



·光纤激光器·

基于锥面衍射实现高效率双光栅光谱合成

吴娟¹, 李建民¹, 尹新启¹, 曾理江², 邱克强³, 李朝明⁴, 颜宏¹

(1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084;
3. 中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230029; 4. 苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006)

摘 要: 分析了基于锥面衍射的双光栅光谱合成系统的可行性, 设计了激光入射角为 Littrow 角附近的双多层介质膜(MLD)光栅光谱合成系统, 开展了两路合成实验。当入射极角等于自准直入射角, 入射方位角为 6° 时, 光栅衍射效率近似等于光束自准直入射时的衍射效率。基于锥面衍射原理, 对中心波长为 1050.24 nm 和 1064.33 nm 的两束光纤激光束进行合成, 入射极角为 43.99° , 测得合成效率为 92.9%, 较基于非锥面衍射的双光栅光谱合成系统的合成效率提高了 8.8%; 测得合成光斑光束质量 $M_x^2=1.204$, $M_y^2=1.467$, 与基于非锥面衍射的双光栅光谱合成系统输出光斑光束质量基本一致。

关键词: 锥面衍射; 非锥面衍射; 双 MLD 光栅; 光谱合成; 合成效率

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.200192

Realizing high efficiency spectral beam combining with dual-gratings based on conical diffraction

Wu Juan¹, Li Jianmin¹, Yin Xinqi¹, Zeng Lijiang², Qiu Keqiang³, Li Chaoming⁴, Yan Hong¹

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang, China;

2. Department of Precision Instrument, State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China;

4. School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: The feasibility of realizing high efficiency spectral beam combining with multilayer dielectric (MLD) gratings based on conical diffraction was analyzed. The spectral beam combining approach was designed with the incident polar angle nearly equals to the Littrow angle based on the conical diffraction theory and two unit beams were experimentally combined. The experimental results indicate that, the diffraction efficiency nearly did not change in the case of conical diffraction when θ was constant and $\varphi=6^\circ$. The combining efficiency of the output beam which was composited by two unit beams (wavelength equals to 1050.24 nm and 1064.33 nm respectively) with incident polar angle θ of 43.99° was 92.9%, 8.8% higher than that of approach based on non-conical diffraction. The beam quality factor after combining were $M_x^2=1.204$ and $M_y^2=1.467$, which were almost equivalent to that of approach based on non-conical diffraction.

Key words: conical diffraction; non-conical diffraction; dual-MLD gratings; spectral beam combining; combining efficiency

基于多层介质膜(MLD)光栅的高功率光谱合成技术近年来取得重大进展^[1-3]。光纤激光光谱合成技术要向更高功率发展, 需要进一步提升子束功率、合成效率并保持高光束质量。采用偏振无关 MLD 光栅可实现对非保偏光纤激光的高效合成, 是近期研究的热点^[4]。此外, 采用双光栅光谱合成技术可降低对子束线宽的要求^[1,5], 提升光纤激光器的单纤输出功率。将二者结合有望大幅提升光谱合成系统的输出亮度。

偏振无关光栅在设计上需要兼顾两个偏振态的衍射效率, 在光谱合成应用中还要考虑宽光谱和耐强光等设计约束, 无论从理论上还是工艺上, 均有较大难度。近年来在光谱合成应用的牵引下, 偏振无关光栅的制备取得较大

收稿日期: 2020-07-08; 修订日期: 2020-11-02

作者简介: 吴娟(1985—), 女, 硕士, 助理研究员, 从事光束合成技术研究; 29745683@qq.com。

通信作者: 颜宏(1981—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为光束合成理论与应用; yanhong@caep.cn。

进展^[6-9]。从国内外进展来看,偏振无关光栅衍射效率和色散能力得到快速提升,但文献报道的偏振无关光栅衍射效率主要是在自准直角(Littrow角)测试的,实际光谱合成应用中,入射激光和衍射激光必须有一定的夹角才能在空间上分离,因此入射激光和衍射激光存在一定偏离角。而当色散方向(垂直于光栅刻线方向)偏离角较大时,偏振无关光栅的衍射效率会出现大幅下降,严重影响光谱合成系统的合成效率。

目前文献报道的光谱合成系统,无论单光栅还是双光栅,均利用了MLD光栅的主截面内衍射,即不同波长在光栅的横断面内排布(非锥面衍射),入射光与衍射光均与光栅刻线方向垂直。当入射光线与光栅刻线不垂直时,将产生锥面衍射现象^[10-11],白光入射到光栅上将产生分布在一个锥面上的色散。根据光路可逆原理,利用光栅的锥面衍射特性也可实现不同波长的光谱合成。利用锥面衍射,可将入射激光和衍射激光在光栅刻线方向分离,光谱合成的中心波长以Littrow角入射,从而获得较高的合成效率。

本文重点分析和测试MLD光栅锥面衍射的效率,并通过理论和实验研究探索锥面衍射在双光栅光谱合成中应用的可行性。

1 锥面衍射理论

根据锥面衍射条件下的光栅方程^[11]可知,入射波矢量 k 可分解为入射极角 θ 和入射方位角 φ 。如果入射波的入射方位角 $\varphi \neq 0$,则必然有两个衍射角与其对应,一个是衍射极角 θ_j ,另一个是衍射方位角 φ_j ,二者都与入射方位角 φ 有关,光束入射及衍射极角和方位角定义见图1。

衍射角 θ_j 和衍射方位角 φ_j 分别为

$$\theta_j = \arcsin \frac{\sqrt{\sin^2 \theta \sin^2 \varphi + \left(\sin \theta \cos \varphi + j \frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2}}{n_l} \quad (1)$$

$$\varphi_j = \arctan \left[\left(\sin \theta \cos \varphi + j \frac{\lambda}{\Lambda} \right), \sin \theta \sin \varphi \right] \quad (2)$$

式中: j 为衍射级次,光谱合成应用中通常为 -1 ; Λ 为光栅周期; $l=I, II$,分别表示反射区和透射区,对应的折射率为 $n_I=1, n_{II}=n$,光谱合成采用反射式光栅,对应的 $n_I=1$ 。由式(1)~(2)可推算出光栅在任意角度光线入射下的一级衍射光线方程,从而指导光栅合成系统设计。

2 基于锥面衍射的双MLD光栅合成系统设计

当入射波的方位角 $\varphi=0$ 时,此时的光栅衍射对应为非锥面衍射,衍射光束与入射光束在同一平面,如图1中的 xz 平面;当入射波的方位角 $\varphi \neq 0$ 时,此时的光栅衍射对应为锥面衍射,由式(1)~(2)可知,通过改变入射极角 θ 和入射方位角 φ ,可得衍射光与入射光在光栅刻线方向分开,利用这一特性,可实现子束与光栅的入射角度控制在子束中心波长的Littrow角附近的光谱合成系统,从而有效提高光栅衍射效率和系统合成效率。

现设计一种基于锥面衍射的双MLD光栅合成系统,其特点在于各合成子束光轴指向一致,各子束光束高度相等、间距相等,各子束经第一块光栅衍射后其衍射光束经第二块光栅后实现共孔径合成,通过转动光栅改变入射极角 θ 和入射方位角 φ ,使得合成后的出射光与入射光存在高度差 H ,从而实现在高度方向上的错位合成,如图2所示。

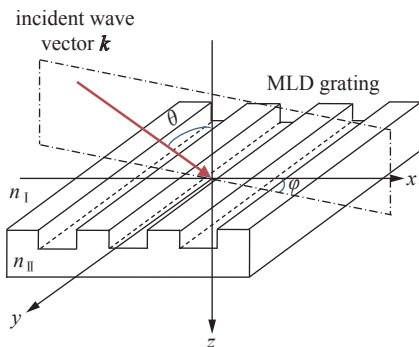


Fig. 1 Structure of the grating and angle of incident wave vector

图1 光栅结构及入射光角度示意图

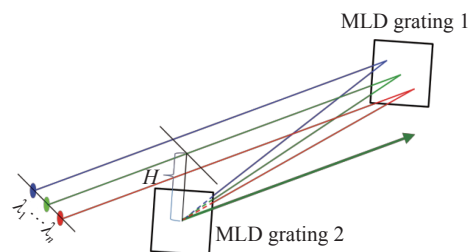


Fig. 2 Schematic of the spectral combining approach with dual-MLD-grating based on conical diffraction

图2 基于锥面衍射的双MLD光栅光谱合成示意图

理想的双光栅锥面衍射光谱合成系统表现为：①各子束经双光栅系统合成后，各子束光瞳基本重合；②各子束出射光束的光轴与入射光束光轴一致，这可通过调节第二块光栅栅线与第一块光栅栅线严格平行得以实现；③合成输出光束与全部子束入射光平面的高度差 H 满足实际应用需要。

表 1 为理论设计的一组双 MLD 光栅锥面衍射光谱合成系统参数，设计中的光栅为偏振无关光栅，光栅线密度为 1300 lines/mm，子束路数为 15 路，子束波长范围为 1050.24 ~ 1064.33 nm，子束间隔均匀，为 1.9 mm。设计的子束入射极角 θ 为 43.99°，与子束中心波长 1057.41 nm 的 Littrow 角 43.4° 接近，入射方位角 φ 为 5.77°。光栅垂直距离 L 是指两光栅在子束发射光平面上所形成的投影面的垂线距离，光瞳纵向偏差 Δy_i 为双光栅合成后子束 i 与中心波长为 1057.41 nm 的子束在 y 方向的光瞳偏差，其产生原因是由于锥面衍射的特性决定的。若希望达到最佳合成效果，即光瞳纵向偏差 Δy_i 为零，则按照表 1 所设计的子束波长，各子束发射坐标应分布于一圆弧上，如图 3 所示，即子束 x 向等间距，但各子束间在 y 方向上有高度差，这增大了工程实现难度，但通过合理的锥面衍射设计，可将这一高度差控制在很小的区域内，如 ± 0.1 mm 以内，从而可忽略各子束光瞳纵向偏差 Δy_i 对合成光斑光束质量的影响。表 1 中，第一块光栅与各入射子束的入射极角 θ 为 43.99°，入射方位角 φ 为 5.77°，两光栅栅线严格平行，光栅垂直距离 L 为 756 mm， Δy_i 被控制在 ± 0.05 mm 以内，则认为已近似达到理想效果。

表 1 一组双 MLD 光栅锥面衍射合成系统参数理论值

Table 1 Academic value of spectral combining approach with dual-MLD-grating based on conical diffraction

No.	unit beam wavelength/nm	unit beam interval/mm	$\theta/(\circ)$	$\varphi/(\circ)$	L/mm	H/mm	$\Delta y_i/\text{mm}$
1	1050.24	0	43.99	5.77	756	-147.654	0.042
2	1051.28	1.9	43.99	5.77	756	-147.659	0.037
3	1052.31	3.8	43.99	5.77	756	-147.665	0.031
4	1053.35	5.7	43.99	5.77	756	-147.67	0.025
5	1054.37	7.6	43.99	5.77	756	-147.676	0.019
6	1055.39	9.5	43.99	5.77	756	-147.682	0.013
7	1056.4	11.4	43.99	5.77	756	-147.689	0.007
8	1057.41	13.3	43.99	5.77	756	-147.696	0
9	1058.41	15.2	43.99	5.77	756	-147.703	-0.007
10	1059.41	17.1	43.99	5.77	756	-147.71	-0.014
11	1060.4	19.0	43.99	5.77	756	-147.717	-0.022
12	1061.39	20.9	43.99	5.77	756	-147.725	-0.029
13	1062.38	22.8	43.99	5.77	756	-147.733	-0.037
14	1063.35	24.7	43.99	5.77	756	-147.741	-0.045
15	1064.33	26.6	43.99	5.77	756	-147.749	-0.054

3 实验验证

3.1 基于锥面衍射的双光栅光谱合成实验系统

实验中，使用了两块线密度为 1300 lines/mm、尺寸为 140 mm × 140 mm 的偏振无关介质膜光栅，分别搭建了基于锥面衍射和非锥面衍射的两种双光栅光谱合成系统。

双光栅锥面衍射光谱合成系统按照表 1 所示参数进行实验，选用表 1 中第 1 路子束波长和第 15 路子束波长对应的参数进行实验。两台光纤激光器经端帽准直后作为子束光源，准直光束直径约 4 mm，其波长分别为 1050.24 nm 和 1064.33 nm，光源的线宽均小于 100 MHz，输出功率分别为 11.77 mW 和 11.25 mW。其中，波长为 1050.24 nm 的子束 M^2 实测值为 $M_x^2=1.188$, $M_y^2=1.211$ ；波长为 1064.33 nm 的子束 M^2 实测值为 $M_x^2=1.196$, $M_y^2=1.425$ 。

双光栅锥面衍射光谱合成系统实物如图 4 所示。实验中，将两路子束的输出端帽固定于支架上，不可随意移

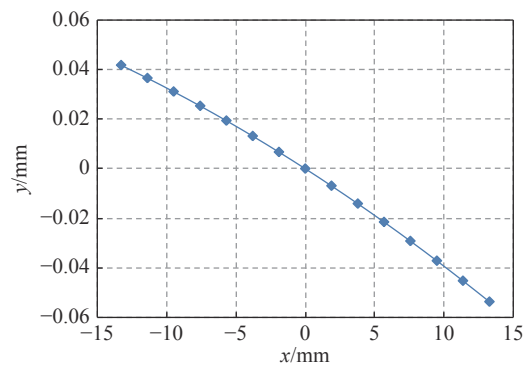


Fig. 3 Coordinates of the unit beam with $\Delta y_i=0$

图 3 $\Delta y_i=0$ 时各子束中心坐标分布

动,其中一路子束端帽固定于六维调节架上,通过调节六维调节架,使得两路子束的光轴完全平行,并与光学平台完全平行。两路子束激光距离光学平台的垂直高度均为 280.3 mm。两路子束经第一块偏振无关光栅衍射后,其衍射光线向下传输,并在距离光学平台垂直高度为 132.8 mm 处重合(与入射子束高度差为 147.5 mm),在两路子束重合的位置放置第二块偏振无关光栅,转动其角度使其与第一块光栅严格平行,经第二块光栅衍射的两路子束光瞳光轴均基本重合,即实现了共孔径光谱合成。

为明显地对比基于锥面衍射的双光栅光谱合成系统与基于非锥面衍射的双光栅光谱合成系统的合成光束质量和合成效率等,利用同样的子束光源,搭建了入射角度与两路子束波长的 Littrow 角偏差较大的基于非锥面衍射的双光栅光谱合成系统,该系统入射角度为 47°。

3.2 实验结果

3.2.1 合成光束的光束质量因子 M^2

双光栅锥面衍射光谱合成系统输出光束的 M^2 实测曲线如图 5 所示,其中, $M_x^2=1.204$, $M_y^2=1.467$ 。入射角为 47°的基于非锥面衍射的双光栅光谱合成系统的输出光束 M^2 实测曲线如图 6 所示,其中 $M_x^2=1.210$, $M_y^2=1.482$ 。由此可知,基于锥面衍射的双光栅光谱合成系统的输出光束光束质量与基于非锥面衍射的双光栅光谱合成系统的输出光束光束质量基本一致,均实现了较理想的共孔径光谱合成。

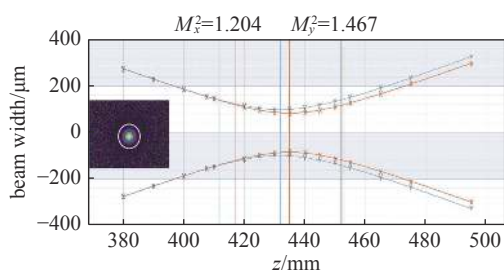


Fig. 5 Beam quality measured after the combining based on conical diffraction

图 5 双光栅锥面衍射光谱合成系统输出光束 M^2 实测曲线

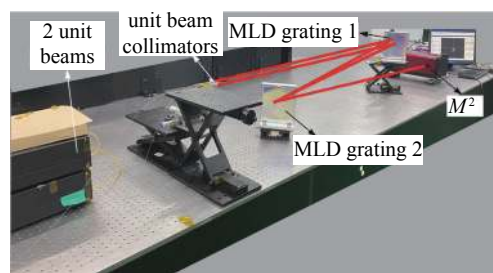


Fig. 4 Picture of the spectral combining approach with dual-MLD-grating based on conical diffraction

图 4 双光栅锥面衍射光谱合成系统

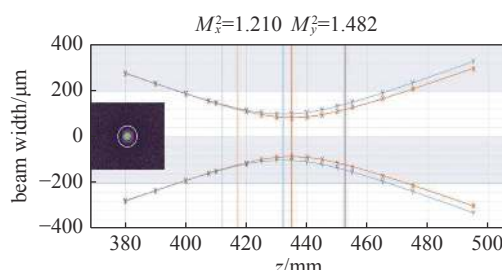


Fig. 6 Beam quality measured after the approach based on non-conical diffraction

图 6 基于非锥面衍射的光谱合成系统输出光束 M^2 实测曲线

3.2.2 光栅衍射效率随入射角度的变化

实验通过转动偏振无关光栅的角度,得到了该偏振无关光栅在锥面衍射和非锥面衍射情况下光栅衍射效率随子束入射角度的变化,测试结果如图 7 所示。该偏振无关光栅的线密度为 1300 lines/mm,测试子束中心波长为 1050.24 nm,线宽不大于 100 MHz,非锥面衍射情况下,该波长子束对偏振无关光栅的 Littrow 角为 43.05°。由图 7 可得,在非锥面衍射情况下,光栅衍射效率随入射角度与 Littrow 角的夹角的增大而减小,入射角在 Littrow 角附近时,非锥面衍射情况下的光栅衍射效率达到最大值。当 $\varphi=6^\circ$,入射光与光栅形成锥面衍射时,光栅衍射效率并无明显变化。因此,对于偏振无关光栅,考虑在入射方位角 θ 为子束中心波长的 Littrow 角附近进行光谱合成,是提高双光栅合成系统效率的关键。

3.2.3 合成效率

实验测试了图 4 所示的双光栅锥面衍射光谱合成系统的合成效率,并搭建了入射角度为 47°的基于非锥面衍射的双光栅光谱合成系统并实测了其合成效率,两种系统的合成效率对比如表 2 所示。锥面衍射的双光栅光谱合

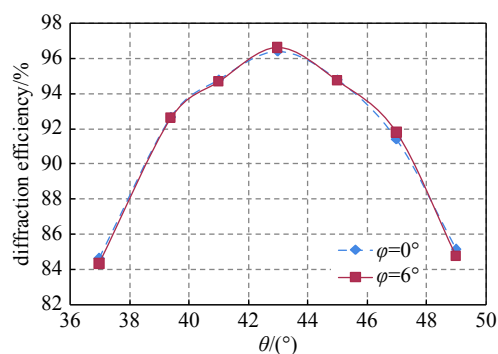


Fig. 7 Change of diffraction efficiency with different incident angle under non-conical diffraction

图 7 锥面衍射和非锥面衍射下光栅衍射效率随入射角度变化曲线

成系统的入射方位角 $\theta=43.99^\circ$, 与子束中心波长的 Littrow 角接近, 因此光栅衍射效率更大, 其系统合成效率较基于非锥面衍射的双光栅光谱合成系统的合成效率提高了 8.8%。

表 2 基于锥面衍射和非锥面衍射的双光栅光谱合成系统的合成效率对比

Table 2 Combining efficiency of the spectral combining approach under the conical diffraction and non-conical diffraction

No.	$\theta/(\circ)$	$\varphi/(\circ)$	input power/mW	output power/mW	combining efficiency/%	diffraction type
1	43.99	5.77	23.22	21.57	92.9	conical diffraction
2	47.00	0	23.22	19.53	84.1	non-conical diffraction

4 结 论

本文分析了基于锥面衍射的双光栅光谱合成系统的可行性。通过转动光栅改变入射极角 θ 和入射方位角 φ , 使得出射光与入射光存在高度差, 从而可实现子束与光栅的入射角度控制在子束中心波长的 Littrow 角附近的光谱合成系统。基于 MLD 光栅锥面衍射原理, 设计并搭建了激光入射极角 θ 为 43.99° 、入射方位角 φ 为 5.77° 的双 MLD 光栅锥面衍射光谱合成系统。实验结果表明: 当入射极角 θ 不变, 入射方位角 $\varphi=6^\circ$ 时, 光栅的衍射效率基本不受影响, 当入射方位角 φ 改变时, 光栅衍射效率随之的变化关系需进一步实验研究; 实验系统对 1050.24 nm 和 1064.33 nm 两束光纤激光光束进行合成, 测得合成光束 M^2 因子为 $M_x^2=1.204$, $M_y^2=1.467$, 与基于非锥面衍射的双光栅光谱合成系统的输出光束光束质量基本一致; 实验测得双光栅锥面衍射合成系统对 1050.24 nm 和 1064.33 nm 两路子束的合成效率为 92.9%, 较入射角度为 47° 的基于非锥面衍射的双光栅光谱合成系统的合成效率提高了 8.8%, 证明了利用锥面衍射原理设计双光栅光谱合成系统可有效提升合成效率。

致 谢 感谢清华大学精仪系李立峰向本文作者们提出利用锥面衍射可能实现光谱合成的想法。

参考文献:

- [1] Pratheepan M, Jander D R, Brooks C D, et al. Dual-grating spectral beam combination of high-power fiber lasers[J]. *IEEE J Select Top Quantum*, 2009, 15(2): 337-343.
- [2] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, et al. High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(16): 3118-3120.
- [3] Ma Yi, Yan Hong, Peng Wanqing, et al. 9.6 kW common aperture spectral beam combination system based on multi-channel narrow-linewidth fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43: 0901009.
- [4] Chen Xu, Li Chaoming, Chen Xinrong, et al. Design of multilayer film polarization-independent gratings[C]//Proc of SPIE. 2019: 11336OF.
- [5] Tian Fei, Yan Hong, Chen Li, et al. Investigation on the influence of spectral linewidth broadening on the beam quality in spectral beam combination[C]//Proc of SPIE. 2014: 92553N.
- [6] Liu Quan, Jin Yunxia, Wu Jianhong, et al. Fabrication of the polarization independent spectral beam combining grating[C]//Proc of SPIE. 2017: 1025514.
- [7] Shen Biyao, Zeng Lijiang, Li Lifeng, et al. Fabrication of polarization independent gratings made on multilayer dielectric thin film substrates[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 111013.
- [8] Chen Junming, Zhang Yibing, Wang Yonglu, et al. Polarization-independent broadband beam combining grating with over 98% measured diffraction efficiency from 1023 to 1080 nm[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(19): 4016-4019.
- [9] Mao Xinyu, Li Chaoming, Qiu Keqiang, et al. Design and fabrication of 1300-line/mm polarization-independent reflection gratings for spectral beam combining[J]. *Opt Commun*, 2020, 458: 124883.
- [10] James E H, Richard N P. Understanding diffraction grating behavior: including conical diffraction and Rayleigh anomalies from transmission gratings[J]. *Opt Eng*, 2019, 58: 087105.
- [11] Bayanheshig, Qi Xiangdong, Tang Yuguo, et al. The vector diffraction theory analysis of chromatic dispersion characteristics of phase grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(5): 1157-1161.