

复用体布拉格光栅的谐波分离以及光束取样特性研究

郑光威^{1,2} 谭吉春³ 沈本剑³ 何焰蓝³ 王 逍⁴

¹ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

² 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077; ³ 国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073

⁴ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 复用体布拉格光栅具有良好的波矢选择性以及可控的衍射效率。根据 Kogelnik 耦合波理论, 分析复用体布拉格光栅作为谐波分离以及光束取样元件的可行性。结果表明, 采用复用两片反射型以及单片透射型体布拉格光栅的结构, 使得两片反射型体布拉格光栅对混有三个倍频成分的主光束中的基频、二倍频光束(1053 nm 和 527 nm)高效率衍射(色分离度分别为 0.2% 和 0.3%), 而对三倍频光束(351 nm)高效率透射(接近于 100%), 以达到谐波分离的目的; 而透射型体布拉格光栅对三倍频光束低效率衍射(等于 0.98%), 且衍射光束的空域时域光强分布与三倍频光束基本一致, 以达到光束取样的目的。因此复用体布拉格光栅可同时实现谐波分离以及光束取样的功能, 这给传统谐波分离以及光束取样光栅提供了一种备选方案。

关键词 光栅; 复用体布拉格光栅; 谐波分离; 光束取样; Kogelnik 耦合波理论

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0305001

Research on Harmonic Wave Separation and Beam Sampling Characteristics of Superposed Volume Bragg Gratings

Zheng Guangwei^{1,2} Tan Jichun³ Shen Benjian³ He Yanlan³ Wang Xiao⁴

¹ College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

² Telecommunication Engineering Institute of Air Force Engineering University, Xi'an, Shannxi 710077, China

³ College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

⁴ Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Superposed volume Bragg gratings (SVBG) has the characteristics of excellent wave vector selectivity and adjustable diffraction efficiency. Based on Kogelnik's coupled wave theory, the potential applications of SVBG for harmonic-wave separation and beam sampling are analyzed. The results show that the SVBG is made up of two pieces of reflecting volume Bragg grating (VBG) and one piece of transmitting VBG. The two pieces of reflecting VBG can highly diffract fundamental frequency and second harmonic beams (harmonic-wave separation ratios are 0.2% and 0.3% respectively), while do little effects on the third harmonic beam (transmittance is up to nearly 100%) in order to make the harmonic-wave separation. The transmitting VBG has low diffraction efficiency for third harmonic beam (only 0.98%). The spatial and temporal intensity distributions of the diffractive beam are similar to those of the third harmonic beam, so the harmonic-wave separation and beam sampling can be realized simultaneously based on the SVBG. The SVBG is a good potential substitution for the traditional grating for the harmonic-wave separation and beam sampling.

Key words gratings; superposed volume Bragg gratings; harmonic-wave separation; beam sampling; Kogelnik's coupled-wave theory

OCIS codes 050.1940; 090.1970; 090.7330

收稿日期: 2010-08-17; 收到修改稿日期: 2010-10-02

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金(NSAF10676038)资助课题。

作者简介: 郑光威(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率激光空间低通滤波以及体布拉格光栅的衍射特性等方面的研究。E-mail: zgw198196@126.com

导师简介: 谭吉春(1947—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光信息获取、传输与处理等方面的研究。

E-mail: nudt2004@126.com

1 引 言

谐波分离以及光束取样光栅是惯性约束聚变(ICF)终端系统的重要组成部分^[1~6]。它们分别用来实现从混有基频 1053 nm 与二倍频 527 nm 的主光束中分离出三倍频 351 nm 光束(谐波分离),以及取样三倍频光束(光束取样)用以实时分析其光束质量的功能。当前实现上述两种功能的方法主要有:1)分离元件法,即谐波分离与光束取样分别由两块特定的浮雕型光栅来实现^[3~5];2)集成元件法,即用一块浮雕型光栅来同时实现这两个功能^[1,6]。这两种方法都是利用浮雕型光栅对不同波长光束有着不同衍射特性的特点,因此本质上并无太大差别,集成元件法主要是考虑到要减少 ICF 终端系统光学元件的数量以及损耗,只是对分离元件法的优化。

体布拉格光栅(VBG)以其优良的角度、波长选择特性以及可控的衍射效率(0.1%~99%以上)被广泛应用于各种光学系统中,如半导体激光器的光束优化、光束的时域和空域整形、光束相干以及非相干合成等领域^[7~15]。由 University of Central Florida 制作

的 VBG 记录材料——光热折变玻璃,具有在 350~2700 nm 波段内低吸收(小于 0.01 cm⁻¹)、高热稳定性以及高抗光损伤阈值等特点,这给 VBG 应用于高功率激光领域铺平了道路^[16]。谐波分离与光束谱合成可以理解两个相逆的物理过程,而基于 VBG 的谱合成正是当前非相干合成领域的热点,并业已成熟,因此不同于浮雕型光栅,本文提出了基于复用体布拉格光栅(SVBG)的谐波分离装置,并在此基础上集成了具有光束取样功能的透射型 VBG 用以在单片基质上同时实现谐波分离以及光束取样功能的光学元件。利用 Kogelnik 耦合波理论详细分析了 SVBG 在完成上述两个功能时的特性,给出了衡量谐波分离效果的色分离度以及三倍频光束透射效率这两个参量的数值,并对比了与传统装置的优缺点。

2 复用体布拉格光栅的基本装置

兼具谐波分离以及光束取样功能的 SVBG 装置如图 1 所示。

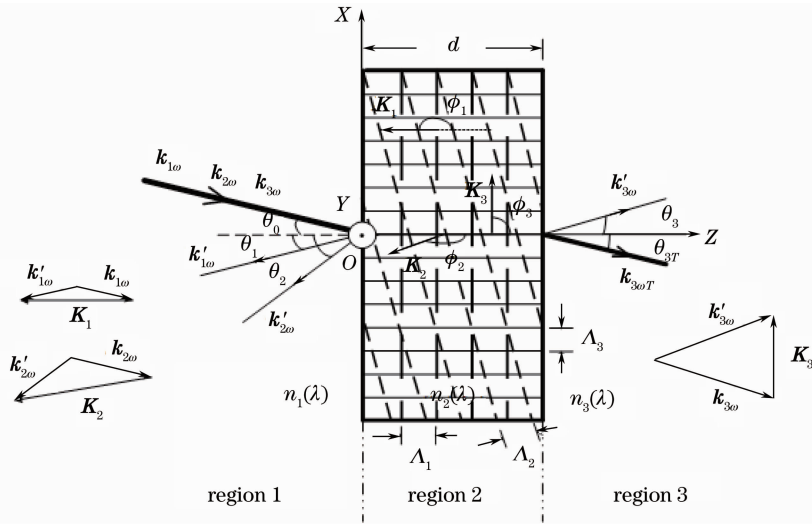


图 1 兼具谐波分离以及光束取样功能的 SVBG 装置

Fig. 1 Schematic of SVBG with the characteristics of harmonic-wave separation and beam sampling

图 1 中 $XYZO$ 为空间直角坐标系, XOZ 在纸面内, Y 轴垂直于纸面朝外。区域 2 为光热折变玻璃基质(各向同性材料),其中复用了三块体布拉格光栅 $VBG_m (m = 1, 2, 3)$,实线条、短虚线条和长虚线条分别表示这三个光栅的等折射率面与 XOZ 面的交线;光栅矢量用 K_m 表示,其方向垂直于等折射率面且在 XOZ 面内,其大小为 $2\pi/\Lambda_m, \Lambda_m$ 为光栅的周期; d 为光栅的厚度; $k_{m\omega}$ 为 m 倍频光束的中心波矢,其大小为 $2\pi n_1(\lambda_m)/\lambda_m$ (区域 1 中), λ_m 为 m 倍频光束

在真空中的中心波长; $k'_{m\omega}$ 为中心波矢 $k_{m\omega}$ 经 VBG_m 的衍射波矢;当 $k_{m\omega}$ 满足 VBG_m 的布拉格条件时,波矢 $k_{m\omega}, k'_{m\omega}$ 与光栅矢量 K_m 构成如图 1 所示的封闭三角形; $k_{3\omega T}$ 表示透射出此 SVBG 的三倍频光束中心波矢; ϕ_m 表示 K_m 与 Z 轴正向的夹角; θ_0 表示入射光束中心波矢与 Z 轴正向的夹角; θ_m 表示衍射角; θ_{3T} 表示 $k_{3\omega T}$ 与 Z 轴正向的夹角; $n_1(\lambda)$ 和 $n_3(\lambda)$ 分别表示光栅左右两侧介质的折射率; $n_2(\lambda)$ 表示复用体光栅的折射率:

$$n_2(\lambda) = n_{20}(\lambda) + n_{21}(\lambda) \cos(\mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{r} + \Phi_1) + n_{22}(\lambda) \cos(\mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{r} + \Phi_2) + n_{23}(\lambda) \cos(\mathbf{K}_3 \cdot \mathbf{r} + \Phi_3), \quad (1)$$

式中 $n_{20}(\lambda)$ 为光栅的平均折射率, $n_{2m}(\lambda)$ 为 VBG_m 的折射率调制度, \mathbf{r} 表示位矢 (x, y, z) , Φ_m 为各光栅的初始相位。

由衍射光束与入射光束在光栅的同侧或异侧, 可以将体布拉格光栅分为反射型或透射型光栅^[17]。由图 1 可以看出, VBG₁ 和 VBG₂ 均为反射型体布拉格光栅, 而 VBG₃ 由于衍射光束与入射光束在光栅的两侧, 因而为透射型体布拉格光栅。

此装置的主要工作原理为: 选择 VBG_m 的合适参量, 使得基频、二倍频光束的中心波矢 $\mathbf{k}_{1\omega}$ 和 $\mathbf{k}_{2\omega}$ 分别满足 VBG₁ 和 VBG₂ 的布拉格条件, 并分别对它们高效率衍射, 而 VBG₁ 和 VBG₂ 均对三倍频光束高效率透射, 这样就可以使得混有三个倍频的光束能够实现空间分离, 达到光束谐波分离的效果。而三倍频光束中心波矢 $\mathbf{k}_{3\omega}$ 满足 VBG₃ 的布拉格条件, 但此时衍射效率较低(接近于 1%), 使得部分三倍频光束发生低效率衍射, 达到了光束取样的功能, 定性而言整个装置可在单片介质中完成谐波分离以及光束取样的能力。

3 SVBG 的谐波分离以及光束取样特性分析

要分析 SVBG 的谐波分离以及光束取样特性, 首先得研究其衍射特性。分析其衍射特性的方法有很多, 如 Kogelnik 耦合波理论和严格耦合波理论等^[17, 18]。由于 Kogelnik 耦合波理论具有解析解, 显式地给出了衍射效率随光栅各参量的变化关系, 且其理论分析结果与实验结果比较吻合, 因而受到各方青睐, 因此本文也选用 Kogelnik 耦合波理论来研究此 SVBG 对混有三个倍频光束的衍射特性, 并定量分析此光栅的谐波分离以及光束取样特性。在分析 SVBG 衍射特性之前, 作如下两点假设: 1) 参照惯性约束聚变所常用的光束类型, 假定归一化的各谐波空域时域光强分布均为平顶分布, 且空域和时域宽度分别为 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 和 1 ns ; 2) 各 VBG_m 只对 m 倍频光束有衍射作用, 各体光栅之间没有串扰, 这一点假设在实际应用中很容易满足, 因为 VBG 的角度选择性比较好, 而且各光栅矢量之间的夹角较大, 降低了相互串扰的可能性, 因此我们可单独分析各 VBG_m 对 m 倍频光束的衍射特性。

3.1 谐波分离特性

由 Kogelnik 耦合波理论可知, 反射型 VBG 对单色平面波的衍射效率表示为^[17]

$$\eta_{\nu_{\omega}}(\theta', \lambda_{\nu_{\omega}}) = [1 + (1 - \xi_{\nu_{\omega}}^2 / \nu_{\nu_{\omega}}^2) / \sinh^2(\nu_{\nu_{\omega}}^2 - \xi_{\nu_{\omega}}^2)^{1/2}]^{-1}, \quad (2)$$

式中

$$\nu_{\nu_{\omega}} = i\pi n_{2n}(\lambda_{\nu_{\omega}}) d / [\lambda_{\nu_{\omega}} (c_{Rn} c_{Sn})^{-1/2}],$$

$$\xi_{\nu_{\omega}} = \{-K_n \cos(\phi_{\nu_{\omega}} - \theta') +$$

$$K_n^2 \lambda_{\nu_{\omega}} / [4\pi n_{20}(\lambda_{\nu_{\omega}})]\} d / (2c_{Sn}),$$

$$c_{Rn} = \cos \theta',$$

$$c_{Sn} = \cos \theta' - K \cos \phi_n \lambda_{\nu_{\omega}} / [2\pi n_{20}(\lambda_{\nu_{\omega}})],$$

$n=1$ 或 2 , 分别对应表示 VBG₁ 和 VBG₂, θ' 表示光束在光栅中的折射角, 由 Snell 公式可得出该角的表达式为

$$\theta' = \text{asin}[\sin \theta n_1(\lambda) / n_{20}(\lambda)]. \quad (3)$$

θ 表示在区域 1 中的入射角。表 1 给出了模拟计算所用的参量数值。

表 1 模拟参量数值

Table 1 Simulation parameters

Parameters	Values
$\lambda_{1\omega} / \text{nm}$	1053
$\lambda_{2\omega} / \text{nm}$	527
$\lambda_{3\omega} / \text{nm}$	351
$n_1(\lambda), n_3(\lambda)$	1
$n_{20}(\lambda_{1\omega})$	1.485
$n_{21}(\lambda_{1\omega})$	8×10^{-4}
$n_{20}(\lambda_{2\omega})$	1.502
$n_{22}(\lambda_{2\omega})$	1×10^{-3}
$n_{20}(\lambda_{3\omega})$	1.525
$n_{23}(\lambda_{3\omega})$	5.5×10^{-6}
d / mm	2
$\Delta_1, \Delta_2 / \text{nm}$	357, 178
Δ_3 / nm	981.7
θ_0 / rad	0.1797
$\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3 / \text{rad}$	0
ϕ_1 / rad	π
ϕ_2 / rad	3.09
ϕ_3 / rad	$\pi/2$

图 2 给出了 VBG₁ 对一倍频光束的衍射效率随入射角度以及波长的变化关系。

其中横坐标 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\lambda_{1\omega}$ 分别表示角度和波长偏移量, 其大小分别为 $\theta_1 - \theta_0$ 和 $\lambda - \lambda_{1\omega}$ 。从图 2 中可以看出, 当基频光束的角度带宽在 VBG₁ 的衍射角度带宽(FWHM)-7 mrad 以及光谱带宽-500 pm 以内时[后文所用的 VBG_m 带宽均指半峰全宽(FWHM)], VBG₁ 对其衍射效率接近于 100%。

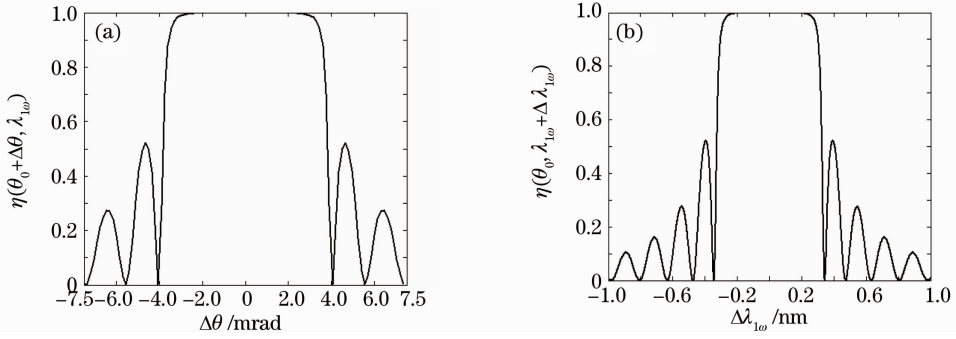


图 2 基频光束的衍射效率随(a)入射角度以及(b)波长的变化关系

Fig. 2 Diffraction efficiency of the fundamental frequency beam as a function of (a) the incident angle and (b) the wavelength
色分离度是衡量元件谐波分离能力的一个重要参量,其定义为直接透射出元件的 n 倍频($n=1$ 或 2)光束的 0 级衍射能量分别与其输入总能量的比值,其表示如下:

$$\sigma_{n\omega} = \frac{\int_{\theta_0 - \Delta\theta_{n\omega}/2}^{\theta_0 + \Delta\theta_{n\omega}/2} \int_{\lambda_{n\omega} - \Delta\lambda_{n\omega}/2}^{\lambda_{n\omega} + \Delta\lambda_{n\omega}/2} I_{n\omega}(\theta, \lambda_{n\omega}) [1 - \eta(\theta, \lambda_{n\omega})] |c_{S1}| d\theta d\lambda_{n\omega}}{\int_{\theta_0 - \Delta\theta_{n\omega}/2}^{\theta_0 + \Delta\theta_{n\omega}/2} \int_{\lambda_{n\omega} - \Delta\lambda_{n\omega}/2}^{\lambda_{n\omega} + \Delta\lambda_{n\omega}/2} I_{n\omega}(\theta, \lambda_{n\omega}) c_{R1} d\theta d\lambda_{n\omega}} \quad (4)$$

式中 $\Delta\theta_{n\omega}$ 和 $\Delta\lambda_{n\omega}$ 分别表示 n 倍频光束的角度带宽以及光谱带宽, $I_{n\omega}(\theta, \lambda_{n\omega})$ 表示 n 倍频光束的光强谱密度, 其由光束的空域以及时域分布所决定。由于一倍频光束在空域以及时域均为平顶分布, 且其空域和时域宽度分别为 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 和 1 ns , 通过傅里叶变换可知, $\Delta\theta_{1\omega}$ 和 $\Delta\lambda_{1\omega}$ 分别为 $4 \mu\text{rad}$ 和 2 pm , 由(4)式计算可知 $\sigma_{1\omega}$ 为 0.2% 。因此 VBG₁ 将基频

光束接近于 100% 的衍射(只有 0 级和 -1 级两个衍射级次), 使得基频光束以衍射角 $\theta_1 \approx 0.18 \text{ rad}$ 的大角度从主光束中反射分离。

同理, 可得出 VBG₂ 对二倍频光束的衍射特性。图 3 给出了 VBG₂ 对二倍频光束的衍射效率随入射角度以及波长的变化关系。

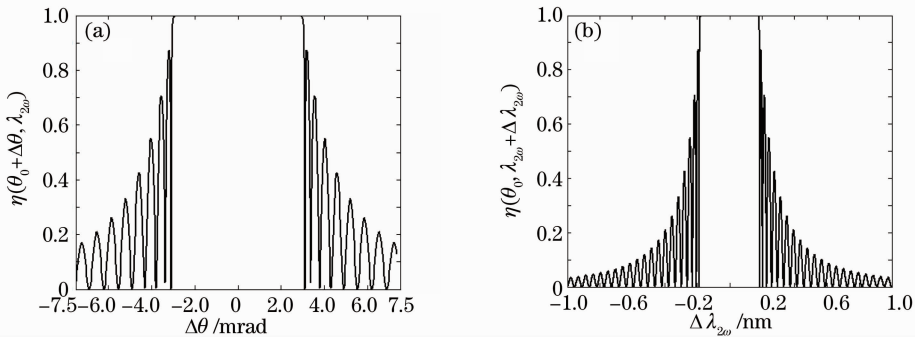


图 3 二倍频光束的衍射效率随(a)入射角度以及(b)波长的变化关系

Fig. 3 Diffraction efficiency of second harmonic beam as a function of (a) incident angle and (b) wavelength

其中横坐标 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\lambda_{2\omega}$ 的定义与图 2 类似。从图 3 中可以看出二倍频光束的角度带宽在 VBG₂ 的衍射角度带宽 5 mrad 以及光谱带宽 400 pm 以内时, 衍射效率接近于 100%。与 SVBG 对一倍频光束的衍射相类似, 由(4)式可计算出 $\sigma_{2\omega}$ 为 0.3% 。由此可以得出二倍频光束也发生了非常高效率的衍射, 并以

衍射角 θ_2 接近于 0.3329 rad 从主光束中分离。

衡量元件谐波分离效果的另一个参量是三倍频光束的透射效率, 即直接透射出元件的三倍频能量与输入三倍频能量的比值。在不考虑 VBG₃ 对三倍频光束衍射的前提下, 可得出经由 VBG₁ 和 VBG₂ 透射出的三倍频光束的透射效率表示如下:

$$\eta_{3\omega} = \frac{\int_{\theta_0 - \Delta\theta_{3\omega}/2}^{\theta_0 + \Delta\theta_{3\omega}/2} \int_{\lambda_{3\omega} - \Delta\lambda_{3\omega}/2}^{\lambda_{3\omega} + \Delta\lambda_{3\omega}/2} I_{3\omega}(\theta, \lambda_{3\omega}) [1 - \eta_{1\omega}(\theta, \lambda_{3\omega})] [1 - \eta_{2\omega}(\theta, \lambda_{3\omega})] |c_{S3}| d\theta d\lambda_{3\omega}}{\int_{\theta_0 - \Delta\theta_{3\omega}/2}^{\theta_0 + \Delta\theta_{3\omega}/2} \int_{\lambda_{3\omega} - \Delta\lambda_{3\omega}/2}^{\lambda_{3\omega} + \Delta\lambda_{3\omega}/2} I_{3\omega}(\theta, \lambda_{3\omega}) c_{R3} d\theta d\lambda_{3\omega}}, \quad (5)$$

式中各参量的定义可参见(4)式。通过(5)式以及三倍频光束在空域以及时域均为平顶分布,且其空域和时域宽度分别为 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 和 1 ns ,可得出此时三倍频光束的透射效率约为 100% 。

通常色分离度小、三倍频透射效率高则说明元件的谐波分离能力较强,而通过对此 SVBG 的分析可知,其对基频、二倍频的色分离度比较小,而对三倍频光束的透射效率较高,因此可以得出此 SVBG 的谐波分离效果较好。

3.2 光束取样特性

由 Kogelnik 耦合波理论可知:透射型 VBG₃ 的

振幅透射率以及衍射效率表达式分别如下^[17]:

$$S_{3\omega}(\theta, \lambda_{3\omega}) = -j \left(\frac{c_{R3}}{c_{S3}} \right)^{1/2} \exp(-j\xi_{3\omega}) \frac{\sin(\nu_{3\omega}^2 + \xi_{3\omega}^2)^{1/2}}{(1 + \xi_{3\omega}^2/\nu_{3\omega}^2)^{1/2}}, \quad (6)$$

$$\eta_{3\omega}(\theta, \lambda_{3\omega}) = \frac{\sin^2(\nu_{3\omega}^2 + \xi_{3\omega}^2)^{1/2}}{1 + \xi_{3\omega}^2/\nu_{3\omega}^2}, \quad (7)$$

式中 $\nu_{3\omega} = \pi n_{23} d / [\lambda_{3\omega} (c_{R3} c_{S3})^{1/2}]$, $\xi_{3\omega} = \{K_3 \cos(\phi_3 - \theta') - K_3^2 \lambda_{3\omega} / [4\pi n_{20}(\lambda_{3\omega})]\} d / (2c_{S3})$, c_{R3} 和 c_{S3} 可参照(2)式的定义。

图 4 给出了 VBG₃ 对三倍频光束的衍射效率随入射角度以及波长的变化关系。

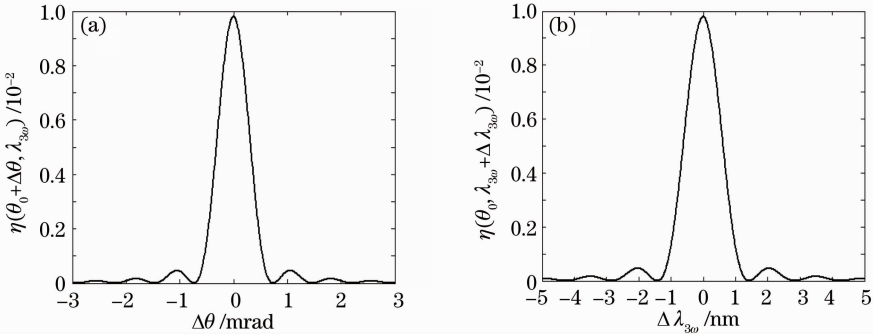


图 4 三倍频光束的衍射效率随(a)入射角度以及(b)波长的变化关系

Fig. 4 Diffraction efficiency of third harmonic beam as a function of (a) incident angle and (b) wavelength

其中横坐标 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\lambda_{3\omega}$ 的定义与图 2 类似。从图 4 中可以看出,三倍频光束的角度带宽在 VBG₃ 的衍射角度带宽 1 mrad ,以及光谱带宽 1.2 nm 以内时,

衍射效率在 $0.05\% \sim 0.1\%$ 范围内。定义 VBG₃ 对三倍频光束总的衍射效率为衍射光束的能量与三倍频光束总能量的比值,其可表示为

$$\eta_{3\omega D} = \frac{\int_{\theta_0 - \Delta\theta_{3\omega}/2}^{\theta_0 + \Delta\theta_{3\omega}/2} \int_{\lambda_{3\omega} - \Delta\lambda_{3\omega}/2}^{\lambda_{3\omega} + \Delta\lambda_{3\omega}/2} I_{3\omega}(\theta, \lambda_{3\omega}) [1 - \eta_{1\omega}(\theta, \lambda_{3\omega})] [1 - \eta_{2\omega}(\theta, \lambda_{3\omega})] \eta_{3\omega}(\theta, \lambda_{3\omega}) |c_{S3}| d\theta d\lambda_{3\omega}}{\int_{\theta_0 - \Delta\theta_{3\omega}/2}^{\theta_0 + \Delta\theta_{3\omega}/2} \int_{\lambda_{3\omega} - \Delta\lambda_{3\omega}/2}^{\lambda_{3\omega} + \Delta\lambda_{3\omega}/2} I_{3\omega}(\theta, \lambda_{3\omega}) c_{R3} d\theta d\lambda_{3\omega}}, \quad (8)$$

式中各参量的定义可参见(4)式。由三倍频光束的空域以及时域分别为平顶分布,且空域和时域宽度分别为 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 和 1 ns ,可以得出 $\eta_{3\omega D}$ 为 0.98% 。这表示从三倍频光束中仅取出 0.98% 的能量。为了更好地评价取样光束与三倍频光束之间除了能量方面的差别之外,我们给出了取样光束的空、时域光强分布,它们定义为单一波长下的空域光强分布以及单一空频下的时域光强分布,其表达式分别为

$$I_{\lambda}(\Delta x, \Delta y) = \left| \int_{\theta_0 - \Delta\theta_{3\omega}/2}^{\theta_0 + \Delta\theta_{3\omega}/2} \int_{-\Delta\varphi_{3\omega}/2}^{\Delta\varphi_{3\omega}/2} A(\theta, \varphi, \lambda) [1 - \eta_{1\omega}(\theta, \lambda_{3\omega})]^{1/2} [1 - \eta_{2\omega}(\theta, \lambda_{3\omega})]^{1/2} \times S_{3\omega}(\theta, \lambda) \exp[-j2\pi/\lambda(\sin\theta \cos\varphi \Delta x + \sin\varphi \Delta y)] \cos^2\varphi \cos\theta / \lambda d\theta d\varphi \right|^2, \quad (9)$$

$$I_{\theta,\varphi}(\Delta t) = \int_{\lambda_{3\omega}-\Delta\lambda_{3\omega}/2}^{\lambda_{3\omega}+\Delta\lambda_{3\omega}/2} |A(\theta,\varphi,\lambda)|^2 [1 - \eta_{1\omega}(\theta,\lambda_{3\omega})][1 - \eta_{2\omega}(\theta,\lambda_{3\omega})]\eta_{3\omega}(\theta,\lambda_{3\omega}) \times \exp(-j2\pi c\Delta t/\lambda)c/\lambda^2 d\lambda, \quad (10)$$

式中 $A(\theta,\varphi,\lambda)$ 表示三倍频光束展开为单色平面波线性叠加, 所对应的空间频率为 $(\sin\theta\cos\varphi, \sin\varphi, \cos\theta\cos\varphi)/\lambda$, 波长为 λ 的复振幅大小, φ 表示展开单色平面波与 XOZ 面的夹角, c 表示真空中的光速。

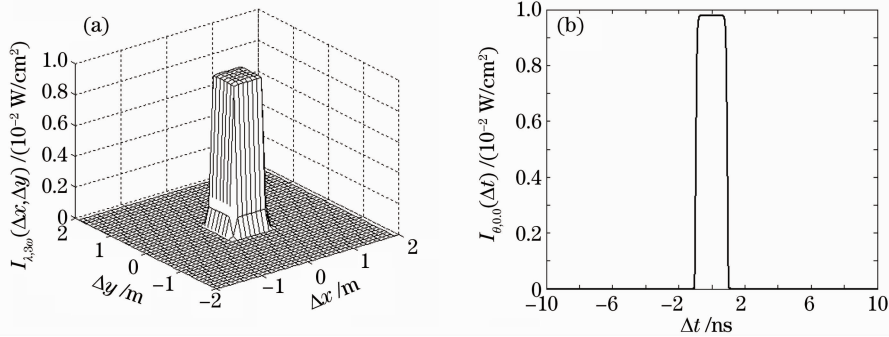


图 5 三倍频取样光束(a)在单一波长 $\lambda_{3\omega}$ 下的空域以及(b)在单一空频 $(\sin\theta_0, 0, \cos\theta_0)/\lambda$ 下的时域分布

Fig. 5 (a) Spatial profile at wavelength $\lambda_{3\omega}$ and (b) temporal profile at spatial frequency $(\sin\theta_0, 0, \cos\theta_0)/\lambda$ of the third harmonic sampling beam

从图 5 中可以看出,单一波长 $\lambda_{3\omega}$ 下的空域以及单一空频 $(\sin\theta_0, 0, \cos\theta_0)/\lambda$ 下的时域仍为平顶分布,且空域宽度为 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$,时域宽度为 1 ns ,这和三倍频光束的空、时域分布一致,唯一差别仅在于能量大小。类似的也可求出在整个空频以及时频下的取样光束的空域以及时域分布,其空、时域分布与三倍频光束一致,因此复用 VBG 亦可实现三倍频光束取样的功能。

4 结 论

从表征谐波分离效果的两个参量—色分离度以及三倍频光束的透射效率出发,可以得出,此 SVBG 的色分离度较小,表明基频、二倍频的光束的绝大部分能量从含有三倍频的主光束中分离出去,且相互之间的角度较大;而透射效率较高说明三倍频光束几乎没受到 VBG₁ 和 VBG₂ 衍射的影响,大部分能量仍在零级衍射方向上。VBG₃ 从三倍频光束中以较低的衍射效率(0.98%)进行取样,且取样后的光束在空、时域分布与原光束相一致,达到了不失真且较少能量取样的目的。因此该 SVBG 同时实现了谐波分离以及光束取样这两个功能。传统的取样光栅具有一定的聚焦特性,本文中所采用的具有取样特性的 VBG₃ 是等周期的体布拉格光栅,所取样出

图 5 给出了三倍频取样光束在波长为 $\lambda_{3\omega}$ 时的空域分布以及空频为 $(\sin\theta_0, 0, \cos\theta_0)/\lambda$ 时的时域分布。

的光束是以与原光束空、时域分布一致为主要目的。若要其具有与传统光栅一样的聚焦特性,采用不等周期体布拉格光栅(体全息透镜)即可^[19]。在制作工艺方面,与传统的浮雕型光栅比较,SVBG 由于其可以全息制作,因而精度较高,制作误差较小,且随着记录材料的发展,为其在大功率激光领域的应用铺平了道路。

参 考 文 献

- 1 Yao Xin, Gao Fuhua, Wen Shenglin *et al.*. Near field modulation and laser induced damage of color separation gratings and combined color separation gratings-beam sampling gratings optical elements for use in inertial confinement fusion system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(12): 6945~6953
姚 欣, 高福华, 温圣林等. 谐波分离和光束取样集成光学元件强激光近场调制及损伤特性研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(12): 6945~6953
- 2 Yao Xin, Gao Fuhua, Li Jianfeng *et al.*. Study on the near field modulation and laser induced damage of beam sampling grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(8): 4891~4897
姚 欣, 高福华, 李剑峰等. 光束取样光栅强激光近场调制及诱导损伤研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(8): 4891~4897
- 3 Chai Liqun, Yang Liming, Xu Qiao. Vector theory analysis and numerical calculation for beam sampling grating used in ICF[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(2): 270~274
柴立群, 杨李茗, 许 乔. 用于 ICF 驱动器的取样光栅的矢量分析与计算[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(2): 270~274
- 4 Gao Fuhua, Zeng Yangsu, Su Jingqin *et al.*. Study on tolerance of input wavefront aberration for color separation gratings[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(2): 265~269
高福华, 曾阳素, 粟敬钦等. 色分离光栅对输入波前畸变宽容度

- 的研究[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(2): 265~269
- 5 Wen Shenglin, Gao Fuhua, Guo Yongkang *et al.*. Study on the near field diffraction of color separation gratings applied in ICF system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8): 1068~1072
温圣林, 高福华, 郭永康等. 用于惯性约束聚变系统中的色分离光栅近场衍射研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(8): 1068~1072
- 6 Zhang Yixiao, Gao Fuhua, Yao Xin *et al.*. Fabrication of the combined color separation grating and beam sampling element applied in inertial confinement fusion driver [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1461~1466
张怡霄, 高福华, 姚欣等. 用于惯性约束聚变驱动器的色分离光栅-光束采样光栅集成元件的制作[J]. 中国激光, 2006, **33**(11): 1461~1466
- 7 Xin Guofeng, Cheng Chan, Qu Ronghui *et al.*. Study of spectral characteristics of external-cavity semiconductor laser a volume Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1821~1826
辛国锋, 程灿, 瞿荣辉等. 体布拉格光栅外腔半导体激光器光谱特性研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(10): 1821~1826
- 8 Bo Baoxue, Gao Xin, Qiao Zhongliang *et al.*. Characteristics of high power volume-Bragg-grating external cavity semiconductor lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 501~504
薄报学, 高欣, 乔忠良等. 大功率体光栅外腔半导体激光器的输出特性[J]. 中国激光, 2008, **35**(4): 501~504
- 9 Cheng Can, Xin Guofeng, Feng Huizhong *et al.*. Temperature characteristics of volume Bragg grating external cavity semiconductor laser working at continuous wave [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 27~30
程灿, 辛国锋, 封惠忠等. 连续工作的体布拉格光栅外腔半导体激光器的温度特性[J]. 中国激光, 2008, **35**(1): 27~30
- 10 A. Gourevitch, G. Venus, V. Smirnov *et al.*. Efficient pumping of Rb vapor by high-power volume Bragg diode laser[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(17): 2611~2613
- 11 Jacques E. Ludman, Juanita R. Riccobono, N. O. Reinhand *et al.*. Very thick holographic nonspatial filtering of laser beams [J]. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(6): 1700~1705
- 12 Zheng Guangwei, Tan Jichun, He Yanlan *et al.*. Low-pass spatial filtering for continuous-wave laser beam by reflection volume phase gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1554~1559
郑光威, 谭吉春, 何焰蓝等. 反射型体相位光栅对连续激光光束空间低通滤波[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1554~1559
- 13 Zheng Guangwei, He Yanlan, Huang Shuihua *et al.*. Study on low-pass spatial filtering for continuous-wave laser beam by transmitting volume phase gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 863~868
郑光威, 何焰蓝, 黄水花等. 透射型体相位光栅对连续激光光束空间低通滤波研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(4): 863~868
- 14 George B. Venus, Armen Seviaan, Vadim I. Smirnov. Stable coherent coupling of laser diodes by a volume Bragg grating in photothermorefractive glass [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(10): 1453~1455
- 15 Armen Seviaan, Oleksiy Andrusyas, Igor Ciapurin *et al.*. Efficient power scaling of laser radiation by spectral beam combining [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 384~386
- 16 Leonid Glebov. Fluorinated silicate glass for conventional and holographic optical elements[C]. *SPIE*, 2007, **6545**: 654507-1~654507-9
- 17 H. Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. *The Bell Syst. Technol. J.*, 1969, **48**(9): 2909~2947
- 18 M. G. Moharam, T. K. Gaylord. Three-dimensional vector coupled-wave analysis of planar-grating diffraction [J]. *J. Opt. Soc. Am*, 1983, **73**(9): 1105~1112
- 19 Yan Aimin, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. Design of a new type latera-spread photorefractive volume holographic lens and its diffraction properties [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1629~1632
闫爱民, 刘立人, 刘德安等. 光横向传播的光折变体全息透镜设计及其衍射性质[J]. 光学学报, 2004, **24**(12): 1629~1632