

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0529-02

收敛耦合波法(增强传输矩阵法)用于计算色分离光栅特性

杨春林, 许 乔, 周礼书, 杨李茗

(成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘要 从麦克斯韦方程出发,利用耦合波理论和增强传输矩阵的方法,计算了 ICF 系统使用的色分离光栅(CSG)的衍射特性。得到了比标量理论设计计算更为精确的结果。计算结果表明,色分离光栅的周期越小,三倍频光的零级衍射效率越低。

关键词 耦合波; 传输矩阵; 色分离光栅

中图分类号 O437.1

文献标识码 A

Convergence Coupled-Wave Analysis of Color Separating Grating

YANG Chun-lin, XU Qiao, ZHOU Li-shu, YANG Li-min

(Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract According to the Maxwell equations, the diffraction characteristics of the color-separating grating (CSG) used in ICF system have been calculated. The coupler-wave analysis and enhanced transmittance matrix have been employed during the calculation process. The results that get by the method, which used in this paper, are better than the results that get by the traditional scale method. The calculation shows that the shorter of the period of the CSG, the lower of the diffraction efficiency of 3ω at zero order.

Key words coupled-wave; analysis of frequency; separation grating with AR coating

1 引言

耦合波法是一种常见的光栅设计方法,它直接基于麦克斯韦方程组,是一种严格精确的数值计算方法。但由于耦合波方法所固有的消逝波的影响以及计算机的截断误差,在许多情况下直接使用会遇到计算不稳定和不收敛性的问题。20 世纪 90 年代中期以来, Moharam, 李立峰, Chateau 等人研究出了多种克服不收敛问题的方法。文章采用了增强传输矩阵法来分析 CSG 光栅,获得了较好的计算效果。

2 光栅结构和场强的表达式

如图 1, I 区是入射区,设归一化入射电场可以展开表示为:

$$E_{yI} = \exp[j(k_{x0}x + k_{z0}z)] + \sum_m R_m \exp[j(k_{xm}x - k_{1,zm}z)]$$

IV 区是出射区,电场表示为:

$$E_{yIV} = \sum_{m=1}^{SMAX} T_m \exp\{j[k_{xm}x + k_{IV,zm}(z-h)]\}$$

上面的公式中 R_m 是反射光振幅, T_m 是透射光振幅。

作者简介: 杨春林 (1972-),男,成都精密光学工程研究中心工程师,硕士,主要从事衍射光学方面的研究。

E-mail: yangchunlin@hotmail.com

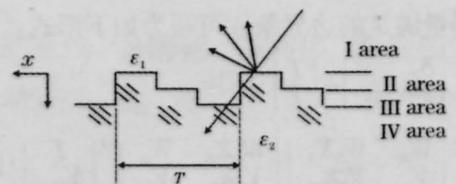


图 1 光栅结构

Fig.1 Structure of CSG

光栅区 II 区的场可表示为:

$$E_{2y} = \sum_{l=1}^{SMAX} S_{yl}(z) \exp[j(k_{xl}x)] \quad (1)$$

$$H_{2x} = -j \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot \sum_{l=1}^{SMAX} U_{xl}(z) \exp[j(k_{xl}x)] \quad (2)$$

从波动方程出发,并采用耦合波法可得其中

$$S_{yl} = \sum_{m=1}^{LMAX} w_{l,m} [c_m^+ \exp[-k_0 q_m(z - D_{l-1})] + c_m^- \exp[k_0 q_m(z - D_l)]] \quad (3)$$

$$S_{xl} = \sum_{m=1}^{LMAX} v_{l,m} [-c_m^+ \exp[-k_0 q_m(z - D_{l-1})] + c_m^- \exp[k_0 q_m(z - D_l)]] \quad (4)$$

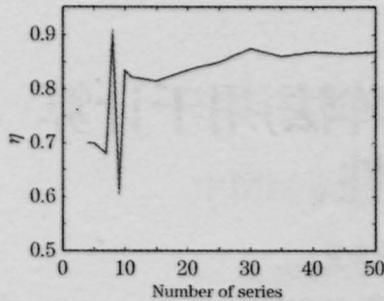


图2 计算的收敛性

Fig.2 Convergence of calculation

式中 $k_{x0}=k_0 \sin \theta \sqrt{\epsilon_1}$; $k_{x1}=k_{x0}-LK$; $K=2\pi/\Lambda$; θ 是入射角; $k_{y1}=k_0 \sin \theta \sqrt{\epsilon_1}$; $k_{1,z}=(k_0^2 \epsilon_1 - k_{x1}^2)^{1/2}$; $k_{1V,z}=(k_0^2 \epsilon_2 - k_{x1}^2)^{1/2}$;

以及 $\epsilon = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \epsilon_l \exp(jlKx)$; $\epsilon_l = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x,z) \exp(jlKx) dx$;

式中 q_m 是矩阵 $[K_x^2 - E]$ 的特征值的正根, $w_{l,m}$ 是对应的特征向量; c 是待定常数. K_x 是元素为 k_{x1}/k_0 的对角矩阵, E 矩阵的元素 $E_{s,t}$ 为 ϵ_{s-t} , D_l 是到第 l 层的总厚度, 对 I 区 $D=0$, 对 II 区 $D=h/2$, 对 III 区 $D=h$; 以及 $v_{l,m}=w_{l,m} q_{m0}$.

光栅区 III 区的场可类似表示。

3 边界条件与待定参数求解

场量满足的边界条件可写为如下形式:

$$\begin{bmatrix} \delta_{10} \\ j \cos \theta \delta_{10} n_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I \\ Y \end{bmatrix} \cdot [R] = \begin{bmatrix} W_n & W_n X_n \\ V_n & -V_n X_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_n X_n & W_n \\ V_n X_n & -V_n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ Y_{\text{end}} \end{bmatrix} \cdot [T] \quad (5)$$

前面的矩阵 $X_{II}, X_{III}, Y, Y_{\text{end}}$ 分别表示对角元为 $\exp(-k_0 q_m h/2), \exp(-k_0 q_m h/2), (-jk_{1,z1}/k_0), (jk_{1V,z1}/k_0)$ 的对角阵, W 和 V 是前述的特征向量矩阵. 直接求解方程(5)会产生不稳定和不收敛. 因此我们采用了 M.G.Moharam 在文献[1]中所描述的方法以消除这些问题。

4 计算结果与分析

计算采用的参数为: 石英对各波长的折射率, $n_{0.35}=1.48; n_{0.53}=1.46; n_{1.06}=1.45$. 光栅周期为 $10.5 \mu\text{m}$, TE 波垂直入射。

计算得到透过的三倍频零级衍射光衍射效率与

所取的衍射级数的关系, 见图 2. 当衍射级次取 ± 3 时, 算得到的三倍频光零级透过率约为 70%, 随着衍射级次超过 ± 40 个衍射级后, 计算结果逐渐收敛于 87%. 这个结果与标量法的计算结果相比有一定的差别. 由于早期设计的 CSG 周期比较大, 其典型的周期为 $300 \mu\text{m}$, 这样标量设计计算的结果也较为精确, 随着 CSG 周期变小, 从 $30 \mu\text{m}$ 直到 $10.5 \mu\text{m}$, 标量设计计算的误差就逐渐显现出来了。

图 3(a) 表示光栅台阶总深度对三倍频光的透过率(或零级衍射效率)的影响. 其衍射效率最高值出现在台阶深 $1.47 \mu\text{m}$, 衍射效率约为 87%. 图 3(b) 表示光栅台阶深度对基频光和二倍频光的透过率的影响. 其中虚线表示二倍频光的零级衍射效率, 实线表示三倍频光的衍射效率. 在台阶深度为 $1.47 \mu\text{m}$ 时, 它们的衍射效率大约为 2%。

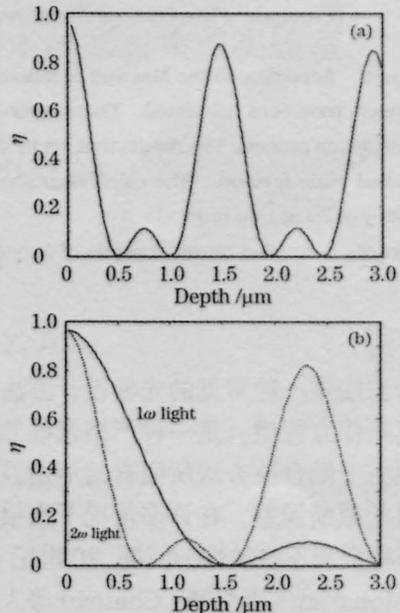


图3 衍射效率与光栅刻槽深度的关系。

(a)三倍频光衍射效率; (b)基频和二倍频光衍射效率

Fig.3 Diffraction efficiency vs depth of grating groove.

(a) Diffraction efficiency of 3ω ;

(b) diffraction efficiency of 1ω and 2ω

参 考 文 献

1 M. G. Moharam, D. A. Pommet, E. B. Grann *et al.*. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach[J]. *J. Opt. Sci. Am. A*, 1995, 12(5): 1077-1086