

文章编号:1001-5078(2007)07-0605-03

利用不等间隔方法提高非相干组束的衍射效率

胥 杰,赵尚弘,方绍强,李勇军,吴季礼
(空军工程大学电讯工程学院,陕西 西安 710077)

摘 要:文章采用不等间隔方法,使得衍射效率高的部分占有较多的组束激光束,在光栅频率 $f=200\text{mm}^{-1}$,光栅厚度 $t=2\text{mm}$ 条件下,不等间隔组束方法下的系统平均衍射效率较等间隔方法升高 14%。

关键词:非相干光纤激光组束;角偏移;波长偏移

中图分类号:TN248

文献标识码:A

The Method of Unequal Interval to Improve Diffraction Efficiency of Incoherent Fiber Laser Beam Combination

XU Jie, ZHAO Shang-hong, FANG Shao-qiang, LI Yong-jun, WU Ji-li

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: To increase the output power of incoherent fiber laser beam combination needs to improve the diffraction efficiency of grating. The traditional equal interval method greatly wasted the high diffraction efficiency section, while the unequal interval method makes the high diffraction efficiency section occupy relatively more combining laser beam. On the condition that grating frequency $f=200\text{mm}^{-1}$, grating thickness $t=2\text{mm}$, such method would provide a 14% higher diffraction efficiency compared with equal interval method.

Key words: incoherent fiber laser beam combination; angle deviation; wavelength deviation

1 引言

利用光纤激光组束技术获得高功率、高亮度的激光输出是当前研究的热点。光纤激光组束技术主要分为相干组束和非相干组束两大类,非相干组束由于其实现难度相对较小且系统稳定性高而更受青睐。目前利用非相干光纤激光组束技术可以得到近千瓦量级的输出功率,满足了一定的工业应用需求^[1],但是离更高一级的军事应用需求尚有一定差距。因此,如何提高非相干组束系统的效率成为研究的重点。诸多研究表明在非相干组束过程中,其他光学元件对组束激光的损耗很小,而光栅的衍射效率在很大程度上制约着组束激光的输出功率^[2]。为了增大组束激光的输出功率,直接和最有效的方法就是提高光栅的衍射效率。

2 组束方法及条件

一般的非相干组束方法是利用衍射光栅的耦合效应,将多个组束光束合成一束光,得到高功率的激光输出,其基本结构如图1所示。

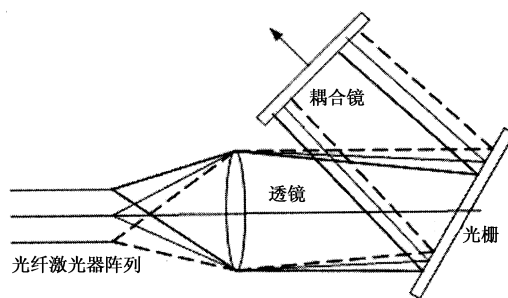


图1 非相干组束的基本结构

根据光栅方程^[3]:

$$\sin\beta - \sin\alpha = \frac{m\lambda}{d} \quad |m| = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

其中, d 为光栅周期; α 为相对光栅表面法线的人射角; β 为 m 阶衍射波的衍射角。显然,只有特定波

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60678018)。

作者简介:胥 杰(1980 -),男,博士研究生,研究方向为光电对抗与激光组束技术。E-mail: xujie1225@163.com

收稿日期:2006-11-06

长、特定入射角的光束才能以相同衍射角输出,从而得到一束合成激光。在此系统结构中,光栅是决定组束激光强度的关键部件,其对组束激光的衍射效率直接决定了组束激光的输出功率。下面给出对光栅衍射效率的定量描述。

3 光栅衍射效率的定量分析

对于如图2所示的非相干光纤激光组束系统,传输透镜物理尺寸为 W ,焦距为 F ;光纤激光器之间的间隔为 d 。选取光束2为中心激光束,使得光束2满足光栅布拉格条件,则光束2的衍射效率为100%,那么临近组束激光相对中心激光束具有角偏移 $\Delta\gamma_1, \Delta\gamma_2, \dots, \Delta\gamma_i$,光栅对角偏移 $\Delta\gamma_i$ 的组束激光的衍射效率^[4]可表示为:

$$\varepsilon = \frac{\sin^2 \left[\left(\frac{\pi}{2} \right)^2 + \left(\frac{\pi f t \cos \gamma_i \Delta \gamma_i}{n^2 - \sin^2 \gamma_i} \right)^2 \right]^{1/2}}{1 + (2 f t \cos \gamma_i \Delta \gamma_i)^2 (n^2 - \sin^2 \gamma_i)^{-1}} \quad (2)$$

式中, f 是光栅频率,且有 $f = 1/d$; γ_i 是布拉格入射角; t 是光栅厚度; n 是介质折射率。选择中心激光波长 $\lambda = 1060\text{nm}$,光栅频率 $f = 200\text{mm}^{-1}$,光栅厚度 $t = 2\text{mm}$,由布拉格条件:

$$\lambda = 2d \sin \gamma_i = \frac{2 \sin \gamma_i}{f} \quad (3)$$

对应的布拉格入射角 $\gamma_i = 12.24^\circ$ 。

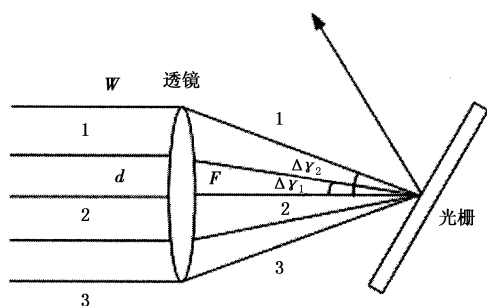


图2 非相干光纤激光组束示意图

必须注意的是,由于是非相干组束,要求参与组束的光纤激光器的输出在频谱上能够完全分开,不能重叠。因此,参与组束的光纤激光不仅有角偏移 $\Delta\gamma_i$,也有波长偏移 $\Delta\lambda_i$ 。光栅对波长偏移 $\Delta\lambda_i$ 的组束激光的衍射效率^[5]可表示为:

$$\varepsilon = \frac{\sin^2 \left[\left(\frac{\pi}{2} \right)^2 + \frac{(\pi/2 f^2 t \Delta \lambda)^2}{n^2 - \left(\frac{\lambda_0 f}{2} \right)^2} \right]^{1/2}}{1 + \frac{4(\pi/2 f^2 t \Delta \lambda)^2}{\pi^2 \left[n^2 - \left(\frac{\lambda_0 f}{2} \right)^2 \right]}} =$$

$$\frac{\sin^2 \left[\frac{\pi^2}{4} + \frac{\pi^2 f^4 t^2 \Delta \lambda^2}{4 n^2 - \lambda_0^2 f^2} \right]^{1/2}}{1 + \frac{4 f^4 t^2 \Delta \lambda^2}{4 n^2 - \lambda_0^2 f^2}} \quad (4)$$

根据式(2)和式(4),可以做出光栅衍射效率随组束激光角偏移和波长偏移的数值仿真曲线,如图3所示。

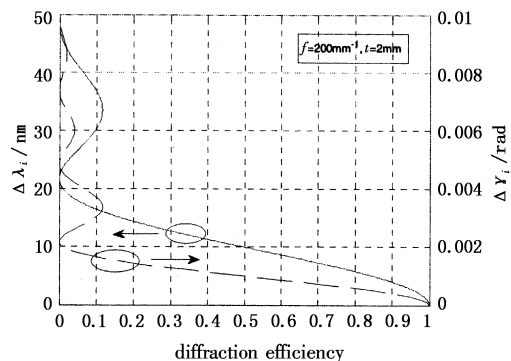


图3 光栅衍射效率随角偏移和波长偏移的变化关系

从图3的仿真结果中可以看出,最大的波长偏移 $\Delta\lambda_i \approx 20\text{nm}$,也即可利用的组束波长带宽约为20nm;最大可允许的角偏移 $\Delta\gamma_i \approx 2 \times 10^{-3}\text{rad}$ 。

4 等间隔下系统平均衍射效率

传统的非相干组束方法多采用等分法,也即将可利用的组束波长带宽和最大角偏移等分。对于一个14束的非相干组束系统,每一组束光束对应的波长偏移和角偏移如图4和图5所示。等角和等波长偏移条件下光栅衍射效率的数据值分别列于表1和表2。

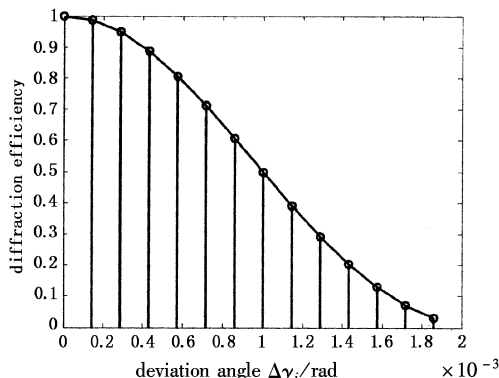


图4 等角偏移条件下光栅衍射效率的样点值

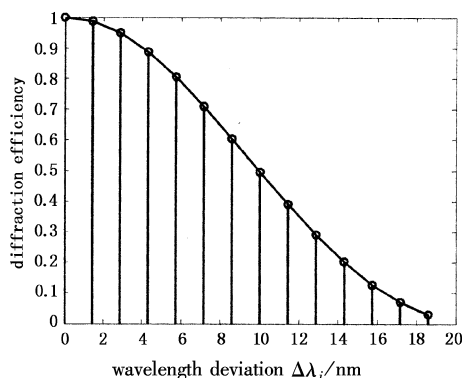


图5 等波长偏移条件下光栅衍射效率的样点值

表1 等角偏移条件下光栅衍射效率的数据值

$\Delta\gamma_i/10^{-3}$	0	0.1	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9
ε_{1i}	1	0.9870	0.9487	0.8875	0.8068	0.7115	0.6067
$\Delta\gamma_i/10^{-3}$	1.0	1.1	1.3	1.4	1.6	1.7	1.9
ε_{1i}	0.4982	0.3916	0.2920	0.2036	0.1297	0.0723	0.0322

表2 等波长偏移条件下光栅衍射效率的数据值

$\Delta\lambda_i$	0	1.43	2.86	4.29	5.72	7.15	8.58
ε_{2i}	1	0.9868	0.9482	0.8863	0.8051	0.7093	0.6043
$\Delta\lambda_i$	10.01	11.44	12.87	14.3	15.73	17.16	18.59
ε_{2i}	0.4958	0.3893	0.2900	0.2020	0.1286	0.0716	0.0318

假设参与组束的光束等功率,则组束系统的平均衍射效率 ε_{av} 可表示为:

$$\varepsilon_{av} = \sum_{i=1}^{14} \varepsilon_{1i} \varepsilon_{2i} / 14 = 0.4092 \quad (5)$$

5 不等间隔下系统平均衍射效率

由于光栅衍射效率随着组束激光角偏移和波长偏移的增大而减小,角偏移和波长偏移较小的部分衍射效率较高。传统的等间隔方法大大浪费了角偏移和波长偏移前端的高衍射效率部分,在高衍射效率部分应该有较多的组束激光,激光束之间的间隔较小;而在衍射效率较低的后端,不妨将光束之间的间隔放大。这样在组束激光器个数一定的条件下,可以改善组束系统的衍射效率。不等间隔下组束光束对应的波长偏移和角偏移如图6和图7所示。

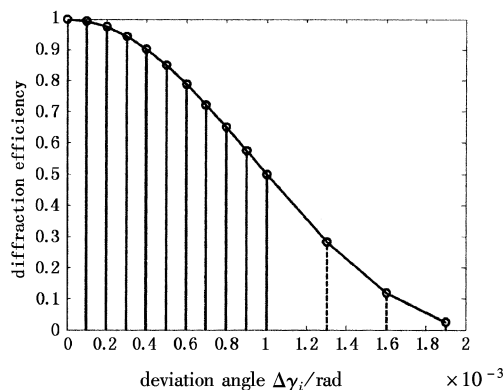


图6 不等角偏移条件下光栅衍射效率的样点值

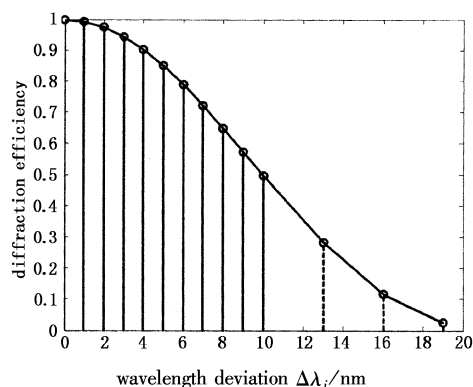


图7 不等波长偏移条件下光栅衍射效率的样点值

不等角和不等波长偏移条件下光栅衍射效率的数据值分别列于表3和表4。

表3 不等角偏移条件下光栅衍射效率的数据值

$\Delta\gamma_i/10^{-3}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
ε_{1i}	1	0.9936	0.9747	0.9437	0.9016	0.8496	0.7892
$\Delta\gamma_i/10^{-3}$	0.7	0.8	0.9	1.0	1.3	1.6	1.9
ε_{1i}	0.7220	0.6500	0.5750	0.4990	0.2834	0.1176	0.0238

表4 不等波长偏移条件下光栅衍射效率的数据值

$\Delta\lambda_i$	0	1	2	3	4	5	6
ε_{2i}	1	0.9935	0.9744	0.9431	0.9006	0.8482	0.7874
$\Delta\lambda_i$	7	8	9	10	13	16	19
ε_{2i}	0.7199	0.6476	0.5725	0.4965	0.2815	0.1165	0.0235

同样利用式(5)可以得到:

$$\varepsilon_{av} = \sum_{i=1}^{14} \varepsilon_{1i} \varepsilon_{2i} / 14 = 0.5423$$

6 结论

由于光栅衍射效率随着组束激光角偏移和波长偏移的增大而减小,所以高衍射效率部分应该占有尽可能多的组束激光束。传统的等间隔方法大大浪费了光栅对组束激光的衍射效率,在光栅频率 $f = 200\text{mm}^{-1}$,光栅厚度 $t = 2\text{mm}$ 条件下,对14束激光进行非相干组束,等间隔条件下的系统平均衍射效率只有40.92%,而在不等间隔条件下系统平均衍射效率达到54.23%,提高了14%。此外,还可以通过将高衍射效率区域的组束激光功率提高,而低衍射效率区域的组束激光功率不做更高要求来提高组束功率。

参考文献:

- [1] 李红艳,任向军. 光束合成技术研究及其应用[J]. 激光与光电子学进展,2002,39(7):22-25.
- [2] 王双义,林殿阳,等. 光纤组束研究的新进展[J]. 激光技术,2005,29(6):657-658.
- [3] Erik J Bochove. Theory of spectral beam combining of fiber lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002,38(5):431-432.
- [4] Igor V Ciapurin, Leonid B Glebov. Incoherent combining of 100W Yb-fiber laser beams by PTR Bragg grating [C]// Proceedings of SPIE,2003,4974(3):213-214.
- [5] Erik J Bochove. Spectral beam combining model for fiber lasers[C]// Proceedings of SPIE,2001,4270(1):93-96.