

变角度 3~5 μm 红外消偏振增透膜的设计

高晓丹

(武汉东湖学院电子信息工程学院, 湖北 武汉 430212)

摘要 基于红外探测器对红外增透膜的变角度使用需求,分析了入射角度改变对薄膜偏振效应的影响。通常会采用各种措施来减小这种偏振效应的影响,但基本上只能在单一入射角度较窄波段范围内实现消偏振。根据设计要求在所设计的初始膜系的基础上,运用 TFCalc 膜系设计软件采用梯度法和 Needle 法综合优化设计了 3~5 μm 宽波段红外增透膜。分析了该设计膜系在入射角为 $0^\circ\sim 60^\circ$ 的范围内所对应的 p 偏振光和 s 偏振光的透射光谱曲线,并模拟了膜厚改变 2% 对设计膜系透射率曲线的影响,实现了宽角度宽波段红外消偏振增透膜的设计。

关键词 薄膜;增透膜;消偏振;膜系;优化设计

中图分类号 O484.4 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.033101

Design of Infrared Non-Polarizing Anti-Reflective Film of 3~5 μm at Variable Incidence Angle

Gao Xiaodan

(School of Electronic and Information Engineering, Wuhan Donghu University, Wuhan, Hubei 430212, China)

Abstract According to variable incidence angle demands of anti-reflective film in infrared detectors, the influence of incidence angle on coating polarization effect is analyzed. Many effective methods were usually taken to reduce the influence of polarization effect, but non-polarizing can only be realized for a single incidence angle or a very narrow spectral range. 3~5 μm infrared anti-reflective film is designed with gradient and needle optimization methods on the designed initial film stack formula by using TFCalc formula design software. The p and s polarized light transmittance curves of designed formula with incidence angle from 0° to 60° are analyzed, and the effect of changing the film thickness by 2% on the transmittance curve of the designed formula is simulated. In this way, the infrared non-polarizing anti-reflective film is successfully designed with wide range and wide incidence angle.

Key words thin films; anti-reflective film; non-polarizing; film stack; optimization design

OCIS codes 310.1210; 310.4165; 310.6188

1 引言

近年来,随着大气探测、军事、光谱学、红外遥感和红外电子对抗等技术的迅速发展,光学薄膜作为光学仪器和光学器件的重要组成部分,其在红外波段的应用引起了人们日益广泛的关注^[1]。3~5 μm 波段是重要的大气窗口,也是红外探测器的主要工作区域,该波段激光对战场、烟尘等恶劣环境具有较强的穿透能力,因而红外光学薄膜对控制红外探测器的性能非常重要,尤其是应用最为广泛的红外增透膜。由于新材料的开发^[2]以及各种设计方法和工艺的提升,人们对红外增透膜的要求越来越高,已不再局限于某一波段范围的增透,同时对使用环境的要求也更加严格,希望红外增透膜在改变入射角时依然能具有较好的增透效果。而入射角度变化势必会造成偏振影响。

消偏振问题一直是光学薄膜的一大难题。关于消偏振,国内外学者都做了较多的研究工作^[3~6],但基本上局限于较短波段或者单一入射角。而在宽角度入射的情况下,在较宽波段具有消偏振特性的红外增透膜尚未见报道。本文在所要求的 Al_2O_3 基底上设计出 3~5 μm 宽波段红外增透膜,当入射角在 $0^\circ\sim 60^\circ$ 范围内变化时始终具有较好的透射光谱特性,改善了因入射角变化而导致的偏振分离。

收稿日期: 2012-10-29; 收到修改稿日期: 2012-12-03; 网络出版日期: 2013-01-31

作者简介: 高晓丹(1980—),女,硕士,讲师,主要从事光学薄膜技术方面的研究。E-mail: gxd6368@163.com

2 理论分析

变角度 3~5 μm 红外增透膜的参数要求如下:以 Al_2O_3 为基底设计 3~5 μm 红外增透膜,且在入射角从 $0^\circ\sim 60^\circ$ 的变化范围内具有较好的透射光谱特性。

当光线倾斜入射到光学薄膜时,电场和磁场在每一个界面上的切向分量均连续,使得薄膜对 s 偏振分量和 p 偏振分量表现出不同的有效折射率,膜系显示出很强的偏振效应^[7]。

当倾斜入射时,每层薄膜 p 偏振光和 s 偏振光的导纳是不同的,对于第 j 层膜:

$$\eta_j = \begin{cases} n_j \cos \theta_j & (\text{s polarization}) \\ n_j / \cos \theta_j & (\text{p polarization}) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 n_j 为第 j 层膜的折射率, θ_j 由斯涅耳定律得出:

$$n_0 \sin \theta_0 = n_g \sin \theta_g = n_j \sin \theta_j, \quad (2)$$

式中 n_0 和 n_g 分别为入射介质和基片的折射率, θ_0 和 θ_g 分别为入射角和折射角。

第 j 层膜的特征矩阵为

$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i \sin \delta_j}{\eta_j} \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中第 j 层的相位厚度 δ_j 为

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \theta_j. \quad (4)$$

m 层膜的膜系特征矩阵是 m 个特征矩阵连乘积:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & i m_{12} \\ i m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \cdots \mathbf{M}_j \cdots \mathbf{M}_m. \quad (5)$$

多层膜和基片的组合导纳 $Y=C/B$,

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & i m_{12} \\ i m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_g \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 η_g 为基片的导纳。p 偏振和 s 偏振的反射率可写作

$$R_{s,p} = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^*. \quad (7)$$

由于 η_j 对于 p 偏振和 s 偏振不同,因此在大部分光谱区域,p 偏振和 s 偏振的反射率 R_p 和 R_s 也不同,反射率偏差会随着入射角的增大而进一步增大。所以必须尽量减少这种偏差才能使 p 偏振光和 s 偏振光在某一波段同时达到较好的增透效果。

3 膜料选取

光学薄膜的光谱特性主要取决于组成膜系的膜层折射率和膜层厚度,因此,膜料的选择是膜系设计首先要考虑的问题。在对光学薄膜材料进行选择时,膜料的透明区域、折射率、机械牢固度和物理及化学稳定性是必须综合考虑的指标^[7]。同时,为了优化性能,要求镀膜材料有最低的吸收,最高的折射率比。

可用于红外波段的材料选择相对较少,主要有氧化物、氟化物、硫化物和硒化物,但是 SiO_2 等氧化物在 2~4 μm 存在吸收,因此氧化物多用在 2 μm 波段之前,中红外波段较少应用。Kruschwitz 等^[8]报道了中远红外波段薄膜材料的光学常数和特性,常用的高折射率材料主要有 ZnS 、 ZnSe 、 Ge 、 Si 等,低折射率材料有 ThF_4 、 YF_3 、 YbF_3 、 BaF_2 、 PbF_2 等。

在上述材料中 ZnS 透明区域为 0.38~14.00 μm ,红外区的折射率约为 2.2,在红外波段具有吸收小、易蒸发等特点。 YbF_3 透明区域为 0.2~14.0 μm ,折射率约为 1.5,熔点 1157 $^\circ\text{C}$,易蒸发,并且具有吸收小、无辐射、化学稳定性高的特点^[9]。因此,选择 ZnS 为高折射率材料, YbF_3 为低折射率材料。

4 膜系设计

采用规整膜系设计很难满足变角度 3~5 μm 红外增透膜的设计要求^[10],而各种优化设计方法比较多,

如变尺度法、梯度法、单纯形法等。梯度法计算膜系中膜层厚度和相关参数所构成的评价函数的导数,当评价函数导数趋向于零,即函数值最小时,即可实现优化。而膜系的光学特性不仅仅与膜层的折射率和厚度有关,还与膜层层数有关。Needle法通过不断地插入薄层,即增加变量的维数来形成一个连续的寻优过程。在Needle法膜系自动设计中,不仅优化膜系的厚度,还改变膜层层数,它会随着寻优过程的进行自动加减膜层层数,因此可以达到最优值。

在此,结合Needle和梯度法优化设计膜系。为便于在实际镀制时监控膜系,先选择一个合适的参考波长1400 nm,在此参考波长下设计一个初始膜系 $\text{Sub}|(0.5\text{HL}0.5\text{H})^2|\text{Air}$,其中H代表厚度为1/4参考波长的高折射率材料ZnS层,L代表厚度为1/4参考波长的低折射率材料 YbF_3 层。初始膜系的设计是膜系设计中很重要的一部分,一个好的初始膜系可以为下一步的优化设计工作提供一个好的平台^[11],从而简化计算过程,得到更理想的设计曲线。运用TFCalc膜系设计软件根据所设置的目标参数采用梯度法优化初始膜系,然后再结合Needle法,最终得到5层非规整膜系:

$$\text{Sub}|0.9660\text{L}0.8123\text{H}1.1210\text{L}5.9337\text{H}2.7956\text{L}|\text{Air}.$$

所设计的3~5 μm 红外增透膜在入射角 $0^\circ\sim 60^\circ$ 范围内的透射光谱如图1所示。由图1可见,在3~5 μm 宽红外波段范围内,随着入射角的增大,p偏振光和s偏振光逐渐出现了分离,但在入射角为 60° 以内时,p偏振光和s偏振光的透射率始终在91%以上,实现了宽波段变角度的红外增透,完全符合设计目标的要求。

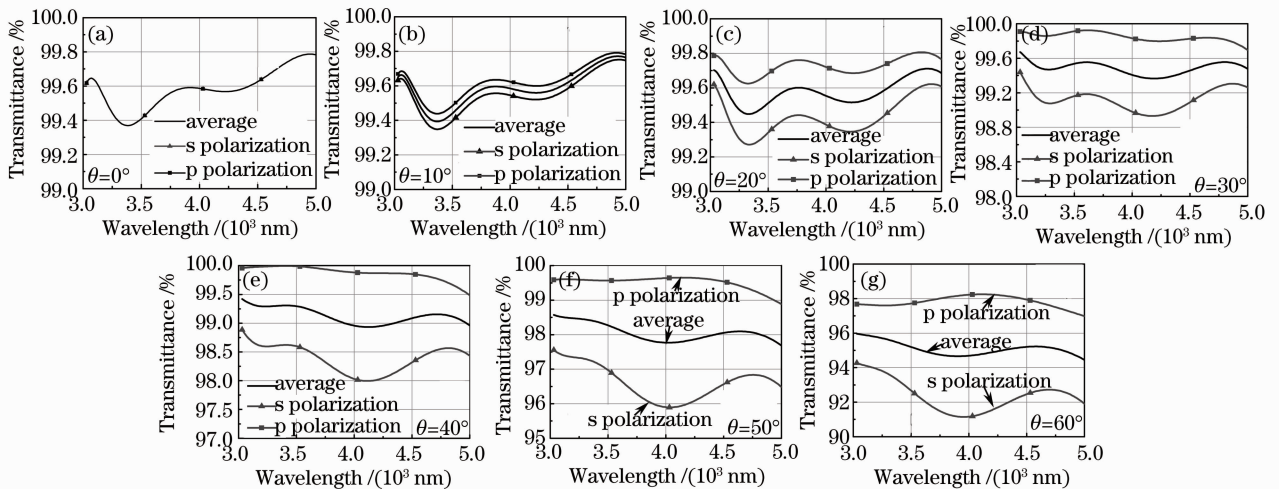


图1 所设计的红外增透膜在入射角 $\theta=0^\circ\sim 60^\circ$ 的透射光谱曲线

Fig. 1 Designed transmittance curves of infrared anti-reflective film with incident angles from $0^\circ\sim 60^\circ$

5 设计膜系的薄膜工艺容差分析

虽然设计膜系具有较好的光谱性能,但在实际镀膜过程中,会受到镀膜设备控制精度的限制以及其他因素的影响,使得实际膜系的透射率曲线与设计目标存在一定的偏差,为此,有必要分析设计膜系的薄膜工艺容差性,即膜厚出现随机涨落对透射波形的影响。对于消偏振增透膜而言,入射角越大,p偏振光和s偏振光的分离也就越严重,所以,在此仅分析最大入射角为 60° 时设计膜系中膜层厚度出现随机涨落的情况。入射角为 60° 时设计膜系膜厚偏差2%的透射率光谱曲线如图2所示。可见,当膜层厚度在实际沉积过程中存在一定误差时,p偏振光和s偏振光的透射率曲线有所偏移,如图中虚线所示,但在全波段范围内,透射率依然维持在90%以上。

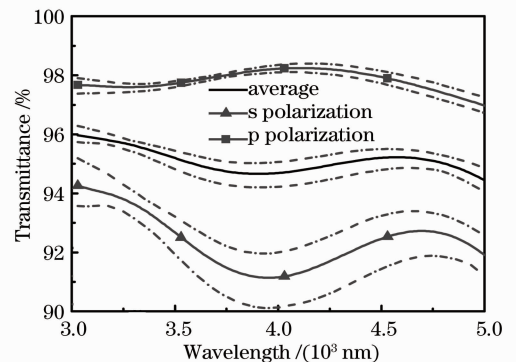


图2 入射角为 60° 时设计膜系膜厚偏差2%的透射率曲线

Fig. 2 Transmittance curves of the designed film with the thickness deviation of 2% at the incident angle of 60°

因此,所设计的变角度宽波段增透膜的性能对膜系的膜厚随机涨落不是很敏感,工艺容差性较好,而且该膜系的膜层数较少,一般镀膜机完全可以蒸镀该膜系。

6 结 论

以 ZnS 和 YbF₃ 为介质材料,运用 TFCalc 膜系设计软件,在所要求的 Al₂O₃ 基底上,结合梯度法和 Needle 法进行膜系优化设计,设计出入射角为 0°~60°的 3~5 μm 宽波段红外消偏振增透膜。该膜系设计能满足红外仪器对变角度宽波段红外增透薄膜的消偏振需求。

参 考 文 献

- 1 Shi Peng, Fu Xiuhua, Sun Yan *et al.*. Design and fabrication of double wavelength laser protective infrared antireflection coatings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0407003
石 澎,付秀华,孙 岩等. 双波段激光防护红外减反膜的研制[J]. 中国激光, 2011, **38**(4): 0407003
- 2 Yang Yongliang, Fu Xiuhua, Liu Guojun *et al.*. Study and fabrication of multi-wavelength laser antireflection film using new mixed material [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1007002
杨永亮,付秀华,刘国军等. 采用新型混合材料的多波长激光减反射膜的研制[J]. 中国激光, 2011, **38**(10): 1007002
- 3 Wang Wenliang, Hao Honggang. Designs of near infrared two-waveband non-polarizing beam splitter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1131002
王文梁,郝宏刚. 近红外双波段消偏振分光膜的设计[J]. 光学学报, 2011, **31**(11): 1131002
- 4 Wang Wenliang, Xiong Shengming, Zhang Yundong *et al.*. Designs of all-dielectric three wavelength non-polarizing parallel plate beam splitter [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(4): 629~632
王文梁,熊盛明,张云洞等. 全介质三波长消偏振平板型分光膜的设计[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(4): 629~632
- 5 V. R. Costich. Reduction of polarization effects in interference coatings [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(4): 866~870
- 6 A. Thelen. Nonpolarizing interference filters inside a glass cube [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(12): 2983~2985
- 7 Tang Jinfa, Gu Peifu. Optical Film Theory and Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 1989. 9~12
唐晋发,顾培夫. 薄膜光学与技术 [M]. 北京:机械工业出版社, 1989. 9~12
- 8 Jennifer D. Tralor Kruschwitz, Walter T. Pawlewicz. Optical and durability properties of infrared transmitting thin films [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(10): 2157~2159
- 9 Zhang Long, Chen Lei, Fan Youyu *et al.*. Development of mid-infrared transmitting glasses window and applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900134
张 龙,陈 雷,范有余等. 中红外玻璃材料发展及前沿应用[J]. 光学学报, 2011, **31**(9): 0900134
- 10 Huang Yun, Wu Suyong, Yang Kaiyong. Active design of multilayer optical coatings based on sensitivity control [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0431002
黄 云,吴素勇,杨开勇. 基于灵敏度控制的光学薄膜膜系主动设计方法[J]. 光学学报, 2011, **31**(4): 0431002
- 11 Gao Xiaodan, Ge Weilong. Manufacture of interference edge filter for FTTH triplexer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(8): 1508~1511
高晓丹,葛卫龙. 光纤到户单纤三向截止滤光片的研制[J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(8): 1508~1511