

高功率光纤激光器谱合成系统的输出特性分析

阴素芹 张 彬

(四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要 建立了用光热折变无机玻璃反射式体布拉格光栅实现高功率光纤激光器谱合成的物理模型,在考虑高功率激光导致的体布拉格光栅表面热形变情况下,将体光栅进行分片处理后,采用有限差分 Crank-Nicholson 和稀疏矩阵方法,通过反复迭代求解波动方程,数值计算了两束光纤激光经不同形变的体布拉格光栅谱合成后的光强分布、桶中功率和合成效率,并定量分析了光栅形变对合成光束光强分布、桶中功率和合成效率的影响。研究结果表明,高功率激光导致的体布拉格光栅表面的热形变不仅会导致合成光束的光束质量变差,而且还会引起谱合成系统合成效率的迅速下降。

关键词 激光器;高功率光纤激光器;谱合成;体布拉格光栅;光束质量;桶中功率;合成效率

中图分类号 TN25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0214002

Analysis of the Output Characteristics of High-Power Fiber Lasers after Spectral Beam Combination

Yin Suqin Zhang Bin

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

Abstract The propagation model for the spectral combining system of fiber laser beams by the volume Bragg grating (VBG) in the photo-thermal refractive (PTR) glass is built. Considering the surface distortion of the VBG by high-power lasers, the VBG is dealt with by splitting into slice and the wave equation is calculated iteratively by using the finite-different Crank-Nicholson and sparse matrix methods. The intensity distribution, the combination efficiency and the power in the bucket of two fiber laser beams after spectral beam combination by the VBG with different deformations are simulated numerically. The thermal deformation effect of the VBG on the intensity distributions, the combination efficiency and the power in the bucket of the combined beam is analyzed quantitatively. The results show that the surface distortion of the VBG due to high-power lasers not only degrades the beam quality of the combined beam, but also decreases the combination efficiency of the spectral beam combining system dramatically.

Key words lasers; high-power fiber lasers; spectral beam combination; volume Bragg grating; beam quality; power in the bucket; combination efficiency

OCIS codes 140.3295; 060.3510

1 引 言

光纤激光器是近十年来发展极为迅速的新型固体激光器,它以耐热性好、输出光束质量高、使用寿命长和结构紧凑等诸多优点,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^[1]。然而,由于受到非线性效应、热负荷和光纤损伤等因素的限

制,大幅度提高单根光纤激光器的输出功率面临着巨大的挑战^[2]。为了获得更高功率的激光输出,人们采用了大模场面积光纤来提高光纤激光器的输出功率。目前,单根大模场光纤激光器的输出功率已达到 1 kW 以上,但同时也带来了光束质量变差等新问题^[3~5]。为了大幅度提高激光输出功率,国内

收稿日期: 2010-05-25; 收到修改稿日期: 2010-09-28

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0784)资助课题。

作者简介: 阴素芹(1982—),女,博士研究生,主要从事激光物理与技术等方面的研究。E-mail: yin-su-qin@163.com

导师简介: 张 彬(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事激光物理和技术等方面的研究。

E-mail: zhangbinff@sohu.com

外许多学者提出了采用光束合成的方法和技术^[6~8],通过将多个光纤激光器的输出光束进行合成,从而获得成倍提高的输出功率,并使合成光束保持与单根光纤激光器接近的光束质量。光束合成可分为相干合成和非相干合成两种主要方式。光束相干合成技术是获得高光束质量、高功率激光的有效方法,但其技术比较复杂,迄今只在中、小功率范围进行了成功的实验^[9,10]。与光束的相干合成相比,非相干合成具有许多独特的优势,不要求精确的波长和相位控制,技术上较为简单,而且,当光束在空间重叠时可消除光束空间干涉的影响,从而获得光束均匀、对称的高光束质量激光输出。谱合成作为非相干合成技术的典型代表,利用色散元件对光纤激光器阵列单元输出的不同波长的激光束进行远场和近场的光束叠加,且合成光束的质量几乎与单根光纤激光器的光束质量相近^[8,11]。

美国 Central Florida 大学已采用体布拉格光栅色散元件对两根光纤激光器进行谱合成实验^[6],单根光纤激光器的输出功率不高,但采用体布拉格光栅进行谱合成时,获得了很高的合成效率。然而,随着待合成的光纤激光器输出功率的不断提高^[4,5],用体布拉格光栅对高功率光纤激光进行谱合成时,体光栅需要承受的激光功率较高,从而导致体光栅表面发生热形变,最终使谱合成后的光束特性以及谱合成系统的合成效率发生明显变化^[12]。本文以两路光纤激光器谱合成系统为例,建立了用光热折变无机玻璃反射式体布拉格光栅实现光纤激光谱合成的物理模型,在考虑高功率激光导致体布拉格光栅表面热形变的情况下,将体光栅进行分片处理后,采用有限差分 Crank-Nicholson 和稀疏矩阵方法,通过反复迭代求解波动方程,数值计算了两束光纤激光经不同形变的体布拉格光栅谱合成后的光强分布、桶中功率和合成效率,并定量分析了光栅形变对合成光束光强分布、桶中功率和合成效率的影响。

2 基于反射式体布拉格光栅的光束谱合成原理

在光束谱合成系统中,色散元件是重要的器件,主要包括闪耀光栅和体布拉格光栅等。由于光热折变无机玻璃体布拉格光栅具有很好的热稳定性、光学稳定性和机械稳定性,且在可见到近红外光谱区域有良好的角度和波长选择性,因而光热折变无机

玻璃体布拉格光栅已成为高功率光纤激光器谱合成系统的理想色散元件^[8]。

反射式体布拉格光栅谱合成的原理如图 1 所示,将波长分别为 λ_1 和 λ_2 的两束激光以对称的角度入射到布拉格体光栅上。其中,波长为 λ_1 的一束激光按入射角 θ_m 入射,并因其完全满足布拉格条件而产生高效的反射式衍射,而波长为 λ_2 的一束激光由于不满足布拉格条件,其经体布拉格光栅的反射效率几乎为零,并几乎完全透射出体布拉格光栅。如果控制这两束激光的出射方向使之一致,则上述两束不同波长的激光束经体布拉格光栅后,在空间就可形成谱叠加,即可实现两束激光束的非相干组束。

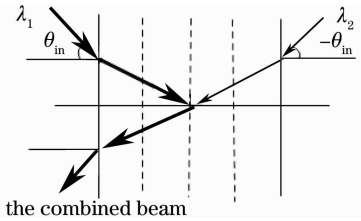


图 1 反射式体布拉格光栅谱合成原理图

Fig. 1 Schematic of the spectral beam combination by the reflection volume Bragg grating

如果波长为 λ_1 的一束激光入射到体布拉格光栅发生完全反射,则入射光波长 λ_1 和入射角 θ_m 应满足布拉格条件^[11]:

$$\lambda_1 = \frac{2n_0 \cos \theta_m^*}{f}, \quad (1)$$

式中 f 为布拉格体光栅的空间频率, n_0 为体光栅的折射率。

根据布拉格光栅的耦合波理论,当布拉格光栅的栅线平行于体光栅的表面时,在忽略吸收情况下,当入射波长相对于布拉格中心波长存在一定偏差 $\Delta\lambda$ 时,体布拉格光栅的反射效率为^[11,13]

$$\epsilon(\Delta\lambda) = \left\{ 1 + \frac{1 - [\lambda_1 f^2 \Delta\lambda / (2n_0 \Delta n)]^2}{\sinh^2 \left[\left(\frac{2\pi n_0 L_0 \Delta n}{\lambda_1^2 f} \right)^2 - \left(\frac{\pi L_0 f \Delta\lambda}{\lambda_1} \right)^2 \right]^{1/2}} \right\}^{-1}, \quad (2)$$

式中 L_0 为布拉格体光栅的厚度, Δn 为折射率调制的幅度。

进一步对(2)式进行数值计算结果表明,对于给定的体布拉格光栅,当入射波长偏离布拉格中心波长超过一定范围时,其衍射效率可降低为零,从而几乎发生完全透射。

3 基于体布拉格光栅的谱合成系统的光束传输模型

以两路光纤激光器谱合成系统为例,说明基于光热折变无机玻璃反射式体布拉格光栅的谱合成系统输出光束特性。基于体布拉格光栅的两路光纤激光器谱合成系统如图2所示,体布拉格光栅对波长 λ_1 光束的衍射效率接近于1,而对波长 λ_2 光束则是透射的,波长 λ_1 光束的光轴与坐标 $o'x'y'z'$ 的 $o'z'$ 轴重合, o' 与高斯光束的束腰重合,体光栅的表面与坐标 $o''x''y''z''$ 的 $o''x''$ 轴重合,光学系统光轴与波长 λ_1 光束的光轴夹角为 θ_m ,合成光束的光轴与与坐标 $oxyz$ 的 oz 轴重合。图2中体布拉格光栅的栅线平行于体光栅的表面,根据衍射波长和光栅参数计算出布拉格角 θ_m 的大小,波长 λ_1 和波长 λ_2 两束激光分别从光栅两侧对称的以 θ_m 入射,这样就可以实现两束激光的谱合成。由体布拉格光栅谱合成系统可知,当两束高功率激光同时经过体布拉格光栅时,体光栅需要承受较大的激光功率,激光束的部分能量会被体布拉格光栅所吸收,从而在体布拉格光栅内部产生温度梯度。当温度梯度到达一定程度后就会导致布拉格光栅的表面产生形变,从而使光栅厚度发生变化,如图2所示。

光纤激光器输出激光束通常可采用高斯光束进行描述^[14],于是,入射光束沿光轴方向传输到体光栅入射面 z' 处的光场可表示为

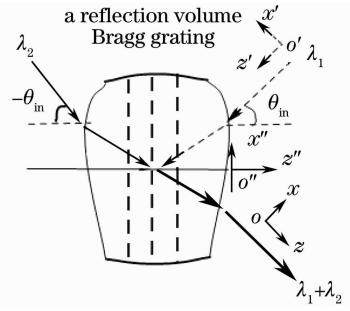


图2 两束光纤激光谱合成系统的示意图
Fig. 2 Schematic of two fiber laser beams spectral combining system

$$E_0(x', y', z') = \frac{A_0 \omega_0}{w(z')} \exp[-(x'^2 + y'^2)/\omega_0^2] \times \exp\left\{-ik\left[\frac{x'^2 + y'^2}{2R(z')} + z'\right] + ik\varphi\right\}, \quad (3)$$

式中 ω_0 为高斯光束束腰, A_0 为一正常数。 $Z_r = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$ 为瑞利距离, $w(z') = \omega_0 \sqrt{1 + (z'/Z_r)^2}$ 为高斯光束在 z' 处束腰, $R(z') = Z_r \left(\frac{z'}{Z_r} + \frac{Z_r}{z'}\right)$ 为高斯光束在 z' 处等相面曲率半径, $\varphi = \arctan \frac{z'}{Z_0}$ 为高斯光束在 z' 处的相位因子。

假设光栅产生热形变后的表面形状是由入射激光束的空间分布决定的^[15],于是,在斜入射高斯光束辐照下,光栅产生热形变后的厚度可表示为

$$L(x', y', z') = L_0 + \Delta L \times \left[\frac{A_0 \omega_0}{w(x' \cos \theta_m + z')} \right]^2 \times \left\{ \exp\left\{-\frac{[(x' \sin \theta_m)^2 + y'^2]}{[w(x' \cos \theta_m + z')]^2}\right\} \right\}^2 \times \left\{ \exp\left\{-ik\left[\frac{(x' \sin \theta_m)^2 + y'^2}{2R(x' \cos \theta_m + z')} + x' \cos \theta_m + z'\right] + ik\varphi(x' \cos \theta_m + z')\right\} \right\}^2, \quad (4)$$

式中 L_0 为光栅无形变时的厚度; ΔL 为光栅存在形变时在入射光束中心处的厚度变化,可进一步根据经验公式表示为^[16]

$$\Delta L = L_0(a_1 + a_n)\Delta T = L_0(a_1 + a_n) \frac{(P_1 + P_2) \exp(-\alpha L_0)}{cV\rho}, \quad (5)$$

式中 c 为体光栅的比热, V 为体光栅的体积, ρ 为体光栅的密度, $a_1 = (1/L_0)(dL/dT)$ 为体光栅的线性热膨胀, $a_n = (1/n_0)(dn/dT)$ 为体光栅的热折射系数, P_1 和 P_2 分别为两束激光的入射功率, α 为体光栅的线性吸收系数。

当波长 λ_1 的激光束在有形变体光栅中传输时,其光场分布应满足波动方程^[17]:

$$\nabla^2 E_1 + k_1^2 \epsilon_r E_1 = 0, \quad (6)$$

式中 $k_1 = 2\pi/\lambda_1$ 为波数, ϵ_r 为有形变时体光栅介质的介电常数,可表示为^[18]

$$\epsilon_r \approx (n_0 + \Delta n_T)^2 + 2(n_0 + \Delta n_T)\Delta n \cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda(x, y)}\mathbf{e}_q \cdot \mathbf{r} + \varphi\right], \quad (7)$$

式中 Δn_T 为背景折射率的变化, $\Lambda(x, y)$ 为有形变体光栅的周期, \mathbf{e}_q 为体光栅的栅线方向。

当波长 λ_1 的激光束经过表面有形变的体光栅时会引入一个相位因子^[19]:

$$\sigma = \exp\{-ik_1[L(0, 0) - L(x', y')]/2\}, \quad (8)$$

于是,波长 λ_1 的激光束在有形变反射式体光栅中传输的光场分布可表示为

$$E_1 = A\sigma \exp(-ik_1 n' \mathbf{e}_a \cdot \mathbf{r}) + B\sigma \exp(-ik_1 n' \mathbf{e}_b \cdot \mathbf{r}), \quad (9)$$

式中 A 为入射光束的场振幅, B 为反射光束的场振幅, \mathbf{e}_a 为入射光束的传输方向, \mathbf{e}_b 为反射光束的传输

方向, n' 为有形变体光栅的折射率。

当光栅发生形变以后, 光栅的布拉格条件可表示为^[10]

$$\begin{aligned} k'_1(x', y', z') n_0 \mathbf{e}_a + \frac{2\pi}{\Lambda(x', y')} \cdot \mathbf{e}_q &= k'_1(x', y', z') n_0 \mathbf{e}_b; \\ k'_1(x', y', z') n_0 \mathbf{e}_b - \frac{2\pi}{\Lambda(x', y')} \cdot \mathbf{e}_q &= k'_1(x', y', z') n_0 \mathbf{e}_a, \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $k'_1(x', y', z')$ 是满足有形变体光栅的布拉格条件时的波数。

进一步将(7)式和(9)式代入(6)式, 并要求波长 λ_1 的激光束满足有形变体光栅的布拉格条件, 可得到波长 λ_1 的激光束入射光束和反射光束场振幅所满足的耦合方程组

$$\begin{aligned} 2ik_1 n_0 \frac{\partial A}{\partial z} &= k_1^2(n_0 + \Delta n_T) \Delta n B \exp[2i\Delta k(x', y', z') n_0 z + i\varphi] + [k_1^2(n_0 + \Delta n_T)^2 - k_1^2 n_0^2] A + \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2}; \\ -2ik_1 n_0 \frac{\partial B}{\partial z} &= k_1^2(n_0 + \Delta n_T) \Delta n A \exp[-2i\Delta k(x', y', z') n_0 z - i\varphi] + [k_1^2(n_0 + \Delta n_T)^2 - k_1^2 n_0^2] B + \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $\Delta k(x, y, z) = k_1 - k'_1(x', y', z') = k_1 - k_1 \frac{L_0}{L(x', y')}$ 。

求解(11)式应满足的初始条件为

$$\begin{aligned} A(z=0) &= A\sigma \exp(-ik_1 n' \mathbf{e}_a \cdot \mathbf{r}); \\ B(z=L) &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

将体光栅进行分片处理后, 采用有限差分 Crank-Nicholson 和稀疏矩阵方法, 通过反复迭代对方程(11)进行数值求解, 可求出波长 λ_1 的激光束经有形变的反射式体光栅反射以后的场振幅 B_{out} 。考虑到体光栅的表面形变引入的相位因子, 波长 λ_1 的激光束经有形变的反射式体光栅反射后的输出光场分布可表示为

$$\begin{aligned} E_1(x, y, z) &= B_{\text{out}} \exp(-ik_1 n' \mathbf{e}_b \cdot \mathbf{r}) \exp\left\{ik_1 n' \times \frac{A_0 w_0}{w(x \cos \theta_{\text{in}} + z_0)} \exp\left\{-\frac{[(x \sin \theta_{\text{in}})^2 + y^2]}{[w(x \cos \theta_{\text{in}} + z_0)]^2}\right\}\right\} \times \\ &\exp\left\{-ik \left[\frac{(x \sin \theta_{\text{in}})^2 + y^2}{2R(x \cos \theta_{\text{in}} + z_0)} + x \cos \theta_{\text{in}} + z_0\right] + ik\varphi(x \cos \theta_{\text{in}} + z_0)\right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

根据反射式体布拉格光栅谱合成的原理, 波长为 λ_2 的激光束以相同的入射角入射到体布拉格光栅时发生完全透射, 同样考虑体光栅的表面形变引入的相位因子, 则波长为 λ_2 的激光束经过有形变的体布拉格光栅后的光场分布可表示为

$$\begin{aligned} E_2(x, y, z) &= \sigma \frac{A_0 w_0}{w(z)} \exp\{-[x^2 + y^2]/w_0^2\} \exp\left\{-ik \left[\frac{x^2 + y^2}{2R(z)} + z\right] + ik\varphi\right\} \\ &\exp\left\{ik_1 n' \times \frac{A_0 w_0}{w[x \cos(-\theta_{\text{in}}) + z_0]} \exp\left\{-\frac{[x \sin(-\theta_{\text{in}})]^2 + y^2}{[w(x \cos(-\theta_{\text{in}}) + z_0)]^2}\right\}\right\} \times \\ &\exp\left\{-ik \left\{\frac{[x \sin(-\theta_{\text{in}})]^2 + y^2}{2R[x \cos(-\theta_{\text{in}}) + z_0]} + x \cos(-\theta_{\text{in}}) + z_0\right\} + ik\varphi[x \cos(-\theta_{\text{in}}) + z_0]\right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

假设体光栅对波长 λ_2 的激光束透射效率为 η_2 , 对波长 λ_2 的激光束线性吸收系数为 α , 根据非相干叠加的原理, 可得到合成光束的光强分布为

$$I(x, y, z) = |E_1(x, y, z)|^2 +$$

$$\eta_2 [1 - \exp(-\alpha L_0)] |E_2(x, y, z)|^2. \quad (15)$$

可将谱合成系统的合成效率定义为: 经体光栅谱合成后的输出光束功率与入射光束总功率之比。对于本文讨论的两束激光合成的情况, 可表示为

$$\eta = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y, z) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} 2 |E_0(x', y', 0)|^2 dx' dy'}. \quad (16)$$

在文中,采用桶中功率 PIB 来评价合成光束的光束质量和远场的能量集中度,可表示为^[20,21]

$$f_{\text{PIB}} = \frac{\int_0^b \int_0^b I_1(x, y, z_1) dx dy}{\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} I_1(x, y, z_1) dx dy}. \quad (17)$$

式中 b 为桶的半径, $I_1(x, y, z_1)$ 为合成光束在远场的光强分布。

4 数值计算和分析

利用(15)~(17)式可计算两束光纤激光经有形变的体光栅谱合成后,其合成光束在近场和远场的光强分布,以及光栅形变对合成光束光束质量和合成效率的影响。计算所用参数:两束入射激光束的波长分别为 $\lambda_1 = 1.064 \mu\text{m}$ 和 $\lambda_2 = 1.080 \mu\text{m}$,入射布拉格角 $\theta_m = 38.29^\circ$,束腰宽度 $w_0 = 2 \text{ mm}$,体光栅的背景折射率 $n_0 = 1.4867$,折射率调制的振幅 $\Delta n = 1.25 \times 10^{-4}$,光栅的厚度为 $L_0 = 2.5 \text{ mm}$,光栅的频率 $f = 2200 \text{ mm}$,体光栅对波长为 λ_1 和 λ_2 激光束的吸收为 $\alpha = 0.002 \text{ cm}^{-1}$,体光栅对波长 λ_2 光束的透射效率为 $\eta_2 = 0.96$,体光栅的密度 $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$,体光栅的比热 $c = 9.66 \text{ J/(kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$,线性热膨胀系数 $\alpha_l = 0.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$,体光栅的热折射系数 $\alpha_n = 3.44 \times 10^{-8} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。图 3 给出两种不同算法计算出两束激光经体光栅谱合成后在体光栅出射面处的光强分布。从图 3 可以看出,用四阶龙格库塔和有限元两种算法计算得到合成光束的光强分布几乎相同,从

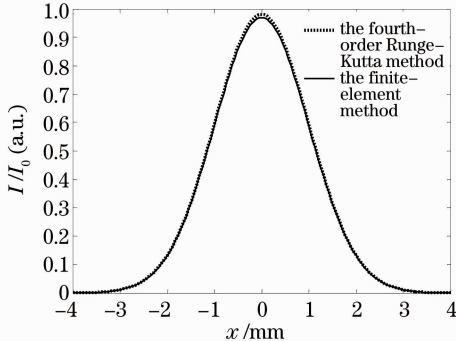


图 3 两种算法计算出合成光束的光强分布的比较

Fig. 3 Comparison of intensity distribution of the combined beam by two different computational methods

而验证了本文有限元计算方法是正确的。

图 4 给出了由经验公式(5)式计算得到的体光栅在入射光束中心处厚度变化随入射激光功率的变化。可以看出,体光栅热变形引起的在入射光束中心处的厚度随激光入射功率的提高而近似呈线性增大的关系。当激光入射功率在 1 kW 以下时,由热变形引起的体光栅厚度变化很小;当激光入射功率为 4.2 kW 时,体光栅在入射光束中心处的厚度变化约为 $1.2 \mu\text{m}$ 。

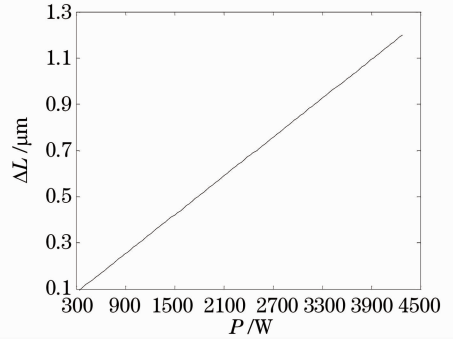


图 4 激光入射功率和光栅厚度变化的关系

Fig. 4 Relation between the input power of the laser and the variation of the VBG thickness

图 5 给出了两束光纤激光经不同形变的体布拉格光栅进行谱合成后,合成光束的光强分布。图 5(a)表示经体光栅合成以后在体光栅出射面处光强;图 5(b)表示经体光栅输出面放置焦距为 20 cm 透镜变换后的焦面处光强。为了便于比较,图 5 中还给出了单束光纤激光经体光栅反射以后在体光栅出射面和透镜焦面处的输出光强分布。

从图 5(a)可以看出,两束光纤激光斜入射到体光栅时,经体布拉格光栅进行谱合成后,合成光束的光强分布将偏离高斯分布,且存在一定的畸变。进一步分析图 5(a)可知,随着体布拉格光栅表面形变的增大,合成光束的光强峰值将明显减小。分析图 5(b)可知,在透镜焦面(远场)处,合成光束的峰值光强随着体布拉格光栅表面形变的增大也明显减小。

光束质量是评价谱合成系统的关键指标,文用桶中功率来评价合成光束质量好坏。图 6 给出了不同的体光栅形变对合成光束桶中功率的影响。从图 6 可以看出,对于桶半径给定的情况,两束光纤激光经不同形变的体光栅进行谱合成后,体光栅形变对合成光束桶中功率的影响随光栅形变的增大而增大,即合成光束的远场光束质量随光栅形变的增大而变差。

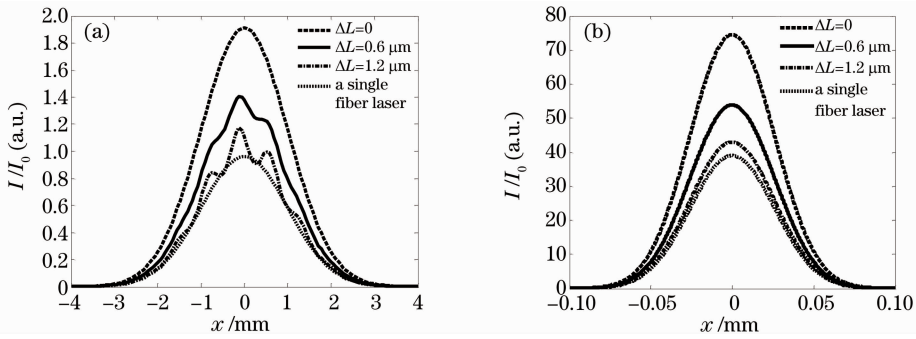


图 5 两束激光经不同变形的体光栅谱合成后的光强分布

Fig. 5 Intensity distribution of the combined beam of two laser beams by the VBG with different deformation

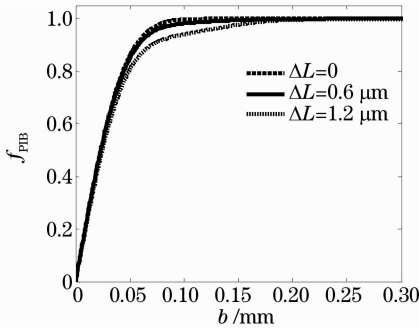


图 6 不同的体光栅形变对合成光束桶中功率的影响

Fig. 6 Influence of different deformation of the VBG on the PIB of the combining beam

为了进一步说明体光栅热形变对谱合成系统合成效率的影响,图 7 给出了谱合成系统的合成效率随体光栅形变的变化。从图 7 可以看出,谱合成系统的合成效率随体光栅形变的增大而迅速减小,也即是说,谱合成系统的合成效率随待合成激光的入射功率的提高而迅速减小。当体光栅无形变时,谱合成系统的合成效率为 91.4%,而当体光栅形变增大为 $\Delta L=0.8 \mu\text{m}$ 时,对应的输入激光功率为千瓦量级,谱合成系统的合成效率迅速减小约为 55%,此时,谱合成系统的输出功率与单根光纤激光器的输出功率几乎相同。当输入激光功率超过几千瓦

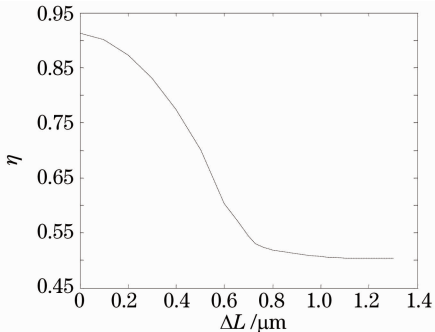


图 7 合成效率随体光栅形变的变化

Fig. 7 Variation of the combination efficiency with the volume grating distortion

时,体光栅的形变会越来越大,谱合成系统的合成效率也会越来越低,从而导致谱合成系统的输出功率小于单根光纤激光器的输出功率,在这种情况下,谱合成已完全失去了意义。由此可见,在实际工作中,应控制输入激光的功率在几千瓦之内,从而有效地控制体光栅的热形变量,以实现高效率和高光束质量的谱合成。为了对功率尽可能高的光纤激光实现高效率谱合成,可采用对热不敏感的新型材料制作体光栅。

5 结 论

本文建立了用光热折变无机玻璃反射式体布拉格光栅实现两路光纤激光器谱合成的物理模型,重点考虑了高功率激光导致体布拉格光栅表面发生的热形变对合成光束的光强分布、桶中功率以及合成效率的影响。研究表明,体光栅热形变对合成光束的光强分布形状影响不太明显,但对合成光束的光强峰值存在明显影响,并且,合成光束的光强峰值随着体布拉格光栅表面热形变的增大而明显减小。此外,随着待合成光纤激光器输出功率的提高,体光栅热形变将增大,从而不仅引起合成光束的光束质量明显变差,而且还导致谱合成系统的合成效率迅速减小。因此,在实际工作中,应有效地控制体光栅的热形变量,以实现高效率和高光束质量的谱合成。

参 考 文 献

- 1 Guo Yubin, Huo Jiayu. Fiber Lasers and Applications [M]. Beijing: Science Press, 2008. 1~3
郭玉彬, 霍佳雨. 光纤激光器及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008. 1~3
- 2 Dominic V., MacCormack V.. 110 W fiber laser [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(8): 1158~1160
- 3 Yi Yongqing, Huang Bangcai, Ning Ding. Large mode area Yb^{3+} -doped double-clad optical fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(10): 1928~1931

- 衣永青, 黄榜才, 宁 鼎. 大模场面积掺镱双包层光纤研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(10): 1928~1931
- 4 Zhang Chi, Hu Minglie, Song Yongjian *et al.*. Mode-locked large-mode-area photonic crystal fiber laser with simple cavity configuration[J]. *Chinese J. Laser*, 2009, **31**(1): 100~103
张 驰, 胡明列, 宋有建等. 简化腔结构的大模场面积光纤锁模激光器[J]. 中国激光, 2009, **31**(1): 100~103
- 5 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. *Opt. Express*, 2004, **25**(12): 6087~6092
- 6 Cipapurin I. V., Glebov L. B., Glebova L. N.. Incoherent combining of 100-w Yb-fiber laser beams by PTR Bragg grating [C]. *SPIE*, 2003, **4947**: 209~219
- 7 Andrusyak O., Ciapurin I., Smirnov V. *et al.*. External and common-cavity high spectral density beam combining of high power fiber lasers[C]. *SPIE*, 2008, **6873**(14): 1~8
- 8 O. Andrusyak, I. Ciapurin, V. Smirnov *et al.*. Spectral beam combining of fiber lasers with increased channel density [C]. *SPIE*, 2007, **6453**: 1~7
- 9 Lu Changyong, Liu Xu, Liu Yang *et al.*. Coherent combining of two beams based on polarization phase locking[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1437~1441
卢常勇, 刘 旭, 留 洋等. 基于偏振锁相的双光束相干合成[J]. 中国激光, 2009, **36**(6): 1437~1441
- 10 Dong Hongcheng, Liu Yang, Yi Kui *et al.*. Theory analysis of polarized beam coherent combination [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2346~2451
董洪成, 刘 阳, 易 葵等. 偏振光束相干合成的理论分析[J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2346~2351
- 11 I. V. Ciapurin, L. B. Glebov, V. I. Smirnov. Modeling of Gaussian beam diffraction on volume Bragg gratings in PTR glass [C]. *SPIE*, **5742**: 183~193
- 12 Wang Xin. Influence of light intensity change on two-central nonvolatile crossed-beam photorefractive gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 859~862
- 王 欣. 光强变化对双中心非挥发光折变局域体光栅的影响[J]. 光学学报, 2009, **29**(4): 859~862
- 13 Zheng Guangwei, Liu Li, He Yanlan *et al.*. Diffraction properties of ultra-short pulsed Gaussian laser beam by transmission volume grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 126~131
郑光威, 刘 莉, 何焰蓝. 透射型体光栅对超短脉冲高斯光束衍射特性研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 126~131
- 14 Zhao Shanghong, Zhan Shengbao, Shi Lei. High-Power Fiber Laser Technology[M]. Beijing: Science Press, 2010. 270~272
赵尚弘, 占生宝, 石 磊. 高功率光纤激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 270~272
- 15 Hong Shu, M. Bases. Modeling the reflection of a laser beam by a deformed highly reflective volume Bragg grating [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(15): 2930~2938
- 16 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoqiang transl. Beijing: Science Press, 2002. 375~377
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙 文, 江泽文, 程国强译. 北京: 科学出版社, 2002. 375~377
- 17 Kogelnik H.. Coupled wave theory for thick hologram grating [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1969, **48**(9): 2909~2945
- 18 S. Yin, B. Zhang, Y. Dan. Effects of the deformation of reflection volume Bragg gratings on the M^2 -factor of super-Gaussian laser beams [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(7): 1418~1423
- 19 Hong Shu, M. Bases. A computer model for simulating real laser systems by solving partial differential equations in Femlab [C]. *SPIE*, 5707. 394~402
- 20 A. E. Siegman. How to measure laser beam quality [J]. *DLAI*, 1998, **17**: 1~18
- 21 P. Kaczmariski, P. E. Lagase. Bidirectional beam propagation method [J]. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(11): 675~676