

基于泄漏模共振的多层介质膜 光栅宽角谱特性实现*

汪剑鹏^{1)2)†} 晋云霞¹⁾ 麻健勇¹⁾²⁾ 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, 中国科学院强激光材料科学与技术重点实验室, 上海 201800)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2009 年 3 月 13 日收到; 2009 年 8 月 10 日收到修改稿)

基于泄漏模共振产生多层介质膜光栅(MDG)的-1级高衍射效率的理论,重点分析了产生MDG的-1级宽衍射角谱的物理机理,提出薄匹配层能有效提高MDG的-1级衍射角谱带宽.采用傅里叶模式理论计算MDG的衍射效率,给出了中心波长为1040 nm, Littrow角37.9°附近 $\pm 11^\circ$ 范围内衍射效率大于90%的宽角谱MDG设计结果,且设计参数具有良好的工艺宽容度.

关键词: 介质膜光栅, 泄漏模共振, 匹配层, 宽角谱

PACC: 4225, 4225G

1. 引 言

最初应用在啁啾脉冲放大(chirped pulse amplification, CPA)系统中的脉冲压缩光栅是镀金光栅,其衍射效率理论上能达到95%^[1].但是由于金属材料固有的吸收特性,导致金属光栅的激光损伤阈值不可能达到很高,因此限制了金属光栅在高功率激光系统中的应用.1995年Perry等人开始了多层介质膜光栅(multilayer dielectric grating, MDG)结构的理论和实验研究^[2],该结构由多层介质膜和顶层浮雕光栅组成,如图1所示.MDG在近Littrow角使用条件下,-1级衍射效率可接近100%,且损伤阈值为金属光栅的几十倍.MDG的出现解决了高功率激光技术发展中的一个瓶颈难题.这也引起了大家的广泛关注,随后出现了大量关于大面积MDG的制作与激光损伤阈值^[3-5],MDG的电场近场分布^[5]、衍射带宽^[6-8]、光栅导模共振异常^[9,10]等相关研究成果的报道,但目前就MDG衍射角谱特性的研究还很少.

与金属光栅相比,MDG的衍射频谱和角谱的带宽较窄.这是由于受到多层介质膜反射带宽和导模共振异常^[9]的限制.具有高衍射效率特性的MDG

要在更多应用领域取代金属光栅,必须要拓宽其衍射谱宽.本文基于泄漏模共振产生MDG的-1级高衍射效率的理论^[11-13],探讨实现MDG-1级宽衍射角谱的机理,指出采用薄匹配层的设计能有效拓宽MDG-1级的衍射角.另外,本文采用光栅矢量衍射理论——傅立叶模式理论(FMM)^[14]计算了基于薄匹配层设计的中心波长1040 nm,1180线MDG的衍射效率,得到了Littrow角37.9°附近 $\pm 11^\circ$ 范围内衍射效率高于90%的MDG宽光谱设计结果,且该设计结果的工艺宽容度良好.宽角谱MDG设计的实现使得MDG在更多应用领域替代金属光栅成为可能.

2. 理论基础

介质膜光栅基本结构包括多层高反膜和顶层浮雕光栅(图1).入射光经光栅透射衍射进入介质膜层激发出泄漏模.由于泄漏模的存在,在一定条件下菲涅耳反射能量消失,也就是光栅的0级反射衍射能量为0.根据能量守恒,入射光能量只能全部从-1级衍射方向出射,因此泄漏模共振光栅能在-1级得到100%的衍射效率.

下面首先基于单层泄漏模层探讨其共振条件.

* 国家自然科学基金(批准号:10704079)资助的课题.

† E-mail: janpo@siom.ac.cn

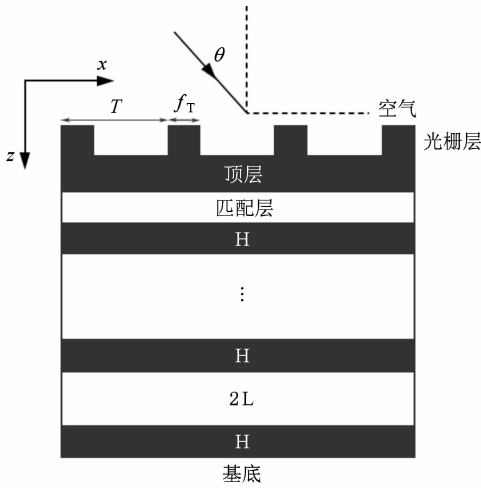


图1 多层介质膜光栅结构示意图(包括基底,高反膜,匹配层和光栅层,光栅脊沿 y 方向延伸.高反膜膜系 $(H2L)^n$, n 为重复杂数.光栅周期为 T ,光栅脊宽度为 fT , f 是占宽比.光波从覆盖空气中以 θ 入射,覆盖层折射率 $n_c = 1$)

在高反射膜上附加一层折射率为 n_f , 厚度为 t 的介质膜,该介质膜层上受到周期性调制.高反膜的反射效率为 $r = |r| \exp(i\phi_0)$, 其中 $|r| \approx 1$, ϕ_0 为其反射相位改变量,介质膜的覆盖层折射率为 n_c , 通常为空气 $n_c = 1$ (见图2).当真空波长 λ 的平面波以 θ_i 入射时,在折射率为 n_f 介质层中折射角为 θ_f , 当满足条件

$$k_0 t n_f \cos \theta_f = m\pi + \frac{\phi_0 + \phi_c}{2}, \quad (1)$$

入射波激发出 m 级泄漏模共振.其中真空波数 $k_0 = 2\pi/\lambda$, θ_f 由 $\sin \theta_f = (n_c/n_f) \sin \theta_i$ 给出. ϕ_c 是光束从介质膜内入射到介质膜和覆盖层的界面时的反射相位差.假设 $n_c < n_f$, 入射光为 TE 波时, $\phi_c = 0$;

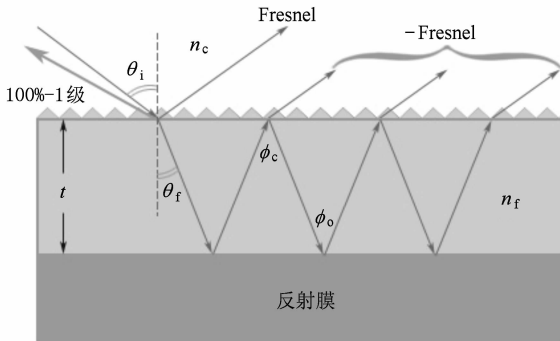


图2 高反膜上的单层周期调制介质膜的非涅耳(Fresnel)反射机理(直接反射,介质膜中的能量束缚,泄漏模传播及能量泄漏到覆盖层中.光栅槽平衡直接辐射和再辐射的能量比,以最终获得-1级100%的衍射效率^{[11])}

TM 波时, $\phi_c = \pi$. 在覆盖层界面处入射能量被束缚在介质膜中,以一定比例泄漏到覆盖层中,这取决于覆盖层界面处的反射率.光栅结构的存在,可以调节入射光在覆盖层与膜层界面处的反射和透射能量的比例.当泄漏模共振条件方程(1)满足,且界面处反射能量与泄漏模总能量平衡时,如果直接反射波的相位与泄漏模相位相反,则整体上表现出光栅的0级反射衍射能量为0,这也就是实现了泄漏共振光栅-1衍射能量达到100%.

由于泄漏模共振的存在,得到了光栅的高衍射效率.如果采用多层膜结构代替单层泄漏模层,可以使得泄漏模共振的色散方程在更宽的频谱或更广的入射角变化范围内得到满足,实现拓宽光栅衍射带宽的目的.根据文献[11]的推导,多层介质膜泄漏模共振须满足如下色散方程:

$$\arg \left[\frac{m_{12} \cdot e^{i\phi_0} + m_{11} e^{i2k_N t_N}}{m_{22} \cdot e^{i\phi_0} + m_{21}} \right] - \phi_c = 2m\pi,$$

其中

$$\phi_c = \begin{cases} 0, & n_c < n_f, \\ \pi, & n_c > n_f, \end{cases} \quad (2)$$

等式右边的系数 m 为泄漏模次数, ϕ_0 表示高反膜的反射相移. N 表示与覆盖层接触的膜层,一般为刻蚀光栅的膜层, k_N 是该层的波数, t_N 为其物理厚度. m_{ij} ($i = 1, 2, j = 1, 2$) 的表达式由下面推导给出:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = M_1 \cdot M_2 \cdots M_{N-1}. \quad (3)$$

传输矩阵 M_i 是由边界上电场强度和磁场强度的切向分量连续性得到的:

$$M_i = \begin{bmatrix} M_{i11} & M_{i12} \\ M_{i21} & M_{i22} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中

$$M_{i11} = \left(1 + \frac{k_i}{k_{i+1}} \right) \cdot \exp(-j \cdot (k_{i+1} - k_i) \cdot t_i),$$

$$M_{i12} = \left(1 - \frac{k_i}{k_{i+1}} \right) \cdot \exp(-j \cdot (k_i + k_{i+1}) \cdot t_i),$$

在不考虑介质吸收情况下,有 $M_{i21} = M_{i12}^*$ 和 $M_{i22} = M_{i11}^*$, ‘*’表示取共轭. $k_i = k_0 n_i \cos \theta_{fi}$ 为第 i 层折射率 n_i , 折射角 θ_{fi} 时的波数.

其中两层泄漏模传输层模型是常见的(图3).下面将双层 M_i 的表达式代入泄漏模共振方程(2)式,化简得到

$$k_2 \cdot \tan \left(k_2 t_2 - \frac{\phi_c}{2} \right) + k_1 \cdot \tan \left(k_1 t_1 - \frac{\phi_0}{2} \right) = 0, \quad (5)$$

直接与高反膜相接的膜层厚度为 t_1 , 折射率为 n_1 , 波数 $k_1 = k_0 \sqrt{n_1^2 - n_c^2 \sin^2 \theta_i}$. 用于刻蚀光栅的膜层的厚度 t_2 和折射率为 n_2 , 必须用等效厚度或者等效折射率^[11], $k_2 = k_0 \sqrt{n_2^2 - n_c^2 \sin^2 \theta_i}$. 此时, ϕ_0 需要根据多层膜的结构分类讨论, 但在我们常用的多层高反膜膜系中, ϕ_0 取决于泄漏模底层膜层的折射率和多层高反膜顶层膜层的折射率. 参照图 3 所示的两层泄漏模传输膜层模型, 后文给出的设计实例, 高反膜顶层膜层为 HfO_2 , 得出 $\phi_0 = \pi$. 不难看出, 当 $n_1 = n_2$ 时, 方程(5) 就退化成方程(1) 的形式了.

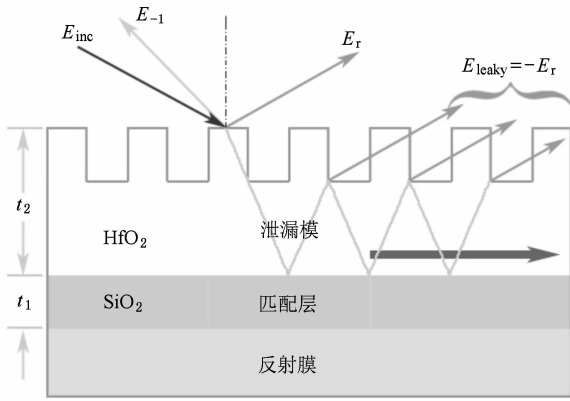


图3 多层高反膜上的双层介质层泄漏模共振光栅示意图^[11]

设计宽衍射角谱的 MDG, 就要求当入射角 θ_i 在一定范围内发生变化时, 都能较好的满足方程(5). 等式中包含 k_i 和 t_i ($i = 1, 2$) 两组变量, 其中 k_i 是 θ_i 的函数. 使用宽衍射角谱 MDG 时, θ_i 在 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 内变化, 所以 k_i 是一个变量. 因此需要当 θ_i 改变时, 减小 $k_i t_i$ 因子整体变化量, 即在方程(5) 满足条件下, t_i 尽量取小值. 对于刻蚀光栅的膜层厚度 t_2 的选择, 需要考虑其对光栅衍射各能级的能量分配, 以达到 -1 级最大衍射效率^[15], 所以 t_2 的改变量不是很大. 相对来说, 与高反膜相连的 SiO_2 膜层厚度 t_1 的厚度选择自由度就大一些, 我们称这一层为匹配层 (match layer), 它确保 θ_i 在较宽角谱范围内泄漏模共振条件得到匹配. 通过以上分析我们得出, 在满足泄漏模共振方程条件下, 当匹配层选择薄层时, 泄漏模方程能在 θ_i 的一定范围变化是仍然成立, 即达到了拓宽 MDG 衍射角谱的目的.

3. 宽角谱 MDG 设计实例

本文在计算 MDG 衍射效率时采用了傅里叶模

式理论. 傅里叶模式理论求解首先对任意面型的光栅进行等厚或者等宽分层, 然后在每一分层内对电磁场做傅里叶级数展开, 求解麦克斯韦方程组, 将其转化为本征模式场的求解问题, 并在每一分层内匹配电磁场的边界条件, 最后采用递推算法^[16] 计算出每一分层本征模式场的振幅系数和传播常数, 进而确定光栅衍射效率或者近场分布情况.

MDG 由多层介质高反膜和位于其上的光栅浮雕结构构成 (图 1), 设计目标为实现中心波长 1040 nm 入射 MDG 时, 在宽角谱范围内获得高衍射效率 (中心波长选取参考某飞秒激光器中 CPA 系统的实际需求). 高反膜的基础膜系为 $(\text{H}2\text{L})^9\text{H}$ (9 为重复次数), H 为高折射率材料 HfO_2 , 物理厚度为 94.4 nm, L 为低折射率材料 SiO_2 , 物理厚度为 126.7 nm. 光栅结构为 HfO_2 , 匹配层为 SiO_2 . 表 1 给出了 MDG 的基本参数, n_H, n_L, n_c, n_s 分别是高低折射率膜层和覆盖层、基板材料的折射率.

表 1 MDG 基本参数

波长/nm	入射角/(°)	光栅周期/nm	n_H	n_L	n_c	n_s
1040	37.9	847	1.96	1.46	1	1.52

选定占宽比 (图 1 中 f) 为 0.25, 计算中心波长在 Littrow 角入射时, MDG - 1 级衍射效率随光栅层厚度和匹配层厚度变化的关系 (图 4). 在本设计实例中顶层全部刻透, 即顶层剩余厚度 (见图 1) 为 0. 其中光栅层全部刻透. 从计算结果中可以看出, 光栅层厚度为 420 nm, 匹配层厚度为 320 nm 时, MDG - 1 级衍射效率达到最大 99.84%. 但在选取匹配层 0—100 nm, 光栅层厚度选取 250—450 nm 时, MDG

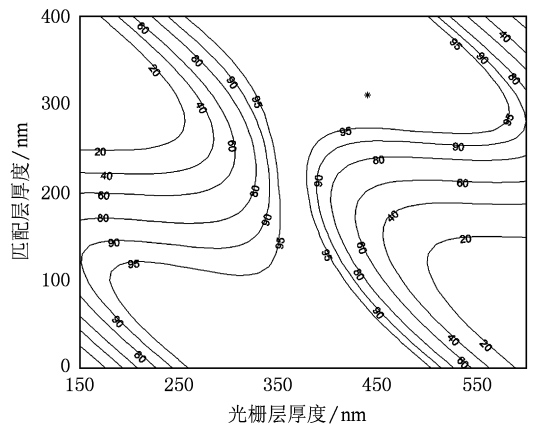


图 4 光栅层厚度和匹配层厚度对 MDG - 1 级衍射效率的影响 (光栅的占宽比为 0.25, 在 * 位置为 MDG - 1 衍射效率最大值 99.84%, 对应光栅层厚度为 420 nm, 匹配层厚度为 320 nm)

-1 级衍射效率超过 95%。根据第 2 节中的分析,匹配层选择取薄层有利于拓宽 MDG 衍射角谱,我们选择匹配层层厚度为 50 nm,光栅层厚度为 335 nm。

图 5 中给出了两组参数下 MDG -1 级的衍射角谱。虚线对应的光栅参数选取确保了在 Littrow 角方向入射时 MDG -1 级的衍射效率达到最大值 (99.84%),对应的光栅层厚度 420 nm 和匹配层厚度 320 nm。实线对应匹配层取薄层时的衍射角谱,其中光栅层与匹配层的厚度分别为 335 nm,50 nm。后者得到了在 Littrow 角 37.9° 附近 $\pm 11^\circ$ 范围内 MDG 的 -1 级衍射效率超过 90%。这一结果证实了取薄的匹配层可以改进 MDG 的角谱特性。这样的设计结果,中心波长的衍射效率会下降 2%—3%,但实现了拓宽 MDG 衍射角谱的目的。从图 6 衍射角度随匹配层厚度的变化结果可以进一步验证,当匹配层增厚时,MDG -1 级衍射效率随角度变化加剧,当匹配层取薄层 50 nm 时,MDG 达到最大的衍射角谱带宽。

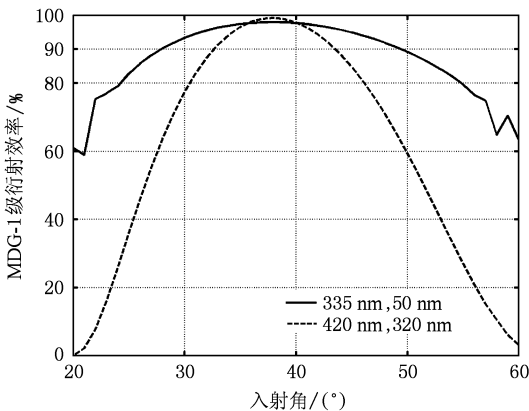


图 5 两组参数下的 MDG -1 级衍射角谱特性

3.1. 工艺容差分析

图 7 (a) 是占宽比变化对 MDG -1 级衍射角谱的影响,计算时取最宽角谱时光栅参数,即光栅层厚为 335 nm,匹配层厚度为 50 nm 时。可以看出当占宽比减小时,有利于 MDG 的角谱改进,综合工艺实现的难度,本设计实例选择了占宽比为 0.25。

图 7 (b), (c) 也是基于占宽比为 0.25, 固定匹配层和光栅层中的一个参量,分别计算光栅层、匹配层厚度对 MDG -1 级衍射角谱的影响。从计算结果中可以看出,光栅层和匹配层分别在取 335 nm 和 50 nm 时,得到了最大范围的高衍射效率角谱。光栅层厚度取 335 ± 40 nm, 匹配层厚度取 50 ± 20 nm

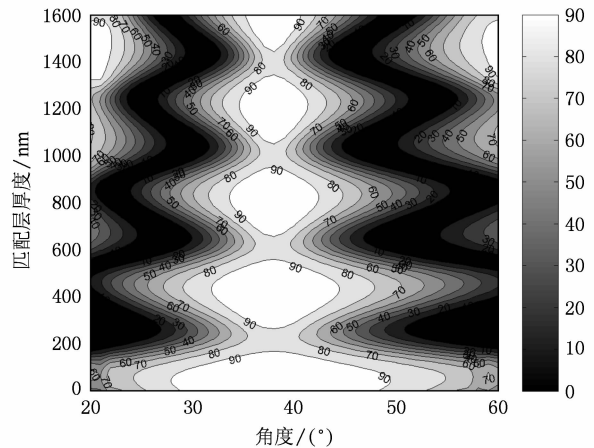


图 6 匹配层厚度变化对 MDG -1 级衍射角谱的影响(占宽比取 0.25,光栅层厚度为 335 nm)

时,MDG -1 级的衍射效率超过 90% 的角谱带宽能达到 18° , 这为该设计的制作提供了便利。

图 7 (d) 针对多层膜镀制工艺中可能引入的各层膜厚的随机误差,计算了其 MDG 角谱的影响。横坐标为各层随机误差量相对该层设计厚度的百分比,纵坐标为对应随机误差程度模拟 100 次后的 MDG -1 级衍射效率超过 90% 的角谱宽度变化范围。可以看出在随机误差为 5%—6% 时,MDG 角谱特性仍能到达接近 20° 。目前的镀膜工艺对膜层厚度的误差控制要优于 5%,这也确保了该设计制作出的 MDG 能实现近 20° 的宽角谱性能。

综上工艺宽容度的分析,基于薄匹配层设计思想的宽角谱 MDG 设计结果,各参数在工艺上可行,且具有良好的工艺宽容度。下一步工作,我们将根据该设计结果进行宽角谱 MDG 的实验制备及其性能的研究。

4. 结 论

具有宽角谱 MDG 可以在更大应用范围内代替金属光栅。本文基于双层泄漏模理论,分析得出薄匹配层有利于 MDG 宽角谱性能的实现。采用傅里叶模式理论计算分析了基于膜系 $(H2L)^9 H$ 的 MDG 的角谱特性,设计了光栅层 (HfO_2) 厚度 335 nm; 匹配层 (SiO_2) 厚度 50 nm, 占宽比为 0.25 的具有宽角谱特性的 MDG。并对占宽比,光栅层厚度,匹配层厚度作了工艺宽容度做了分析,得出均具有良好的宽容度的结论,确保了设计结果在工艺上较易实现。

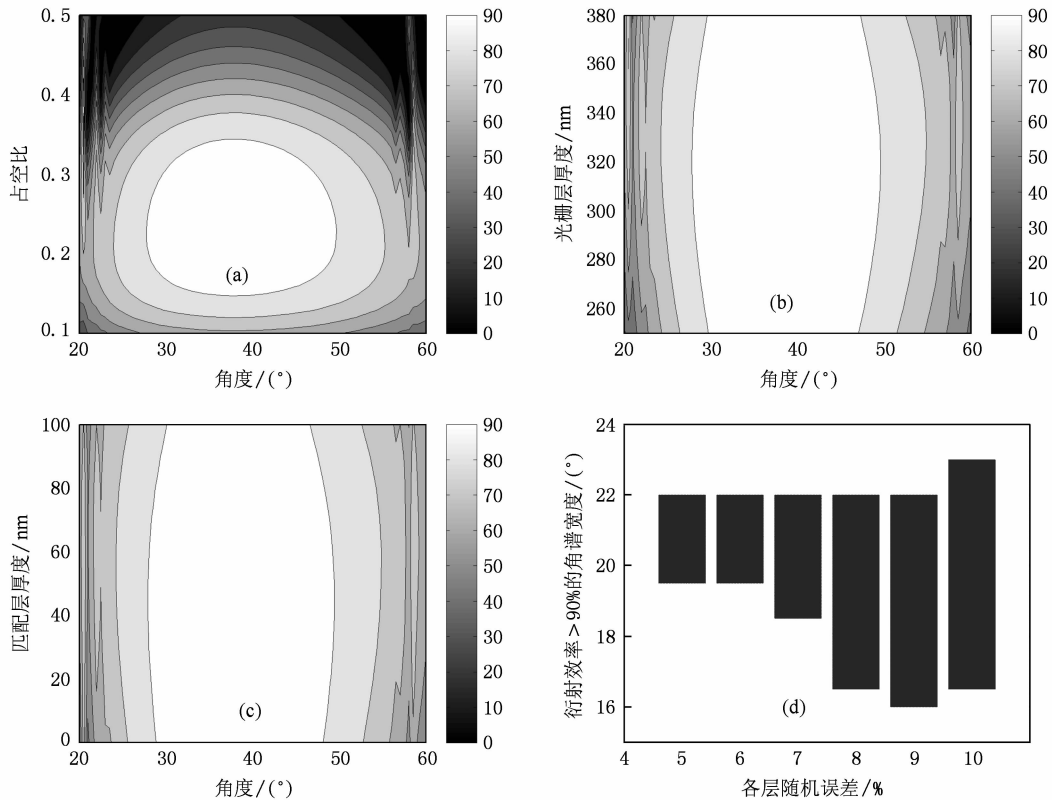


图7 (a)一(c)分别为占宽比、光栅层厚度、匹配层厚度对 MDG -1 级衍射角谱的影响,基本参数为,占宽比 0.25,光栅层厚度 335 nm,匹配层厚度 50 nm,图中白色区域为 -1 级衍射效率超过 90%;(d) 多层膜各层随机程度对 MDG -1 级衍射角谱宽度的影响

- [1] Svakhin A A, Sychugov V A 1991 *Sov. Phys. Tech. Phys.* **36** 1038
- [2] Perry M D, Boyd R D, Britten J A 1995 *Opt. Lett.* **20** 940
- [3] Shore B W, Perry M D, Britten J A 1997 *J. Opt. Soc. Am. A* **14** 1124
- [4] Michael C Y, Zhou Y and Connie J 2007 *Nat. Photonics* **1** 119
- [5] Liu S J, Shen J, Shen Z C, Kong W J, Wei C Y, Jin Y X, Shao J D, Fan Z X 2006 *Acta. Phys. Sin.* **55** 4588 (in Chinese) [刘世杰、沈健、沈自才、孔伟金、魏朝阳、晋云霞、邵建达、范正修 2006 物理学报 **55** 4588]
- [6] Carlos F R Mateus, Michael C Y 2004 *IEEE. Photonic. Tech. L* **16** 518
- [7] Wu M L, Lee Y C, Hsu C L, Liu Y C, Chang J Y 2007 *Jpn. J. Appl. Phys.* **46** 5431
- [8] Magnusson R, Mehrdad S S 2008 *Opt. Express* **16** 3456
- [9] Wang S S, Magnusson R 1995 *Appl. Opt.* **34** 2414
- [10] Ma J Y, Liu S J, Wei C Y, Xu C, Jin Y X, Zhao Y N, Shao J D, Fan Z X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 827 (in Chinese) [麻健勇、刘世杰、魏朝阳、许程、晋云霞、赵元安、邵建达、范正修 2008 物理学报 **57** 827]
- [11] Flury M, Tishchenko A V, Parriaux O 2007 *J. Lightwave. Technol.* **25** 1870
- [12] Tishchenko A V, Sychugov V A 2000 *Opt. Quant. Electron* **32** 1027
- [13] Destouches N, Tishchenko A V, Pommier J C, Reynaud S, Parriaux O 2005 *Opt. Express* **13** 3230
- [14] Li L F 1993 *J. Opt. Soc. Am. A* **10** 2581
- [15] Wei H B, Li L F 2003 *Appl. Opt.* **42** 6255
- [16] Tang X G, Fu K X, Wang Z H 2002 *Acta Opt. Sin.* **22** 774 (in Chinese) [唐雄贵、傅克祥、王植恒 2002 光学学报 **22** 774]

Realization of the broad angular spectrum of multilayer dielectric gratings based on the leaky mode resonance^{*}

Wang Jian-Peng^{1)2)†} Jin Yun-Xia¹⁾ Ma Jian-Yong¹⁾²⁾ Shao Jian-Da¹⁾ Fan Zheng-Xiu¹⁾

1) (*Key Laboratory of Material Science and Technology for High Power Lasers, 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 13 March 2009; revised manuscript received 10 August 2009)

Abstract

Based on the leaky mode resonance theory, the physical mechanism of producing the broad angular spectrum of Multilayer Dielectric Grating (MDG) in the -1 st order reflection diffraction direction is presented in this paper. It is found that the thin match layer would improve the bandwidth of angular spectrum effectively. A good result of ± 11 degree near Littrow angle 37.9° over 90% diffraction efficiency centered at 1040nm is obtained, and the parameters of the result have excellent fabrication tolerance. The Fourier modal method is employed for calculating the diffraction efficiency.

Keywords: multilayer dielectric grating, leaky mode resonance, match layer, wide angular spectrum

PACC: 4225, 4225G

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 1074079).

[†] E-mail: janpo@siom.ac.cn