

倍频分离薄膜中的半波孔抑制研究

鲍刚华*, 谢雨江, 王奔, 梁玉

上海米峰激光科技有限公司, 上海 201306

摘要 经典短波通膜堆(0.5LH0.5L)ⁿ会由于薄膜的折射率不均匀性而产生半波孔现象。在进行膜系结构设计时,通常将薄膜假定为均匀折射率材料,当薄膜的光学厚度为1/2中心波长时,薄膜可被视为虚设层。而在实际制备时,薄膜的折射率通常存在一定的不均匀性,薄膜的光学厚度与设计值不符,从而产生半波孔。对薄膜的基本周期结构进行了优化,优化后的膜系结构在半波处的光学导纳不再受折射率不均匀性的影响。在此基础上,设计并制备了倍频分离薄膜,有效消除了半波孔现象,理论和实验光谱曲线具有很好的一致性。

关键词 薄膜; 短波通滤光片; 半波孔; 导纳; 折射率不均匀

中图分类号 O484

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1931002

Half-Wave Hole Suppression of Harmonic Beam Splitting Films

Bao Ganghua*, Xie Yujiang, Wang Ben, Liang Yu

Shanghai Multiple Films & Laser Tech. Co. Ltd., Shanghai 201306, China

Abstract The classical film stack (0.5LH0.5L)ⁿ induces half-wave holes due to its inhomogeneity of refractive index. In the design of film structures, the film possessing a homogeneous refractive index is usually assumed. When its optical thickness is half of the central wavelength, the film can be regarded as an absent layer. Unfortunately, in the practical fabrication, there exists some inhomogeneity in the refractive index of the film, which causes the optical thickness of the film inconsistent with theoretical design, and thus half-wave holes occur. Here the basic periodic structure of the film is optimized. The optical admittance of the optimized film structure at half wave is no longer affected by the refractive index inhomogeneity. On this basis, a harmonic beam splitting film is designed and fabricated that effectively eliminates the half-wave hole phenomena. The theoretical and experimental spectral curves are in a good agreement.

Key words thin films; short-wave pass filter; half-wave hole; admittance; refractive index inhomogeneity

OCIS codes 310.6805; 310.1860; 310.6860

1 引言

倍频分离薄膜是强激光系统中不可或缺的一种光学介质薄膜^[1],要求薄膜在基频处具有高反射率,在二倍频处具有高透射率^[2]。因此,通常采用经典短波通膜堆(0.5LH0.5L)ⁿ作为初始结构,其中 n

为膜堆周期数。短波通滤光片在实际制备中经常出现半波孔现象^[3],即透射率在二倍频处远低于理论预期值。半波孔现象会严重影响倍频分离薄膜的光学特性,降低整个光学系统的工作效率。

目前,国内对半波孔的研究主要集中于膜厚积累误差和色散等因素,通常采用优化或调整厚度的

收稿日期: 2020-09-16; 修回日期: 2020-10-16; 录用日期: 2020-10-29

基金项目: 多波段超高性能光学薄膜研发及产业化(ZN2018010210)

通信作者: *bgh@mfoptics.com

方法抑制半波孔对二倍频处透射率的影响^[4-5],而关于折射率不均匀性导致光谱性能下降的研究较少,更鲜有文章讨论如何消除折射率不均匀性所导致的半波孔的影响^[6-7]。Tikhonravov 等^[8]改善了传统软件的算法,将薄膜折射率的不均匀性作为薄膜优化计算的参数之一,有效解决了半波孔问题。但编程计算使薄膜的设计和计算变得十分繁琐,该方法没有普适性。

在强激光系统中,高阈值倍频分离膜的制备方法之一是电子束蒸镀 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 薄膜^[9-10]。该方法制备的 HfO_2 薄膜的折射率是薄膜厚度的函数。折射率通常随着物理厚度的增加而降低^[11],从而出现半波孔^[12]。常规薄膜软件的薄膜材料参数只包含折射率和消光系数,没有表征折射率不均匀性的参数。在当前缺乏有效计算手段的情况下,通常采用回避半波孔的方法来设计和制备倍频分离薄膜。回避半波孔意味着短波通膜堆的中心波长偏移目标波长,这对薄膜制备精度要求很高,导致良品率降低。为了提高产品的良品率,应进一步研究抑制半波孔的方法。

本文利用导纳理论分析了折射率不均匀性对常规膜系半波处光谱的影响,在此基础上优化设计了一种半波处光谱不受膜层折射率不均匀性影响的基本周期结构。最后,利用常规软件设计膜系,并制备出消除了半波孔的倍频分离薄膜。

2 折射率不均匀性影响半波孔的原因

经典短波通膜堆的基本周期结构为 $0.5\text{LH}0.5\text{L}$,如果薄膜为均匀折射率介质,其二倍频处光学导纳为一封闭的曲线,薄膜相当于虚设层,薄膜在二倍频处具有高透射率。

下面以 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 膜堆为例,研究 HfO_2 薄膜折射率不均匀性对倍频分离膜光学特性的影响。为了方便讨论,下文计算中假定薄膜浸没在透明玻璃中,玻璃折射率为 1.52;L 为折射率均匀膜,折射率为 1.45;H 是平均折射率为 1.95 的非均匀性薄膜,折射率随厚度的增加呈线性降低,折射率不均匀性为 -5%。

此时 H 在二倍频处的导纳不再是一个封闭的曲线,如图 1 所示,其中 A 为导纳, $\text{Im}(A)$ 为导纳虚部, $\text{Re}(A)$ 为导纳实部。相对于起点, $0.5\text{LH}0.5\text{L}$ 不再是虚设层,即破坏了原有的导纳匹配,导致半波处的透射率下降,从而产生半波孔。

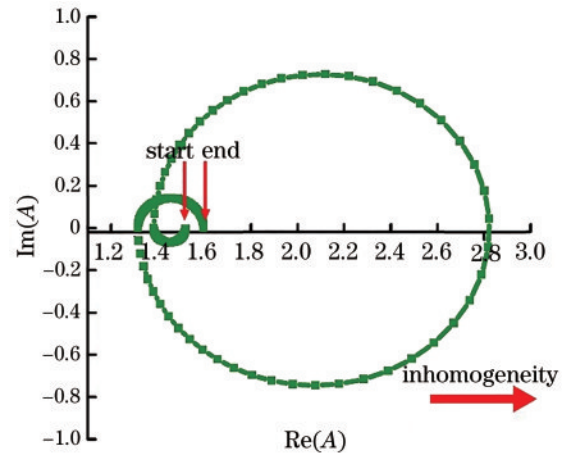


图 1 常规结构 $0.5\text{LH}0.5\text{L}$ 在半波处的导纳图

Fig. 1 Admittance locus of $0.5\text{LH}0.5\text{L}$ at half wave with conventional structure

图 2 给出了膜堆 $(0.5\text{LH}0.5\text{L})^n$ 在全波段的光谱,其中 g 为波数, λ_0 为参考波长, λ 为波长。实线为理想均匀性薄膜的光谱,点线是 H 具有不均匀折射率的情形。对比分析可以发现,折射率的不均匀性主要影响半波处附近的光谱特性,对高反带光谱没有任何影响。

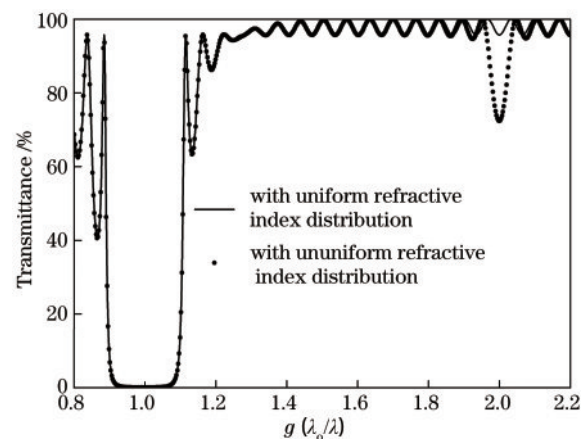


图 2 $(0.5\text{LH}0.5\text{L})^n$ 的光谱设计曲线

Fig. 2 Designed spectra of $(0.5\text{LH}0.5\text{L})^n$

常规薄膜设计软件在优化计算时,并不代入折射率不均匀性数据,因此无法通过优化计算来抑制半波孔。

3 抑制半波孔的设计方法

在上述讨论中我们发现,单一周期结构的导纳轨迹由于折射率不均匀而不封闭,这是传统膜堆产生半波孔的原因。由图 1 可以发现,导纳轨迹的终点和起点都在实轴上,且终点在起点右侧。如果在

同样的折射率不均匀性的情况下, 导纳轨迹的终点落在起点左侧, 那么两个膜堆的结合就有可能最大程度抑制半波孔。

基于此观点, 根据以往实际镀膜情况可知, 高折射率材料的折射率不均匀性一般在 -5% 左右, 在此条件下计算的膜堆 $(HL)^n$ 在二倍频处的导纳轨迹如图 3 所示。可以发现, 导纳轨迹的终点和起点都在实轴, 且终点落在起点左侧。计算显示, 此时终点到起点的距离与图 2 中的一致。

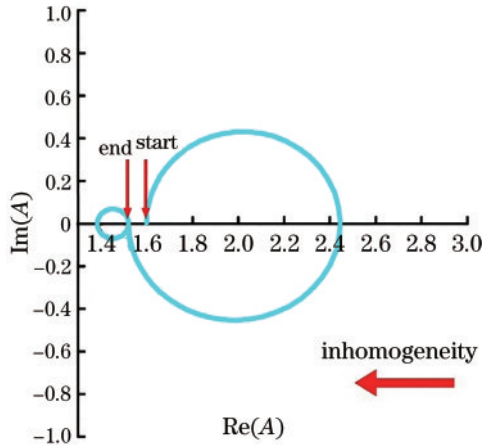


图 3 常规结构 HL 在半波处的导纳图
Fig. 3 Admittance locus of HL at half wave with conventional structure

这意味着, 如果两个膜堆结合, 新膜堆的导纳轨迹将会是封闭的。图 4 给出了膜堆 $0.5LH0.5LHL$ 的导纳轨迹。可以发现, 导纳的起点和终点完美地重合在一起。这意味着新膜堆不会因为折射率不均匀性而产生半波孔。

理论计算也表明, 新膜堆 $0.5LH0.5LHL$ 的等效导纳与 H 的折射率不均匀性无关。

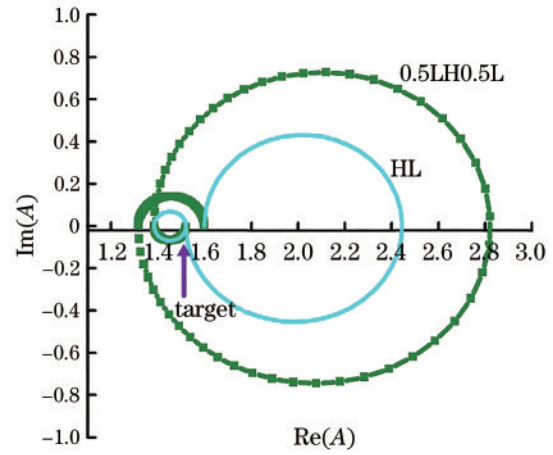


图 4 $0.5LH0.5LHL$ 膜堆的光学导纳轨迹
Fig. 4 Optical admittance locus of film stack $0.5LH0.5LHL$

设 H、L 和基板在半波处的折射率分别为 n_H , n_L 和 n_s , 则膜堆 $H0.5LH$ 的等效导纳为

$$\frac{n_H n_L^2}{n_s n_H} = \frac{n_L}{n_s} \quad (1)$$

(1) 式中不含与 H 相关的因子。考虑到 L 为均匀薄膜, 这意味着无论 H 是否有不均匀性, 导纳的轨迹都将是一个封闭的曲线。因此, 膜堆 $0.5LH0.5LHL$ 在二倍频处的导纳轨迹也将是一个封闭的曲线。

由于 $(0.5LH0.5L)^n$ 和 $(HL)^n$ 在基频处都具有高反射率, 因此膜堆 $(0.5LH0.5LHL)^n$ 在基频处也具有高反射率, 同时由于二倍频处的导纳轨迹是封闭的, 因此薄膜在二倍频处具有高透射率。

图 5 给出了膜堆 $(0.5LH0.5LHL)^{10}$ 在整个波段的光谱, n 取值为 10。实线为理想均匀薄膜的光谱, 虚线为 H 折射率不均匀性为 -5% 的情形。可以发现, 两个曲线之间的差异微小, 可以忽略不计。这意味着此膜堆的光谱特性不再依赖于膜层折射率的不均匀性。

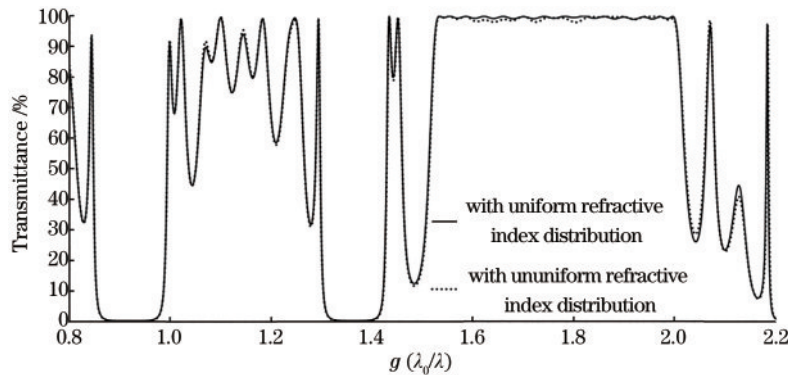


图 5 $(0.5LH0.5LHL)^{10}$ 的光谱设计曲线
Fig. 5 Designed spectra of $(0.5LH0.5LHL)^{10}$

4 实验结果与讨论

在上述讨论中,假定薄膜的光学常数不是波长的函数,为了进一步说明这个方法的可行性,用 TFCalc 软件按照上述方法设计并优化了膜系,初始

膜堆为 $(0.5LH0.5LHL)^9$,如图 6 中的实线所示;基板为 BK7,图 6 中的点线给出了裸基板的单面透射率曲线;在 Oportun 机器上,采用电子束法蒸镀 HfO_2/SiO_2 组合,制备了膜系,图 6 中的菱框线曲线是最终得到的测试曲线。

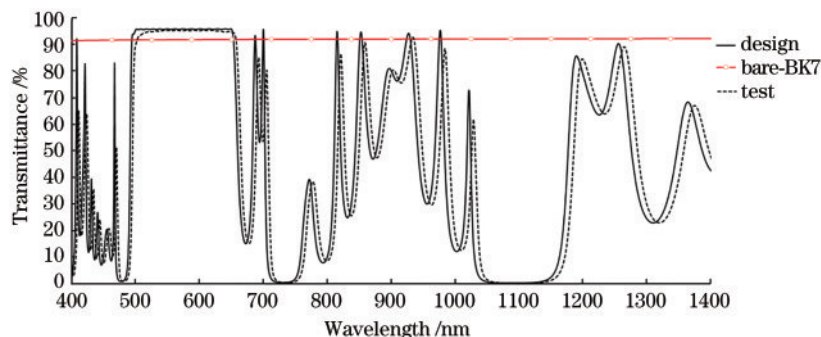


图 6 改进后的倍频分离薄膜的设计及测试曲线

Fig. 6 Design and test curves of improved harmonic beam splitting film

考察测试曲线,可以发现,薄膜在基频处具有很好的反射率;依据 BK7 裸基板的透射率曲线,可以推算出半波附近的透射率都在 98.8% 以上,透射带宽约为 110 nm。在包含基频和半波的整个测量波段中,测试曲线形状与理论曲线形状吻合较好。

5 结 论

利用光学导纳理论分析了薄膜的折射率不均匀性对半波孔的影响。对于常规短波通膜堆结构,当薄膜为均匀折射率介质时,周期结构在半波处的导纳是封闭的轨迹;而薄膜折射率的不均匀性会导致半波处的导纳轨迹不再封闭,破坏了膜堆与周围介质的匹配,从而出现半波孔。基于此观点,给出了一种全新的基本周期结构: $0.5LH0.5LHL$,此结构在二倍频处的光学纳等效于一均匀薄膜,其轨迹是封闭的曲线。无论折射率不均匀性大小如何,以此结构为基础,可以在常规软件上设计出能够抑制半波孔的倍频分离薄膜。依据此膜堆设计并制备了强激光用倍频分离薄膜,实测光谱与理论光谱吻合很好,证明了这种方法的可行性。

参 考 文 献

- [1] Cheng X B, Shen Z X, Jiao H F, et al. Laser damage resistance of dichroic mirrors at 532 nm and 1064 nm [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7842: 78420C.
- [2] Trache A, Trifan M E, Lupei V, et al. Dichroic mirror design by complete admittance matching[J]. Optical Engineering, 1996, 35(5): 1284-1287.
- [3] Han J, Zhang J L, Cheng X B, et al. Analysis of the half-wave hole for symmetrical harmonic beam splitter based on equivalent layer theoretics[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0131001. 韩金, 张锦龙, 程鑫彬, 等. 基于等效层法分析对称性倍频分束镜的半波孔[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0131001.
- [4] Xue J J, Zhu J H, Jiang M Q, et al. Study on the half-wave hole phenomenon of short-wave pass filter caused by film infiltration[J]. The Journal of Light Scattering, 2008, 20(4): 319-323. 薛建军, 朱建华, 蒋茂清, 等. 膜层渗透产生短波通截止滤光片半波孔现象的分析[J]. 光散射学报, 2008, 20(4): 319-323.
- [5] Ma X F, Wang Y J, Shao J D, et al. Elimination of the half-wave hole for short-wave pass filter[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5774: 377-380.
- [6] Jacobsson J R. Review of the optical properties of inhomogeneous thin films[J]. Proceedings of SPIE, 1993, 2046: 2-8.
- [7] Tikhonravov A V, Trubetskov M K, Sullivan B T, et al. Influence of small inhomogeneities on the spectral characteristics of single thin films[J]. Applied Optics, 1997, 36(28): 7188-7198.
- [8] Tikhonravov A V, Trubetskov M K. Design of optical coatings taking into account thin film inhomogeneity[C]//Optical Interference Coatings, June 16-21, 2013, Whistler, Canada. Washington, D.C.: OSA, 2013: TD.6.
- [9] Cheng X B, Zhang J L, Ding T, et al. The effect of

an electric field on the thermomechanical damage of nodular defects in dielectric multilayer coatings irradiated by nanosecond laser pulses[J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(6): e80.

- [10] Chow R, Falabella S, Loomis G E, et al. Reactive evaporation of low-defect density hafnia[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(28): 5567-5574.
- [11] Borgogno J P, Lazarides B, Pelletier E. Automatic determination of the optical constants of inhomogeneous thin films[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(22): 4020-4029.
- [12] Niederwald H, Greve P, Eichinger R. Dielectric coatings for diode pumped solid state laser devices[J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1125: 76-84.