

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0308-03

# 用于 ICF 的分频光栅的三维耦合波分析\*

陈德伟 王 炜 李永平

(中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

摘要 用严格的耦合波理论分析用于 ICF 系统的分频光栅, 得到一些初步的分析结果。

关键词 ICF 系统, 耦合波理论, 分频光栅

中图分类号 TH741.6 文献标识码 A

## Rigorous Coupled-Wave Analysis of Frequency Separation Grating

CHEN De-wei WANG Wei LI Yong-ping

(Physics Department, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

**Abstract** The rigorous couple-wave method is comprehensively applied in the analysis of frequency-separation gratings used for inertial confinement fusion system, some result is obtained.

**Key words** ICF system, rigorous coupled-wave method, frequency-separation gratings

### 1 引言

严格的耦合波理论作为矢量理论的典型代表被广泛地用于光栅的分析设计, 这种理论具有适用范围广、收敛性好、精确度高等优点。但一方面由于目前的光学系统在标量理论框架下已经能符合现实要求, 另一方面由于耦合波理论本身计算复杂程度的局限, 目前国内用耦合波理论分析光栅大多注重方法介绍, 而很少涉及对某一实际光栅的具体应用。我们将这一套理论用于分析具有三个台阶的分频光栅。在惯性约束核聚变 (Inertial Confinement Fusion, ICF) 的高功率激光驱动系统中, 入射光束中常常混杂有三种频率的光, 而需要的只是其中的三倍频光, 分频光栅的作用就是将基频光与倍频光从三倍频光中分离开来。

### 2 用于分频光栅的耦合波模型

严格的耦合波理论<sup>[1,2]</sup>是通过求解 Maxwell 方程来对衍射光学元件进行分析的:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -j\omega\mu_0 \mathbf{H}, \\ \nabla \times \mathbf{H} &= j\omega\epsilon_0 \epsilon(x) \mathbf{E} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $\mathbf{E}$  为电场矢量,  $\mathbf{H}$  为磁场矢量,  $k$  为光在真空中

的波矢,  $\epsilon(x, z)$  为光在传播介质的介电常数。对用于分频的闪耀光栅来讲, 其光栅结构如图 1 所示, 因为我们感兴趣的只是分频光栅的透射效率, 所以图中没有将区域 1 中的反射光画出来,  $\Lambda$  为光栅周期,  $h$  为每级台阶的高度,  $n_1, n_2$  分别为光在区域 1 和区域 4 中的折射率。区域 1 和区域 4 中介质为均匀分布; 区域 2 和区域 3 中为两种介质的周期性分布, 占空比分别为 1/3, 2/3。

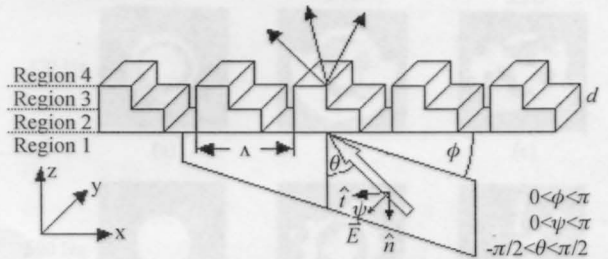


图 1 分频光栅的结构示意图

Fig. 1 The structure of frequency separation grating

耦合波理论先将区域 2 和区域 3 中的电介常数用 Fourier 级数展开, 即式(2), 式中  $l = 2, 3$  分别对应于区域 2 和区域 3,  $a_l$  分别为  $2\Lambda/3, \Lambda/3$ 。然后在区域 2 和区域 3 中求解 Maxwell 方程, 求得具有待定系数的电磁场, 待定系数通过边界条件(3)求得。

\* 国家 863-416 课题资助课题。

$$\epsilon_l(x, z) = n_1^2 + (n_2^2 - n_1^2) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \left[ \frac{1}{\Lambda} \int_{a_l}^{\Lambda} \exp\left(-jm \frac{2\pi}{\Lambda} x\right) dx \right] \exp\left(jm \frac{2\pi}{\Lambda} x\right) \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} E_1|_{z=0} &= E_2|_{z=0}, & H_1|_{z=0} &= H_2|_{z=0}, \\ E_2|_{z=d} &= E_3|_{z=d}, & H_2|_{z=d} &= H_3|_{z=d}, \\ E_3|_{z=2d} &= E_4|_{z=2d}, & H_3|_{z=2d} &= H_4|_{z=2d}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Maxwell 方程组的求解归结为矩阵特征值和特征向量的计算,而边界条件可化为一个线性方程组,用高斯消去法求解。最后通过式(4)求解衍射效率:

$$\left. \begin{aligned} DE_{1,i} &= \text{Re}[(k_{1,i} \cdot r)/(k_1 \cdot r)] R_i R_i^*, \\ DE_{4,i} &= \text{Re}[(k_{4,i} \cdot r)/(k_1 \cdot r)] T_i T_i^*, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中  $R_i, R_i^*$  为第  $i$  级反射波的反射系数,  $T_i, T_i^*$  为第  $i$  级透射波的透射系数,  $\text{Re}$  表示取实部, “ $*$ ” 表示取复共轭;  $DE_{1,i}$  表示区域 1 中第  $i$  级反射波的衍射效率;  $DE_{4,i}$  表示区域 4 中第  $i$  级透射波的衍射效率。对于无损光栅,所有的衍射级次的衍射效率之和应为 1,即:

$$\sum_i (DE_{1,i} + DE_{4,i}) = 1 \quad (5)$$

### 3 计算结果与分析讨论

当光栅参数满足一定关系时,分频光栅可以将入射光中不同频率的光波分离开来。我们以用于 ICF 系统中的分频光栅为例来分析。在 ICF 系统中入射光束是由三种不同波长的光波 ( $0.351 \mu\text{m}$ ,  $0.5265 \mu\text{m}$ ,  $1.053 \mu\text{m}$ ) 组成的。在标量理论<sup>[3]</sup>中我们知道当台阶深度  $h$  与三倍频光波的波长有如下关系时,即

$$h = \lambda / (n_1 - n_2) |_{0.351},$$

可实现分频效果。光栅各参数为:  $h = 0.62 \mu\text{m}$ ,  $n_2 = 1$ ,  $n_1(0.351 \mu\text{m}) = 1.5672$ ,  $n_1(0.5265 \mu\text{m}) = 1.5326$ ,  $n_1(1.053 \mu\text{m}) = 1.5254$ ,  $\Lambda = 79 \mu\text{m}$ 。其中带括号的各参数表示具有括号内所示波长的光在区域 1 中的折射率。

首先计算正入射情况,即  $\theta = 0, \phi = 0, \psi = \pi/2$ , 这时的计算结果与文献[4]中的计算结果基本一致。基频光、倍频光和三倍频光的计算结果分别显示在图 2 中,图中的衍射效率仅为透射效率,并且已经用总的透射效率归一化,图中横坐标表示计算时所考虑的总的衍射级次,比如  $\pm 2$  表示考虑了如下几级衍射波 ( $+2, +1, 0, -1, -2$ ),虚线表示标量理论结

果,实线为本文所述的耦合波理论计算结果,从图中可以明显看到光栅的分频效果,并且可以看到标量理论对我们所分析的光栅结构是适用的。

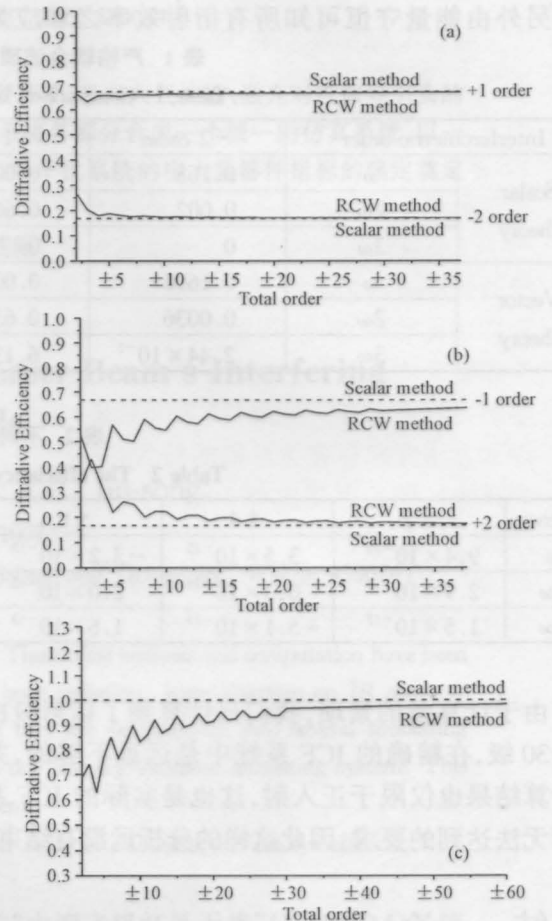


图 2 三种频率的透射效率及其与标量理论的比较

Fig.2 Comparison of the diffractive efficiency between scalar and RCW method . ( a )  $1.053 \mu\text{m}$  beam ; ( b )  $0.6265 \mu\text{m}$  beam; ( c )  $0.351 \mu\text{m}$  beam

尽管以上结果仍然是正入射的情况,与文献[4]的区别在于计算过程严格按照非正入射的情况分析,即将  $\theta, \phi, \psi$  的值在计算中都有所体现,而在文献[4]中则没有,相对来讲本文的计算量也要繁琐很多,所以斜入射的情况仍在计算之中。

从图 2 中可以看出随着所考虑的衍射级次的增加,衍射效率向一个极值逼近。然而,在计算过程中,我们不可能将所有的衍射级次都考虑到,而常常将较高的衍射级忽略,只留下一部分较低衍射级参与计算,这样误差就在所难免。表 1 中显示的是标量理论与矢量理论透射效率的比较,从图 2 可以看

出矢量理论渐渐逼近的极值近似为标量理论的结果,所以我们暂且以标量理论的结果作为矢量理论误差分析的依据。因为耦合波理论中各衍射级之间要相互耦合,当忽略较高衍射级时,这样的耦合就不会是完全的,截断误差必然会对各级衍射效率的准确度产生影响,而所考虑的衍射级次越多,耦合就越充分,计算结果也就越逼近准确解。

另外由能量守恒可知所有衍射效率之和应为

表 1 严格耦合波理论结果与标量理论结果比较

Table 1 Comparison between scalar and RCW method

Interferometric order		- 2 order	- 1 order	0 order	+ 1 order	+ 2 order
Scalar theory	$\omega$	0.168	0.005	0.008	0.673	0.0012
	$2\omega$	0.002	0.668	0.009	0.009	0.167
	$3\omega$	0	0	1	0	0
Vector theory	$\omega$	0.1696	0.00617	0.0103	0.6704	0.0007
	$2\omega$	0.0036	0.6352	0.01974	0.01818	0.1735
	$3\omega$	$2.44 \times 10^{-5}$	$6.13 \times 10^{-5}$	0.9821	$3.67 \times 10^{-5}$	$5.79 \times 10^{-5}$

表 2 不同精度下的计算误差

Table 2 The efficiency error under different precision

Trueness	$\pm 2$	$\pm 4$	$\pm 6$	$\pm 8$	$\pm 10$	$\pm 20$	$\pm 30$
$\omega$	$9.4 \times 10^{-16}$	$3.5 \times 10^{-15}$	$-3.2 \times 10^{-15}$	$3.8 \times 10^{-16}$	$2.8 \times 10^{-15}$	$1.7 \times 10^{-15}$	$5.4 \times 10^{-15}$
$2\omega$	$2.9 \times 10^{-15}$	$6.3 \times 10^{-16}$	$2.0 \times 10^{-15}$	$2.7 \times 10^{-15}$	$-2.3 \times 10^{-15}$	$5.0 \times 10^{-15}$	$7.9 \times 10^{-16}$
$3\omega$	$1.5 \times 10^{-15}$	$-5.1 \times 10^{-15}$	$1.6 \times 10^{-15}$	$9.4 \times 10^{-16}$	$-9.1 \times 10^{-16}$	$5.4 \times 10^{-16}$	$2.7 \times 10^{-15}$

由于计算量的繁琐,我们只计算到了衍射级次的 $\pm 30$ 级,在精确的 ICF 系统中是远远不够的,并且计算结果也仅限于正入射,这也是实际的 ICF 系统所无法达到的要求,因此这样的分析远没有结束。

### 4 结 论

严格的耦合波理论作为矢量理论的典型代表用来分析具有周期结构的光栅有很大的优势,虽然较之标量理论有些复杂,但却可以对其进行精确的计

算,我们将不同精度下所有衍射级次的衍射效率之和与 1 的差列于表 2 中,从中可以看到,尽管计算所考虑的衍射级次有多有少,能量却都是近似守恒的,误差数量级均在  $10^{-16} \sim 10^{-15}$  之间。这说明这样的误差不是截断误差,而是计算时的舍入误差,也就是说耦合波理论中将较高衍射级截断,但并没有将这些衍射级次的能量一起忽略,而是将其分配到所考虑的衍射级中,因此截断误差不会造成能量失恒。

算,本文就此用分频光栅作了简单论证。

### 参 考 文 献

- 1 M. G. Moharam, T. K. Gaylord. Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(10):1385~1392
- 2 Song Peng, G. Michael Morris. Efficient implementation of rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings. *J. Opt. Soc. Am.*, 1995, **12**(5):1087~1096
- 3 王 炜,徐俊中,李永平等. 用于分频的闪耀光栅设计及衍射行为的研究. *光电工程*, 2000, **27**(2):39~42
- 4 陈德伟,王 炜,李永平. 用于 ICF 的分频光栅的耦合波分析. *光子学报*, 2002, **31**(4):433~437