

基于等效层法分析对称性倍频分束镜的半波孔

韩 金 张锦龙 程鑫彬* 王占山

(同济大学精密光学工程技术研究所, 上海 200092)

摘要 半波孔问题严重影响了倍频分束镜在高功率激光系统中的应用。为研究半波孔的产生机理,分别模拟了由高、低折射率膜层厚度失配和膜料色散失配引起的 $1/4$ 波长对称规整膜系的半波孔。基于等效层理论,在 Matlab 平台上计算膜系的等效折射率 E ,绘出其对应的反射率极值包络曲线。通过研究对称膜系的等效折射率、反射率光谱和反射率包络之间的关系,从原理上分析了半波孔的大小、位置和变化趋势等特点。结果表明,膜层的厚度失配使对称膜系的等效折射率在光谱半波处产生截止带。膜层数越多,膜层厚度和膜料色散的失配越严重,则倍频分束镜的半波孔越深。

关键词 薄膜光学;半波孔;等效层;厚度失配;色散

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0131001

Analysis of the Half-Wave Hole for Symmetrical Harmonic Beam Splitter Based on Equivalent Layer Theoretics

Han Jin Zhang Jinlong Cheng Xinbin Wang Zhanshan

(Institute of Precision Optical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract Half-wave hole has seriously influenced the application of harmonic beam splitters in high-power laser systems. Half-wave holes of the quarter wavelength symmetrical coatings usually caused by overall thickness mismatch and materials dispersion mismatch of the high and low refractive index films are simulated in order to conduct further research on their formation mechanism. Based on the theory of equivalent layers, the equivalent refractive index of a symmetrical design is calculated on Matlab platform. Consequently, the corresponding reflectance envelope is depicted. Through the study on the relation among the equivalent refractive index, reflectance spectrum and reflectance envelope of different designs, the characteristics of half-wave holes such as location, size and change tendency are analyzed in principle. Computational results indicate that thickness mismatch gives rise to equivalent refractive stop-band in the half wave of spectrum. The more the number of layers is, the more serious the thickness mismatch and dispersion mismatch are, the deeper the half-wave hole will be for a harmonic beam splitter.

Key words thin film optics; half-wave hole; equivalent layers; thickness mismatch; dispersion

OCIS codes 240.0310; 260.2030

1 引 言

近年来,随着高功率激光器的快速发展及其应用范围的不断扩大,对高光学性能、高激光损伤阈值光学薄膜的要求也在不断提升^[1~4]。在倍频激光系统中,通常要求基频光与倍频光分离,因而基频光高反射、倍频光高透射的分束镜是高功率激光系统中

的重要组成元件之一^[5]。然而,在制备这种分光元件的过程中,在光谱基频波长一半处的通带区域内常常会出现一个反射峰,称之为半波孔。半波孔问题对倍频分束镜的实际应用造成了严重影响,因而分析其产生机理,寻找有效的抑制方法是亟待解决的问题。

收稿日期: 2011-05-17; 收到修改稿日期: 2011-06-17

基金项目: 教育部博士点基金(20100072120037)和上海市晨光计划(10CG19)资助课题。

作者简介: 韩 金(1986—),男,硕士研究生,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: hanjinxxx@126.com

导师简介: 王占山(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事极紫外、软 X 射线和 X 射线光学与光学薄膜等方面的研究。

E-mail: wangzs@mail.tongji.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: chengxb@tongji.edu.cn

倍频分束镜的半波孔问题早已受到了广泛关注^[6~10],目前普遍认为由膜料的色散、膜层折射率的非均匀性以及膜层厚度的相对失配等原因造成的^[11,12],然而从原理上对半波孔进行的研究却鲜有报道。本文基于对称周期等效层理论^[13],分析了在高低折射率膜层厚度整体失配和不同的折射率色散组合下,常见倍频分束镜规整膜系在半波通带的反射率变化规律。

2 理 论

由于对称膜系和单层膜特征矩阵具有相同性质,可以在通带中将周期对称膜系等效为一个光学厚度和折射率 E 都略微变化的单层膜。对于一个三层的对称膜层结构 pqp ,其特征矩阵和等效折射率 E 可分别表示为

$$M = M_p M_q M_p = \begin{bmatrix} \cos \Gamma & \frac{i}{E} \sin \Gamma \\ iE \sin \Gamma & \cos \Gamma \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$E = \sqrt{M_{21}/M_{12}}, \quad (2)$$

式中 Γ 为等效相位厚度。

若(1)式为基本周期特征矩阵,那么,周期性对称膜系的特征矩阵为各基本周期特征矩阵的乘积:

$$M^S = \begin{bmatrix} \cos S\Gamma & \frac{i}{E} \sin S\Gamma \\ iE \sin S\Gamma & \cos S\Gamma \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由(3)式可以看出,此类对称膜系在透射带中的等效折射率与其基本周期的等效折射率 E 完全相同,而等效相位厚度为基本周期等效相位厚度 Γ 的 S 倍。因此,当周期对称膜系的等效相位厚度为 $\pi/2$ 的偶数倍时,膜系反射率为仅由入射媒质和光洁基板所确定的反射率 R_1 ;等效相位厚度为 $\pi/2$ 的奇数倍时,膜系反射率等于由入射媒质、光洁基板和膜系等效折射率 E 共同确定的反射率 R_2 ,即

$$S\Gamma = m \frac{\pi}{2}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} R_1 = (\eta_0 - \eta_k)^2 / (\eta_0 + \eta_k)^2, & m = 2, 4, 6 \dots \\ R_2 = (\eta_0 - E^2 / \eta_k)^2 / (\eta_0 + E^2 / \eta_k)^2, & m = 1, 3, 5 \dots \end{cases} \quad (5)$$

式中 η_0 为入射媒质导纳, η_k 为基板导纳。这样,由等效折射率 E 可以推知对称膜系通带反射率的包络曲线。通过研究厚度失配和色散失配对等效折射率的影响,便可以分析半波光谱所受到的影响。

3 计算与分析

倍频分束镜的半波孔是多种原因共同作用造成

的。基于等效层理论,应用特征矩阵法在 Matlab 软件环境下进行编程计算,分析了膜层厚度失配和材料色散对半波孔的影响。

3.1 厚度失配对半波孔的影响

无论是晶体监控还是光学监控,监控片与基板相对位置和运动模式的差异、真空室的环境改变以及镀膜工艺的变化都会导致监控到的厚度与薄膜的实际厚度不同。监控到的厚度与实际厚度的差异用工具因子 σ 来修正,工具因子为薄膜实际厚度与设计厚度的比值。对于高精度镀膜监控系统,通常可以认为设计厚度与监控片上读取的厚度相同,而不同材料、不同工艺条件下的 σ 不同,在 σ 值不够精确和稳定的情况下,很容易出现膜层厚度的整体失配。另外,对于光学监控系统,高、低折射率膜层基于导纳图的误差补偿效应也可能会带来一个周期性的厚度误差。

为了分析倍频分束镜的半波孔效应,首先考虑的膜系结构为 $G/(L/2 \ H \ L/2)^{14}/\text{Air}$,其中 G 代表玻璃基板, Air 为入射媒质空气,参考波长(基频波长)为 1064 nm, H, L 分别表示光学厚度为 $1/4$ 参考波长的高、低折射率膜层。本文高折射率材料为 HfO_2 ,其在半波附近的折射率约为 1.92,低折射率材料为 SiO_2 ,在半波附近的折射率约为 1.46, BK7 基板的折射率为 1.52。两种膜料的折射率是首先利用日本光驰 OTFC-1800 电子束蒸发镀膜机在 110°C , 1.2×10^{-2} Pa 和 2.4×10^{-3} Pa 的工艺条件下镀制 $\text{HfO}_2, \text{SiO}_2$ 单层膜,然后对它们的透射率光谱进行拟合而得到的。在所讨论的波段内,基底和膜料的吸收系数非常小,可以忽略不计。同时,为了便于与膜系的等效折射率比较,仅讨论正入射反射率光谱。

$(L/2 \ H \ L/2)^S$ 和 $(H/2 \ L \ H/2)^S$ (S 为周期数)膜系的等效折射率与基本周期的等效折射率相同,这为通过等效折射率来分析由厚度失配造成的半波孔提供了方便。图 1(a), (b) 中粗虚线分别为 $(L/2 \ H \ L/2)^{14}$ 对称膜系的等效折射率 E 及其反射率光谱包络(不考虑背反射)。可见,当膜层无厚度失配且色散匹配良好时,膜系的等效折射率在半波处平滑过渡,分束镜的半波光谱也具有较低的反射率。

当该结构出现 $\pm 3\%$ 的厚度失配时将出现明显的半波孔。图 2 为 $(L/2 \ H \ L/2)^{14}$ 膜系的高折射率膜层厚度增加 3% ,低折射率膜层厚度减小 3% 时的反射率光谱。由于两种膜料的折射率不同,当膜层具有大小相同、符号相反的物理厚度失配时,膜系的

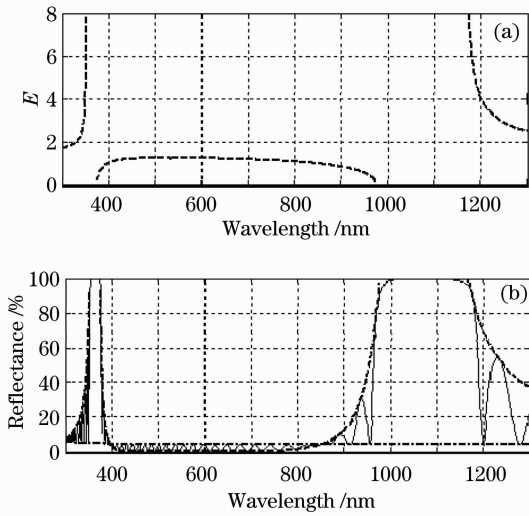


图 1 (L/2 H L/2)¹⁴ 对称结构的(a)等效折射率 E 及 (b)反射率包络

Fig. 1 (a) Equivalent refractive index E of the symmetric structure of (L/2 H L/2)¹⁴ and (b) corresponding reflectance envelope

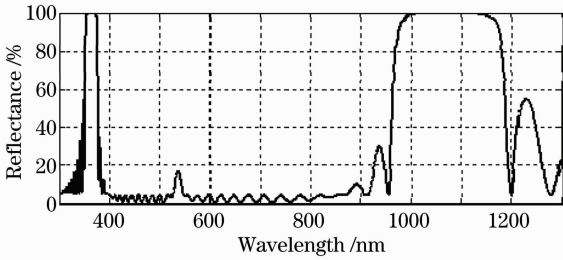


图 2 (97%L/2 103%H 97%L/2)¹⁴ 膜系的反射率光谱
Fig. 2 Reflectance spectrum of (97%L/2 103%H 97%L/2)¹⁴

整体光学厚度会发生改变。为保持膜系总光学厚度的恒定,物理厚度相对失配量均以百分比的形式表示。简洁起见,可以将存在厚度失配的膜系写成类似(97%L/2 103%H 97%L/2)¹⁴的形式。

通过计算膜系的等效折射率 E 和反射率包络可以发现(图 3),膜层厚度的失配导致等效折射率在半波处出现截止带。图 3(a)和(c)表示(L/2 H L/2)¹⁴ 规整膜系在高折射率材料(HfO₂)厚度增加 3%,低折射率材料(SiO₂)厚度减少 3%时,膜系等效折射率 E 在半波附近的走势及其对应的反射率包络曲线;而当高折射率材料厚度减少,低折射率材料厚度增加使膜系变为(103%L/2 97%H 103%L/2)¹⁴时,其等效折射率和反射率包络由图 3(b)和(d)所描绘。由图 3(a)和(b)可以得知,相反的厚度失配类型使膜系的等效折射率 E 以不同方式趋向于截止带。由于(L/2 H L/2)¹⁴ 规整膜系的等效折射率 E 在通带内

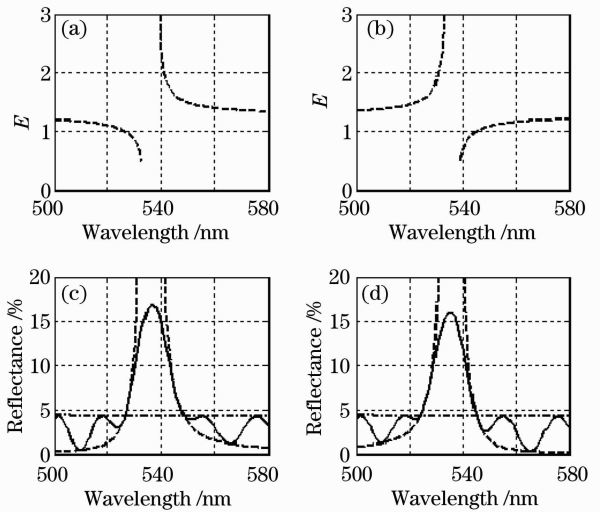


图 3 具有不同厚度失配的(L/2 H L/2)¹⁴ 结构在半波处的等效折射率 E 及对应的反射率包络

Fig. 3 Equivalent refractive index E and the corresponding reflectance envelope of (L/2 H L/2)¹⁴ suffering from different types of thickness mismatch

已经实现了与入射媒质和基底导纳近乎理想的匹配,无论 E 在接近半波处快速增大还是减小,反射率包络曲线 R₂ 在数值上都是随之急剧增大的。因此,对于此类膜系,不同类型的厚度失配对半波孔位置的影响并无明显区别。

另一种典型对称结构 G/(H/2 L H/2)¹⁴/Air 受厚度失配作用后的等效折射率 E 与其对应的反射率包络如图 4 所示。图 4(a)和(c)表示(103%H/2 97%L 103%H/2)¹⁴ 膜系等效折射率及半波反射率包络曲线,图 4(b)和(d)表示(97%H/2 103%L 97%H/2)¹⁴ 膜系等效折射率及半波反射率包络曲线。(H/2 L H/2)¹⁴ 结构受不同类型的厚度失配作用时,等效折射率向截止带的趋近方式与(L/2 H L/2)¹⁴ 相同[图 4(a),(b)]。但(H/2 L H/2)¹⁴ 膜系在通带中的平均等效折射率较大,未能与入射媒质和基底导纳有效匹配,因而反射率极大值的包络曲线 R₂ 与等效折射率的增减趋势相同。值得注意的是,不同类型的厚度失配对该膜系半波孔位置的影响是明显不同的。高折射率材料厚度增加 3%,低折射率材料厚度减少 3%时,其半波孔峰值对应的波长为 543 nm,长于半波位置,如图 4(c)所示;而高折射率材料厚度减少 3%,低折射率材料厚度增加 3%时,半波孔反射率极大值处波长为 528 nm,短于半波位置,如图 4(d)所示。因此,半波孔出现在半波的哪一侧决定于膜层厚度的失配类型。

随着周期数 S 的增加,(pqp)^S 型周期性对称膜

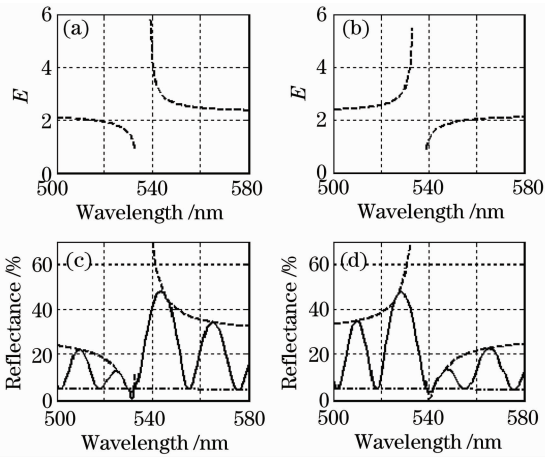


图 4 具有不同厚度失配的 $(H/2 L H/2)^{14}$ 结构在半波处的等效折射率 E 及对应的反射率包络
 Fig. 4 Equivalent refractive index E and the corresponding reflectance envelope of $(H/2 L H/2)^{14}$ suffering from different types of thickness mismatch

系的峰值反射率包络曲线不变,但包络曲线内部的光谱振荡波纹随之增多。因而 $(H/2 L H/2)^{10}$ 和 $(H/2 L H/2)^{20}$ 两种膜系,如图 5 所示,在给定的厚度失配下(两种材料各失配 $\pm 2\%$),距离半波最近的反射率极大值位置随膜层周期数的增大不断向截止带边缘“移动”。另一方面,图 5(c)和(d)中的粗实线表示 $(H/2 L H/2)^{20}$ 膜系分别受厚度失配 $\pm 2\%$ 和 $\pm 4\%$ 时所引发的半波孔,图 5(a)和(b)为它们所对应的等效折射率。不难发现,随着膜层材料的厚度失配量增大,相同膜系半波孔的位置变化微弱,而

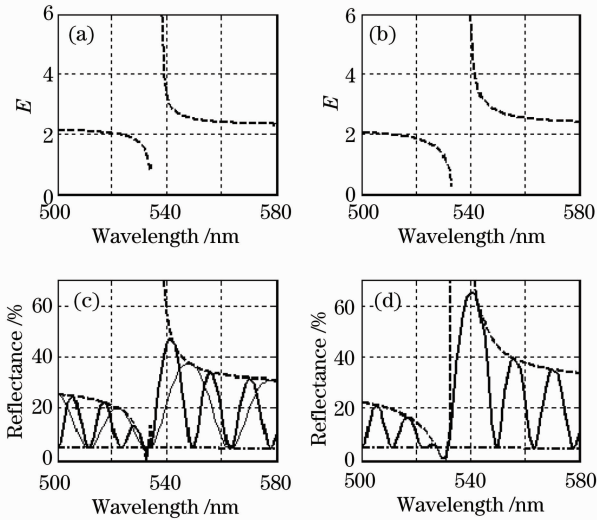


图 5 具有厚度失配的 $(H/2 L H/2)^S$ 结构半波孔位置与深度的比较

Fig. 5 Comparison about the location and depth of half-wave holes for $(H/2 L H/2)^S$ structure suffering from thickness mismatch

等效折射率 E 向截止带过度时的“陡度”却在减小,因而所对应的反射率包络曲线在半波附近的“形变”增大。所以,膜系周期数增多和厚度失配量增大都倾向于导致分光膜系半波孔加深。

$(H/2 L H/2)^S$ 膜系虽然很好地符合由等效折射率 E 所描绘的反射率包络曲线,这有助于对半波孔的分析,但该膜系在通带内的剩余反射率过高,并不适合用作倍频分束镜的初始结构。

下面来考察一种更具普遍性的对称膜系 $G/(H L)^{13} H/Air$ 。与上文所讨论的膜系不同,此类膜系不能够视为基本周期的简单叠加,但可以从中心的三层开始,由内至外将此结构逐步等效为单层膜,进而算出等效折射率 E 。图 6 为 $(H L)^{13} H$ 膜系在高、低折射率材料厚度分别失配 $\pm 3\%$ 时的反射率光谱。此时膜系半波附近的反射率变化趋势与图 4(b)和(d)中 $(97\% H/2 103\% L 97\% H/2)^{14}$ 膜系相似。

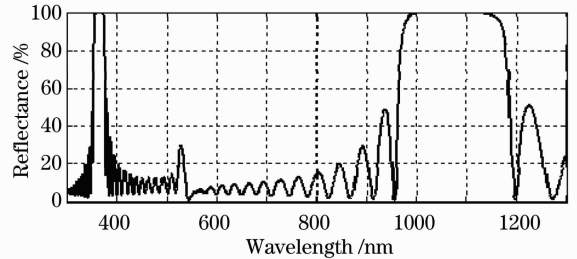


图 6 $(103\% H 97\% L)^{13} 103\% H$ 膜系的反射率光谱
 Fig. 6 Reflectance spectrum of $(103\% H 97\% L)^{13} 103\% H$

图 7(a)和(c)为 $(103\% H 97\% L)^{13} 103\% H$ 结构等效折射率及半波反射率包络曲线,图 7(b)和(d)为 $(97\% H 103\% L)^{13} 97\% H$ 结构等效折射率曲线。对于 $(H L)^S H$ 膜系,每当等效相位厚度 Γ 为 π 的整数倍时,由于 $\sin \Gamma = 0$,求解 E 时会出现 $0/0$ 不定式[(2)式],造成等效折射率的“劈裂”,但此时反射率包络是由基板导纳决定的,与膜系等效折射率无关,因此这并不会对利用等效折射率来分析半波孔造成影响。此外, $L (H L)^S$ 膜系也同样可以使用对称周期等效层法进行分析,它受厚度失配影响时等效折射率向截止带趋近的方式与 $(H L)^S H$ 膜系相反。而对于 $(H L)^S$ 膜系,可以先将首层或末层从膜堆中分离,计算出分离后对称结构的等效折射率,再将起初分离出的厚度为 $1/4$ 基频波长的单层膜与之叠加,因而总膜堆反射率光谱的特点仍与周期对称膜系相似。

$(L/2 H L/2)^S$ 和 $(H L)^S$ 膜系均可以用作倍频分束镜的初始结构,最终的膜系设计可以通过对规整

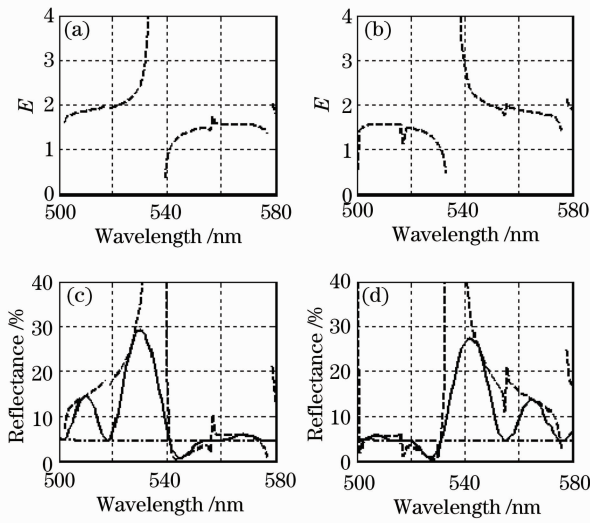


图7 具有不同厚度失配的 $(H L)^{13} H$ 结构在半波处的等效折射率 E 及对应的反射率包络

Fig. 7 Equivalent refractive index E and the corresponding reflectance envelope of $(H L)^{13} H$ suffering from different types of thickness mismatch

结构进行适当的优化而得到。由于 $(L/2 H L/2)^S$ 膜系受到折射率的正非均质性影响时,在半波处的反射率是先减小后增大的,因此当薄膜体现折射率正非均质性时,选用 $(L/2 H L/2)^S$ 膜系作为初始结构更容易获得较理想的镀制结果;而当膜系体现负非均质性时, $(H L)^S$ 膜系半波处的反射率先减后增,此时可以将 $(H L)^S$ 膜系作为首选初始结构。同时, $(H L)^S$ 膜系各膜层厚度较为接近,这使得采用光学监控镀膜时监控波长的选取更为方便,监控精度也更加可靠。

3.2 膜料色散对半波孔的影响

膜料和基底折射率的色散特性可以分别通过对单层膜和裸露基板的透射率光谱进行拟合而得到。镀制单层膜时,沉积原子直接沉积于基底上;而在多层膜的蒸镀过程中,后续膜层材料将主要沉积在上一层薄膜表面,并且镀制不同材料时存在蒸发源和工艺参数的转换,因此单层膜与多层膜的折射率色散可能会略有差异。接下来分别比较无色散、两种材料均采用单层膜拟合色散、单一材料具有较大的色散以及两种材料同时具有较大的色散时,半波反射率光谱所受到的影响。

在上文所述的工艺条件下,由 HfO_2 和 SiO_2 单层膜透射率拟合出的色散组合为

$$\begin{cases} n_H(\lambda) = 1.92 + 1.07 \times 10^3/\lambda^2 + 1.25 \times 10^9/\lambda^4 \\ n_L(\lambda) = 1.45 + 1.33 \times 10^4/\lambda^2 + 3.23 \times 10^7/\lambda^4 \end{cases} \quad (6)$$

图8中细实线和细虚线分别表示当膜层与基底均不存在色散时, $(H L)^{14}$ 和 $(L/2 H L/2)^{14}$ 膜系在半波处的反射率光谱。如果将规整膜堆光谱的半波虚设层位置定义为“光学半波”,将理想的倍频位置称为“物理半波”,则不考虑色散时光学半波位置与物理半波位置(532 nm)相同。图8中粗实线和粗虚线分别表示两种膜料具有如(6)式的色散特性时, $(H L)^{14}$ 和 $(L/2 H L/2)^{14}$ 膜系在半波处的反射率光谱。由于正常色散材料的折射率在半波位置比参考波长(1064 nm)处大, $\lambda/4$ 膜系的光学半波将比物理半波的波长更长,故图8中薄膜的色散使半波虚设层位置略向长波移动至536 nm。各种失谐因素所导致的半波孔实际上都是围绕光学半波产生的。

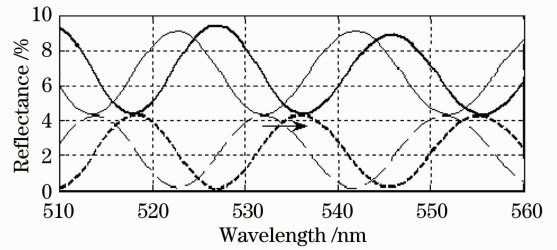


图8 材料色散造成膜系光学半波的位置移动
Fig. 8 Dislocation of optical half-wave caused by material dispersion

如果两种材料的折射率色散不匹配,半波孔随之产生,并且半波孔出现的位置受色散的失配类型影响。本文给定了一组具有较大色散的高、低折射率材料,其色散公式为

$$\begin{cases} n'_H(\lambda) = 1.87 + 1.33 \times 10^4/\lambda^2 + 1.53 \times 10^9/\lambda^4 \\ n'_L(\lambda) = 1.40 + 1.22 \times 10^4/\lambda^2 + 2.84 \times 10^8/\lambda^4 \end{cases} \quad (7)$$

图9(a)表示的色散组合为 n'_H, n_L ,图9(b)的色散组合为 n_H, n'_L 。图9(c)和(d)中实线表示 $(H L)^{13} H$ 膜系在这两种色散组合作用下的半波反射率光谱,点划线表示由基板折射率(已考虑色散)决定的“虚设层”反射率包络 R_1 ,粗虚线表示由等效折射率决定的反射率包络 R_2 。由图9可以看出,色散失配对半波光谱的影响形式与厚度失配相似,但它通常并不会引起严重的半波孔问题。

当两种材料具有相匹配的折射率色散时,半波孔可以得到抑制。图10表示高、低折射率材料同时具有给定的较大色散,即采用 n'_H 和 n'_L 组合时, $(H L)^{13} H$ 膜系的等效折射率[图10(a)]及反射率包络[图10(b)]。经过对膜料组合的简单调整,该膜系便可以在半波通带获得相对平缓的等效折射率曲

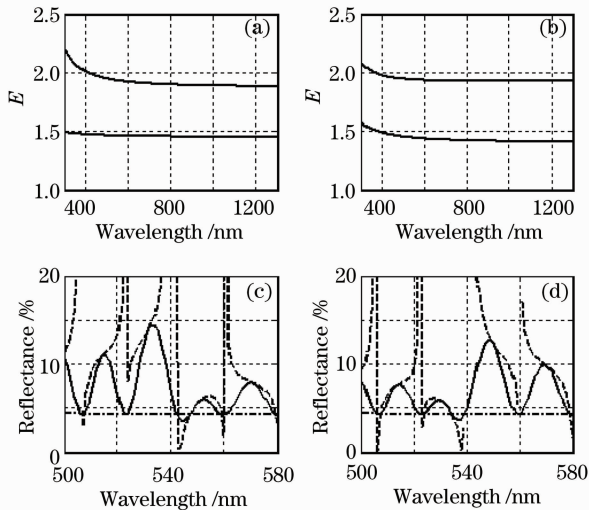


图9 膜料色散不匹配导致(H L)¹³ H膜系产生半波孔
Fig. 9 Half-wave hole of (H L)¹³ H structure caused by the mismatch of dispersion

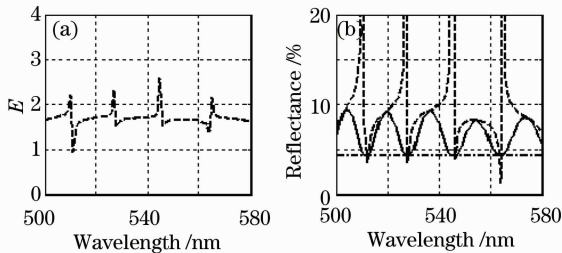


图10 高、低折射率材料的色散相匹配时,(H L)¹³ H膜系半波等效折射率E及对应的反射率包络
Fig. 10 Equivalent refractive index E and the corresponding reflectance envelope of (H L)¹³ H when the dispersions of high and low index materials match with each other

线,并与基板及入射媒质实现良好的导纳匹配。因此,膜料色散并不是导致半波孔产生的主要原因。

4 结 论

膜层厚度的整体失配使对称性倍频分光膜系在半波处产生了等效折射率的截止带,从而导致半波孔的产生。半波孔是膜系光学厚度失谐的积累效应,其产生及变化随着膜系结构的不同而不同。首先,膜层材料的厚度失配是引发半波孔的一个重要原因,不同类型的厚度失配可能使半波孔产生在不同位置。其次,膜料色散并不是半波孔产生的主要原因。两种材料的折射率色散不匹配会促进半波孔的产生,但色散的失配通常对半波光谱的影响并不严重,并且实现两种材料色散的良好匹配也不困难。为了消除半波孔对倍频器件分光性能的不利影响,

一方面,在满足光谱要求的情况下应该选取总膜层数较少的设计方案,以降低误差的积累;另一方面,在镀制多层膜过程中要采用更加精确的监控方式,不断修正膜厚的工具因子,从而尽量减小不同折射率膜层厚度的相对失配。

参 考 文 献

- 1 J. H. Campbell, R. A. Hawley-Fedder, C. J. Stolz *et al.*. NIF optical materials and fabrication technologies: an overview[C]. *SPIE*, 2004, **5341**: 84~101
- 2 D. Aikens, H. Bissinger. Overview of small optics for the National Ignition Facility[C]. *SPIE*, 1999, **3782**: 447~487
- 3 Lin Zunqi. Progress of laser fusion[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2202~2207
林尊琪. 激光核聚变的发展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2202~2207
- 4 Zhou Ming, Zhao Yuan'an, Li Dawei *et al.*. Laser damage of optical film with the combined irradiation of 1064 nm and 532 nm pulse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3050~3054
周 明, 赵元安, 李大伟 等. 1064 nm 和 532 nm 激光共同辐照薄膜的损伤[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3050~3054
- 5 Xiaofeng Ma, Yingjian Wang, Zhengxiu Fan *et al.*. Harmonic beam splitter design and fabrication[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(11): 670~672
- 6 Huang Wei, Zhang Yundong. Method for eliminating the half-wave hole of short-wave passed filter[J]. *Optical Instruments*, 1999, **21**(4-5): 145~148
黄 伟, 张云洞. 消除短波通截止滤光片半波孔的方法[J]. *光学仪器*, 1999, **21**(4-5): 145~148
- 7 Yuan Hongtao, Zhang Guiyan. Ion beam sputter depositing harmonic beam splitter by time-power monitoring method[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(4): 370~372
袁宏韬, 张贵彦. 时间监控离子束溅射沉积倍频波长分离膜[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(4): 370~372
- 8 Xue Jianjun, Zhu Jianhua, Jiang Maoqing *et al.*. Study on the half-wave hole phenomenon of short-wave pass filter caused by film infiltration[J]. *J. Light Scattering*, 2008, **20**(4): 321~323
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): 321~323
- 9 A. Dinca, M. E. Trifan, V. Lupei *et al.*. Dichroic mirror design by complete admittance matching [J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(5): 1284~1287
- 10 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007. 134
唐晋发, 顾培夫, 刘 旭 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007. 134
- 11 H. A. Macleod. Half wave holes, leaks and other problems[C]. Proceedings of the 39th Annual Technical Conference of the Society of Vacuum Coaters, 1996, 193~198
- 12 Xiaofeng Ma, Yingjian Wang, Jianda Shao *et al.*. Elimination of the half-wave hole for short-wave pass filter[C]. *SPIE*, 2005, **5774**: 377~380
- 13 Wang Qing, Wu Fuquan, Hao Dianzhong *et al.*. Quarter periodic multilayer polarizing beam splitter based on equivalent layers theoretics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2159~2163
王 庆, 吴福全, 郝殿中 等. 基于等效膜层理论的1/4规整膜系薄膜偏光分束镜[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2159~2163

栏目编辑: 韩 峰