

文章编号: 1001-4322(2007)09-1413-04

# 全内反射式衍射光栅近场光学特性\*

周平和<sup>1</sup>, 王少华<sup>1</sup>, 刘世杰<sup>1,2</sup>, 邵建达<sup>2</sup>

(1. 陕西理工学院 物理系, 陕西 汉中 723000; 2. 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要:** 利用傅里叶模式理论分析了具有高衍射效率的全内反射式衍射光栅在 TE 和 TM 偏振态下的近场光分布特点, 讨论了光栅结构参数以及入射角度对光栅内电场增强的影响。结果表明: 全内反射光栅内部电场分布对偏振态较敏感, 光栅槽深和占宽比对电场增强影响较小, 光栅内的峰值电场随光栅周期增大而增大, 并且峰值电场随着入射角度的增大而减小。在应用于高功率激光时, 降低光栅内部的电场增强可以有效降低损伤风险。

**关键词:** 全内反射; 衍射光栅; 电场增强; 损伤阈值; 近场分布

**中图分类号:** TB113

**文献标识码:** A

高衍射效率的光栅在现代光学系统中发挥着重要的作用, 包括光通信、光谱测量、传感和成像等。高效率光栅也是激光系统中不可缺少的元件, 特别是作为啁啾脉冲放大(CPA)系统中的脉冲展宽/压缩器<sup>[1]</sup>。用于 CPA 系统中的衍射光栅不仅要有高的衍射效率, 而且用于压缩超短脉冲的光栅也需要较高的损伤阈值, 以保证整个激光系统的稳定运行。由于存在较大的吸收, 金属光栅的损伤阈值较低, 也限制了衍射效率的进一步提高<sup>[2]</sup>。相比之下, 全介质光栅具有很低的吸收, 制作材料可具有高于金属膜数十倍的损伤阈值, 衍射效率也接近 100%, 从而减少了能量损耗。因此, 发展高效率的全介质光栅是提高脉冲激光功率的必由之路。

近年来提出的多层介质膜光栅(MDG)被广泛用于 CPA 系统<sup>[3]</sup>。MDG 由多层介质高反射膜和位于其顶层的浮雕光栅组成, 在自准直角使用条件下, MDG 的 -1 级衍射效率可高于 99%, 损伤阈值目前已提高到 4.5 J/cm<sup>2</sup> (10 ps, 1 053 nm)<sup>[4]</sup>。然而, MDG 不仅需要设计顶层光栅结构, 还要考虑底层高反射膜的特性, 随着光栅面积的增大, 多层膜的均匀性和清洁度的控制也给工艺过程带来挑战<sup>[5]</sup>。因此, 直接在体材料上制作光栅成为获得这种高衍射效率光栅的另外一种选择, 体材料的损伤阈值也要比薄膜材料高得多<sup>[6]</sup>。最近, Maciante 等人提出了一种基于全内反射(TIR)原理的光栅<sup>[7]</sup>, 该光栅直接制作在熔石英材料上, 在全内反射和自准直使用条件下, -1 级衍射效率仍可高于 99%。在不同使用波长处, 通过优化 TIR 光栅结构可以获得高效、低插入损耗的各种应用器件<sup>[8]</sup>。然而, 对于应用于高功率激光系统的光栅, 近场光分布特性对其抗激光损伤特性有重要的影响。这主要是由于峰值电场强度是光栅材料发生雪崩离化导致破坏的主导因素<sup>[9-10]</sup>。目前, 对于满足高效率的 TIR 光栅, 其峰值电场随光栅结构的变化规律报道还很少。因此, 理论分析和优化 TIR 光栅的近场光分布对其在高功率激光系统中的应用有重要意义。

本文利用傅里叶模式理论分析了 TIR 光栅近场光分布, 分别讨论了 TE 波和 TM 波入射时, 具有高效率的 TIR 光栅的近场光分布特点, 分析了峰值电场随光栅槽深、占宽比以及周期的变化规律, 最后讨论了入射角度变化对峰值电场的影响。

## 1 理论模型

图 1 为 TIR 光栅结构示意图, 具有矩形结构的浮雕光栅位于石英体材料上。当入射光以自准直角  $i$  从石英入射到光栅, 并且光栅周期满足(1)式时, 入射光全部被反射回石英体内, 且沿入射光反方向上可获得接近 100% 的衍射效率<sup>[7]</sup>

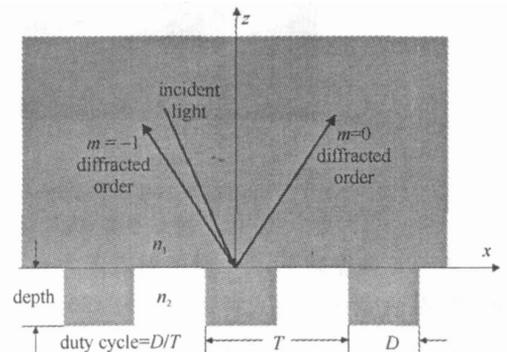


Fig. 1 Structure of TIR grating

图 1 TIR 光栅结构示意图

\* 收稿日期: 2007-03-27; 修订日期: 2007-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(10376040); 陕西理工学院科研基金资助课题(SL GQD0406)

作者简介: 周平和(1955—), 男, 陕西汉中人, 实验师, 主要从事光电技术的研究; zhoupinghe@163.com。

$$m_1 > \frac{\lambda}{2T} > m_2 \quad (1)$$

式中:  $m_1$  和  $m_2$  分别为石英和空气的折射率;  $\lambda$  为入射波长;  $T$  为光栅周期。

对于这种具有亚波长结构的光栅, 本文采用傅里叶模式理论<sup>[11]</sup> 分析其衍射特性。根据该理论, 按构成材料对 TIR 光栅进行分层处理, 沿  $z$  方向可分为光栅层、空气层和石英层, 在每一分层, 电磁场满足麦克斯韦方程组。由于 TIR 光栅具有周期结构, 电磁场可以展开为傅里叶级数形式, 从而使麦克斯韦方程组转化为代数方程组, 再根据边界条件和初始条件就可以求解每一层的电磁场分布, 最后根据衍射效率的定义便可得到 TIR 光栅各级次的衍射效率。在 TE 或 TM 偏振态时, 通过优化 TIR 光栅结构, 其 -1 级反射衍射都可获得较高的效率, 这对提高 CPA 系统中的光能利用率非常有利。同时, CPA 系统中使用的压缩光栅直接和输出高能激光相互作用, 所以 TIR 光栅抗激光损伤特性也是其应用于高功率激光系统的关键。已有的研究表明, 高峰值电场是光栅材料发生雪崩电离导致损伤的主要因素<sup>[9]</sup>, 因此分析具有高效率 TIR 光栅的近场光分布特点和变化规律对其应用于高功率激光系统有重要的意义。

对于 TE 和 TM 两种偏振态, TIR 光栅内第  $j$  层的电场分布可以表示为<sup>[12]</sup>

$$E_l^j(x, z) = e_l \exp(ik_0 x) \{ \exp[ik_0 i(z - z_j)] u_{l+}^j + \exp[ik_0 i(z - z_j)] d_{l+}^j \} \quad (2)$$

式中: 下标  $l$  表示 TE 或 TM 偏振态;  $e_l$  为电场本征值;  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ;  $i$  为  $z$  方向波矢分量,  $u_{l+}^j$  和  $d_{l+}^j$  分别为界面  $j$  处上行波和下行波振幅系数, 可以由边界条件确定。在递推求解振幅系数  $u_{l+}^j$  和  $d_{l+}^j$  时, 采用反射透射系数阵算法<sup>[11]</sup> (RTCM) 以提高计算效率和数值稳定性。

## 2 数值分析和讨论

在数值分析时, 假设入射光波长为 1 053 nm, 空气和熔石英的折射率分别为 1.0 和 1.46。根据 (1) 式, 光栅的周期  $T$  应介于 361 ~ 527 nm 之间。在 TE 偏振态下, TIR 光栅 -1 级衍射效率与光栅周期和槽深、以及占宽比和槽深的关系分别如图 2 所示, 其中光栅占宽比和周期分别取 0.5 和 450 nm。由图 2(a) 可以看出, 光栅槽深在 2  $\mu\text{m}$  范围内变化时, 在 3 个白色区域的光栅参数都可以使 TIR 光栅 -1 级衍射效率高于 95%。但是, 随着槽深的增大, 获得高效率 TIR 光栅的周期范围呈缩小趋势。另外, 随着槽深的增大, 获得高效率 TIR 光栅的占宽比的宽容度也减小, 如图 2(b) 所示。因此, 浅槽深的 TIR 光栅不仅提供了较大的工艺容差, 而且也降低了刻蚀石英材料的难度。在 TM 偏振态下, TIR 光栅 -1 级衍射效率随光栅参数的变化规律与 TE 偏振态下的结果类似。不同之处在于: 相同周期的 TIR 光栅获得高衍射效率所需的槽深要更大, 宽容度范围也更宽。

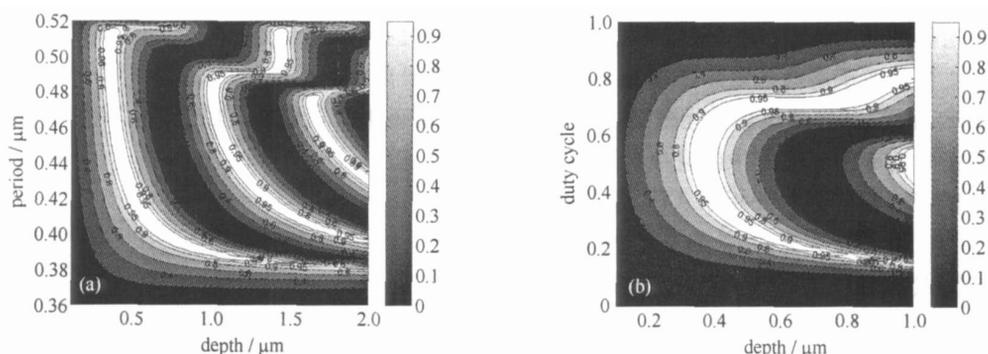


Fig. 2 -1 order diffraction efficiency vs period and depth, duty cycle and depth

图 2 TIR 光栅 -1 级衍射效率与周期和槽深以及占宽比和槽深的关系

在 TE 偏振态下, -1 级衍射效率为 0.988 的 TIR 光栅的内部电场振幅分布如图 3(a) 所示, 其中光栅周期、槽深、占宽比以及入射角分别为 450 nm, 390 nm, 0.5 和 53.26°。在 TM 偏振态下, -1 级衍射效率为 0.99 的 TIR 光栅的内部电场振幅分布如图 3(b) 所示, 其中光栅周期、槽深、占宽比以及入射角分别为 450 nm, 450 nm, 0.5 和 53.26°。可以看出, 对于两种偏振态的入射光, 光能都基本被 TIR 光栅反射回石英体内, 仅倏逝波透过石英到空气中一小段距离。而且, 对于 TE 偏振态, 在石英体材料内和光栅脊处, 电场振幅是入射光的 2 倍以上, 如图 3(a) 所示。相比之下, 对于 TM 偏振态, 石英体材料内和光栅脊处的电场振幅要小, 仅为入射光振幅的 1.6 倍左右, 而且峰值电场位于空气间隙, 如图 3(b) 所示。两种偏振态下近场光分布的差异主要是由它们在光栅区域的边界条件不同所致<sup>[13]</sup>。

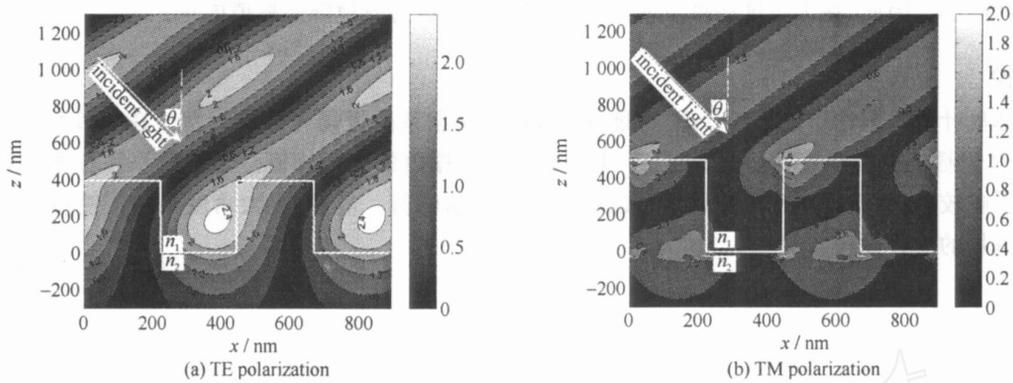


Fig. 3 Amplitude distribution of internal electric field of TIR grating

图 3 TIR 光栅内部电场振幅分布

从以上的分析可以看出,为了避免峰值电场引起的多光子离化诱导光栅损伤, TIR 光栅适合在 TM 偏振态下使用。若要求 TIR 光栅在 TE 偏振态下使用时,其内部的电场增强必须要降到很低。

定义电场增强系数为 TIR 光栅内部峰值电场振幅和入射电场振幅的比值。图 4 分别给出了电场增强系

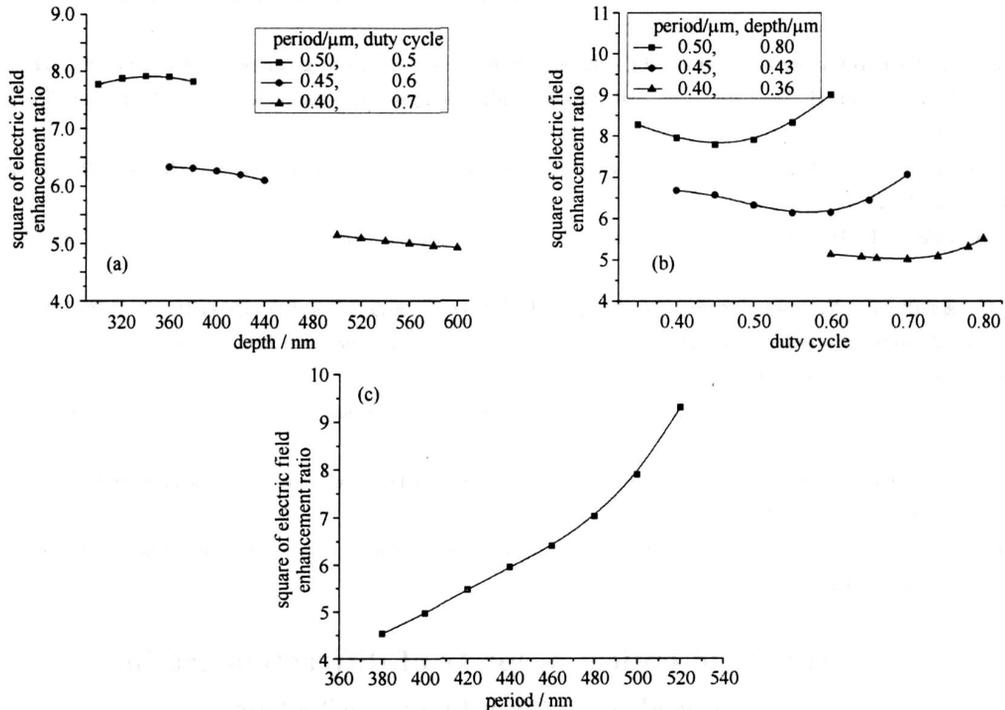


Fig. 4 Relation between electric field enhancement with depth, duty cycle and period

图 4 TIR 光栅电场增强与槽深,占宽比和周期的关系

数的平方与光栅槽深、占宽比和周期的关系。由图 4 (a) 和 (b) 可以看出,高效率 TIR 光栅内电场增强对光栅槽深和周期的依赖程度都很小。然而,随着光栅周期的增大,电场增强系数迅速增大,最大值为 9.5。因此,在 TE 偏振态使用时,为了降低 TIR 光栅内的电场增强,光栅周期宜选择较小值。

计算结果表明,在 TE 偏振态下, TIR 光栅在较宽的角谱内也能获得高衍射效率,如图 5 中虚线所示,其中光栅周期、槽深以及占宽比分别为 410 nm, 640 nm 和 0.47。入射角度的变化对 TIR 光栅内电场增强的影响如图 5 中实线所示,可以看出电场增强随着入射角度的

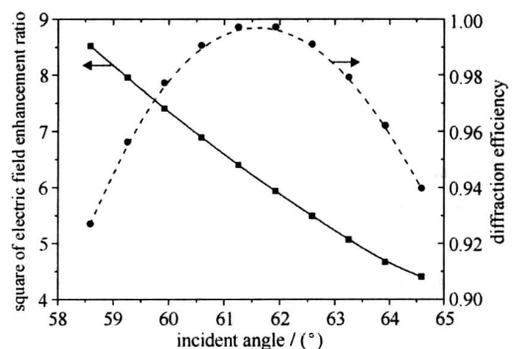


Fig. 5 Diffraction efficiency and field enhancement vs incident angle

图 5 TIR 光栅衍射效率以及电场增强与入射角度的关系

增大而线性减小。因此,在大角度条件下使用 TIR 光栅也可以有效地降低峰值电场。

### 3 结 论

利用傅里叶模式理论讨论了与 TIR 光栅损伤阈值密切联系的近场光分布特性。在 TM 偏振态下具有高效率的 TIR 光栅的电场峰值要远低于在 TE 偏振态下的光栅内的电场峰值。光栅槽深和占宽比对 TIR 内的电场增强影响较小,但选择小的光栅周期可以有效降低电场峰值。最后,在大角度条件下使用 TIR 光栅也是降低峰值电场的一种途径。

### 参考文献:

- [1] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Opt Commun*, 1985, **56**: 219-221.
- [2] Boyd R D, Britten J A, Decker D E, et al. High-efficiency metallic diffraction gratings for laser application[J]. *Appl Opt*, 1995, **34**(10): 1697-1706.
- [3] Perry M D, Boyd R D, Britten J A, et al. High-efficiency multiplayer dielectric diffraction gratings[J]. *Opt Lett*, 1995, **20**(8): 940-941.
- [4] Jovanovic I, Brown C G, Stuart B C, et al. Precision damage tests of multilayer dielectric gratings for high-energy petawatt lasers[C]// Proc of SPIE. 2005, **5647**: 34-42.
- [5] Shore B W, Perry M D, Britten J A, et al. Design of high-efficiency dielectric reflection gratings[J]. *J Opt Soc Am A*, 1997, **14**(5): 1124-1135.
- [6] Nguyen H T, Shore B W, Bryan S J, et al. High-efficiency fused-silica transmission gratings[J]. *Opt Lett*, 1997, **22**(3): 142-144.
- [7] Marciante J R, Raguin D H. High-efficiency, high-dispersion diffraction gratings based on total internal reflection[J]. *Opt Lett*, 2004, **29**(6): 542-544.
- [8] Marciante J R, Hirsh J I, Raguin D H, et al. Polarization-insensitive high-dispersion total internal reflection diffraction gratings[J]. *J Opt Soc Am A*, 2005, **22**(2): 299-305.
- [9] Stuart B C, Feit M D, Herman S, et al. Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics[J]. *Phys Rev B*, 1996, **53**(4): 1749-1761.
- [10] 朱湘琴,葛德彪,柴立群. 1 维介质光栅近场及其衍射的 FDTD 分析[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(12): 1585-1589. (Zhu X Q, Ge D B, Chai L Q. Analysis on near-field and diffraction problem of 1-D dielectric grating using FDTD method. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(12): 1585-1589)
- [11] Li L F. Multilayer modal method for diffraction gratings of arbitrary profile, depth, and permittivity[J]. *J Opt Soc Am A*, 1993, **10**(12): 2581-2591.
- [12] Liu S J, Shen Z C, Kong W J, et al. Optimization of near-field optical field of multi-layer dielectric gratings for pulse compressor[J]. *Opt Commun*, 2006, **267**(1): 50-57.
- [13] Nakagawa W, Tyan R, Sun P, et al. Ultrashort pulse propagation in near-field periodic diffractive structures by use of rigorous coupled-wave analysis[J]. *J Opt Soc Am A*, 2001, **18**(5): 1072-1080.

## Near-field optical property of diffraction grating based on total internal reflection

ZHOU Ping-he<sup>1</sup>, WANG Shao-hua<sup>1</sup>, LIU Shi-jie<sup>1,2</sup>, SHAO Jian-da<sup>2</sup>

(1. Physics Department of Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China;

2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,

P. O. Box 800-211, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** Using Fourier model method, the near-field distribution of a total internal reflection(TIR) grating with high efficiency was analyzed under the irradiation of different polarized lights. The dependence of electric field enhancement in the TIR grating on constructive parameters and incident angle was also discussed. It is shown that electric field in the grating is sensitive to the polarization state, and peak electric field can be reduced greatly with short period and also decreases linearly with the increasing of incident angle. For the application of TIR grating to the high-energy laser system, reduction of the internal field enhancement can avoid the danger of damage effectively.

**Key words:** Total internal reflection; Diffraction grating; Electric field enhancement; Damage threshold; Near-field distribution