

矩孔金属光栅矢量模式理论的数值计算*

朱文勇 林维德 高景 陈晖 李国刚 严瑗
(上海交通大学应用物理系, 上海 200030)

摘 要 根据矩孔金属光栅的矢量模式理论, 计算了不同入射方向、波长及偏振态情况下衍射场的分布, 研究了不同光栅结构(光栅周期、占空比及深度等)对衍射效率、偏振态变化的影响; 同时, 根据实际需要, 加工制作了一批不同深度的矩孔光栅样品, 进行了实验测量, 并将计算值与实验值进行了比较, 两者基本相符。

关键词 矢量模式理论, 衍射, 金属光栅。

1 引 言

用积分法、微分法和标量模式理论等处理金属光栅衍射问题^[1], 或有一定的局限, 或在处理和计算中较为繁复; 而采用矢量模式理论, 能较为方便地直接处理任意入射方向和偏振态的衍射问题。采用这种方法, 人们分别处理了矩形槽光栅、对称闪耀光栅、任意槽型光栅的衍射问题^[2-4]。文献[5]利用矢量模式理论处理了矩孔金属光栅的衍射场分布, 给出各级衍射的级数解, 但未进行具体的数值计算。

本文在文献[5]的基础上, 具体实现了矩孔光栅衍射场的数值计算, 给出了在不同入射方向、入射波长和不同偏振态情况下衍射场分布的数值计算结果, 并研究、分析了光栅结构参数(光栅周期、占空比、深度等)对衍射效率、偏振特性的影响; 与此同时, 根据实际需要设计、制作了一批实验样品, 利用 PE-983 红外光谱仪进行了实际测量, 同理论计算结果进行了比较, 两者变化趋势基本相符, 有关实验样品也达到了设计要求。

2 数值计算

根据文献[5], 矩孔金属光栅结构如图 1 所示, 其中 $x-y$ 平面为光栅平面, x 方向周期为 d_1 , 孔宽为 a_1 , y 方向周期为 d_2 , 孔宽为 a_2 , 孔深为 h 。入射光的方向由 (θ, φ) 表示, θ 表示入射光与 oz 轴的夹角, φ 表示入射面与 zoy 平面的夹角, 电矢量与在振动面内垂直于 oz 轴的矢量所成夹角 α 可表示线偏振光的偏振方向。

文献[5]给出的理论解是无穷级数, 而数值计算的关键之一就是根据解的收敛情况, 选定有限的阶次进行合理的截取, 保证舍弃的高次项所产生的影响在允许的误差范围内, 而具

* 国家科委 863 高科技项目。

收稿日期: 1995 年 12 月 30 日; 收到修改稿日期: 1996 年 12 月 6 日

体的收敛速度则由所选基矢决定。考虑到计算时间, 本文计算所选阶次为 10, 误差基本在 1% 以内。这就表明文献[5]所选的基矢较为合理, 计算结果能够较快地收敛于一稳定值。

2.1 衍射效率

图 2 为在不同入射条件下, 光栅(-1, -1)级衍射随入射光波长变化的情况。总体而言, 衍射效率 η 与波长 λ 间的变化关系受入射光方向及其偏振态的影响不大; 图中可明显看出各条曲线的变化大致相同, 即在波长大致相同的范围内, 衍射效率达到极大或极小。

图 3 给出了(-1, -1)级衍射效率随入射方向的变化规律。图中不难发现, 针对确定的光栅结构, 衍射效率随入射光方向的变化总体较平缓, 变化范围也并不大。

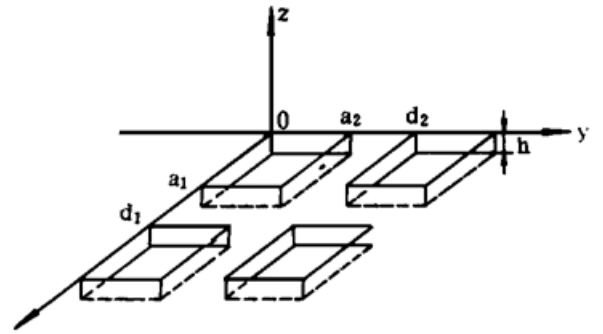


Fig. 1 The model of the grating

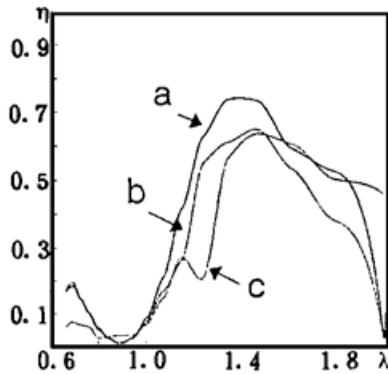


Fig. 2 The (-1, -1) order diffraction efficiency of grating vs. incident wavelength a: $h = 0.5, \theta = 30^\circ, \varphi = 60^\circ, \alpha = 30^\circ$; b: $h = 0.5, \theta = 60^\circ, \varphi = 60^\circ, \alpha = 30^\circ$; c: $h = 0.5, \theta = 30^\circ, \varphi = 60^\circ$, (circular polarization)

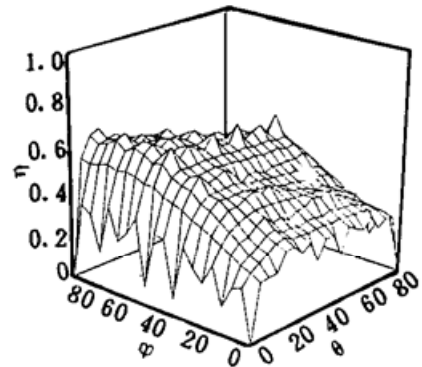


Fig. 3 The (-1, -1) order diffraction efficiency of grating vs. incident direction (linear polarization). $h = 0.5, \alpha = 30^\circ, \lambda = 1.429$

图 4、图 5 分别为线偏振光和圆偏振光在不同入射方向、不同波长和不同偏振方向(线偏

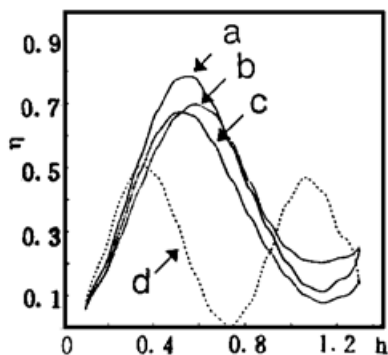


Fig. 4 The (-1, -1) order diffraction efficiency of grating vs. the depth (linear polarization) a: $\lambda = 1.429, \theta = 30^\circ, \varphi = 60^\circ, \alpha = 30^\circ$; b: $\lambda = 1.429, \theta = 30^\circ, \varphi = 45^\circ, \alpha = 30^\circ$; c: $\lambda = 1.429, \theta = 30^\circ, \varphi = 60^\circ, \alpha = 45^\circ$; d: $\lambda = 1.111, \theta = 30^\circ, \varphi = 45^\circ, \alpha = 30^\circ$

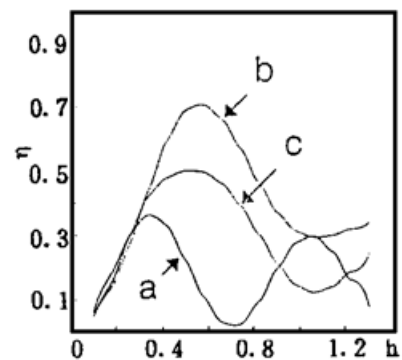


Fig. 5 The (-1, -1) order diffraction efficiency of grating vs. the depth (circular polarization) a: $\lambda = 1.111, \theta = 30^\circ, \varphi = 45^\circ$; b: $\lambda = 1.429, \theta = 30^\circ, \varphi = 45^\circ$; c: $\lambda = 1.429, \theta = 60^\circ, \varphi = 45^\circ$

振光)的情况下, $(-1, -1)$ 级的衍射效率 η 随矩孔深度 h 变化的情况。图 4 中曲线变化的情况非常相似, 即 η 随 h 都呈现一定的周期性的变化, 这与槽型光栅的计算结果十分相似^[6]; 图中曲线还表明入射光的波长对周期性变化影响很大。从图 5 可以看出, 圆偏振光入射的变化情况也是与线偏振光相类似的。根据这种规律性, 就可以通过调整矩孔光栅的结构参数, 来实现确定波长(或波段范围)、确定入射方向的情况下, 对各级衍射效率的控制。

图 6 为入射波长在与结构参数大致相当的范围内, 衍射效率随光栅结构参数(光栅周期和占空比)的变化关系。图中可看出 η 虽缺乏较明显的规律, 但主要是在 0~0.5 之间变化。

2.2 偏振特性

光栅衍射波的偏振特性用复振幅间的位相差 δ 来描述。图 7 给出了偏振特性 δ 随入射光偏振方向的关系曲线, 图 8 表示了在不同条件下偏振特性 δ 与矩孔深度 h 间的变化情况。两幅图都反映出, 除个别点发生突变, 一般而言, 偏振变化较为平缓, 这一点也是和槽型光栅的计算结果颇为相似的^[6, 7]。

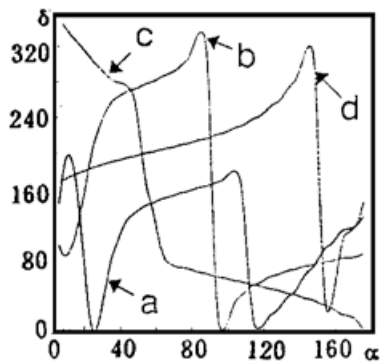


Fig. 7 The $(-1, -1)$ order diffraction phase δ of grating vs. incident polarization direction
 a: $a_1 = 1, a_2 = 0.8, d_1 = 2.0, d_2 = 1.8$;
 b: $a_1 = 2, a_2 = 1.6, d_1 = 4.0, d_2 = 3.6$;
 c: $a_1 = 0.5, a_2 = 0.4, d_1 = 2.0, d_2 = 2.0$;
 d: $a_1 = 1, a_2 = 0.6, d_1 = 2, d_2 = 1.3$

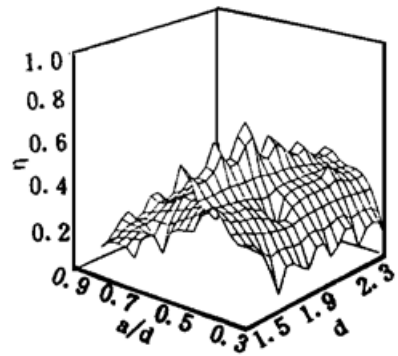


Fig. 6 The $(-1, -1)$ order diffraction efficiency of grating vs. the structural parameters. $h = 0.5, \lambda = 1.429, \theta = 30^\circ, \varphi = 60^\circ, \alpha = 30^\circ$

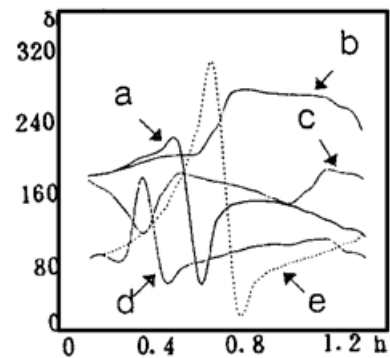


Fig. 8 The $(-1, -1)$ order diffraction phase δ of grating vs. grating depth
 a: $\theta = 30^\circ, \varphi = 60^\circ, \alpha = 30^\circ, \lambda = 1.429$;
 b: $\theta = 30^\circ, \varphi = 45^\circ, \alpha = 30^\circ, \lambda = 1.429$;
 c: $\theta = 30^\circ, \varphi = 45^\circ, \alpha = 30^\circ, \lambda = 1.111$;
 d: $\theta = 30^\circ, \varphi = 45^\circ, \lambda = 1.111$ (circular polarization);
 e: $\theta = 30^\circ, \varphi = 45^\circ, \lambda = 1.429$ (circular polarization)

3 实验结果

在本文的实际情况下, 需要在较宽的波段范围内、在一定入射方向的情况下, 实现对衍射效率的控制。根据上述理论计算的结果, 选择正方形矩孔光栅, 通过调整矩孔深度来满足实际需要。根据设计要求, 采用微加工技术, 在 $\phi 100$ mm 的样板上, 制备了矩孔长、宽均为

40 μm , 周期均为 80 μm , 深度分别为 1.5 μm 、2.5 μm 、3.0 μm 的矩孔光栅, 并利用 PE-983 红外光谱仪测量了光栅(0, 0)级镜反射谱。有关的计算结果和测量结果见图 9、图 10、图 11。

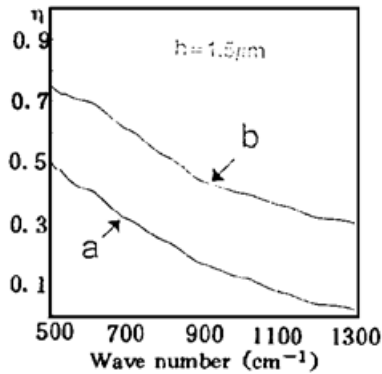


Fig. 9 The (0, 0) order diffraction efficiency vs. incident wave number
a: theoretical result; b: experimental result

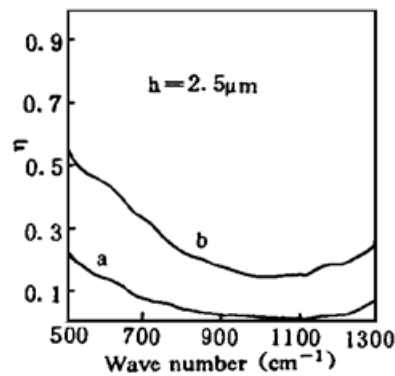


Fig. 10 The (0, 0) order diffraction efficiency vs. incident wave number
a: theoretical result; b: experimental result

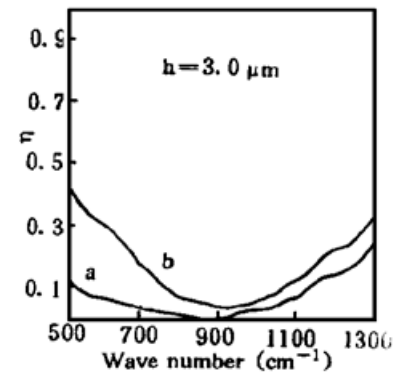


Fig. 11 The (0, 0) order diffraction efficiency vs. incident wave number
a: theoretical result; b: experimental result

从上述结果来看, 理论曲线与实验曲线的变化趋势基本吻合; 至于两者绝对值之间的差异, 可能是由于制备过程中样品结构的缺陷、测量光束为非严格平行光等原因所造成的。

结 论 上述研究结果表明, 根据电磁场的矢量模式理论, 能较为方便、有效地解决矩孔金属光栅的衍射问题, 能同时直接给出衍射效率和衍射偏振特性; 文献[5]所选定的基矢也是较为合理的。上述结果同时表明, 完全有可能根据实际需要所需的光栅结构进行设计, 即根据矢量模式理论的数值计算结果, 通过调整结构参数以使衍射场分布满足实际需要; 与其它二维结构的光栅如矩形槽光栅等相比, 矩孔光栅有更多的结构参数可供调整, 以使所关心的衍射光场满足所要求。

参 考 文 献

- [1] R. Petti, *Electromagnetic Theory of Grating*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1980
- [2] 杨宝成, 庄松林, 周学松, 矩形槽光栅的矢量模式理论. 光学学报, 1989, 9(3): 270~ 277
- [3] 林维德, 庄松林, 周学松, 对称型闪耀光栅的矢量模式理论. 光学学报, 1991, 11(7): 624~ 629
- [4] 林维德, 庄松林, 周学松, 金属光栅的矢量模式理论. 光学学报, 1993, 13(2): 170~ 174
- [5] 严 瑗, 陈 晖, 朱文勇, 矩孔光栅的矢量模式理论. 光学学报, 1994, 14(6): 621~ 625
- [6] 严 瑗, 朱文勇, 陈 晖, 矩形槽光栅矢量模式理论的数值计算. 光学学报, 1994, 14(5): 505~ 507
- [7] 朱文勇, 郑毅达, 陈 晖等, 任意槽型金属光栅矢量模式理论的数值计算. 光学学报, 1994, 14(4): 303~ 307

Numerical Calculation of Vector Modal Theory for Perfectly-Conducting Rectangular-Aperture Grating

Zhu Wenyong Lin Weide Gao Jing Chen Hui
Li Guogang Yan Yuan

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

(Received 30 December 1995; revised 6 December 1996)

Abstract Based on the vector modal theory for perfectly-conducting rectangular-aperture grating, the diffraction field was studied numerically. The distribution of diffraction efficiency and polarization with arbitrary incident direction and polarization was given. The effect of grating structure parameters (period, width and depth) on the diffraction field was discussed. According to the calculation results, a series of samples with different depth were made, and the measurement shows that the theoretical calculation agrees with the experimental results.

Key words diffraction, vector modal theory, perfectly-conducting rectangular-aperture grating.

高效电子俘获光学薄膜在中国科学院 上海光学精密机械研究所研制成功

陈述春 阮昊 方祖捷 干福熹

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

中国科学院上海光学精密机械研究所在已有工作基础上最近成功地研制出 SrS(Eu, Sm) 电子俘获光学薄膜, 通过 X-射线衍射及各种光谱和光学性质测试, 表明所研制的薄膜具有良好的光存储、光学图像转换和红外激励发光特性。

图 1 是用所研制的薄膜通过 Polerold 照相机拍摄的光存储实验结果。实验中, 用普通白炽灯中的兰绿光成分, 通过刻有“T”字的掩膜, 将信息写入薄膜, 然后去掉掩膜, 在近红外光作用下, 将存储的“T”字以桔红色发光显示出来。其它实验结果, 将另文发表。

高效电子俘获薄膜制备关键是要使 Eu 在膜中保持二价, 形成发光中心; 使 Sm 保持三价, 形成电子俘获中心; 适当地控制基片的温度; 防止 S 的丢失等。

其它电子俘获薄膜的研制, 以及有关的工作正在继续和深入, 电子俘获光学薄膜的研制成功, 将进一步促进我国光存储和光信息处理以及红外像转换等方面的研究和发展。

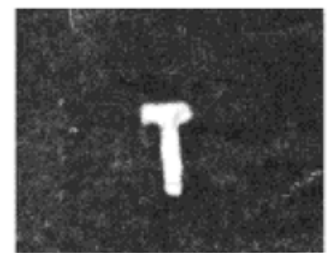


Fig. 1