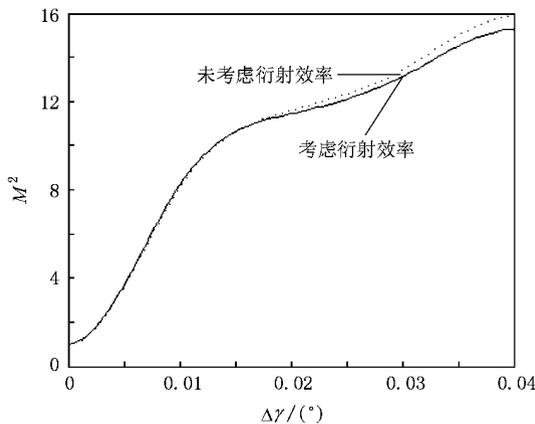


图 8 合成光束质量因子 M^2 随光栅刻槽倾角误差的变化

为了定量说明光栅刻槽倾角误差对谱合成光束质量的影响,图 8 进一步给出了谱合成光束质量因子 M^2 随光栅刻槽倾角误差的变化.从图 8 可以看出,随着光栅刻槽倾角误差的增大,合成光束质量因子 M^2 明显增大,光束质量迅速变差.此外,为了进一步说明光栅衍射效率对合成光束特性的影响,图 8 中还给出了未考虑光栅衍射效率情况下,谱合成光束质量因子 M^2 随光栅刻槽倾角误差的变化.分析图 8 可知,当光栅刻槽倾角误差较小时,考虑光栅衍射效率与否对计算得到合成光束质量因子 M^2 几乎无差别,然而,随着光栅刻槽倾角误差的增大,两种情形下质量因子 M^2 出现偏差,并且光栅刻槽倾角误差越大计算偏差越大.从而说明当光栅刻槽倾角存在较大误差时,必须考虑光栅衍射效率对合成光束特性的影响.

为了进一步说明由于高斯光束的发散角引起非平行倾斜入射情况的必要性,图 9 给出了考虑光栅衍射效率后,非平行倾斜入射和平行倾斜入射时合成光束质量随光栅刻槽误差的变化.从图 9 可以看出,当忽略光栅刻槽误差时,非平行倾斜入射和平行倾斜入射情况下计算得到的合成光束质量差异很小,相对误差约为 0.25%.然而,当考虑光栅刻槽误差时,其差异会明显增大,相对误差可达到 4.38%.此外,当光栅刻槽误差约为 6.1×10^{-6} rad 时,计算得到的合成光束质量因子 M^2 为 1.123,而 August 等^[5]在实验中测得的 5 根掺 Yb 光纤激光器经过谱合成后合成光束质量因子 M^2 为 1.14.因此本文理论计算结果与前人实验结果基本一致.

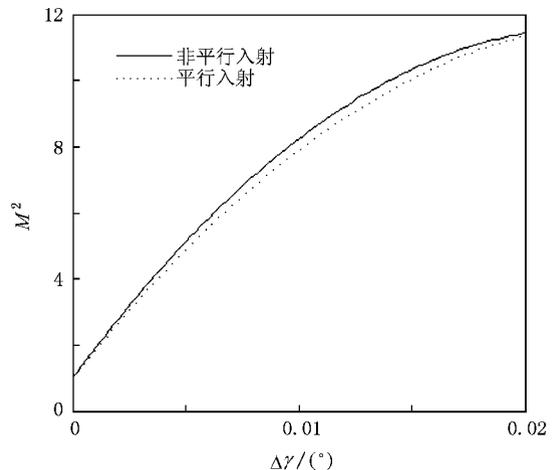


图 9 考虑光栅衍射效率后,非平行倾斜入射和平行倾斜入射时的合成光束质量随光栅刻槽误差的变化

合成光束的光斑尺寸增大,光强峰值明显减小且分布出现起伏.

4. 结 论

本文建立了掺 Yb 光纤激光器谱合成的光束传输模型,应用光线追迹方法,给出了高斯光束非平行倾斜入射到光栅时相位变化的计算模型,利用衍射积分方法,给出了光纤激光器阵列经谱合成系统后输出光场的解析表达式,依据非相干叠加原理,计算得到合成光束的光强分布,利用强度二阶矩方法,分别计算了掺 Yb 光纤激光器阵列和合成光束质量因

子 M^2 ,并定量分析了光栅角色散、光栅衍射效率和光栅制作误差对合成光束特性的影响.研究表明:光纤激光器阵列谱合成光束具有与单根光纤激光器几乎相同的光束质量;光栅角色散对合成光束特性的影响较小;谱合成光束的光束质量随着光栅刻槽倾角误差的增大而明显变差;当光栅刻槽倾角误差较小时,可忽略光栅衍射效率对合成光束特性的影响,而当光栅刻槽倾角误差较大时,则必须考虑光栅衍射效率对合成光束特性的影响.

- [1] Guo Y B ,Huo J Y 2008 *Fiber Lasers and Applications* (Beijing : Science Press) p1 (in Chinese) [郭玉彬、霍佳雨 2008 光纤激光器及其应用(北京:科学出版社)第 1 页]
- [2] Song Y J ,Hu M L ,Liu Q W ,Li J Y ,Chen W ,Chai L ,Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5045 (in Chinese) [宋有建、胡明列、刘庆文、李进延、陈伟、柴路、王清月 2008 物理学报 **57** 5045]
- [3] Wang Y G ,Ma X Y ,Fu S G ,Fan W D ,Li Q ,Yuan S Z ,Dong X Y , Song Y R ,Zhang Z G 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1810 (in Chinese) [王勇刚、马晓宇、付圣贵、范万德、李强、袁树忠、董孝义、宋晏蓉、张志刚 2004 物理学报 **53** 1810]
- [4] Liu A ,Mead R ,Vatter T ,Henderson A ,Stafford R 2004 *Proc. SPIE* **5335** 81
- [5] August S J ,Goyal A K ,Aggarwal R L ,Fan T Y ,Sanchez A 2003 *Opt. Lett.* **28** 331
- [6] Fan T Y ,Sanchez A ,Daneu V ,Aggarwal R L ,Buchter S C ,Goyal A , Cook C C 2000 *Proc. IEEE* **3** 49
- [7] Loftus T H ,Thomas A M ,Hoffman P R ,Norsen M ,Royse R ,Liu A , Honea E C 2007 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **13** 487
- [8] Xiao R ,Hou J ,Jiang Z F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 853 (in Chinese) [肖瑞、侯静、姜宗福 2008 物理学报 **57** 853]
- [9] Bochove E J 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 432
- [10] Daneu V ,Sanchez A ,Fan T Y ,Choi H K ,Cook C C 2000 *Opt. Lett.* **125** 405
- [11] Bochove E J 2001 *Proc. SPIE* **4270** 95
- [12] Lü B D 1999 *Propagation and Control of High-Power Lasers* (Beijing :National Defence Industry Press) p23 (in Chinese) [吕百达 1999 强激光的传输与控制(北京:国防工业出版社)第 23 页]
- [13] Zhang Y ,Zhang B ,Zhu S J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4590 (in Chinese) [张艳、张彬、祝颂军 2007 物理学报 **56** 4590]
- [14] Zheng H 1982 *Chin. J. Lasers* **10** 1 (in Chinese) [郑辉 1982 中国激光 **10** 1]
- [15] Li L B ,Lou Q H 2006 *Laser Optoelectron. Prog.* **43** 37 (in Chinese) [李立波、楼祺洪 2006 激光与光电子发展 **43** 37]
- [16] Bayanheshig ,Gao J X ,Qi X D ,Li Y H ,Zhang F C ,Li C Q 2005 *Chin. J. Lasers* **32** 301 (in Chinese) [巴音贺希格、高键翔、齐向东、李英海、张坊城、李春启 2005 中国激光 **32** 301]
- [17] Bayanheshig ,Gao J X ,Qi X D ,Li C Q 2004 *J. Optoelectron. Laser* **15** 1137 (in Chinese) [巴音贺希格、高键翔、齐向东、李春启 2004 光电子·激光 **15** 1137]
- [18] Zhao B ,Yan L 2004 *J. Opt. Tech.* **27** 103 (in Chinese) [赵博、晏磊 2004 光学技术 **27** 103]
- [19] Sun W ,Gao C Q ,Wei G H 2000 *J. Beijing Inst. Technol.* **20** 471 (in Chinese) [孙伟、高春清、魏光辉 2000 北京理工大学学报 **20** 471]
- [20] Zhao C M 2000 *J. Laser Technol.* **24** 341 (in Chinese) [赵长明 2000 激光技术 **24** 341]

Analysis of the beam characteristics and the propagation model of spectral combining systems for Yb-doped fiber lasers^{*}

Pan Lei-Lei Zhang Bin[†] Yin Su-Qin Zhang Yan

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

(Received 21 August 2008 ; revised manuscript received 18 March 2009)

Abstract

The propagation model for the spectral combining systems including Yb-doped fiber laser arrays ,transform lens ,grating and output coupler has been built up. By taking into consideration the grating angle dispersion ,the fabrication errors of groove angle and the diffraction efficiency of the grating ,the formula for the phase change of the Gaussian beam unparallelly oblique incidence on the grating and the analytical expression for the intensity distribution of the combining beam have been derived by using the ray tracing method ,the diffraction integral method ,the principle of incoherent superposition of laser beams and the intensity second-order moments method. Consequently ,the effects of the angle dispersion ,the diffraction efficiency and the fabrication errors of groove angle of the grating on the beam characteristics of the spectral combining system have been analyzed for the case of Gaussian beam unparallelly oblique incidence on the grating. The results show that the beam quality of the combined beam remains almost the same as that of a single fiber laser. The effect of the angle dispersion of the grating on the beam quality of combined beam can be neglected. The beam quality of combined beam degrades with the increasing of the fabrication errors of groove angle of the grating. For the case of the large fabrication errors of groove angle of the grating ,the effect of the diffraction efficiency of the grating on the beam characteristics of the combined beam should be considered.

Keywords : Yb-doped fiber laser arrays , unparallel oblique incidence , spectral beam combining , beam quality

PACC : 4255N , 2410H

^{*} Project supported by the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education ,China (Grant No. NCET-05-0784).

[†] Corresponding author. E-mail : zhangbinff@sohu.com