

体布拉格光栅色散对衍射光束质量的影响

周泰斗, 梁小宝, 赵磊, 王琳, 李超, 罗韵, 王建军, 景峰

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 基于衍射理论,建立了光束经过体布拉格光栅衍射的光束质量分析模型。在考虑入射光束参数和体布拉格光栅参数的情况下,分析任意光束经过体布拉格光栅衍射的光场分布,计算得到二阶矩意义下的束腰和光束质量 M^2 因子,并分析了体布拉格光栅空间周期、入射光束尺寸、光谱线宽和初始入射光束质量 M^2 对衍射光束质量的影响。研究表明,衍射光束质量受体布拉格光栅和入射子束共同影响:体布拉格光栅周期越小,其空间色散越严重;入射子束尺寸越大、光谱线宽越宽、初始光束质量越差,衍射后的输出光束质量劣化越明显。该模型给出了衍射后的光束质量表示,可方便快捷地得到不同输入光束衍射后的光束质量。在最高入射功率达千瓦量级时,实验测量了初始 M^2 和光谱线宽两部分贡献对衍射光束质量的结果,并与相应理论分析进行了比较。

关键词 光栅;体布拉格光栅;光束质量;光谱合成;色散;衍射

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0201019

Effect of Volume Bragg Gratings Dispersion on Diffracted Beam Quality

Zhou Taidou, Liang Xiaobao, Zhao Lei, Wang Lin, Li Chao, Luo Yun,
Wang Jianjun, Jing Feng

Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Based on the diffraction theory, an analytical model for the beam quality after the beam passing through volume Bragg grating (VBG) is built. Considering the parameters of input beam and VBGs, the optical field distribution of an arbitrary beam passing through VBG after diffraction is analyzed, and the beam waist in second moment definition and the beam quality parameter of M^2 can be calculated. The effect of space period of VBGs, input beam size, spectral bandwidth and initial input beam quality M^2 on the diffraction beam quality are analyzed. The results show that the diffracted beam quality is influenced by the VBGs and the input sub-beam commonly. The spatial dispersion becomes larger with the decrease of period of VBGs, and the output beam quality after diffraction deteriorates significantly with the increase of input sub-beam size, spectral bandwidth and the initial beam quality. The model gives the analytical formula for the beam quality after diffraction, which can be used to obtain the beam quality after diffraction for different input beams easily and quickly. At the maximum input power of kilowatt level, the contribution of the initial M^2 and the spectral line width to the diffracted beam quality is measured, and it is compared with the corresponding theoretical analysis.

Key words gratings; volume Bragg gratings; beam quality; spectral combination; dispersion; diffraction

OCIS codes 050.7330; 090.7330; 050.1960; 090.2890; 140.3298

1 引言

光纤激光器^[1]因光束质量好、转换效率高、结构简单等优点在高端工业制造、军事国防等领域应用广泛。

收稿日期: 2016-09-09; 收到修改稿日期: 2016-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(11474257)、国家自然科学基金青年基金(11404305)

作者简介: 周泰斗(1988—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器及高功率光谱组束方面的研究。

E-mail: taidou88@126.com

导师简介: 景峰(1968—),男,研究员,博士生导师,主要从事先进激光技术等方面的研究。

E-mail: jingfeng09@sina.cn (通信联系人)

然而,现有的非线性效应、光纤损伤、模式不稳定等^[2-6]诸多因素限制了单台光纤激光器的输出能力。光束组束技术^[7-8]被认为是大幅提高激光输出的有效途径,它将多束中等功率、光束质量好的激光进行合成,从而获得成倍提高的输出功率而光束质量没有出现大的劣化。当前能够满足这种要求的组束方式有相干组束、光谱组束和偏振组束三种方式。相干组束^[9-11]可以大大地提高光束的空间和谱亮度,但其要求对组束激光的频率和相位进行精确控制,技术难度大;偏振组束^[12]中光束的偏振态限制了其扩展能力;相比较而言,光谱组束^[13-16]结构相对简单,系统稳定,无需对光源进行相位控制,且扩展能力强,是近年来的研究热点。体布拉格光栅^[17-19](VBG)具有与偏振无关、衍射效率高、热机械性稳定以及激光损伤阈值高等优点,被广泛应用于光谱组束及高功率激光器中。

在光谱组束中,VBG 作为合成元件将与子束相互作用,子束和 VBG 的特性均影响着衍射后的输出光束质量,包括子束的初始光束质量、光谱线宽、光束尺寸以及 VBG 的色散特性等。组束系统最终的光束质量直接受多路衍射光束和透射光束的光束质量共同影响,因而分析光束经过 VBG 衍射后的光束质量并控制衍射光束的光束质量为优质,对于优质组束工程设计具有指导意义。当前研究人员对 VBG 衍射效率以及组束系统的效率进行了大量分析,对 VBG 衍射光束质量及组束系统的光束质量分析较少,阴素芹等^[20]和 Shu H 等^[21]分别对光束经过畸变 VBG 的光束质量进行了数值分析,但都侧重于对 VBG 参量的分析。本文基于衍射理论,同时考虑入射光束参数和 VBG 参数的影响,对入射光经过 VBG 的衍射场分布进行了分析,得到了 VBG 衍射光束质量的解析表示。对 VBG 空间周期和子束线宽、光束质量和光束尺寸的分析表明,VBG 周期越小、子束光谱线宽越宽、光束尺寸越大、初始光束质量越差,衍射后的输出光束质量劣化越严重。

2 基本原理

2.1 理论模型

VBG 是一种折射率调制型光栅,它通常被分为两种结构:透射式和反射式,前者的入射光束和衍射光束在 VBG 两侧,后者的入射光束和衍射光束在 VBG 同侧,如图 1 所示。 Z 为光栅的厚度方向,VBG 在 X 、 Y 方向被认为是无限扩展的。

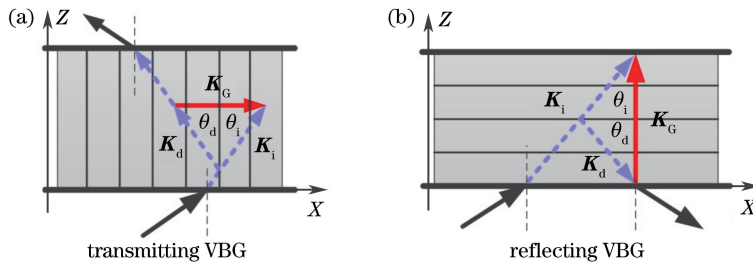


图 1 两种 VBG 结构示意图。(a)透射式;(b)反射式

Fig. 1 Two type of VBG structure. (a) Transmitting; (b) reflecting

透射式 VBG(T-VBG)和反射式(R-VBG)的物理本质是相同的:光的衍射过程可以理解为光被声波的弹性散射过程。此过程满足微观的能量动量守恒

$$\lambda_d = \lambda_i = \lambda, \quad (1)$$

$$|\mathbf{K}_i| \sin \theta_i + |\mathbf{K}_d| \sin \theta_d = |\mathbf{K}_G|, \quad (2)$$

式中 λ_i, λ_d 分别为入射光和衍射光在真空中的波长, $\mathbf{K}_i, \mathbf{K}_d, \mathbf{K}_G$ 分别为 VBG 内入射光、衍射光和光栅声格波的波矢,其大小分别为 $|\mathbf{K}_i| = 2\pi n_{av} / \lambda_i$, $|\mathbf{K}_d| = 2\pi n_{av} / \lambda_d$, $|\mathbf{K}_G| = 2\pi / \Lambda$, θ_i 和 θ_d 分别为 VBG 内部入射光、衍射光与 VBG 栅格的夹角, Λ 为 VBG 栅格间距(VBG 的空间周期), n_{av} 为 VBG 的平均折射率。联立(1)~(2)式,可得到 VBG 的布拉格条件

$$\sin \theta_i + \sin \theta_d = \frac{\lambda}{n_{av} \Lambda}. \quad (3)$$

经 VBG 衍射后的光场分布主要受到两方面因素影响:入射光束的发散角和光谱线宽,它们均会引起部分衍射光场对光轴的偏离。当入射平行光束轻微偏离所预设的角度时,出射角偏移为

$$\Delta\theta_d \cos \theta_d = -\Delta\theta_i \cos \theta_i. \quad (4)$$

那么对于任意一个入射光场 $u(x, y, \lambda)$, 这里 x, y 为垂直于光轴的平面上的坐标, 对其做一维傅里叶变换:

$$G(p, y, \lambda) = \int dx \times \exp(-2\pi ipx) u(x, y, \lambda) \Leftrightarrow u(x, y, \lambda) = \int dp \times \exp(2\pi ipx) G(p, y, \lambda), \quad (5)$$

式中 G 就是在 x 方向的平面波展开系数。因为物理光学对光束倾斜是通过相因子 $\varphi = kx \tan \theta$ 来体现的, 则对于 p 分量的平面波其离轴角度为

$$\Delta\theta_i \approx p\lambda \rightarrow \Delta\theta_d = -p\lambda \cos \theta_i / \cos \theta_d. \quad (6)$$

因此, 计入衍射后离轴角变化的衍射光场为

$$u'(x', y, \lambda) = \int (d\Delta\theta_d) \exp(ikx \Delta\theta_d) G(\Delta\theta_d, y, \lambda) = u(-x' \cos \theta_i / \cos \theta_d, y, \lambda), \quad (7)$$

上式推导中用到了

$$\int dp \times \exp [2\pi ip(x - y)] = \delta(x - y). \quad (8)$$

显然, 这里已经自动计入了光栅衍射造成的物理尺寸变化对光场形态的影响

$$x \rightarrow x' = x \cos \theta_d / \cos \theta_i. \quad (9)$$

那么忽略衍射导致的光场形态变化和衍射损耗, 考虑到能量守恒, 则光栅衍射后的光场表示为

$$u'(x', y, \lambda) = \sqrt{\frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_d}} u(-x' \cos \theta_i / \cos \theta_d, y, \lambda). \quad (10)$$

可以验证(10)式满足能量守恒, 此为入射光束的发散角对衍射光场带来的影响。

当一束有光谱线宽的光以相同的角度入射在光栅上时, 由(3)式可知, 波长偏差导致的出射角偏移为

$$\Delta\theta_d = \frac{\Delta\lambda}{n_{av} \Lambda \cos \theta_d}, \quad (11)$$

此为入射光束的线宽对衍射光场的影响, 它表示 VBG 的光谱空间色散, 因此最终还需要在(7)式中附加一个倾斜因子

$$u'(x, y, \lambda_0 + \Delta\lambda) = \sqrt{\frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_d}} \exp [ik \Delta\lambda x / (n_{av} \Lambda \cos \theta_d)] u(-x \cos \theta_i / \cos \theta_d, y, \lambda_0), \quad (12)$$

式中 λ_0 是 VBG 的谐振布拉格波长, 这里将哑变量 x' 写为 x 。

当考虑有线宽光束入射时, 假设光谱为 $\rho(\lambda)$, 对准中心波长为 λ_0 , 在较窄谱段内认为所有波长的光空间分布都一样, 那么可以将入射光场写为

$$U(x, y, \lambda) = \sqrt{\rho(\lambda)} u(x, y). \quad (13)$$

那么任意光束经过一块衍射光栅后的近场光束为

$$U'(x, y, \lambda) = \sqrt{\frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_d}} \rho(\lambda) \exp [2\pi i(1 - \lambda_0 / \lambda)x / (n_{av} \Lambda \cos \theta_d)] u(-x \cos \theta_i / \cos \theta_d, y). \quad (14)$$

所以经过单光栅衍射后的远场为

$$U_f(\xi, y, \lambda) = C \sqrt{\frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_d}} \rho(\lambda) \int d\eta \times \exp(-2\pi i \eta \xi / f\lambda) \exp [2\pi i(1 - \lambda_0 / \lambda)\eta / (n_{av} \Lambda \cos \theta_d)] u(-\eta \cos \theta_i / \cos \theta_d, y) = \sqrt{\rho(\lambda)} U_f^{(0)} [\xi - (\lambda - \lambda_0) f' / (n_{av} \Lambda \cos \theta_i), y], \quad (15)$$

式中 $U_f^{(0)}$ 表示以 $u(x, y)$ 为出射场计算的焦距为 f' 的远场, C 表示衍射积分的位相因子。因此用二阶矩表示的远场发射角为

$$\theta^2 = \frac{1}{P f'^2} \int dx dy \cdot x^2 \int d\lambda \times \rho(\lambda) |U_f^{(0)} [x - (\lambda - \lambda_0) f' / (n_{av} \Lambda \cos \theta_i), y]|^2 = \theta_0^2 + \frac{1}{n_{av}^2 \Lambda^2 \cos^2 \theta_i P} \int d\lambda \times \rho(\lambda) (\lambda - \lambda_0)^2, \quad (16)$$

式中 θ_0 为单频光的远场发射角, P 为归一化积分因子。记初始入射的光束质量为

$$M^2 = \frac{\omega_0 \theta_0}{\lambda / \pi}, \quad (17)$$

式中 ω_0 为光斑尺寸。那么,衍射后光束质量劣化可表示为

$$M_{\text{diff}}^2 = \frac{\omega_0 \Delta\theta}{\lambda / \pi} = M^2 \sqrt{1 + \frac{1}{\Delta\theta_0^2 n_{\text{av}}^2 \Lambda^2 \cos^2 \theta_i} \int d\lambda \times \rho(\lambda) (\lambda - \lambda_0)^2}, \quad (18)$$

这里为避免混淆,用 $\Delta\theta$ 来表示衍射后光束的发散角。当光谱 $\rho(\lambda)$ 为高斯分布时可表示为

$$M_{\text{diff}}^2 = M^2 \sqrt{1 + \frac{1}{2 \ln 2} \left(\frac{\Delta\lambda}{n_{\text{av}} \Lambda \Delta\theta_0 \cos \theta_i} \right)^2}, \quad (19)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为光谱的半峰全宽(FWHM), M^2 为入射光束的初始光束质量。此外,还需注意到以上结果是在 VBG 内部的结果,考虑到 VBG 内外的折射效率,VBG 外的发散角 $\Delta\theta'$ 与内部发散角 $\Delta\theta$ 的关系为

$$\Delta\theta = \frac{\sqrt{1 - n_{\text{av}}^2 \sin^2 \theta_i}}{n_{\text{av}} \cos \theta_i} \Delta\theta'. \quad (20)$$

因此 VBG 外的发散角要大于 VBG 内部。考虑到此因素后,对于光谱分布为高斯型,光束经 VBG 衍射后的光束质量劣化可以表示为

$$M_{\text{diff}}^2 = M^2 \sqrt{1 + \frac{1}{(4\Lambda^2 - \lambda_0^2) \ln 2} \left(\frac{\Delta\lambda}{\Delta\theta'_0} \right)^2}. \quad (21)$$

2.2 光束质量劣化

衍射光束的光束质量劣化随 VBG 参数和入射光束初始条件的变化可以通过(21)式明晰地表示。从(21)式可以看出,光束经过 VBG 衍射后的光束质量由入射光束的初始光束质量 M^2 、光谱线宽 $\Delta\lambda$ 、光斑尺寸 ω_0 和 VBG 的空间周期 Λ 决定。先看初始光束质量和线宽的影响,取入射光束中心波长 $\lambda_0 = 1064 \text{ nm}$, VBG 空间周期为 1200 line/mm , 光束被准直为 $\omega_0 = 2 \text{ mm}$, 改变初始光束质量,衍射后的光束质量变化如图 2 所示。可以看出:1) 在其他条件不变的情况下,入射光束初始光束质量 M^2 越大,衍射后的光束质量越差;2) 改变入射光谱线宽,三条曲线中衍射后的光束质量变化趋势相同,均表现为光谱线宽越大,衍射后光束质量越差;3) 在相同光谱线宽条件下,由初始光束质量差异带来的衍射光束质量差异发生变化,随着光谱线宽的增加,该差异逐渐减小。

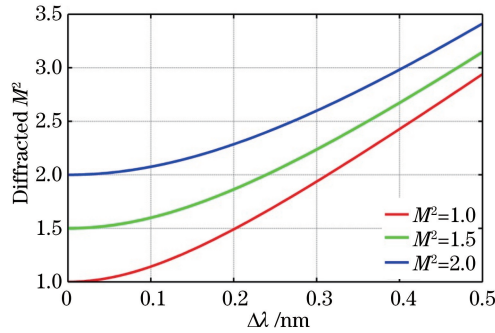


图 2 VBG 衍射后的光束质量随初始光束质量和光谱线宽的变化

Fig. 2 Beam quality after diffracting through VBG changes with initial beam quality and spectral line width

再看光斑尺寸和 VBG 的空间周期对衍射后光束质量的影响,取入射光束是近衍射极限的, $M^2 = 1.2$, 入射光束中心波长 $\lambda_0 = 1064 \text{ nm}$ 。图 3 给出了光斑尺寸分别为 $\omega_0 = 2 \text{ mm}$ 和 $\omega_0 = 4 \text{ mm}$ 、空间周期分别为 $1200, 1500, 1800 \text{ line/mm}$ 时 VBG 衍射光束质量劣化。

从图 3 可以看到:衍射光束质量 M^2 的劣化随着 VBG 空间周期的减小(线对增大)越来越严重,且当 VBG 的空间周期减小时,光谱线宽的增加会导致衍射光束质量的迅速下降,这是因为 VBG 的空间周期越小(线对越大),VBG 的光谱空间色散越严重,宽谱光束经过 VBG 衍射后在空间上分散得越开,从而导致衍射后光束质量劣化严重。从图 3 还可以看出,对同一面 VBG,同样的光谱和初始 M^2 条件下,入射的光束尺寸越大,衍射后的光束质量越差。

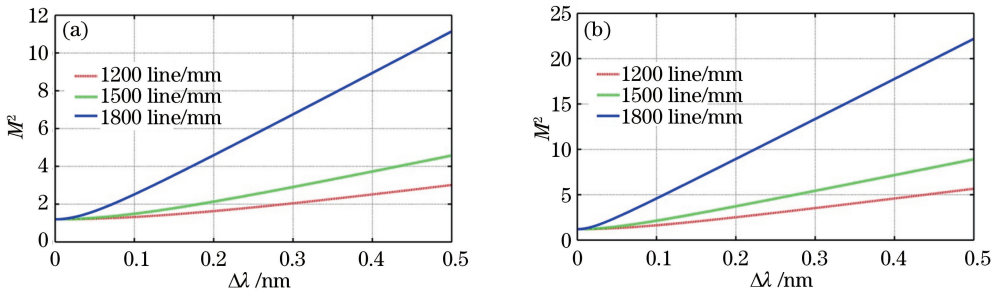


图 3 光栅周期和光束尺寸对衍射后光束质量的影响。(a) $\omega_0=2$ mm; (b) $\omega_0=4$ mm

Fig. 3 Influence of grating period and beam size on beam quality after diffraction. (a) $\omega_0=2$ mm; (b) $\omega_0=4$ mm

光斑越大,在同等波长漂移情况下, M^2 越差。这是容易理解的,因为大光斑对应小衍射角,但是同等波长漂移引起同等的出射光轴漂移,引起同等程度的远场光斑发散,相对衍射极限来说就是更大的发散角。对于 $\omega_0=2$ mm 光束尺寸,要使衍射后的光束质量小于 2,VBG 周期为 1200 line/mm 时,光谱 FWHM 线宽应小于 0.3 nm,而 VBG 周期为 1500 line/mm 时,光谱 FWHM 线宽应小于 0.2 nm。

3 实验结果

为了验证上述分析,进行了 VBG 衍射实验,购于美国 OptiGrate 公司的透射式 VBG 型号为 TBG-1065-Q04-18,其参数如下:设计谐振波长 1065 nm,衍射效率高达 94.1%,空间周期为 $0.8 \mu\text{m}$ (1250 line/mm), VBG 厚度为 1 mm,在空气中的入射角和出射角分别为 -40° 和 45° 。该透射式 VBG 质量良好,光栅尺寸为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,净口径大于 85%,表面平整度(633 nm 下)达 $\lambda/4$,在 1064 nm 处表面反射率小于 0.3%。自主研发的高功率窄线宽光纤激光器输出最大功率达 1.3 kW,中心波长为 1057 nm,已知 VBG 的设计波长为 1065 nm,但由于 VBG 独特的衍射特性,中心波长为 1057 nm 的光束在改变入射角度时也能满足谐振布拉格条件;激光输出光束的半径被准直为 5 mm,随着光纤激光输出功率的增加,激光器输出光束的线宽和光束质量均逐渐增大,由(21)式可知,两因素共同作用导致实验测量的光束质量逐渐劣化。将实验结果与理论分析进行对比,其结果如图 4 所示。图 4 中,圆形表示实验测量,正方形表示同时考虑光谱线宽和初始光束质量的理论结果;菱形线表示仅考虑光谱线宽时的理论结果,初始光束质量取 $M^2=1.05$;倒三角线表示仅考虑初始光束质量时的理论结果,光谱 FWHM 线宽取 $\Delta\lambda=0.0691$ nm。

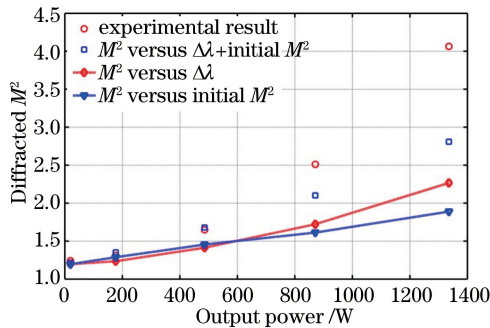


图 4 理论分析与测量的实验结果

Fig. 4 Theoretical analysis and measured experimental results

4 分析与讨论

随着输出功率的增加,光纤激光器的输出因非线性效应而变差,初始光束质量和光谱 FWHM 线宽均逐渐增大,与光纤激光输出功率一一对应,其关系如表 1 所示,此两因素耦合在一起,共同导致了衍射光束质量的下降,因此在与实验测量对比时的理论分析过程中需同时考虑这两个因素。从图 4 中可以看出,仅考虑初始光束质量或光谱线宽时的结果与实验测量的结果出入较大,不能反映真实的情况,但单独考虑其中一因素

时的变化趋势与上文分析一致,初始光束质量越差,衍射后光束质量越差;光谱线宽增大,衍射后光束质量下降;同时考虑初始光束质量和光谱线宽的贡献时,实验测量与理论分析结果符合良好。此外,还发现在低功率时实验结果与理论计算符合得很好,超过 500 W 后,两者出现差异,且随着功率进一步增加,两者之间的差异越来越大。这是由于随着功率的增加,VBG 热负载越来越严重,VBG 出现热膨胀和面型畸变,引起光栅周期非均匀变化,布拉格条件失谐,从而造成光束质量下降。这点可以从表 1 中 VBG 的表面峰值温度得到体现。

表 1 实验参数

Table 1 Experiment parameters

Power /W	Line width /nm	Initial M^2	Diffracted M^2	Temperature / $^{\circ}\text{C}$
19.5	0.0691	1.05	1.241	21.3
177	0.0783	1.153	1.310	31.6
486	0.114	1.338	1.650	50.5
871	0.1646	1.507	2.511	78.7
1336	0.2421	1.8	4.064	103

此外,图 5 给出了不同功率下衍射光束的近场光斑。可以看出在低功率(小于 500 W)时,衍射光束有着近高斯分布的圆形光斑,光束质量好。高功率时,初始光束质量差,光谱线宽大,衍射后光束质量劣化,近场光斑出现横向拉伸,这表明了 VBG 的色散存在。最大功率输出时,光斑甚至出现了畸变,在光斑中心附近有一些小的高频调制成分,这说明在高功率负载下,VBG 受热使得 VBG 内部发生了复杂的非均匀体膨胀以及面型畸变。要想排除热带来的问题,应加以利用更低吸收系数的光栅基底材料、合适的冷却手段和光束整形技术。

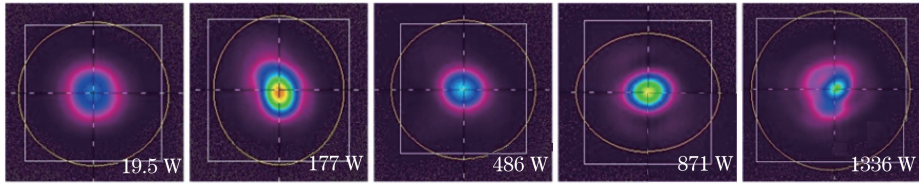


图 5 不同功率输出时的衍射光束近场光斑分布

Fig. 5 Near-field beam profile of diffracted beam under different power outputs

5 结 论

采用衍射理论,建立了 VBG 衍射光束质量分析模型,在最大功率达千瓦量级时,实验测量了初始 M^2 和光谱线宽两部分贡献的结果,与理论分析具有良好的一致性。该模型较为全面地考虑了入射光束参量(初始光束质量、光谱线宽、光束准直尺寸)和 VBG 参量(空间周期)的影响。理论计算结果表明:1) 光束经过 VBG 衍射后的光束质量包括入射光束本身以及 VBG 两方面因素的贡献;2) VBG 的空间周期对衍射的光束质量影响较大,周期越小,VBG 的光谱空间色散越大,与光谱线宽相互作用时的光束质量劣化就越严重,对 $1\ \mu\text{m}$ 附近光束,应选取 VBG 的空间周期较大;3) 入射光束的光束参量也影响着最终衍射后的光束质量,初始光束质量越差、光谱线宽越宽、光束尺寸越大时,衍射后的光束质量会产生越严重的劣化,因此,要想获得高的衍射光束质量,入射光束初始光束质量要好、光谱线宽要窄,同时光束准直尺寸要小;4) 高质量光纤激光通常有近高斯型强度分布,相应的 VBG 表面有近高斯型的温度分布,中心高、边缘低,VBG 经历了非均匀的热膨胀和面型畸变,这些复杂的热效应进一步影响着衍射输出的光束质量,为减少热效应带来的影响,应加以利用更低吸收系数的光栅基底材料、合适的冷却手段和光束整形技术。下一步将对多光束组束系统的光束质量以及 VBG 在高功率负载下的热行为进行分析。

参 考 文 献

[1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.

- [2] Ke W W, Wang X J, Bao X F, *et al.* Thermally induced mode distortion and its limit to power scaling of fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 14272-14281.
- [3] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10180-10192.
- [4] Ward B, Robin C, Dajani I. Origin of thermal modal instabilities in large mode area fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11407-11422.
- [5] Eidam T, Wirth C, Jauregui C, *et al.* Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(14): 13218-13224.
- [6] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [7] 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.
- [8] Li Yongzhong, Fan Dianyuan. Beam combining of fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2005, 42(9): 26-29.
李永忠, 范滇元. 光纤激光器光束的叠加技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(9): 26-29.
- [9] Wang X L, Zhou P, Ma Y X, *et al.* Active phasing a nine-element 1.14 kW all-fiber two-tone MOPA array using SPGD algorithm [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3121-3123.
- [10] Lou Qihong, He Bing, Zhou Jun. Fiber lasers and it's coherent beam combination [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2007, 36(2): 155-159.
楼祺洪, 何 兵, 周 军. 光纤激光器及其相干组束 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(2): 155-159.
- [11] Ma Y X, Wang X L, Leng J Y, *et al.* Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 951-953.
- [12] Uberna R, Bratcher A, Tiemann B G. Power scaling of a fiber master oscillator power amplifier system using a coherent polarization beam combination [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(35): 6762-6765.
- [13] Bochove E J. Theory of spectral beam combining of fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(5): 432-445.
- [14] Seviran A, Andrusyak O, Ciapurin I, *et al.* Efficient power scaling of laser radiation by spectral beam combining [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(4): 384-386.
- [15] Ott D, Divliansky I, Anderson B, *et al.* Scaling the spectral beam combining channels in a multiplexed volume Bragg grating [J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29620-29627.
- [16] Drachenberg D R, Andrusyak O, Venus G, *et al.* Thermal tuning of volume Bragg gratings for spectral beam combining of high-power fiber lasers [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(6): 1242-1246.
- [17] Liang Xiaobao, Chen Liangming, Li Chao, *et al.* High average power spectral beam combining employing volume Bragg gratings [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(7): 071012.
梁小宝, 陈良明, 李 超, 等. 体布拉格光栅用于高功率光谱组束的研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(7): 071012.
- [18] Shen Benjian, Zheng Guangwei, Tan Jichun, *et al.* Spectral beam combining by phase-shifted reflective volume Bragg gratings [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(12): 3056-3059.
沈本剑, 郑光威, 谭吉春, 等. 相移反射体布拉格光栅在谱合成中的应用 [J]. *中国激光*, 2010, 37(12): 3056-3059.
- [19] Shen Benjian, Zheng Guangwei, Tan Jichun, *et al.* Diffraction characteristic analysis of sinc-apodized reflective volume Bragg grating [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(9): 0902003.
沈本剑, 郑光威, 谭吉春, 等. Sinc 切趾反射体布拉格光栅衍射特性分析 [J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0902003.
- [20] Yin S Q, Zhang B, Dan Y Q. Effects of the deformation of reflection volume Bragg gratings on the M^2 -factor of super-Gaussian laser beams [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(7): 1418-1423.
- [21] Shu H, Bass M. Modeling the reflection of a laser beam by a deformed highly reflective volume Bragg grating [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(15): 2930-2938.