

多重结构对体全息光栅衍射角带宽的拓展

彭飞^{1,2} 杨德兴³ 张攀³ 康明武^{1,2} 周拥军² 马百恒^{1,2}

¹ 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000
² 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000
³ 西北工业大学理学院陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072

摘要 以 Kogelnik 耦合波理论为基础, 从理论上分析了反射体全息光栅衍射效率的影响因素, 提出了采用多光栅重叠衍射拓展体全息光栅角带宽的方法。针对衍射均匀性的要求, 分析了多重光栅重叠衍射的物理过程, 给出了相邻光栅拼接时的布拉格角偏移量, 得到了多重光栅衍射角带宽随光栅重数和折射率调制度的变化关系。理论计算结果表明, 多重光栅衍射角带宽与多重光栅数量和光栅折射率调制度均呈现出线性增加的关系。在合适的折射率调制度下, 通过增加光栅数量可显著增加衍射角带宽。

关键词 全息; 耦合波理论; 反射体全息光栅; 角带宽拓展; 多重光栅; 折射率调制度

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP50.090901

Diffraction Angular Bandwidth Broadening of Volume Holographic Grating by Multiplex Structures

Peng Fei^{1,2} Yang Dexing³ Zhang Pan³ Kang Mingwu^{1,2}
 Zhou Yongjun² Ma Baiheng^{1,2}

¹ Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang, Henan 471000, China
² Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, Aviation Industry Corporation of China, Luoyang, Henan 471000, China
³ Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

Abstract Based on Kogelnik's coupled-wave theory, diffraction efficiency of reflection volume holographic grating is analyzed for several parameters. We propose a method to broaden the diffraction angular bandwidth by superposing multiplex volume holographic gratings, each of which is oriented properly. Permitted on the requirement of uniform diffraction, the diffraction process in multiplex volume gratings is analyzed to acquire the offset of Bragg angle between adjacent gratings, and the uniform-diffraction bandwidth versus multiple numbers and refractive index modulation are finally obtained. Numerical results show that diffraction angular bandwidth of multiplex volume holographic gratings increases linearly with the number of multiplex gratings and refractive index modulation depth. The angular bandwidth can be broadened markedly via increasing the number of superposed gratings with appropriate refractive index modulation depth.

Key words holography; coupled-wave theory; reflection volume holographic grating; angular bandwidth broadening; multiplex gratings; refractive index modulation

OCIS codes 090.7330; 090.2870; 090.2820

1 引言

体全息光栅的衍射属于布拉格衍射, 具有衍射级次少、衍射效率高的特点, 已广泛应用于激光技术、光学滤波技术、光学全息存储等领域^[1-6]。在上述应用领域中, 一般都要求其衍射具有严格的角度选择特性和波

收稿日期: 2013-04-17; 收到修改稿日期: 2013-05-21; 网络出版日期: 2013-08-05

作者简介: 彭飞(1983—), 男, 博士, 工程师, 主要从事全息显示和头戴显示等方面的研究。E-mail: eoeci@vip.sina.com

长选择特性,即具有窄的衍射带宽,包括角带宽和光谱带宽。近年来,人们将体全息光栅与平板波导结合在一起用于成像,其中体全息光栅作为成像系统的输入输出元件^[7-8]。为了获得足够的视场范围,要求其光栅必须具有较大的衍射角带宽,以匹配输入输出视场角范围;同时,为了满足成像均匀性要求,在衍射角带宽内还应具有良好的衍射均匀性。然而,对于单个体全息光栅,其衍射带宽十分有限,最大只有几度,而且在一般情况下,角带宽内衍射效率极不均匀,难以满足系统对显示视场和成像均匀性的要求。本文针对体全息光栅的有限衍射角带宽,在分析光栅衍射特性的基础上,提出采用多重光栅拓展衍射带宽的方法,并进行数值计算研究,分析了影响角带宽拓展的主要因素。

2 单光栅的衍射角带宽

对于无吸收反射相位体全息光栅,其衍射过程如图1(a)所示。波矢为 \mathbf{k}^i 的光波1入射到光栅矢量为 \mathbf{K}^G 的体光栅中,经过衍射,变成波矢为 \mathbf{k}^d 的光波2。三个矢量之间的关系如图1(b)所示, θ_r 、 θ_d 和 ϕ 分别为入射光波、衍射光波和光栅矢量与 z 轴的夹角。根据 Kogelnik 耦合波理论^[9-11]可知,无吸收反射相位体全息光栅衍射效率为

$$\eta = \frac{\sinh^2 [(\kappa L)^2 - \xi^2]^{1/2}}{\sinh^2 [(\kappa L)^2 - \xi^2]^{1/2} + [1 - (\xi/\kappa L)^2]}, \quad (1)$$

式中

$$\kappa = \frac{\pi \Delta n}{\lambda (\cos \theta_r \cos \theta_d)^{1/2}}, \quad (2)$$

$$\xi = \frac{\delta L}{2 \cos \theta_r}, \quad (3)$$

式中 Δn 为体光栅折射率调制度, L 为记录介质厚度, δ 为由于入射光波不满足布拉格条件而产生的相位失配,可表示为

$$\delta = \frac{1}{2 \cos \theta_r} [\Delta \theta \mathbf{K}^G \sin(\phi - \theta_d) - \Delta \lambda (\mathbf{K}^G)^2 / 4 \pi n_0], \quad (4)$$

式中 n_0 为介质折射率, $\Delta \theta$ 和 $\Delta \lambda$ 分别为相对于布拉格角和布拉格波长的偏移量,本文仅考虑角度失配的情况,因此 $\Delta \lambda = 0$ 。

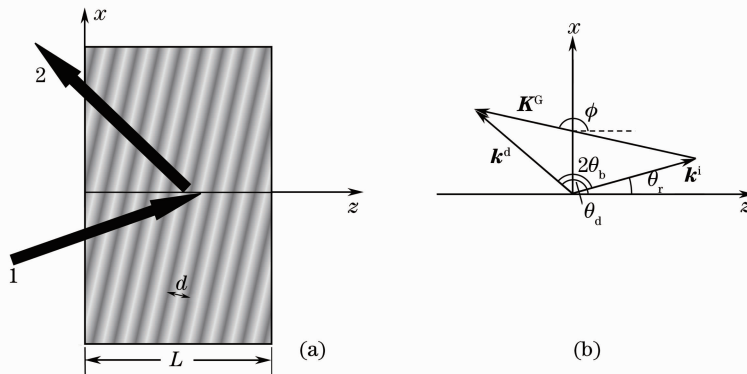


图1 反射式体全息光栅的衍射。(a) 衍射过程; (b) 衍射过程中光栅矢量 \mathbf{K}^G 、入射矢量 \mathbf{k}^i 和衍射矢量 \mathbf{k}^d 的几何关系

Fig. 1 Diffraction of reflection volume grating. (a) Diffraction process; (b) geometry of \mathbf{K}^G ,

\mathbf{k}^i and \mathbf{k}^d during the diffraction process

通常将入射光线偏离布拉格角后,衍射效率角分布曲线主瓣两侧第一个零点之间的角度差定义为水平选择角:

$$\Delta \theta_{\max} = \frac{\lambda [\pi^2 + (\kappa L)^2]^{1/2} \cos \theta_r}{\pi n_0 L \sin \theta_b \cos \theta_b}. \quad (5)$$

(5)式表明,水平选择角受体光栅厚度和折射率调制度这两个参数的影响。在体光栅厚度小于 $30 \mu\text{m}$ 的范围内,水平选择角随厚度增加而逐渐减小,但峰值衍射效率随之增加;厚度大于 $30 \mu\text{m}$ 时,水平选择角宽度

几乎不受厚度变化的影响。水平选择角随折射率调制度的增加而增加,例如当厚度大于 $40 \mu\text{m}$ 时,折射率调制度 Δn 从 0.01 增加到饱和时的 0.08,选择角从 1° 近似线性增加到约 6° 。由于 0.08 是常用的 DCG 材料的调制度上限^[12],因此单个体光栅可获得的角带宽小于 6° ,需要对其进行拓宽。

在衍射效率角分布曲线主瓣的两端,衍射效率迅速下降到零,尽管该部分包含在水平选择角内,但由于较低的衍射效率而无法用于实际成像系统中。为了避免出现这种较低的衍射效率,通常采用衍射均匀度来限制衍射效率曲线的实际使用部分,并把该部分曲线的角度范围称为均匀衍射角带宽。衍射均匀度可定义为

$$\Gamma = 1 - \frac{\eta_{\max} - \eta_{\min}}{\eta_{\max} + \eta_{\min}}, \quad (6)$$

式中 η_{\max} 和 η_{\min} 分别为均匀衍射角带宽内的最大和最小衍射效率。

3 体全息光栅衍射角带宽的拓展

3.1 衍射角带宽的拓展方法

在体全息存储中,利用参考光束的角度扫描,并与入射方向保持不变的数据页光束干涉,在记录材料中实现海量数据存储,这就是所谓的“角分复用”技术。本文在角分复用技术的基础上,同时改变参考光和物光的入射方向,在记录介质中形成多重体全息光栅,通过光栅设计将每个光栅的均匀衍射角带宽范围拼接起来,实现角带宽的拓展。多重光栅角带宽的拼接方式如图 2 所示,可将成像系统完整视场平均分为若干个子视场,子视场范围为 $\Delta\theta$,等于单个光栅的均匀衍射角带宽。图中波矢分别为 $k_1^i, k_2^i, k_3^i, \dots$ 的各子视场的中心入射视场光线,经过光栅矢量分别为 $K_1^G, K_2^G, K_3^G, \dots$ 的光栅衍射后,对应的衍射波矢分别为 $k_1^d, k_2^d, k_3^d, \dots$,且满足布拉格条件

$$K_j^G = k_j^d - k_j^i, \quad (7)$$

式中角标 $j=1, 2, 3, \dots$ 。为了保持原视场范围内各视场光线的相对关系,图 2 中各光栅的矢量平行,即光栅面平行,通过光栅周期也即矢量大小的改变来满足相应子视场的衍射要求。

3.2 多重光栅的衍射效率

当光栅矢量的大小改变时,对应的布拉格角随之而变,如图 2 所示。因此,在衍射效率的角分布曲线上表现为曲线平移,如图 3 所示,第二个光栅的衍射效率分布曲线相对于第一个平移了 $\Delta\theta$ 。由于衍射旁瓣的存在,不同光栅的衍射效率曲线会存在重叠区域。在该区域内,多重光栅对同一入射角度的光线都会产生衍射作用,此时重叠衍射的总效率可表示为

$$\eta = \sum_{i=1}^n \eta_i - \sum_{i \neq j} \eta_i \eta_j + \sum_{i \neq j \neq k} \eta_i \eta_j \eta_k - \sum_{i \neq j \neq k \neq l} \eta_i \eta_j \eta_k \eta_l + \dots, \quad (8)$$

式中 n 为光栅重数, $\eta_x (x = i, j, k, l, \dots)$ 为多重光栅中任一光栅的衍射效率。(8)式中单个光栅对应于第一项,两重光栅对应前两项,三重光栅对应前三项,依此类推。

图 3 为两重光栅重叠衍射结果。由于单个光栅的最大衍射效率与重叠光栅的最大衍射效率十分接近,可将单光栅的最大衍射效率作为重叠光栅最大衍射效率的近似。由于重叠衍射带内允许的最小衍射效率出现在两光栅主瓣的交点处,因此,在满足重叠衍射均匀度要求的情况下,交点处对应的单光栅衍射效率为

$$\eta_c = 1 - \sqrt{1 - \tau \eta_{\max}}, \quad (9)$$

式中 τ 为均匀衍射角带宽内最低衍射效率和最大衍射效率的比值,满足

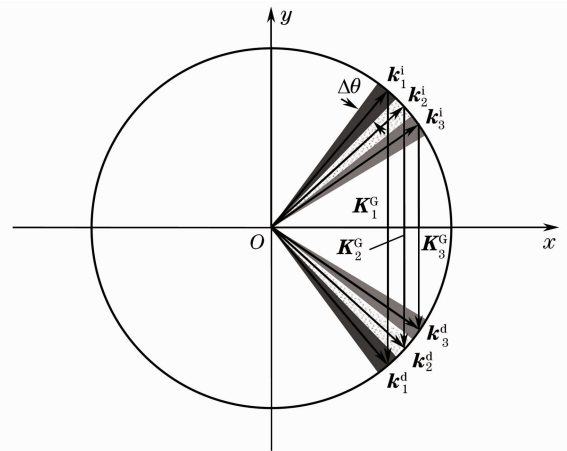


图 2 具有角带宽拼接效果的多重光栅衍射过程中 K_j^G, k_j^i 和 k_j^d 的关系

Fig. 2 Geometry of K_j^G, k_j^i and k_j^d during the diffraction process of multiplex gratings with conjoint angular bandwidth

$$\tau = \frac{\eta_{\min}}{\eta_{\max}} = \frac{\Gamma}{2 - \Gamma} \quad (10)$$

根据(9)式得到交点处的布拉格偏离角,由此可以确定第二个光栅相对于第一个光栅的布拉格角平移量 $\Delta\theta$,进一步得到光栅 2 的布拉格角

$$\theta_{b2} = \theta_{b1} + \Delta\theta. \quad (11)$$

按照图 2 和(7)式可最终确定第二个光栅的光栅矢量。

在图 3 所示重叠衍射曲线的计算中,取光栅厚度为 $30 \mu\text{m}$,折射率调制度为 0.01,衍射均匀度为 90%。由计算可知,当均匀度为 90%时,单个光栅的衍射带宽为 1.2° ,而两重光栅的衍射带宽为 2.72° ,角带宽增加明显。由图 3 还可看出,单个光栅衍射旁瓣对两重光栅衍射效率曲线影响很小,一般可以忽略。

3.3 角带宽拓展的数值计算

图 4(a)和(b)给出了折射率调制度分别为 0.01 和 0.02 时两重光栅均匀衍射角带宽的拓展结果。对于 $\Delta n=0.01$ 的光栅,满足均匀性要求时单个光栅角带宽为 1.1° ,两光栅重叠衍射后角带宽为 2.6° 。对于 $\Delta n=0.02$ 的光栅,单光栅的角带宽为 2.5° ,两光栅重叠衍射后的角带宽为 4.87° 。以上结果表明增加折射率调制度和光栅重数可以明显拓展均匀衍射角带宽。由进一步的计算可知,当折射率调制度继续增加时,单个光栅衍射效率变为平顶型曲线,即衍射效率在较大角度范围内等于 1,并且衍射效率迅速从 1 变化到 0。因此,平顶型光栅复合时,两重光栅的均匀衍射角带宽约为单个光栅衍射角带宽的 2 倍。

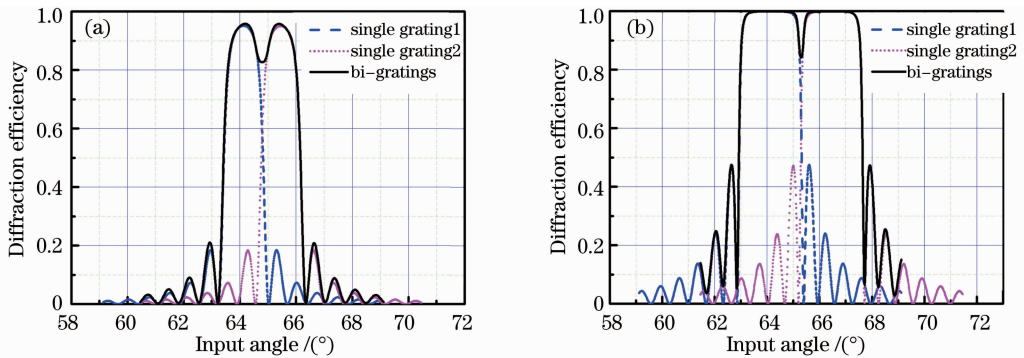


图 4 不同折射率调制度下两重光栅的衍射效率随入射光角度的分布。(a) 较低折射率调制度的情况($\Delta n=0.01$); (b) 较高折射率调制度的情况($\Delta n=0.02$)

Fig. 4 Equivalent diffraction efficiency of double gratings versus θ_i when Δn varies. (a) $\Delta n=0.01$; (b) $\Delta n=0.02$

图 5 给出了多重光栅的均匀衍射角带宽与折射率调制度和光栅重数的关系。图中结果表明,均匀衍射角带宽随着光栅折射率调制度和光栅重数的增加均呈线性增加。然而,记录介质的光敏感动态范围是有限的,复用的光栅数量越多,可得到的折射率调制度越小^[13]。因此,在同一层介质中不能通过这种方法无限制地增加角带宽,其可获得的最大角带宽由记录介质厚度、最大折射率变化量和光敏感响应特性决定。

4 结 论

以 Kogelnik 耦合波理论为基础,在分析单个反射体全息光栅衍射特性的基础上,针对全息波导成像系统对

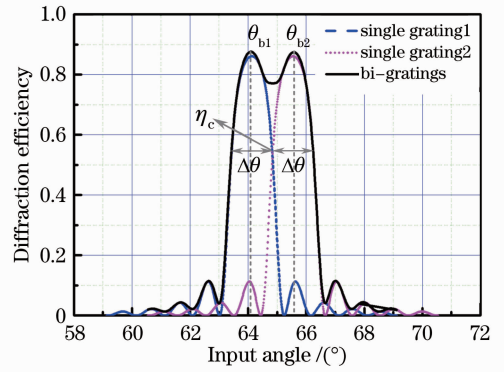


图 3 两重光栅的等效衍射效率随入射光角度的分布

Fig. 3 Equivalent diffraction efficiency of double gratings versus θ_i

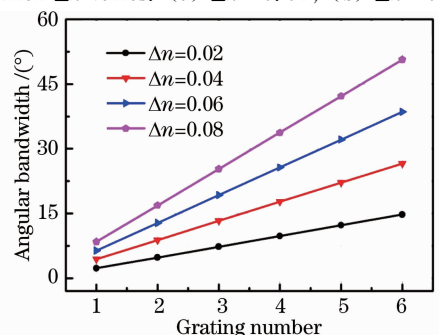


图 5 不同折射率调制度下多重光栅的均匀衍射角带宽与光栅重数的关系

Fig. 5 Uniform-diffraction bandwidth of multiplex gratings versus grating number when Δn varies

衍射角带宽和均匀性的要求,提出了利用多重光栅拓展衍射角带宽的方法,得到了多重光栅重叠衍射的总效率,并由衍射均匀性要求得到了确定多重光栅布拉格角的计算公式。数值计算表明,多重光栅衍射角带宽与多重光栅数量和光栅折射率调制度均呈现出线性增加的关系,即在多重光栅数量一定的情况下,通过提高每重光栅的折射率调制度可以显著增加其衍射角带宽,或者在折射率调制度一定的情况下,通过增加光栅数量也可以明显增加衍射角带宽。

参 考 文 献

- 1 Boffi P, Ubaldi MC, Piccinin D, *et al.*. 1550 nm volume holography for optical communication devices[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2000, 12(10): 1355–1357.
- 2 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.
- 3 Zheng Guangwei, Tan Jichun, Shen Benjian, *et al.*. Research on harmonic wave separation and beam sampling characteristics of superposed volume Bragg gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0305001.
郑光威, 谭吉春, 沈本剑, 等. 复用体布拉格光栅的谐波分离以及光束取样特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0305001.
- 4 Shen Wenmei, Jiang Zhuqing, Cheng Guofeng, *et al.*. Depth resolution of 90° geometry volume holographic imaging system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(5): 050901.
沈文梅, 江竹青, 程国峰, 等. 90°临面入射体全息成像系统的深度分辨率[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(5): 050901.
- 5 Kong Peng, Bayinhexige, Li Wenhao, *et al.*. Modeling and in-situ monitoring of the asymmetric exposure and development of holographic grating[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1):65–69.
孔 鹏, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 全息光栅非对称曝光显影的理论模拟及实时监测[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 65–69.
- 6 Kong Weijin, Wang Shuhao, Wei Shijie, *et al.*. Design and diffraction property of broad waveband high-diffraction-efficiency grating for chirped pulse compressor[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1005001.
孔伟金, 王书浩, 魏世杰, 等. 宽光谱高衍射效率脉宽压缩光栅设计和性能分析[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1005001.
- 7 Cameron A. Optical waveguide technology and its application in head mounted displays[C]. SPIE, 2012, 8383: 83830E.
- 8 Cameron A. The application of holographic optical waveguide technology to Q-Sight™ family of helmet mounted displays [C]. SPIE, 2009, 7326: 73260.
- 9 Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. The Bell System Technical Journal, 1969, 48(9): 2909–2947.
- 10 Yu Meiwen. Optical Holography and Its Applications[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996.
于美文. 光全息学及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- 11 Tao Shiquan, Wang Doyong, Jiang Zhuqing, *et al.*. Optical Holographic Storage[M]. Beijing: Beijing University of Technology, Press, 1998.
陶世荃, 王大勇, 江竹青, 等. 光全息存储[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1998.
- 12 Zhou Haixian, Cheng Yunfang. Holographic Optics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
周海宪, 程云芳. 全息光学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- 13 Mok F, Burr G, Psaltis D. System metric for holographic memory systems[J]. Opt Lett, 1996, 21(12): 896–898.