

多层介质膜脉冲压缩光栅近场 光学特性分析*

刘世杰^{1)†} 沈 健^{1)‡} 沈自才^{1)‡} 孔伟金^{1)‡}

魏朝阳^{1)‡} 晋云霞¹⁾ 邵建达¹⁾ 范正修¹⁾

1) 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2005 年 12 月 3 日收到, 2006 年 1 月 25 日收到修改稿)

利用傅里叶模式理论分析了 TE 波自准直角入射的使用条件下, 多层介质膜光栅的光栅区和多层膜区电场分布的特点. 分别讨论了 HfO_2 和 SiO_2 为顶层光栅材料时, 光栅结构参数对光栅脊峰值电场的影响. 结果表明, 对于不同膜厚的顶层材料, 存在一个最佳膜厚度, 使光栅脊峰值电场最小, 并且当膜厚增大时, 设计大高宽比的光栅可以降低该电场峰值. 最后, 在大角度条件下使用多层膜光栅也可以降低光栅脊处的峰值电场.

关键词: 衍射光学, 多层介质膜光栅, 模式理论, 损伤阈值

PACC: 4225, 4225B, 6180

1. 引 言

在高功率脉冲激光系统中, 啁啾脉冲放大 (chirped-pulse amplification, CPA) 技术^[1]是提高其输出功率的重要环节. 该技术将超窄脉冲先用光栅展宽, 再用传统技术放大, 最后再用光栅进行压缩, 从而可以获得高功率的短脉冲. 为了提高激光能量利用率, 脉冲展宽/压缩光栅需要较高的衍射效率, 此外, 末级脉冲压缩光栅直接和输出的高功率激光脉冲相互作用, 因而其抗激光损伤特性对整个系统也至关重要.

金属光栅可以得到很高的衍射效率, 然而其较强的吸收使其对皮秒脉冲的抗损伤阈值限制在 $0.4\text{J}/\text{cm}^2$ 以下^[2]. 由于介质膜吸收很弱, 其抗激光损伤阈值要比金属膜高十个数量级以上, 因此近年来提出的多层介质膜光栅^[3-5] (multi-layer dielectric grating, MDG) 在 CPA 系统中得到了广泛的应用, MDG 不仅可以提供高衍射效率, 而且也有较高的损伤阈值. 已有的研究结果表明^[6], MDG 的损伤特性不仅依赖于制作工艺中的精确控制和清洁度, 而且

损伤易发生在光栅脊的侧壁, 这主要是由于在这些区域光干涉相长导致电场增强, 高电场强度是光栅材料发生雪崩离化的主导因素. 但是, 对于满足高衍射效率的 MDG, 其峰值电场随光栅结构参数和材料的变化规律报道较少. 因此, 理论分析和优化 MDG 的近场分布对设计和制作高损伤阈值压缩光栅有重要的指导意义.

本文用傅里叶模式理论分析了 MDG 的近场分布, 给出了光栅区和多层膜内部的电场分布表达式, 分析了 MDG 近场分布的特点, 数值计算时通过增加傅里叶模数可降低倏逝波对近场分布的影响, 分别以 HfO_2 和 SiO_2 为顶层光栅材料, 分析了当 MDG-1 级衍射效率高于 0.95 时, 光栅脊峰值电场随光栅槽深、占宽比和顶层膜厚的变化规律, 最后讨论了光栅折射率和入射角度变化对光栅脊处峰值电场的影响, 这些结果将对提高 MDG 的损伤阈值提供一定的理论指导.

2. 理论模型

MDG 结构如图 1 所示, 它由多层介质高反膜和

* 国家自然科学基金(批准号: 30376040)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: hsyliu@163.com

位于其上的光栅浮雕结构构成.高反膜由高折射率为 n_H 的膜料和低折射率为 n_L 的膜料制备而成,其结构可由(H L) p 或(H 2L) p 膜系优化设计得出(其中 p 为周期数目)^[7].位于顶层的光栅,其截面在 xz 平面内,栅线沿 y 方向,周期为 T .基底材料的折射率为 n_{sub} .按照傅里叶模式理论^[8,9],对 MDG 按构成材料分布进行水平多分层处理,沿 z 方向分为 N 层,其中光栅结构位于第 2 层,如图 1 所示.在每一分层,电磁场满足麦克斯韦方程组,一般 MDG 的使用条件为 TE 波自准直角度入射,从而使麦克斯韦方程组得到很大的简化.由于 MDG 沿 x 方向具有周期性,可将第 j 层中的电磁场用傅里叶模级数进行展开

$$U^j(x, z) = \sum_m U_m^j \exp\{ik[\alpha_m x + \gamma(z - z_j)]\} \quad (1)$$

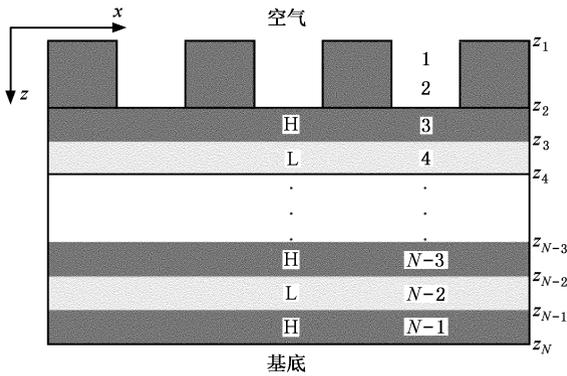


图 1 多层介质膜光栅结构示意图

其中 $U^j(x, z)$ 可以代表分量 E_y, H_x 或 H_z, U_m^j 为对应的傅里叶模系数, m 代表傅里叶模编号 ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm M$), 波矢 $k = 2\pi/\lambda$, x 方向波矢分量 $\alpha_m = \alpha_0 + m\lambda/T$, γ 为 z 方向波矢分量. 对介电常数 $\epsilon^j(x, z)$ 按照下式进行展开:

$$\epsilon^j(x, z) = \sum_m \epsilon_m^j \exp(i2\pi mx/T). \quad (2)$$

把(1)和(2)式代入 TE 波满足的麦克斯韦方程组中,可以得到每一层电场和磁场满足如下本征矩阵方程:

$$\begin{aligned} & \{\epsilon_{mn} - \alpha^2\} E_{ym} \\ &= [\gamma_{mn}] E_{ym}, \\ & [H_{xm}] = [\gamma_{mn}] E_{ym}, \\ & [H_z] = \alpha E_{ym}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $[E_{ym}], [H_{xm}], [H_z]$ 分别表示 E_{ym}, H_{xm}, H_z 组成的阵列,

$$\epsilon_{mn} = 1/T \int_0^T \epsilon^j(x) \exp[-2\pi(m-n)x/T] dx,$$

α 为 $\sin\theta + m\lambda/T$ 所构成的对角矩阵 $[\gamma_{mn}]$ 为由向量 γ 构成的对角矩阵.

通过求解以上本征方程,可以得到每一层的本征值和本征矩阵.线性叠加这些本征模式场就可以得到每一分层中的电场分布,即

$$\begin{aligned} E_y^j(x, z) &= \sum e_y^j \exp(ik_0 \alpha x) \\ &\times \{ \exp(ik_0 \gamma_j(z - z_j)) u_+^j \\ &+ \exp(ik_0 \gamma_j(z - z_j)) d_+^j \}, \quad (4) \end{aligned}$$

其中 e_y^j 为电场本征值, u_+^j 和 d_+^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_+^j 和 d_+^j 时,采用反射透射系数矩阵法^[9](RTCM)以提高计算效率和数值稳定性.

根据衍射效率的定义,MDG 的第 m 级衍射效率为

$$\eta_m^R = \frac{\overline{S_{mz}^R}}{S_{1z}^R} = \frac{\text{Re}[E_{ym}^R (H_{xm}^R)^*]}{\cos\theta}, \quad (5)$$

其中 $\overline{S_{1z}^R}, \overline{S_{mz}^R}$ 分别为入射波和第 m 级衍射波的能量流密度 z 方向分量对时间的平均值, E_{ym}^R 和 H_{xm}^R 分别为沿 m 级次方向上的电场和磁场分布, θ 为入射角度.

应用于高功率激光系统中的脉冲压缩光栅,需要有尽可能高的衍射效率,以便最大限度的提高光能利用率.同时,末级压缩光栅直接和输出高能激光相互作用,抗激光损伤特性也是发展高功率激光的关键.在自准直使用条件下,光栅浮雕结构对光能的调制使 MDG 反射 -1 级获得高衍射效率,但同时光栅区也形成了峰值电场,其振幅可高于入射光振幅的 2 倍以上,高电场是光栅材料发生雪崩离化的主导因素.因此,在设计 MDG 时,衍射效率和光栅区峰值电场需要同时兼顾.在分析 MDG 的光学特性时,我们采用了如下评价函数^[6]:

$$MF = \eta_{-1} / E_f^2, \quad (6)$$

其中 η_{-1} 为 -1 级衍射效率,其值高于 0.95, E_f 为电场增长幅度,定义为光栅脊中电场振幅的最大值与入射电场振幅的比值.由(6)式可以看出,衍射效率是接近于 1 的常量,若评价函数 MF 越大,电场增长幅度越小,其抗激光损伤特性就越强.下面用(4), (5)和(6)式对 MDG 的近场光学特性进行分析.

3. 数值计算分析

在用(4)式计算电场时,数值计算的精度依赖于傅里叶模的数目,在近场区,高阶傅里叶模一般都以

倏逝波的形式存在,其对电场的调制有很重要的作用.但是在实际运算时,为了提高运算效率,不可能无限地增加傅里叶模数,数值计算表明,当傅里叶模数大于某一值时,MDG 内部电场分布变化很小,更高阶的倏逝波影响很小,同时衍射效率也达到收敛状态.因此,在计算电场分布时,傅里叶模数的取值以衍射效率达到收敛状态为标准.

表 1 数值计算参数

| 波长/nm | 入射角($^{\circ}$) | 光栅周期/nm | n_{HfO_2} | n_{SiO_2} | $n_{\text{空气}}$ | $n_{\text{基底}}$ |
|-------|-------------------|---------|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| 1053 | 51.2 | 676 | 1.96 | 1.46 | 1.0 | 1.52 |

表 1 给出了数值计算参数,底层高反膜为优化 H_2L 膜系后的结果,其结构为 $\text{H}_3\text{L}(\text{H}_2\text{L})\text{H}_{0.5}\text{L}^{[7]}$,其中 H 和 L 分别表示四分之一厚度的高低折射率膜层.图 2 为顶层材料为 HfO_2 材料时 MDG 的近场分布 $|E_y(x, z)|$,此时 MDG 的 -1 级衍射效率为 0.988.可以看出,多层膜内的电场呈非均匀驻波分布,且极大值位于高低折射率材料的界面处,从底层到顶层电场振幅逐渐增加.光栅处于波峰位置,在光栅脊极大峰值为入射振幅的 2.1 倍,极大波峰一直

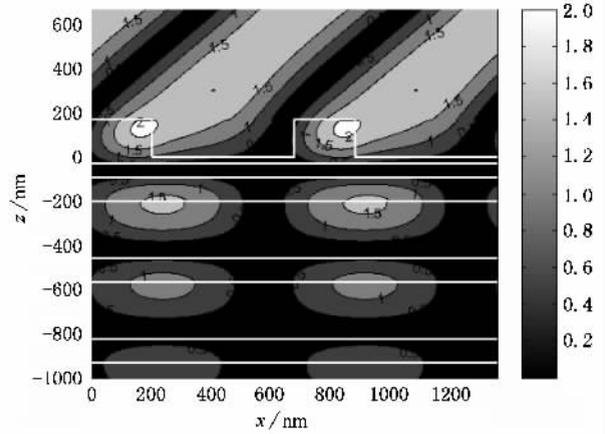


图 2 多层膜光栅内部电场分布(HfO_2 顶层材料厚度为 200nm,光栅槽深 170nm,占宽比 0.3)

延伸到空气层.由于这种非均匀的电场分布,MDG 在短脉冲激光的作用下,其损伤易发生在光栅脊上.因此,从理论上优化光栅参数(顶层厚度,光栅槽深和占宽比),降低光栅脊处的电场峰值,是提高 MDG 损伤阈值的一种有效途径.

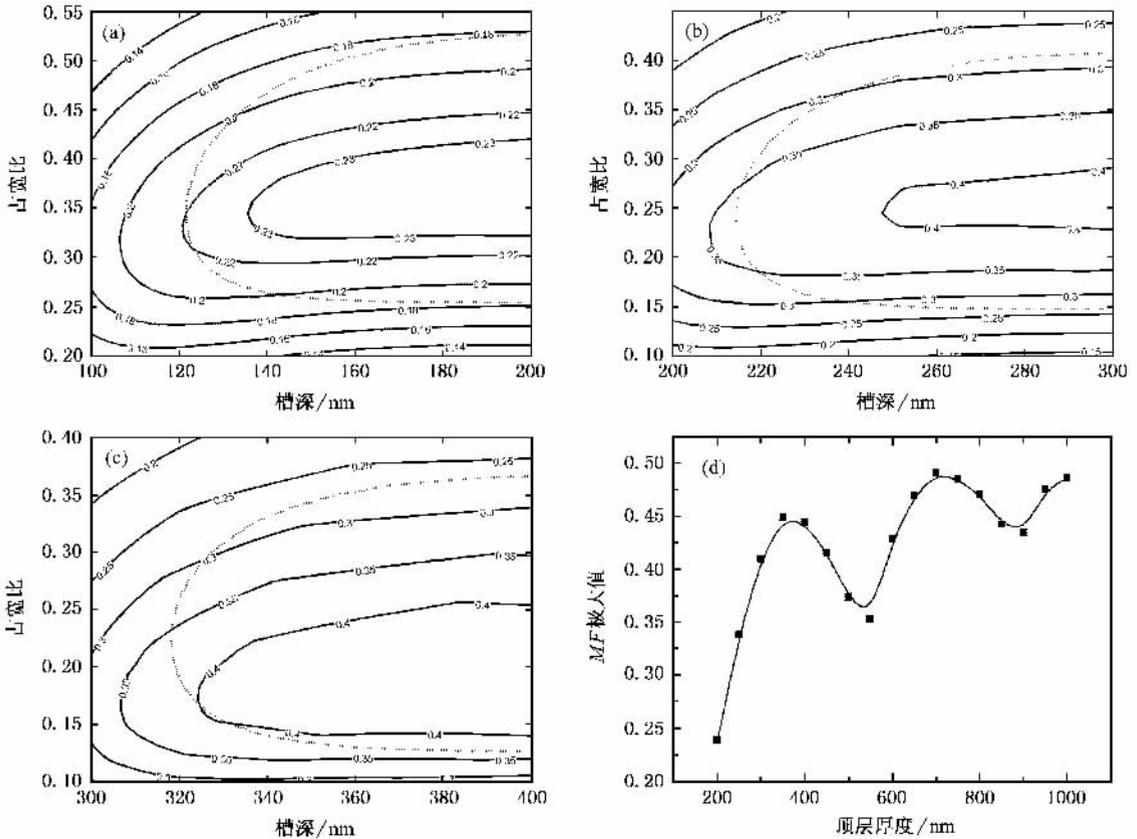


图 3 (a)–(c)评价函数 MF 与光栅槽深和占宽比的关系, HfO_2 顶层材料的厚度分别为 200、300 和 400nm (d) MF 极大值与顶层厚度的关系

首先考虑顶层材料为 HfO_2 的 MDG 结构. 图 3 (a)–(c) 为顶层厚度分别取 200nm, 300nm 和 400nm, 评价函数 MF 和光栅槽深, 占宽比的等高线图, 实线为 MF 的变化规律, 点线包络为 MDG-1 级衍射效率大于 0.95 的区域. 可以看出, 占宽比和槽深在较宽的范围内取值都可以使 MDG 获得高衍射效率, 并且在此范围内, 对固定顶层 HfO_2 膜厚的 MDG, 当占宽比不变时, 评价函数 MF 随光栅槽深的增加而增大, 即光栅脊处的峰值电场在减小; 当光栅槽深不变时, 评价函数在占宽比取值范围的中值附近有极大值. 如在图 3(a)–(c) 中, 占宽比可分别取 0.35, 0.25 和 0.17. 但是, 当占宽比增大或者减小时, MF 都会减小, 对应的峰值电场都在增大. 所以, 在工艺制作时, 严格控制占宽比的大小就显得尤为重要, 而深刻蚀光栅槽可以提高 MF , 降低光栅脊处的峰值电场. 此外, 当顶层膜厚度增大时, 要得到较高的 MF , 占宽比须取较小的值, 此时光栅具有较大的高宽比. 而且, 当顶层膜厚不同时, 评价函数 MF 的极大值也不同, 图 3(d) 给出了 MF 的极大值和顶层膜厚度的关系. 可以看出, 在 1000nm 厚度范围内,

当顶层膜厚度在 700nm 附近取值时, MF 的极大值最高, 以此顶层厚度优化设计光栅占宽比和槽深, 可以使光栅脊处的峰值电场最小, 且 MDG 也可提供较高的衍射效率.

损伤测试研究表明, 在皮秒脉冲作用下, SiO_2 材料的损伤阈值要比 HfO_2 材料高出三倍以上^[10]. 因此, 用 SiO_2 材料制作光栅层也可以有效地提高 MDG 的抗损伤特性. 图 4(a)–(c) 为顶层厚度分别取 800nm, 900nm 和 1000nm, 评价函数 MF 和光栅槽深、占宽比的关系, 实线为 MF 的变化规律, 点线包络为 MDG-1 级衍射效率大于 0.95 的范围. 可以看出, 当顶层材料为 SiO_2 时, MDG-1 级衍射效率大于 0.95 的光栅参数取值范围局限在窄带区域内, 评价函数 MF 在这些区域内随光栅占宽比和槽深的变化规律和 HfO_2 顶层材料有所区别. 顶层 SiO_2 材料需要较高的顶层厚度和相对较大的槽深, 才能获得高评价函数值, 如在图 4(a)–(c) 中, 槽深最小须为 561, 670 和 775nm. 并且当占宽比不变时, MF 随槽深的减小而增大. 同样, 占宽比宜取其所在范围的中值,

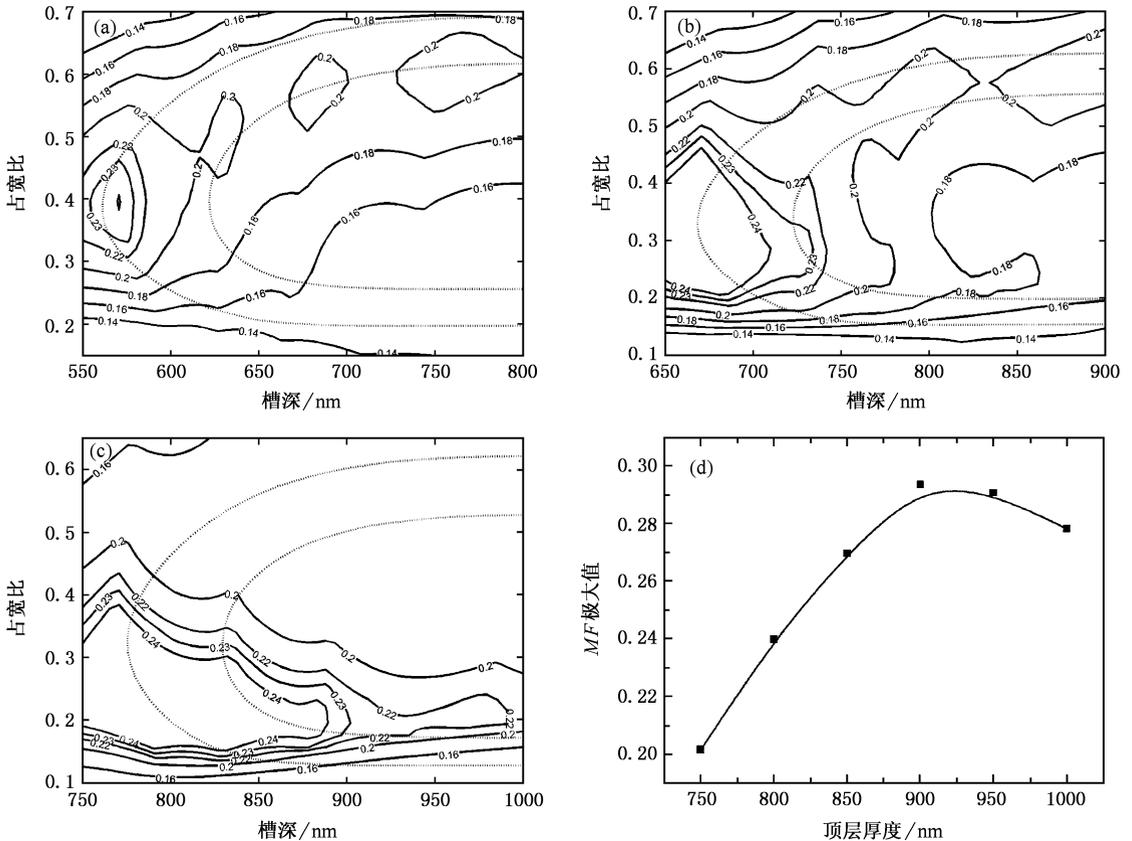


图 4 (a)–(c) 评价函数 MF 与光栅槽深和占宽比的关系, SiO_2 顶层材料的厚度分别为 800, 900 和 1000nm (d) MF 极大值与顶层厚度的关系

而且占宽比的增大或减小都会使光栅脊处的峰值电场增大.因此,在工艺实验时,须同时精确控制占宽比和槽深.另外,随着 SiO_2 顶层膜厚的增大, MF 的极大值变化趋势如图 4(d)所示,在 1000nm 厚度范围内,当顶层膜厚在 910nm 附近取值时, MF 的极大值最高,但低于 HfO_2 顶层材料 MF 的最大值 0.49.

4. 讨 论

由以上的数值计算分析可以得出,用 HfO_2 和 SiO_2 分别作 MDG 顶层光栅材料时,在 MDG - 1 级衍射效率大于 0.95 的光栅参数区域内,存在一个最佳

顶层膜厚度,都可以得到较高的评价函数值,而且当膜厚增大时,大高宽比的光栅可以降低光栅脊处的峰值电场.但是,后者的 MF 取值范围要比前者窄很多,这就对制作工艺精度提出了较高的要求,而且后者 MF 的极大值也小于前者.图 5(a)和(b)给出了两者在 MF 的极大值最高时,MDG 的近场分布情况.MDG 的衍射效率分别为 0.958 和 0.961,在光栅区电场振幅极大值分别为 1.39 和 1.84.可以看到,用最大评价函数值设计的 MDG,光栅脊处的电场分布得到了明显的改善.但是,对于顶层材料为 SiO_2 的设计,在光栅和其底层膜的界面处又不可避免地产生了电场极大值分布.

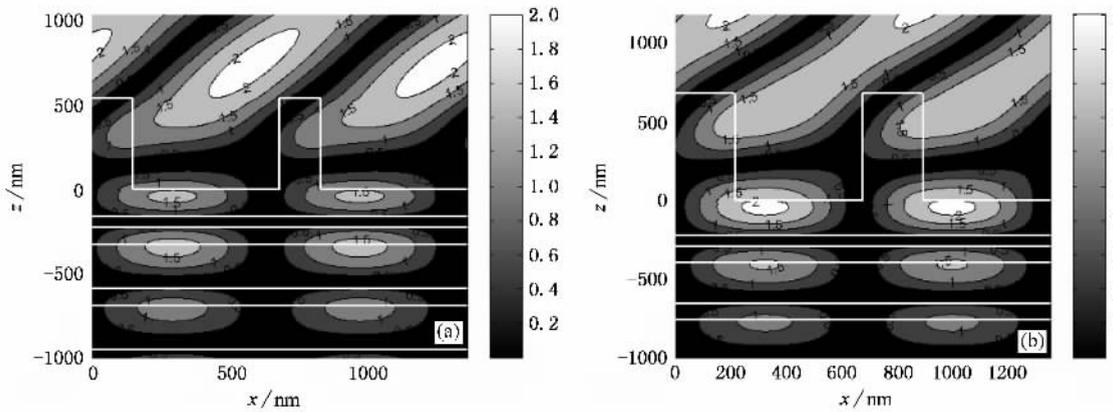


图 5 优化设计后得到的 MDG 近场分布 (顶层材料 (a) HfO_2 —700nm 槽深 540nm,占宽比 0.22 (b) SiO_2 —910nm 槽深 684nm,占宽比 0.32)

以上分析说明,光栅层材料的折射率也是影响 MDG 近场分布和 -1 级衍射效率的一个重要因素.图 6 给出了评价函数 MF 与光栅槽深和折射率的关系,实线为 MF 变化规律,虚线包络为 MDG - 1 级衍射效率大于 0.95 的区域,顶层厚度和占宽比分别取 1000nm 和 0.3.可以看出,当顶层折射率大于 1.6 时,宜选择比较浅的光栅沟槽才能获得高衍射效率和评价函数值,而且折射率在此区域的中值附近可以获得最小的峰值电场.当顶层材料折射率小于 1.6 时,MDG - 1 级衍射效率大于 0.95 的区域范围很窄,而且需要刻蚀比较深的光栅沟槽.在此区域 MF 的最大值仅在 0.3 左右,小于高折射率区域 MF 的最大值 0.49.所以,在表 1 给出的使用条件下,MDG 从能提供的结构参数的宽容度范围来讲,其顶层光栅材料适合选择高折射率材料.

计算结果表明,当 MDG 在一个较宽的角度范围内使用时,其 -1 级衍射效率都可以大于 0.95,如图

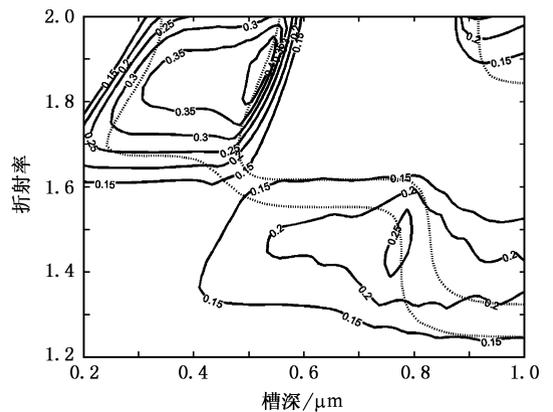


图 6 评价函数 MF 与光栅槽深和折射率的关系(顶层厚度为 1000nm,占宽比 0.3)

(a)所示,光栅槽深为 170nm,占宽比 0.3.同时,MDG 损伤实验表明^[6],当入射角度增大时,其损伤阈值显著增大,这说明光栅脊处的峰值电场随入射

角度的增大而减小. 我们的计算结果也和此结论一致. 如图 7 (b) 所示. 这主要是因为随着入射角度的

增大, 入射电场的切向分量减小的缘故. 因此, 在大角度条件下使用 MDG, 也可以提高其损伤阈值.

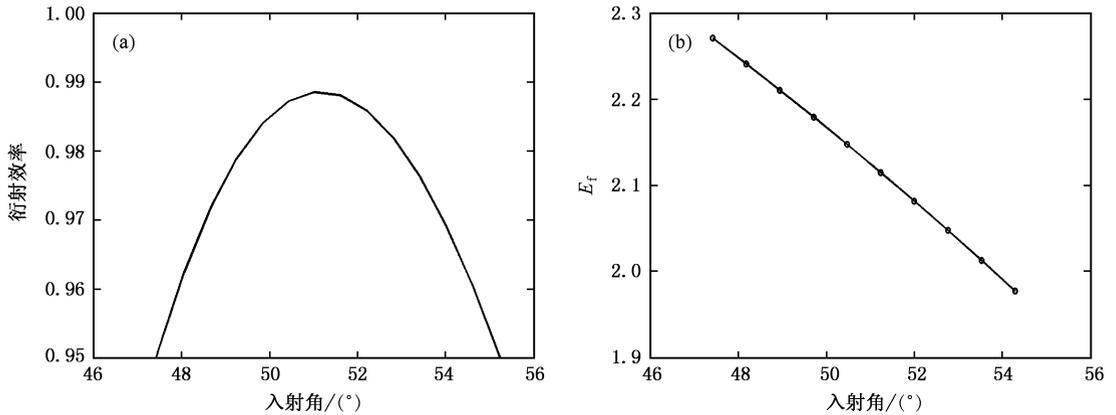


图 7 (a) MDG-1 级衍射效率和入射角度的关系 (b) 光栅脊处峰值电场与入射角度的关系

5. 结 论

设计和制作高衍射效率和高损伤阈值的多层介质膜光栅是发展拍瓦级超短脉冲激光器的关键. 由于光栅浮雕对入射光的调制, 使多层介质膜光栅近场呈非均匀分布, 这种分布在一定程度上限制了多层膜光栅损伤阈值的提高. 本文用傅里叶模式理论对这种非均匀性进行了分析. 结果表明, 光栅浮雕在反射-1 级提供高衍射效率的同时, 由于其对入射光的调制, 在光栅脊附近形成峰值电场, 造成该处抗强激光损伤特性降低. 因此, 优化光栅结构, 降低光栅脊处的峰值电场是提高 MDG 损伤阈值的一种有效途径.

用 HfO_2 和 SiO_2 分别作顶层光栅材料时, 在一定的厚度范围内设计光栅槽深和占宽比都可以使 MDG 获得高衍射效率, 但是光栅脊处的峰值电场一般只在占宽比范围的中值附近有极小值, 而且对于两种材料都存在一个最佳厚度, 使峰值电场达到最小. 当顶层膜厚增大时, 宜选择大高宽比的光栅结构, 以降低光栅脊处的峰值电场. 制作顶层材料为 SiO_2 的 MDG 时, 需同时精确控制光栅槽深和占宽比, 而顶层材料为 HfO_2 的 MDG, 只需对占宽比较有较严格的要求. 两者比较而言, 在该使用条件下, 顶层光栅材料宜选择高折射率的 HfO_2 .

在使用 MDG 时, 在获得高衍射效率的入射角范围内, 使用大角度入射, 也可以降低光栅脊处的峰值电场. 因此这也是提高 MDG 损伤阈值的一种有效方式.

- [1] Maurice P, Jeff S, Gerard M *et al* 1989 *Opt. Lett.* **14** 797
 [2] Boyd R D, Britten J A, Decker D E *et al* 1995 *Appl. Opt.* **34** 1697
 [3] Perry M D, Boyd R D, Britten J A *et al* 1995 *Opt. Lett.* **20** 940
 [4] Li L F, Jeffrey H 1995 *Opt. Lett.* **20** 1349
 [5] Shore B W, Perry M D, Britten J A *et al* 1997 *J. Opt. Soc. Am. A* **14** 1124
 [6] Britten J A, Molander W, Komashko A M *et al* 2003 *SPIE* **5273** 1

- [7] Kong W J, Shao J D, Zhang W *et al* 2005 *Acta Opt. Sin.* **25** 701 (in Chinese) [孔伟金、邵建达、张伟丽等 2005 光学学报 **25** 701]
 [8] Li L F 1993 *J. Opt. Soc. Am. A* **10** 2581
 [9] Tang X G, Fu K X, Wang Z H *et al* 2002 *Acta Opt. Sin.* **22** 774 (in Chinese) [唐雄贵、傅克祥、王植恒等 2002 光学学报 **22** 774]
 [10] Stuart B C, Feit M D, Rubenchik A M *et al* 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 2248

Near-field optical property of multi-layer dielectric gratings for pulse compressor^{*}

Liu Shi-Jie^{1,2)†} Shen Jian^{1,2)} Shen Zi-Cai^{1,2)} Kong Wei-Jin^{1,2)}
Wei Chao-Yang^{1,2)} Jin Yun-Xia¹⁾ Shao Jian-Da¹⁾ Fan Zheng-Xiu¹⁾

¹ *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

² *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

(Received 3 December 2005 ; revised manuscript received 25 January 2006)

Abstract

Multi-layer dielectric gratings for pulse compressor in high-energy laser system must provide high diffraction efficiency. In addition, its laser induced damage property is critical for the system. Nonuniform optical near-field distribution of multi-layer dielectric gratings is one of the important factors to limit its laser induced damage threshold. Electric field distributions in the grating region and multi-layer film region are analyzed by using Fourier modal method. Effects of grating structure on peak magnitude of electric field in grating ridge are analyzed when the top layer material is HfO_2 and SiO_2 , respectively. The results show that there exists an optimum top layer thickness, at which the peak magnitude of electric field within grating ridge is a minimum. And the peak electric field in the grating ridge can be reduced by designing top gratings with high aspect ratio structure when top layer thickness is increasing. Finally, the peak electric field in the grating ridge can also be reduced when the multi-layer dielectric grating is used at big incident angle.

Keywords : diffractive optics, multi-layer dielectric gratings, Fourier modal method, laser induced damage threshold

PACC : 4225, 4225B, 6180

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Granted No. 10376040).

[†] Corresponding author. E-mail : hsyliu@163.com