

# 体全息光栅透镜的设计和应<sup>\*</sup>

闫爱民 刘立人 刘德安

(中科院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 设计了一种新型的体全息光栅透镜, 在一块光学平板(体全息记录材料)内可以将输入光束产生横向传输并聚焦, 或对输入光点产生横传的准直. 它由一束平面波和一束球面波正交入射到光学平板上干涉形成的. 研究了该体全息透镜的光栅间距变化情况, 为设计和制备体全息光栅透镜及相关器件提供了理论依据. 基于两光束耦合波理论, 得到了该光栅透镜的耦合波方程, 近似计算了该透镜的衍射效率及其达到高衍射效率时透镜的最佳尺寸. 最后, 讨论了该透镜在集成光学等领域中的应用.

**关键词** 体全息透镜; 耦合波理论; 衍射效率

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A

## 0 引言

在集成光学、光电子学及空间技术中, 能够有效转换光束方向实现光束聚焦或准直的光学器件有着广泛的应用. 其中光栅耦合器<sup>[1]</sup>、光学透镜<sup>[2]</sup>、波导光栅衍射透镜<sup>[3,4]</sup>、微透镜<sup>[5]</sup>等器件可以实现这种功能, 但是传统的光学透镜系统主要采用球面或者非球面透镜实现, 因此透镜的光学玻璃的比重很高, 透镜包括机械支撑结构的重量也很大. 波导光栅衍射器件的应用面积增大时衍射效率很低. 也有人用光折变反射体全息透镜<sup>[6,7]</sup>对入射光束进行反射离轴聚焦, 但是整个光学系统占用的空间体积很大, 不利于系统的微小化集成. 随着对通信器件的可集成性及微小化程度要求的提高, 有效减小透镜系统的体积, 增强全光信息处理能力成为光纤通信、空间激光通信技术发展的必然趋势.

本文采用有限体积光折变体全息记录的方法, 在光学平板(体全息记录介质)内可以对于输入光束产生横向传输并聚焦, 或对输入光点产生横传的准直, 从而能大大减小整个光学系统的体积. 研究了平面波和球面波的波前干涉场的强度分布及形成的体全息光栅透镜的光栅间距变化情况, 为设计和制备这种类型的透镜及相关器件提供了依据. 基于两光束耦合波理论, 近似计算了该透镜的衍射效率及其达到高衍射效率时透镜的最佳尺寸. 最后讨论了该体全息透镜在集成光学等领域中的应用.

## 1 体全息光栅透镜及其工作原理

体全息光栅透镜形成的干涉原理如图1所示.

一束平行记录光束(平面波)和一束会聚记录光束(向坐标原点会聚的球面波)垂直正交入射到一光学平板(体全息记录材料, 如  $\text{LiNbO}_3$  晶体等)上相互干涉, 在光学平板内以体全息光栅的结构形成一个横向传播的透镜区域.

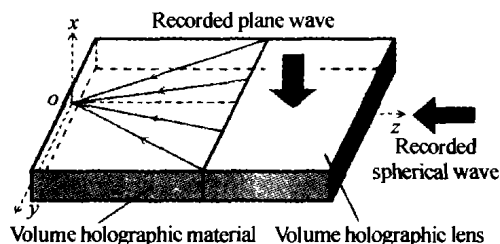


图1 体全息光栅透镜的形成示意图

Fig. 1 Diagram of forming volume holographic lens

由于体全息光栅透镜的记录是基于体全息原理, 当布喇格匹配条件满足时, 用参考光波或者共轭参考光波读出时可以将物光波或共轭物光波再现. 对于垂直入射在光学平板内的体光栅透镜上的输入平行光束, 将在平板内衍射产生横向传输的会聚光束并聚焦一点. 相反地, 对于在光学平板内小面上输入的光点经过平板内的横向传播扩散, 将产生垂直与光学平板传输的平行光束并准直输出.

## 2 光栅间距和衍射效率

在利用两光束耦合波理论<sup>[8]</sup>进行计算之前, 我们作如下假设: 记录介质的折射率和吸收常量的空间调制是按正弦规律变化的; 再现光以布喇格角或者接近布喇格角入射, 介质内仅出现再现光和衍射光波, 而忽略其他所有的衍射级次; 光波复振幅的变化与其波长相比是很小的, 光波复振幅的二阶微分可以忽略.

设平面波  $E_{10}$  和球面波  $E_{20}$  分别沿  $-x$  轴和  $-z$  轴正交入射到光学平板上(图1所示), 其电场强度分别为

<sup>\*</sup>感谢国家自然科学基金委(NO. 60177106)和国家科学技术部(NO. 2002CCA03500)的资助

Tel: 021-69918762 Email: yanaimin@mail.siom.ac.cn

收稿日期: 2003-12-15

$$E_{10} = A_{10} \exp(-j\beta p_1) \quad (1)$$

$$E_{20} = A_{20} \frac{r_0}{r} \exp(-j\beta p_2) \quad (2)$$

式中  $A_{10}$ 、 $A_{20}$  为电场的相对强度,  $r_0$  为单位长度,  $\beta$  为传播常数,  $p_1$ 、 $p_2$  分别为平面波和球面波的位相函数. 本文中取  $p_1 = x$ ,  $p_2 = r$ ,  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ . 在线性记录条件下, 记录介质内介电常数调制正比于光栅内部总电场强度的平方, 介质的相对介电常数可以写为

$$\epsilon_r = \epsilon_{r_0} + \epsilon_n + \epsilon_{r_1} \frac{r_0}{r} \cos \beta(r - x) \quad (3)$$

式中,  $\epsilon_n = A_{10}^2 + (\frac{r_0}{r})^2 A_{20}^2$ ,  $\epsilon_{r_1} = 2A_{10}A_{20}$ . 由式(3)可知两束光波的等干涉强度面(干涉光强极大值)为

$$\beta(x - r) = 2\pi m \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (4)$$

因此, 由平面波和球面波干涉形成的体光栅的等干涉强度面不再是平面, 而是变周期的一族曲面. 图 2 所示为图 1 中的矩形边界体光栅透镜的等干涉强度面的示意图.

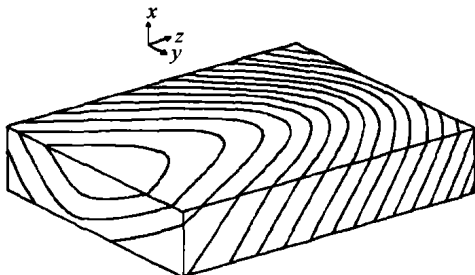


图 2 体全息光栅透镜的等干涉强度面  
Fig. 2 The grating pattern of the volume holographic grating lens

在布喇格入射条件下, 光栅矢量定义为

$$\mathbf{K} = \beta(\nabla p_1 - \nabla p_2) = \beta[(1 - \frac{x}{r})\mathbf{i}_x - \frac{y}{r}\mathbf{i}_y - \frac{z}{r}\mathbf{i}_z] \quad (5)$$

相应地光栅间距为

$$D = 2\pi/|\mathbf{K}| = \frac{\lambda}{\sqrt{2}\sqrt{1-x/r}} \quad (6)$$

从式(5)、(6)可以看出, 光栅矢量和光栅周期不再是常数而是随坐标的变化而变化; 图 3(a)和(b)给出了在  $x = 2 \text{ mm}$  和  $x = -2 \text{ mm}$  时, 光栅间距  $D$  随  $y$  和  $z$  变化的关系曲线, 波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , 从图中可以看出, 在  $x = 2 \text{ mm}$  时, 光栅间距  $D > 0.447 \mu\text{m}$  ( $D = 0.447 \mu\text{m}$  为中心平面  $x = 0$  的光栅间距), 并且关于  $y = 0$  对称, 随着  $z$  的增加  $D$  逐渐减小直到饱和. 在  $x = -2 \text{ mm}$  时, 光栅间距  $D < 0.447 \mu\text{m}$ , 并且关于  $y = 0$  对称, 随着  $z$  的增加  $D$  逐渐增大直到饱和.

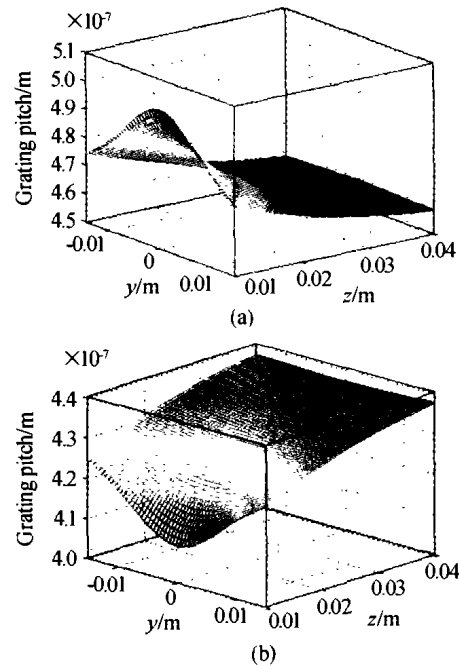


图 3 (a)在  $x = 2 \text{ mm}$  时, 光栅间距  $D$  随坐标  $y$  和  $z$  的变化曲线, (b)在  $x = -2 \text{ mm}$  时, 光栅间距  $D$  随坐标  $y$  和  $z$  的变化曲线

Fig. 3 (a) Grating pitch  $D$  as a function of  $y$  and  $z$  at  $x = 2 \text{ mm}$ , (b) Grating pitch  $D$  as a function of  $y$  and  $z$  at  $x = -2 \text{ mm}$

设再现光和衍射光的复振幅为  $R$  和  $S$ , 光栅内的总电场强度为

$$E = R \exp(-j\beta x) + S \exp(-j\beta r) \quad (7)$$

将式(7)代入亥姆霍兹方程, 在前面简化假设的基础上, 得到耦合波方程

$$\frac{\partial R}{\partial x} + j\kappa \frac{r_0}{r} S = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial S}{\partial x} \frac{x}{r} + \frac{\partial S}{\partial y} \frac{y}{r} + \frac{\partial S}{\partial z} \frac{z}{r} + j\kappa \frac{r_0}{r} R = 0 \quad (9)$$

相应的边界条件为

$$\begin{cases} S = 0, \text{ on } z = z_0 \\ \frac{\partial S}{\partial x} \frac{x}{r} + \frac{\partial S}{\partial y} \frac{y}{r} + \frac{\partial S}{\partial z} \frac{z}{r} = -j\kappa \frac{r_0}{r}, \text{ on } x = x_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\kappa = \pi n_1 / \lambda$  为 Kogelnik 耦合系数,  $n_1$  为折射率调制振幅,  $x = x_0$  和  $z = z_0$  为入射边界. 耦合波方程式(8)和式(9)和边界条件式(10)构成了多变量的二次偏微分方程的边值问题<sup>[9]</sup>, 可以用有限差分法、黎曼函数法等方法给出上述耦合波方程的解. 然后, 可以根据下式计算整个光栅透镜的衍射效率,

$$\eta = P_d / (P_d + P_t) \quad (10)$$

式中  $P_d$  为衍射的总能量,  $P_t$  为透射的总能量. 表 1 给出了不同  $z$  坐标取值范围时光栅透镜的衍射效率, 其中  $x$  的取值范围  $[-2 \sim 2 \text{ mm}]$ ,  $y$  的取值范围  $[-15 \sim 15 \text{ mm}]$ , 波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,  $n_1 = 5 \times 10^{-5}$ .

表 1 体全息光栅透镜的衍射效率

$z$ 的取值范围	衍射效率
10 ~ 30 mm	75.2%
10 ~ 40 mm	50.6%
20 ~ 50 mm	96.7%
10 ~ 50 mm	40.4%

所以,该体全息光栅透镜达到高衍射效率时的最佳尺寸  $z$  取 [20 ~ 50 mm],  $x$  取 [-2 ~ 2 mm],  $y$  取 [-15 ~ 15 mm]. 需要说明的是,这个最佳尺寸只是在多次计算中选取的衍射效率取极大值时的估计尺寸,对实际设计和制作器件只起参考作用.

### 3 优点和应用

本文设计的体全息光栅透镜,其突出的优点和特点为:体积小重量轻;透镜和传播基质为同一介质的光学平板,稳定可靠,抗环境干扰能力强;基于体光栅衍射而具有良好的波长和视场选择性,能有效抑制噪声;采用体全息原理,可对光束进行波面像差的自动补偿,获得高准直的发射光束或低像差的接收焦点.

基于该体全息光栅透镜可以制作基本光学元件,如平板透镜元件,波面变换器件,波分复用器件等,和其他光学器件组合可以在光电集成系统、激光收发系统中具有广泛的应用前景. 例如,利用波长灵敏度高的特点,可以实现体全息的复用. 如图 4 所示为单板集成激光收发光学系统. 其突出特点为复用全息结构,收发光束空间分离. 如果光学平板采用电光晶体材料,它具有良好的压电、光弹、声光、热光和非线性光学等效应,制作三维光学集成系统采用光折变效应制作不同性质的若干个分立的局域体全息,通过衍射光的互连实现单块晶体集成的微小三维光学系统,并可以进一步结合晶体的电光效应或其他各种可控制的效应能够同时实现电光扫描或电光调制等附加功能,并可以进一步制作具有多功能的光学信息处理和光通信器件.

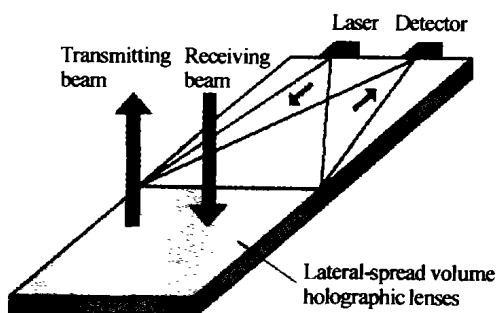


图 4 单板集成光束收发系统示意图

Fig. 4 Optical beams receiving transmitting system integrated in a single optical planar

### 4 结论

1) 如图 1 所示,设计了一种新型的用于光束横向传输并具有波面转换功能的器件—体全息光栅透镜. 该透镜根据有限体积光折变体全息原理,在光学平板内可以对输入光束产生横向传输并聚焦,或对输入光点产生横传的准直. 横向传输透镜的概念具有革新意义,采用体全息实现光束的横向传输是本文的创新点. 该光栅透镜结构简单可靠、体积小、抗干扰能力强、基于体全息原理有良好的波长和视场选择性,在集成光学、激光通信、激光雷达等领域的激光准直、发射、接收中将有广泛的应用前景.

2) 理论分析了该光栅透镜的光栅间距、等干涉强度面及衍射效率. 估算了在高衍射效率时,透镜的最佳尺寸,为实际设计制作这种类型的体全息光栅透镜及其相关器件提供了理论参考依据.

#### 参考文献

- Schultz S M, Glytsis E N, Gaylord T K. Design of a high-efficiency volume grating coupler for line focusing. *Applied Optics*, 1998, **37**(12): 2278 ~ 2287
- 汪韬,李辉,李宝霞,等. 用于光伏系统新型非涅耳线聚焦聚光透镜设计. *光子学报*, 2002, **31**(2): 196 ~ 199  
Wang T, Li H, Li B X. et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(2): 196 ~ 199
- 徐迈,李燕,郑杰. 导波弧光栅的曲率分布及实验设计. *光子学报*, 1994, **23**(4): 324 ~ 326  
Xu M, Li Y, Zheng J. *Acta Photonica Sinica*, 1994, **23**(4): 324 ~ 326
- Hatakoshi G, Fujima H, Goto K. Waveguide grating lenses for optical couplers. *Applied Optics*, 1984, **23**(11): 1749 ~ 1753
- 刘玉玲,卢振武,任智斌,等. 亚波长衍射微透镜的设计. *光子学报*, 2004, **33**(1): 81 ~ 84  
Liu Y L, Lu Z W, Ren Z B, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 81 ~ 84
- Ma Jian, Catanzaro B, Ford J E, et al. Photorefractive holographic lenses and applications for dynamic focusing and dynamic image shifting. *J Opt Soc Am A*, 1994, **11**(9): 2471 ~ 2480
- Lopez A M, Atencia J, Tornos J, et al. Partitioned-field uniaxial holographic lenses. *Applied Optics*, 2002, **41**(10): 1872 ~ 1881
- Solymar L. A general two-dimensional theory for volume holograms. *Appl Phys Lett*, 1977, **31**(12): 820 ~ 822
- Myint-u T. Partial differential equations of mathematical physics. New York: American Elsevier Pub Co, 1973, 62 ~ 68

## Design and Application of Volume Holographic Grating Lenses

Yan Aimin, Liu Liren, Liu De'an

*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*

Received date: 2003-12-15

**Abstract** New volume holographic grating lenses for laterally focusing an optical wave or collimating an optical wave emitted from an optical dot in an optical plate (volume holographic material), has been designed. Grating pitch and grating vector of the grating lenses are derived from intensity distribution of wavefront interfering field of a plane wave and a spherical wave. And basis is provided to design and fabricate volume holographic grating lenses devices. On the basis of two beams coupled-wave theory, coupled wave differential equations and the boundary conditions are derived. Numerical results of the diffraction efficiency and the best size with high efficiency of the grating lenses are also given. And the practical applications in integrated optics or other fields are discussed.

**Keywords** Volume holographic lenses; Coupled-wave theory; Diffraction efficiency

**Yan Aimin** was born on Nov. 4, 1976. She got her M. S. degree from Shanghai University in 2002, now she is studying for his Ph. D. in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Her research interests focus on diffraction optics and optical information processing.

