

激光/长波红外双波段减反射薄膜设计与制备

李子杨^{1,2}, 刘华松^{1,2*}, 孙 鹏^{1,2}, 杨 霄^{1,2}, 白金林^{1,2}, 徐 颖^{1,2}, 杨仕琪^{1,2}, 季一勤^{1,2}, 苏建忠^{1,2}

(1. 天津市航技术物理研究所 天津市薄膜光学重点实验室, 天津 300308;
2. 王之江激光创新中心, 天津 300308)

摘要: 在氟化钡光学元件上设计并制备多波段减反射薄膜是提升光电系统探测性能的关键。在氟化钡基底上设计并制备了 1064 nm 激光/长波红外双波段减反射薄膜。基于周期对称结构膜系导纳计算方法, 以及拟合膜层周期数与参考波长的优化算法, 开展了复合波段减反射薄膜初始膜系的设计方法研究。使用热蒸发离子束辅助沉积方法制备了多层减反射薄膜。测试结果表明, 该薄膜在 1064 nm 处透射率为 94.0%, 在 8~12 μm 长波红外波段平均透射率为 96.3%, 在 8.2 μm 处的透射率高达 99.4%。该激光/长波红外双波段减反射薄膜具有良好的光学性能, 可以应用于多模复合精确探测光电装备之中, 对于提升探测系统的工作性能具有重大意义。

关键词: 光学薄膜; 双波段减反射; 膜系设计; 热蒸发离子束辅助沉积

中图分类号: O484 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210944

Design and preparation of laser/long-wave infrared dual-band antireflection thin-film

Li Ziyang^{1,2}, Liu Huasong^{1,2*}, Sun Peng^{1,2}, Yang Xiao^{1,2}, Bai Jinlin^{1,2},
Xu Ying^{1,2}, Yang Shiqi^{1,2}, Ji Yiqin^{1,2}, Su Jianzhong^{1,2}

(1. Tianjin Key Laboratory of Optical Thin Film, Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China;
2. Wang Zhijiang Laser Innovation Center, Tianjin 300308, China)

Abstract: The design and preparation of multi-band antireflection thin-film on barium fluoride optical elements is the key to improve the detection performance of photoelectric system. 1064 nm laser/long-wave infrared dual-band antireflection thin-film was designed and prepared on barium fluoride substrate. Based on the calculation method of the admittance in periodically symmetric structure thin-film system and the optimization algorithm of fitting periods and reference wavelength, study on the design method of the initial film system of the multi-band antireflection thin-film was carried out. The films were prepared using the thermal evaporation ion-assisted deposition method. The results show that the film has excellent optical properties with a transmittance of 94.0% at 1064 nm, average transmittance of 96.3% in the long-wave infrared spectral band from 8 to 12 μm , and transmittance of 99.4% at 8.2 μm . The laser/long-wave infrared dual-band antireflection thin-film can be applied to dual-mode composite photodetection optoelectronic equipment, which is of great significance to improve the working performance of the photodetection system.

Key words: optical thin-film; dual-band antireflection thin-film; thin-film design; thermal evaporation ion-assisted deposition

收稿日期: 2021-12-09; 修订日期: 2021-12-27

基金项目: 国家自然科学基金 (61775167, 61975150); 天津市自然科学基金 (19 JCYJC38400); 国家拔尖青年人才支持计划; 天津市人才发展专项支持计划高层次创新团队

作者简介: 李子杨, 男, 硕士生, 主要从事光学薄膜、红外光学窗口的设计与表征技术方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 刘华松, 男, 研究员, 博士, 主要从事光学薄膜的设计、制备与表征技术, 红外光学材料技术等方面的研究。

0 引言

随着光电探测技术的快速发展,人们对光电成像系统实施目标探测与识别的要求越来越高。1064 nm 激光波段具有良好的云雾穿透能力,具有成像分辨率高、抗干扰能力强、图像质量稳定等优势,常用于夜间暗弱目标、距离目标以及运动目标的探测、成像与识别^[1-2]。8~12 μm 长波红外波段是最常用的大气窗口之一,具有探测灵敏度高、可昼夜全天时工作的优势,常用于光电探测扫描成像系统^[3]。通常情况下,单一波段的探测成像获取信息的能力有限,不能充分反映目标各个维度的特征^[4-8]。为了更加充分地提取目标特征信息,充分发挥不同探测波段、不同探测机理的优势,同时满足未来光电探测系统集成化、智能化的发展趋势,多模复合光电探测系统是当前技术发展的热点^[9-12]。

复合波段减反射薄膜是多模复合光电探测系统中的重要组成部分。近年来,国内外研究人员对复合波段减反射薄膜的设计与制备工作开展了一系列研究。米高园^[13]等人在多光谱硒化锌基底上开展了电视/激光/中波红外三波段减反射薄膜的制备研究,样品在 500~800 nm 平均透射率大于 97%,1064 nm 激光透射率大于 98%,3.7~4.8 μm 平均透射率大于 96.5%。付秀华^[14]等人在硅基底上研制出用于短/中波红外探测系统的宽波段高透射率薄膜,样品在 1.5~5 μm 波段内透射率大于 96.5%。Yenisoy. A^[15]等人在锗基底上开展了中波红外超宽带减反射薄膜的制备,在 3.4~4.8 μm 范围内的平均反射率为 0.256%,在 3.55 μm 处的反射率仅为 0.005%。D. Cohen^[16]等人在硫化锌与硒化锌基底上设计并制备了激光/中波红外/长波红外三波段减反射薄膜,其设计重点在于增强 1064 nm 激光波段与 8~12 μm 长波红外波段的透射率,测试结果表明样品在 1064 nm 透射率为 98.0%,在 3.4~5 μm 平均透射率为 96.0%,在 8~12 μm 平均透射率为 92.7%。分析国内外研究成果可知,目前研究人员对激光/长波红外复合波段减反射薄膜的研究较少,同时对复合波段减反射薄膜尚未有明确的设计方法。

为了合理结合 1064 nm 激光高分辨率和与 8~12 μm 长波红外高探测灵敏度的优势,文中在 BaF₂ 基底上开展了激光/长波红外双波段减反射薄膜的膜系

设计及制备技术研究。提出了一种基于周期对称结构的初始膜系设计方法,可以显著提高后续膜系优化效率。随后开展了双波段减反射薄膜的制备工作。研究成果可以满足多模复合光电探测系统的实际应用需求,对提升探测性能具有重要意义。

1 复合波段减反射薄膜设计原理

BaF₂ 具有良好的光学特性,可从可见光到长波红外实现宽波段光学减反射作用。厚度为 0.5 mm 的 BaF₂ 基底透射率和反射率光谱测试结果如图 1 所示。

分析基底的测试结果可知, BaF₂ 在 1064 nm 具有 93% 的透射率,在 8~12 μm 具有平均 92% 的透射率。BaF₂ 在 10 μm 之后的透射率下降,这是因为波长接近 BaF₂ 的长波截止限而引起的吸收增大现象。根据红外探测器工作波段的要求,需要在 BaF₂ 基片上沉积 1064 nm 激光与 8~12 μm 长波红外双波段减反射薄膜。具体技术要求如表 1 所示。

在红外光学薄膜材料中, ZnS 与 YbF₃ 具有同时满足 1064 nm 激光与 8~12 μm 长波红外波段的光学透明性能,同时二者机械强度较高,在红外区域的吸收也相对较低^[17]。因此,根据 BaF₂ 材料折射率的匹配性及材料透明区范围,选择 ZnS 作为高折射率材料, YbF₃ 为低折射率材料。

采用 Sub | (0.5 HL 0.5 H) N | Air 结构作为初始膜系,参考波长为 λ₀。其中, H 代表高折射率材料 ZnS 在参考波长处的 1/4 光学厚度, L 代表低折射率材料 YbF₃ 在参考波长处的 1/4 光学厚度。上述膜系结构由 N 个对称周期组成,每个周期的特征矩阵 M 可以表示为^[18]:

$$M = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta_H}{2} & \frac{i}{n_H} \sin \frac{\delta_H}{2} \\ in_H \sin \frac{\delta_H}{2} & \cos \frac{\delta_H}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_L & \frac{i}{n_L} \sin \delta_L \\ in_L \sin \delta_L & \cos \delta_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \cos \frac{\delta_H}{2} & \frac{i}{n_H} \sin \frac{\delta_H}{2} \\ in_H \sin \frac{\delta_H}{2} & \cos \frac{\delta_H}{2} \end{bmatrix}$$

式中: n_H、δ_H 代表高折射率材料的折射率及位相厚度; n_L、δ_L 代表低折射率材料的折射率及位相厚度。位相厚度的计算方法为:

$$\delta_H = \frac{2\pi}{\lambda} n_H d_H \cos \theta \quad (2)$$

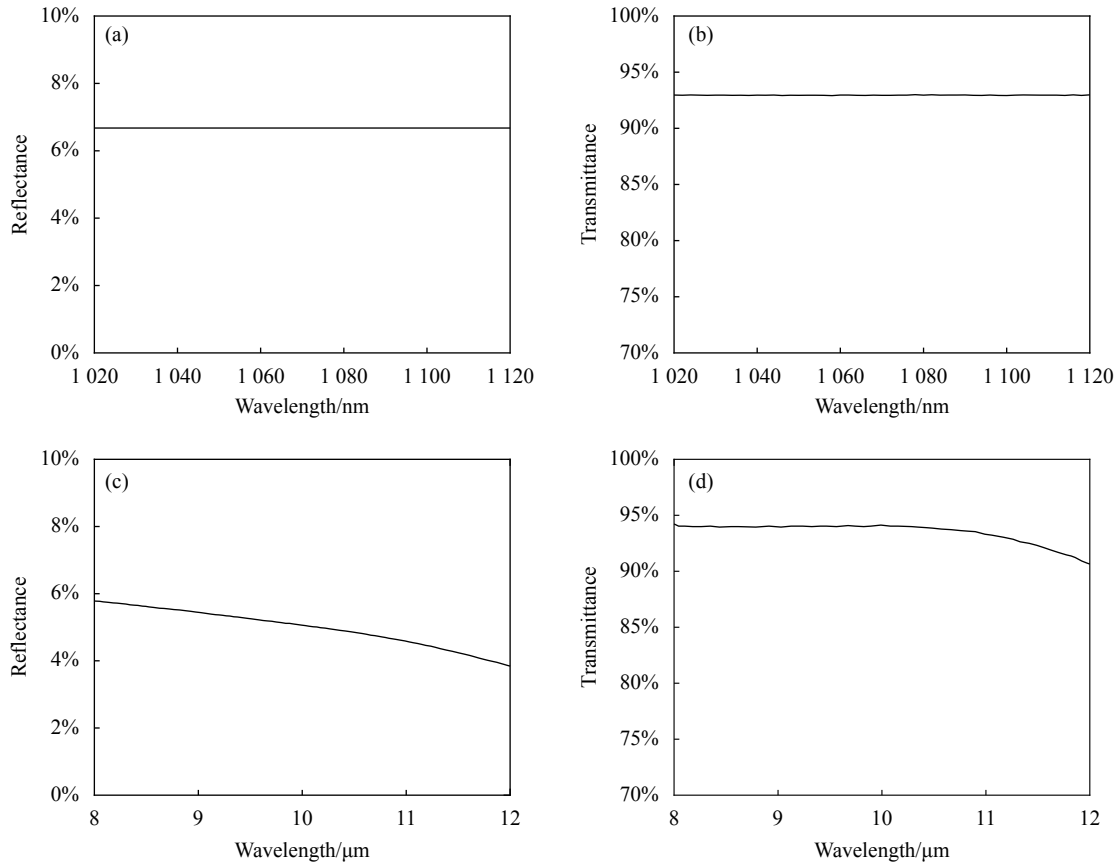


图 1 BaF₂ 基底在 1064 nm 测试光谱 (a) 反射率曲线及 (b) 透射率曲线; BaF₂ 基底在 8~12 μm 测试光谱 (c) 反射率曲线及 (d) 透射率曲线
Fig.1 Spectrum of BaF₂ substrate at 1064 nm: (a) Reflectance test curve and (b) transmittance test curve; Spectrum of BaF₂ substrate at 8~12 μm: (c) Reflectance test curve and (d) transmittance test curve

表 1 激光/长波红外双波段减反射薄膜技术要求

Tab.1 Technical requirements of the laser/long-wave infrared dual-band antireflection thin-film

Parameter	Technical requirements	
Substrate material	BaF ₂	
Incident angle/(°)	0	
Working band/μm	1.064	8-12
Transmittance	≥93%	≥95%

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos^2 \delta - \frac{1}{2} \left(\frac{n_H + n_L}{n_L + n_H} \right) \sin^2 \delta \\ in_H \left[\sin \delta \cos \delta + \frac{1}{2} \left(\frac{n_H + n_L}{n_L + n_H} \right) \cos \delta \sin \delta - \frac{1}{2} \left(\frac{n_H - n_L}{n_L - n_H} \right) \sin \delta \right] \end{bmatrix}$$

考虑在正入射的条件下, 由于 $M_{11}=M_{22}$, 可以用等效单层膜的形式描述基本周期:

$$M = \begin{bmatrix} \cos \Delta & \frac{i}{H} \sin \Delta \\ iH \sin \Delta & \cos \Delta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\delta_L = \frac{2\pi}{\lambda} n_L d_L \cos \theta \quad (3)$$

式中: d_H 、 d_L 分别表示高折射率膜层与低折射率膜层的物理厚度; θ 为光线入射角度。在不考虑薄膜材料色散特性的条件下, 对应同一参考波长、同一入射角度下的高低折射率材料位相厚度 δ_H 与 δ_L 相等。令 $\delta_H=\delta_L=\delta$, 公式 (1) 经过矩阵乘法运算并化简, 可以求得基本周期的特征矩阵:

$$\frac{i}{n_H} \begin{bmatrix} \sin \delta \cos \delta + \frac{1}{2} \left(\frac{n_H + n_L}{n_L + n_H} \right) \cos \delta \sin \delta + \frac{1}{2} \left(\frac{n_H - n_L}{n_L - n_H} \right) \sin \delta \\ \cos^2 \delta - \frac{1}{2} \left(\frac{n_H + n_L}{n_L + n_H} \right) \sin^2 \delta \end{bmatrix} \quad (4)$$

该基本周期具有等效位相厚度 Δ 与等效导纳 H :

$$\Delta = \arccos \left[\cos^2 \delta - \frac{1}{2} \left(\frac{n_H + n_L}{n_L + n_H} \right) \sin^2 \delta \right] \quad (6)$$

$$H = n_H \left[\frac{\cos \delta (n_H + n_L)^2 - (n_H^2 - n_L^2)}{\cos \delta (n_H + n_L)^2 + (n_H^2 - n_L^2)} \right] \quad (7)$$

对于由 N 个基本周期组成的整体膜系, 其特征矩阵为各个基本周期特征矩阵的累乘:

$$M^N = \begin{bmatrix} \cos \Delta & \frac{i}{H} \sin \Delta \\ iH \sin \Delta & \cos \Delta \end{bmatrix}^N = \begin{bmatrix} \cos N\Delta & \frac{i}{H} \sin N\Delta \\ iH \sin N\Delta & \cos N\Delta \end{bmatrix} \quad (8)$$

基底与薄膜组合的特征矩阵为:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos N\Delta & \frac{i}{H} \sin N\Delta \\ iH \sin N\Delta & \cos N\Delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_s \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: B 、 C 为光学薄膜特征运算的过程变量。膜系整体的等效导纳 Y 为:

$$Y = \frac{C}{B} = \frac{n_s \cos N\Delta + iH \sin N\Delta}{\cos N\Delta + \frac{in_s}{H} \sin N\Delta} \quad (10)$$

反射率 R 可以通过膜系整体等效导纳 Y 表示:

$$R = \left(\frac{1-Y}{1+Y} \right) \cdot \left(\frac{1-Y}{1+Y} \right)^* \quad (11)$$

经过上述数值运算, 可以求得膜系整体等效导纳及反射率随波长的变化关系。取高折射率材料 $n_H=2.29$, 低折射率材料 $n_L=1.49$, 基底折射率 $n_s=1.45$, 膜层周期数 $N=8$, 参考波长 $\lambda_0=2000$ nm。膜层的导纳 Y 决定了反射率的振幅, 周期数 N 决定了反射率次峰的数量, H 与 L 两种材料的折射率差值决定了反射率次峰的振幅。膜系的导纳及反射率随波长的变化关系如图 2 所示。

在不考虑基底与薄膜材料色散特性的前提下, 对于波长大于参考波长的谱段, 其导纳 Y 很小, 因此上述膜系结构具有良好的长波宽带减反射效果。对于波长小于参考波长的谱段, 其导纳 Y 的振动幅度加剧, 因此其反射率随波长的变化幅度极为明显。然而, 由于短波方向的干涉峰增多, 理论上可以通过优化膜系结构的方式调整短波方向干涉峰的位置, 实现窄带减反射效果。

进一步调整 N 与 λ_0 的值, 确定最适合激光/长波红外双谱段减反射薄膜的初始膜系结构。接下来构建目标膜系的评价函数。定义评价函数:

$$\text{MeritF} = \sum_{i=1}^k \frac{[R(\lambda_i) - R(\lambda_t)]^2}{k} \quad (12)$$

在 $8\sim 12 \mu\text{m}$ 谱段之内等间隔采样 k 个数据点, 记为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k, \lambda_t$ 为初始膜系在 $8\sim 12 \mu\text{m}$ 谱段之内的反射率极小值点, $R(\lambda)$ 表示膜系在波长 λ 处的反射

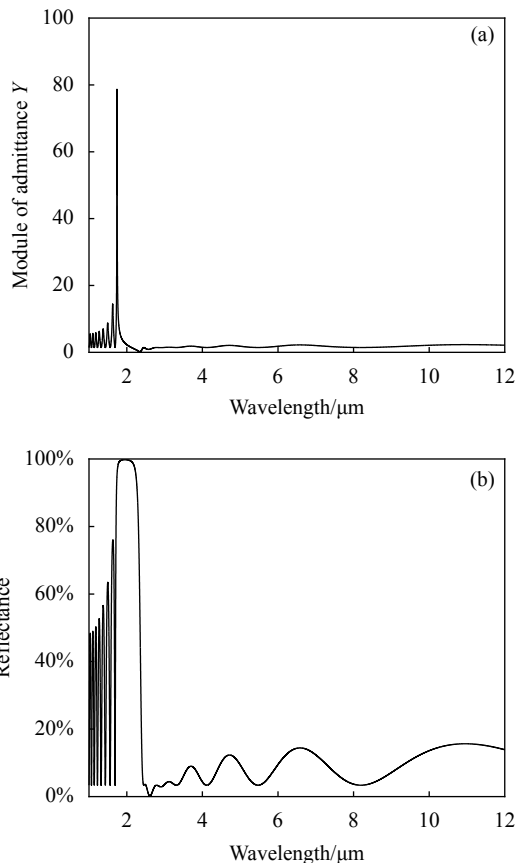


图 2 当 $\lambda_0=2000$ nm, $N=8$ 时 (a) 膜系导纳随波长变化曲线及 (b) 膜系反射率随波长变化曲线

Fig.2 (a) Curve of admittance of thin-film system with wavelength and (b) curve of reflectance of thin-film system with wavelength when $\lambda_0=2000$ nm and $N=8$

率。使用 MATLAB 软件编写程序计算膜系的反射光谱极小值点 λ_t 的位置, 并计算各个波长下的反射率 $R(\lambda_1), R(\lambda_2), \dots, R(\lambda_k)$ 与 $R(\lambda_t)$, 求解评价函数。评价函数的值越小, 则初始膜系的反射率极小值点更接近目标谱段中心。优化过程中取 $k=100$ 。为了降低制备难度, 周期数不宜过多, 选择 $N=8$; 为了防止膜层总厚度过厚, 参考波长不宜过大, 选择 $\lambda_0 \leq 1500$ nm。经过拟合求解, 得到参考波长 $\lambda_0=1259$ nm。此时膜系的导纳及反射率随波长变化曲线如图 3 所示, 膜系在 $8\sim 12 \mu\text{m}$ 长波红外谱段具有良好的初始反射率。

随后将薄膜材料的色散特性加入膜系设计中, 使用 Essential Macleod 软件对初始膜系进行优化。考虑到 BaF_2 基底与 YbF_3 之间的结合性更好, 故选择在基底上首先沉积一层很薄的 YbF_3 层。对于 1064 nm 激光, 考虑到沉积过程中引起工艺参数不稳定的环境因素, 应在膜系设计时考虑一定的工艺容差, 在 1064 nm

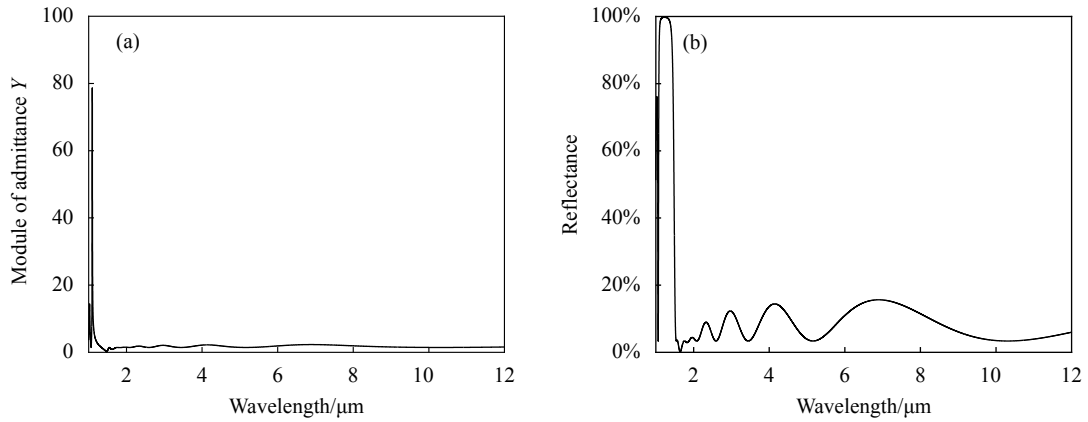


图 3 当 $\lambda_0=1259\text{ nm}$, $N=8$ 时 (a) 膜系导纳随波长变化曲线及 (b) 膜系反射率随波长变化曲线

Fig.3 (a) Curve of admittance of thin-film system with wavelength and (b) Curve of reflectance of thin-film system with wavelength when $\lambda_0=1259\text{ nm}$ and $N=8$

波长附近设置不少于 80 nm 的透射带宽。当膜层沉积厚度过厚时将导致膜层累计应力大,膜层稳定性差,引发脱膜问题;而当膜层沉积厚度过薄时,因膜层初始沉积速率不稳定,将导致膜层沉积厚度不稳定,引发光学性能下降等问题。基于上述考量,在优化过

程中对膜层厚度的变化范围加以约束,设置膜层最大厚度为 550 nm,最小厚度为 30 nm。由于初始膜系具有良好的长波通特性,该初始膜系更容易收敛至目标结果。经优化后,膜系在 1064 nm 及 8~12 μm 的反射率及透射率设计曲线如图 4 所示。

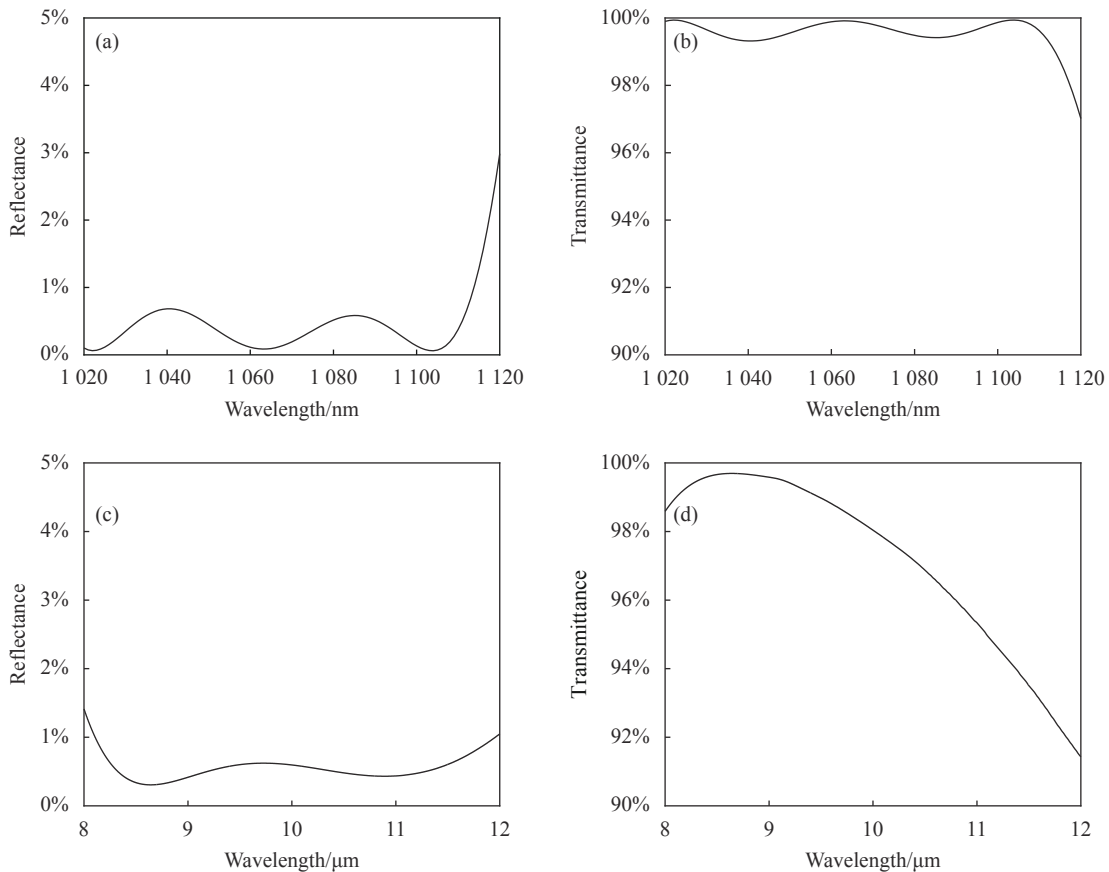


图 4 薄膜在 1064 nm 理论设计光谱 (a) 反射率曲线及 (b) 透射率曲线;薄膜在 8~12 μm 理论设计光谱 (c) 反射率曲线及 (d) 透射率曲线

Fig.4 Spectrum at 1064 nm: (a) Reflectance theoretical curve and (b) transmittance theoretical curve; Spectrum at 8~12 μm : (c) Reflectance theoretical curve and (d) transmittance theoretical curve

对于复合谱段应用背景下的膜系结构,采用文中提出的设计方法所确定的初始膜系开展膜系优化,可快速收敛至目标设计要求,并且没有过厚层与超薄层的存在,降低了制备难度。若采用常规的初始膜系结构直接使用薄膜设计软件开展优化,将导致膜层层数过多、膜层厚度过厚等不良结果,势必会给薄膜制备工艺带来很大的困难;而在设计过程中若对膜层层数与膜层厚度加以限制,薄膜光学性能则难以达到技术要求。因此,文中提出的初始膜系结构对完善复合谱段膜系设计方法具有重要作用。

2 薄膜制备

采用热蒸发离子束辅助沉积的方法制备薄膜。首先使用乙醇和乙醚的混合液对 BaF₂ 基底进行清洗,确保样品表面无污垢、无尘埃粒、无擦痕。将 BaF₂ 基底装入真空室中,烘烤温度设定为 150 °C。到达烘烤温度后将真空室抽至 1×10⁻³ Pa,并保温 2 h。

膜层开始沉积之前,使用霍尔离子源对基底进行二次清洗,可以增强基底与膜层的结合性,也可以起到去除基底表面杂质的作用。为了减小基底后表面引起的反射率损耗,在基板上下表面开展双面镀膜。薄膜沉积过程中的工艺参数如表 2 所示。

表 2 薄膜沉积工艺参数

Tab.2 Film deposition process parameters

Material	Substrate temperature/°C	Deposition rate/Å·s ⁻¹ (1 Å=10 ⁻¹⁰ m)	Ion beam voltage/V
YbF ₃	150	5	140
ZnS	150	8	120

3 测试结果与分析

测试实验样品在 1064 nm 的透射率曲线以及在 8~12 μm 长波红外谱段的透射率曲线,并与参考文献 [16] 的结果加以对比,如图 5 所示。

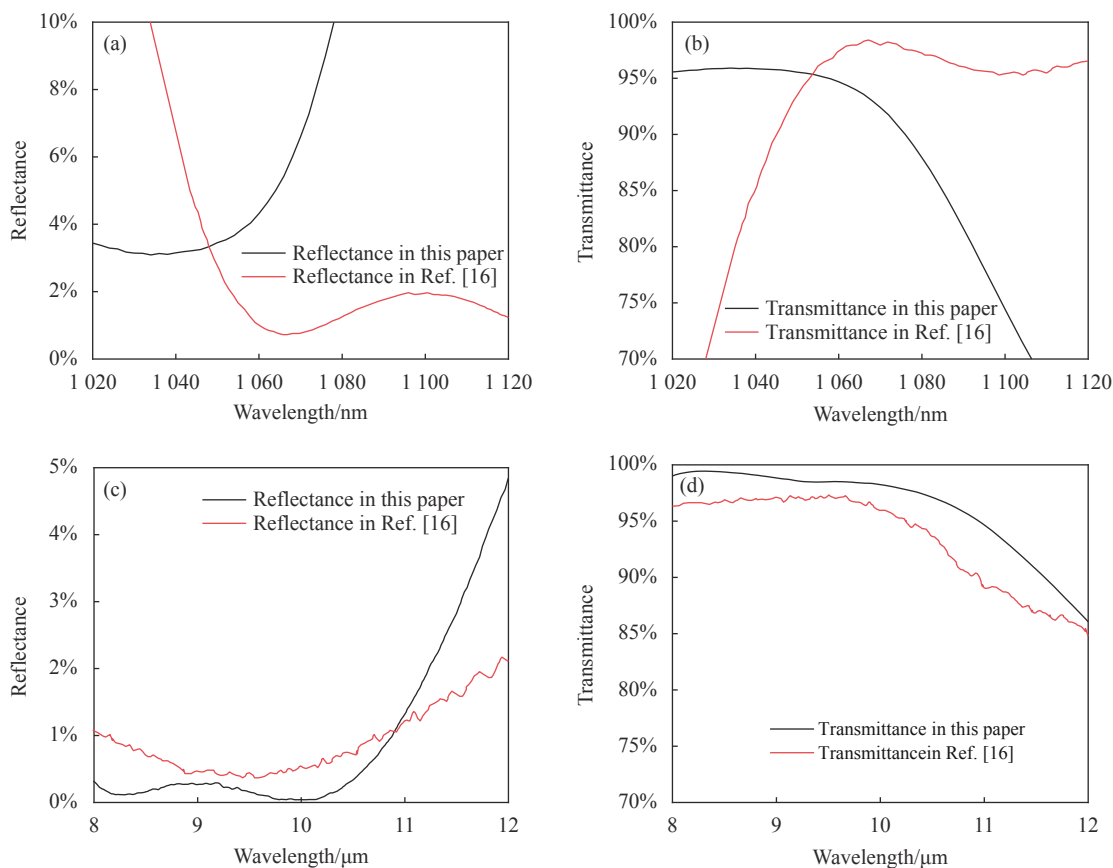


图 5 薄膜在 1064 nm (a) 反射率曲线及 (b) 透射率曲线对比; 薄膜在 8~12 μm (c) 反射率曲线及 (d) 透射率曲线对比

Fig.5 Compared spectrum at 1064 nm: (a) Reflectance test curve and (b) transmittance test curve; Compared spectrum at 8-12 μm: (c) Reflectance test curve and (d) transmittance test curve

测试结果表明,文中所制备的薄膜在8~12 μm 长波红外谱段平均透射率为96.3%,在8.2 μm 处的透射率高达99.4%;1064 nm激光透射率为94.0%。测试结果与设计结果对比,10 μm 之后的透射率下降,这是由于 YbF_3 薄膜材料与 BaF_2 基底材料的吸收增大导致的。在设计时已经将薄膜的剩余反射率控制得足够低,因此膜层在8~12 μm 长波红外谱段的平均透射率满足红外探测的技术要求。与参考文献[16]的结果加以对比,文中制备的薄膜在8~12 μm 长波红外谱段平均透射率比参考文献[16]的结果高约3.6%,而1064 nm激光透射率低3%。分析原因可知,膜层物理厚度的设计结果与经沉积得到的物理厚度实际结果有偏差,所制备的薄膜在1064 nm激光波长附近出现了透射带偏移现象,但在设计时已经考虑了制备工艺容差带来的影响,故1064 nm激光波长处仍然可以保证大于93%的高透射率,满足激光探测的技术要求。后续工作将分析厚度偏差,并优化制备工艺,提升膜系双谱段减反射性能。

4 结 论

文中主要开展了以 BaF_2 为基底的激光/长波红外双谱段减反射薄膜的膜系设计及制备技术研究。考虑到膜系优化过程中初始膜系对最终结果的影响,基于周期对称结构膜系导纳计算方法,提出了复合谱段减反射薄膜初始膜系设计方法。使用热蒸发离子束辅助沉积方法开展薄膜的制备。研制的激光/长波红外双谱段减反射薄膜1064 nm激光透射率为94.0%,在8~12 μm 长波红外谱段平均透射率为96.3%,在8.2 μm 处的透射率高达99.4%,具有良好的光学性能。

参考文献:

- [1] Zhao Jianchuan, Wang Dinan, Chen Changqing, et al. Infrared laser active imaging and recognition [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 795-802. (in Chinese)
- [2] Zhou Guoqing, Tan Yizhi, Zhou Xiang, et al. Measurement method and experiment of large dynamic range energy of pulsed laser with wavelength of 1064 nm and 532 nm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(S2): 20200417. (in Chinese)
- [3] Yuan Shengfu, Luo Wei, Zhong Wei, et al. Performance optimization of mid and far infrared dual-band lasers [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, 32(5): 404-407. (in Chinese)
- [4] Chen Huimin, Liu Weibo, Gu Jian, et al. Design of FMCW laser fuze detecting system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1206004. (in Chinese)
- [5] Song Chuang, Jiang Peng, Duan Lei, et al. Application research of new photoelectric detection technology on precision guided weapons (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20201015. (in Chinese)
- [6] Yang Yi. Design and implementation of signal processor for FMCW millimeter radar fuze [J]. *Application of Integrated Circuits*, 2010, 36(10): 53-56. (in Chinese)
- [7] Wang Huihui, Fu Xuebin, Zhang Ke. Digital signal processing of millimeter wave fuze [J]. *Journal of Detection & Control*, 2014, 36(5): 34-37, 42. (in Chinese)
- [8] He Qigong, Jia Xiaodong. Target detection technology of laser/millimeter wave dual-mode fusion proximity detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 20200361. (in Chinese)
- [9] Chen Xianzhi, Luo Zhenbao, Yang Xu, et al. Design of information processing system for photoelectric seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 20200312. (in Chinese)
- [10] Zuo Wei, Zhou Bohua, Li Wenzhu. Research progress and development analysis of multi-mode and composite precision guidance technology [J]. *Air & Space Defense*, 2019, 2(3): 44-52. (in Chinese)
- [11] Palumbo N F. Guest editor's introduction: Homing missile guidance and control [J]. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, 2010, 29(1): 2-8.
- [12] Palumbo N F, Blauwkamp R A, Lloyd J M. Basic principles of homing guidance [J]. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, 2010, 29(1): 25-41.
- [13] Mi Gaoyuan, Zhang Jianfu, Han Jun, et al. Research on multi-band antireflection films for TV, laser and medium wave infrared [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(5): 593-596. (in Chinese)
- [14] Fu Xiuhua, Sun Bing, Zhang Jing, et al. Development of wavelength separation film for 1064 nm laser and far infrared common window imaging system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(12): 1231001. (in Chinese)
- [15] Yenisoay A, Yesilyaprak C, Ruzgar K, et al. Ultra-broad band antireflection coating at mid wave infrared for high efficient germanium optics [J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(7): 3123.
- [16] Cohen D, Stolov Y, Azran A, et al. Dual- and triple-band AR coatings for IR systems [C]//Proceedings of SPIE, 2013, 8704: 22.
- [17] Zhang Yinhua, Huang Wei, Zhang Yundong, et al. Optical properties of several infrared thin-film materials [J]. *Optical Instruments*, 2006, 28(4): 104-108. (in Chinese)
- [18] Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, et al. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese)