

# ZnS 窗口激光防护/中红外增透膜光热仿真

曹袁睿<sup>1</sup>, 王利栓<sup>1</sup>, 刘华松<sup>1\*</sup>, 杨仕琪<sup>1</sup>, 孙 鹏<sup>1</sup>, 钮信尚<sup>2</sup>

(1. 天津津航技术物理研究所 天津市薄膜光学重点实验室, 天津 300308;  
2. 同济大学先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 激光技术的发展给飞行器红外光学系统带来极大挑战, 而光学窗口是红外光学系统抗激光损伤的最薄弱环节。文中针对 ZnS 光学窗口设计了多层薄膜结构, 使其在提高 3~5  $\mu\text{m}$  波段光学透过率的同时, 具备对 1.06  $\mu\text{m}$  激光的防护能力。首先, 构建了激光作用多层膜的光热响应模型, 并通过仿真计算获得了膜层厚度、折射率和消光系数等参数对光学窗口薄膜的光学性能和热效应的影响关系。研究表明, 以  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  作为多层膜基本膜堆, 当最外三层薄膜物理厚度误差在 -3.3%~3.3% 范围时, 膜基界面温度变化最大为 27  $^\circ\text{C}$ , 1.06  $\mu\text{m}$  波长处反射率和 3~5  $\mu\text{m}$  波段内平均透过率变化均小于 1%, 对多层膜光热性能影响较小; 当两种膜层材料的折射率差值增大时, 膜层内部电场的变化影响了薄膜的吸收率, 使膜基界面温度呈现出先降低后升高的现象; 多层膜的膜基界面温度随膜层材料消光系数提高而升高, 且低折射率材料对激光热效应的影响权重更大。研究结果可以为激光防护/中红外增透多层膜的抗激光损伤设计和制备提供参考。

**关键词:** 激光热效应; 有限元分析; 多层膜; 折射率; 厚度误差

**中图分类号:** O484.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240492

**引用格式:** CAO Yuanrui, WANG Lishuan, LIU Huasong, et al. Photothermal simulation of laser protective/mid-infrared antireflective multilayer on ZnS window[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(5): 20240492.

曹袁睿, 王利栓, 刘华松, 等. ZnS 窗口激光防护/中红外增透膜光热仿真[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(5): 20240492.

## 0 引言

红外光学成像系统是飞行器末段飞行过程中的核心系统。作为红外光学成像系统的薄弱环节, 红外光学窗口在末段飞行过程中易受到外部的干扰和损伤。高能激光具有能量密度大、精准度高的特点<sup>[1-2]</sup>, 在入射到光学窗口时容易对其产生一系列的影响。目前广泛应用的高能激光器通常为可见和近红外激光<sup>[3]</sup>, 对中红外光学窗口造成的损伤主要表现为窗口裂纹、熔化穿孔以及炸裂解理等<sup>[4-5]</sup>。为了提高光学窗口对激光的耐受能力, 已经发展出了基于薄膜材料特性的激光防护技术, 主要包括线性防护、非线性防护和相变防护等, 其中线性激光防护薄膜对单一波长

小角度入射的激光具有很好的防护效果, 是当前主要的激光防护手段<sup>[6-7]</sup>。

线性激光防护技术的主要缺点在于, 防护薄膜自身较低的激光损伤阈值严重影响了其防护性能。因此, 薄膜损伤分析逐渐成为该领域的热点研究方向, 国内外已有许多学者进行了相关的实验和分析, ALEKSEEV 等人<sup>[8]</sup>使用 1.06  $\mu\text{m}$  和 0.53  $\mu\text{m}$  波长的纳秒脉冲激光研究了  $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$  多层膜的损伤情况; 齐文琰等人<sup>[9]</sup>通过热力学相关原理建立了  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  双层增透膜模型, 并在横向和纵向尺度上分析了激光对增透膜造成热损伤的过程; 郑梦珂等人<sup>[10]</sup>基于热传导、热应力和电子增殖理论构建了激光高反膜的模型, 研究了多层膜在纳秒脉冲激光作用下的破坏过

收稿日期: 2024-11-29; 修订日期: 2024-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61975150); 同济大学先进微结构材料教育部重点实验室开放基金项目, 天津市自然科学基金项目 (23JCZDJC00150)

作者简介: 曹袁睿, 男, 硕士生, 主要从事薄膜设计、测试和制备等方面的研究。

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。

程; LIN 等人<sup>[11]</sup>研究了玻璃基底上的多层膜介质光栅激光损伤效应,证明激光脉冲在多层膜的表面电场对其有强烈的破坏作用;李绵等人<sup>[12]</sup>研究了 K9 玻璃基底上的 ZnS 单层膜在 532 nm 激光照射下的损伤过程,证明薄膜折射率的变化可以对激光损伤阈值产生影响;闫磊磊利用磁控溅射的方式在黑玻璃上制备了二氧化硅单层膜并分析了其激光损伤机理<sup>[13]</sup>。王云哲<sup>[14]</sup>等人研究了石英基底上 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 多层膜的脉冲激光损伤机理,证明皮秒和纳秒脉冲激光对多层膜损伤都是由热效应引起的。按照基底类型和多层膜功能分类,目前薄膜激光损伤的研究大多针对于可见光学窗口上的防护膜,其功能也一般为特定波长的激光防护。

相比于可见光学窗口的单波段激光防护膜,红外光学窗口的防护膜需要同时具有激光防护和红外增透的跨波段功能,其激光损伤效应也存在差异。在制备过程中,多层膜结构和材料光学特性等受到多种因素影响,与理论值存在一定误差,有可能对多层膜的光热性能产生影响。文中在 ZnS 光学窗口上设计了具有 1.06 μm 激光防护能力和 3~5 μm 波段增透能力的多层膜结构。利用有限元计算软件建立了多层膜光热响应模型,分析了 ZnS 基底上激光反射/中红外增透多层膜的光学性能和在激光入射时膜基界面温度变化情况,同时研究了多层膜最外三层厚度、膜层材料折射率和消光系数对多层膜光学性能和激光热效应的影响,得到了不同条件下多层膜 1.06 μm 反射率、3~5 μm 平均透过率以及膜基界面温度的变化规律。

## 1 仿真模型的建立

### 1.1 激光作用热响应模型理论

为了研究激光对薄膜的作用,首先需要明确光在薄膜中的传播规律。麦克斯韦方程组描述了光的传播规律,是研究物质对光作用的理论基础。根据麦克斯韦方程组,在均匀介质中平面光波的传播满足如下公式:

$$\nabla^2 E = \frac{N^2}{c^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$N = n - ik \quad (2)$$

式中:  $E$  为电场强度;  $H$  为磁场强度;  $N$  为材料复折射

率;  $c$  为光速。复折射率  $N$  表示光在材料中的传播特性,  $n$  为介质的折射率,  $k$  为介质的消光系数。若光为单色平面光波,则其电场的传播可表示为:

$$E = E_0 \exp\left(-\frac{2\pi kx}{\lambda}\right) \exp\left[i\left(\omega t - \frac{2\pi nx}{\lambda}\right)\right] \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为平面光波的角频率;  $x$  为光传播方向上的距离;  $\lambda$  为光波长,光在介质中传播的损耗由消光系数  $k$  和传播距离决定。

根据能量守恒定律,光在介质中损耗的能量将转化为其它形式,如声能、热能和动能等。在激光对薄膜的作用过程中,激光在薄膜中传播时产生的损耗绝大部分将转化为热量,进而导致薄膜温度升高。多层膜中激光场对材料作用产生热场的过程如下<sup>[15]</sup>:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = (k_i \nabla T) + Q_e \quad (4)$$

$$Q_e = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(J \cdot E^* + i\omega B \cdot H^*) \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为材料的密度;  $C_p$  为恒压热容;  $u$  为法向矢量;  $T$  为介质温度;  $t$  为时间;  $k_i$  为导热系数;  $Q_e$  为激光产生的热量,  $J$ 、 $E$ 、 $B$  和  $H$  分别表示薄膜内损耗电磁场的电流密度、电场强度、磁感应强度和磁场强度。上述公式可以描述激光作用材料产生的热效应,使用有限元方法对公式 (4) 和公式 (5) 进行求解,最终可以得到多层膜在激光作用下的温度变化情况。

### 1.2 激光作用热响应模型的建立

在上述激光作用于材料的热学响应理论中,热效应与激光的入射特性和材料特性密切相关。为了快速获得激光作用多层膜的热学响应规律,对入射激光与材料特性做如下的假设:

1) 多层膜材料的光学和热学特性均为各向同性,光波在入射到介质分界面时仅发生反射和透射,介质内不发生散射;

2) 激光从多层膜的空气侧入射,从基底侧出射,多层膜的辐照面上各点功率密度相同,入射光以固定的角度和相位入射;

3) 多层膜的热效应仅来源于膜层材料对激光的吸收,且多层膜的外表面与外部环境 (20 °C) 进行自由热交换,基底材料和空气无吸收并且假设为热绝缘。

根据假设条件构建的二维多层膜激光热响应模

型示意图如图 1 所示,激光由空气侧入射到多层膜内部,从基底侧出射。激光与膜层相互作用产生的热量由空气侧与外部进行热交换,左侧和右侧边界按照周期性边界条件设置。在对热效应进行仿真分析的过程中,使用的激光参数如表 1 所示。

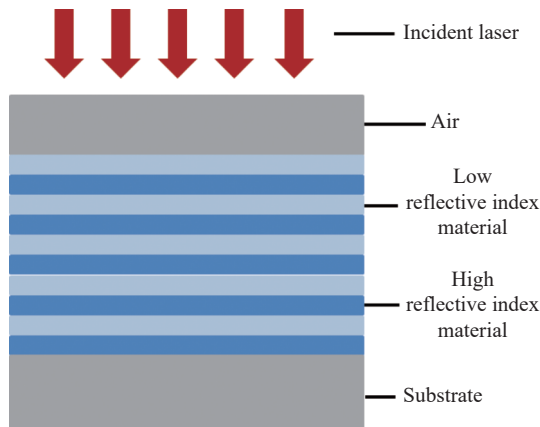


图 1 多层膜激光热响应模型示意图

Fig.1 Structure of multilayer laser thermal response model

表 1 热仿真激光参数

Tab.1 Laser parameter in thermal simulation

Parameters	Value
Working condition	Continous wave
Polarization	Linear polarization
Wavelength/ $\mu\text{m}$	1.06
Incident angle/ $^\circ$	0
Power density/ $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	$5\times 10^9$
Laser spot diameter/ $\mu\text{m}$	8

常见的中波红外光学窗口材料主要有  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgF}_2$ 、 $\text{Si}$  和  $\text{ZnS}$  等,其中  $\text{ZnS}$  材料由于在中长波宽波段范围内都具有较好的光学性能,使用最为广泛。因此,文中选择  $\text{ZnS}$  作为光学窗口基底材料进行膜系结构设计。常见的中波红外膜层材料主要有硫化物、氟化物、硒化物和氧化物等, $\text{ZnS}/\text{YbF}_3$  的材料组合由于具有较大的折射率比值,且膜层之间结合的力学稳定性好,是中红外常用的膜层材料组合之一;而  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  的材料组合具有优异的热稳定性和抗激光损伤能力,在高功率激光系统中得到广泛应用。因此,文中分别选择  $\text{ZnS}/\text{YbF}_3$  和  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  组合作为薄膜材料进行多层膜设计。以  $\text{Sub}|(0.5\text{HL}0.5\text{H})^{13}\text{L}|Air$  为初始膜系结构进行优化,其中 Sub 表示  $\text{ZnS}$  基底, Air 表示空气, H 和 L 分别表示高折射率和低折射率材料的  $1/4$  波长光学厚度。在模型构建过程中使用的材料参数如表 2 所示,其中基底  $\text{ZnS}$  材料与薄膜  $\text{ZnS}$  材料的光学性能有所差异。最终在两种材料体系上分别设计出了具有  $1.06\ \mu\text{m}$  高反射,  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  增透功能的多层膜,膜系结构如表 3 所示,其中  $\text{ZnS}(\text{Substrate})$  表示  $\text{ZnS}$  基底材料的性能,其余均为薄膜的材料性能。由于  $\text{ZnS}$  基底通常使用热压法或化学气相沉积法制备,与  $\text{ZnS}$  薄膜的制备工艺存在较大差别,因此两种材料的光学性能存在一定差异。构建的多层膜几何模型与网格分情况如图 2 所示。在模型构建过程中,多层膜和基底的宽度均为  $8\ \mu\text{m}$ ,  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  多层膜总厚度为  $4.99\ \mu\text{m}$ ,  $\text{ZnS}/\text{YbF}_3$  多层膜总厚度为  $3.87\ \mu\text{m}$ ,  $\text{ZnS}$  基底厚度为  $10\ \mu\text{m}$ 。

表 2 模型材料参数<sup>[16-17]</sup>

Tab.2 Material parameters of model<sup>[16-17]</sup>

Materials	$\text{HfO}_2$	$\text{SiO}_2$	$\text{ZnS}$	$\text{YbF}_3$	$\text{ZnS}(\text{Substrate})$	$\text{Y}_2\text{O}_3$
Reflective index	1.92	1.46	2.28	1.45	2.28	1.74
Extinction coefficient	$6.9\times 10^{-5}$	$1.2\times 10^{-5}$	$1.6\times 10^{-5}$	$9.3\times 10^{-6}$	$1\times 10^{-5}$	$1\times 10^{-5}$
Density/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	9680	2680	4080	8200	4080	5200
Heat capacity/ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	310	754	468	854	468	249
Thermal conductivity/ $\text{W}\cdot\text{m}\cdot\text{K}$	1.3	27	16.7	27	16.7	27

表 3  $\text{ZnS}$  基底上的多层膜系结构

Tab.3 Multilayer structure on  $\text{ZnS}$  substrate

Substrate	$\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$	$\text{ZnS}/\text{YbF}_3$
$\text{ZnS}$	$\text{Sub} 4.01\text{H}1.07\text{L}1.36\text{H}(\text{LH})^9 0.79\text{L}1.64\text{H}4.35\text{L} Air$	$\text{Sub} 0.48\ \text{H}0.65\ \text{L}2.01\ \text{H}(\text{LH})^9 0.23\ \text{L}0.51\ \text{H}4.05\ \text{L} Air$

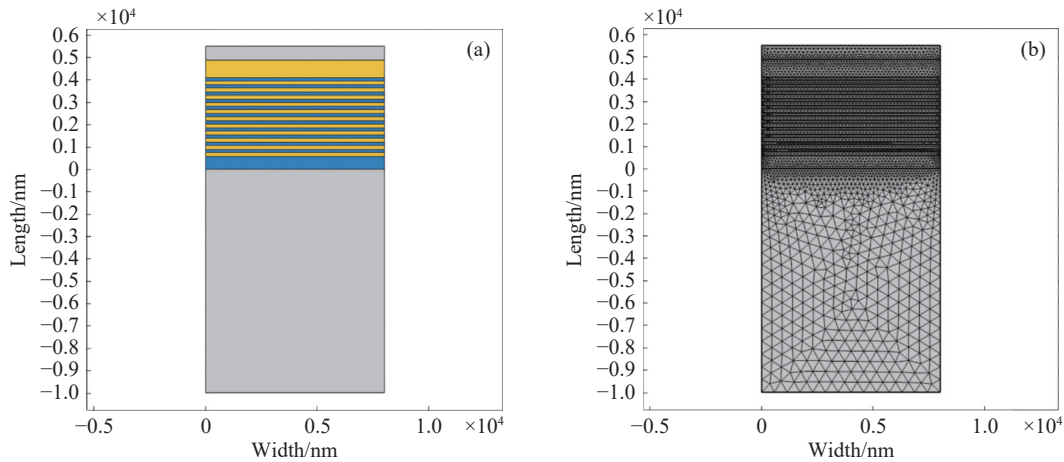


图 2 多层膜激光热响应模型。(a) 几何模型; (b) 网格划分

Fig.2 Multilayer laser thermal response model. (a) Geometrical model; (b) Model mesh

上述两种多层膜结构在 0.8~5 μm 波段的光谱透过率曲线如图 3 所示。HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 多层膜在 1.06 μm 反射率为 99.5%, 3~5 μm 波段内平均透过率为 98.2%; ZnS/YbF<sub>3</sub> 多层膜在 1.06 μm 反射率为 99.8%, 3~5 μm 波段内平均透过率为 99.1%。ZnS/YbF<sub>3</sub> 材料组合具有更宽的反射带宽, 且在 3~5 μm 波段范围内的平均透过率更高, 结果如图 3 所示。下面将对两种薄膜材料体系的激光作用热响应特性进一步对比分析。

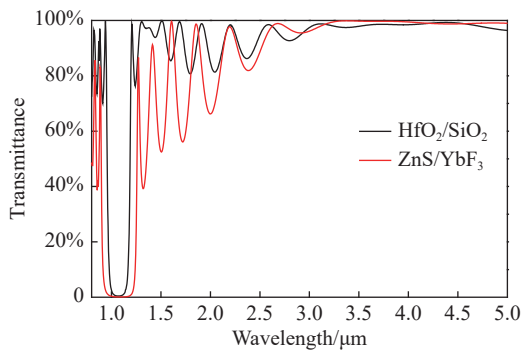


图 3 不同多层膜的光谱透过率曲线

Fig.3 Transmittance of different multilayers

## 2 仿真结果与分析

### 2.1 两种薄膜材料体系的激光热效应分析

不同膜层材料及其组成的膜系结构, 将导致多层膜的激光热效应产生较大差异, 从而影响多层膜对光学窗口的防护性能。利用上述构建的激光作用热响应模型, 计算了 ZnS/YbF<sub>3</sub> 和 HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 两种多层膜结

构在 1.06 μm 激光作用下的膜基界面温升情况, 结果如图 4 所示。

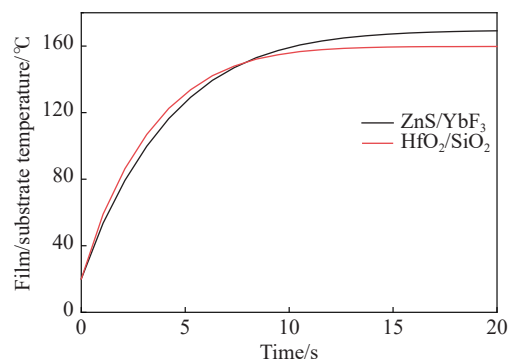


图 4 不同多层膜在激光照射下的膜基界面温度

Fig.4 Film/substrate temperature of different multilayers under laser irradiation

两种多层膜结构的激光热效应计算结果表明, 在激光照射的 20 s 内, HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 多层膜的温升速率略高于 ZnS/YbF<sub>3</sub>, 但该膜系结构达到热平衡的时间更短, 且热平衡后的温度更低。结合图 3 对两种结构光学性能的分析, 虽然 ZnS/YbF<sub>3</sub> 多层膜结构的光学性能略优于 HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>, 但考虑激光与膜层相互作用的效应时, HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 多层膜结构在热效应方面更具有优势。因此选择 ZnS 基底上的 HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 多层膜结构进行激光防护能力的分析。

### 2.2 不同膜系结构对光学窗口防护能力分析

当前光学窗口通常使用单层膜或双层膜作为防护膜, 其功能也仅为工作波段增透或对风沙环境的防

护等。为了对比不同膜系结构对光学窗口的激光防护效果,分别建立了无防护膜、单层防护膜和多层防

护膜三种结构的激光热响应模型,仅针对光学窗口的温升进行分析。三种结构和功能如表4所示。

表4 三种激光热响应模型结构

Tab.4 Three laser thermal response model structures

Structure	Component	Stack formula
Structure 1	ZnS substrate	-
Structure 2	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> single layer on ZnS substrate	Sub 575 nmY <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  Air
Structure 3	HfO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> multilayers on ZnS substrate	Sub 0.48H0.65L2.01H(LH) <sup>0</sup> .23L0.51H4.05L Air

对上述三种结构在激光连续照射下光学窗口的温升情况进行计算,结果如图5所示。计算结果表明,在激光开始照射的5 s时间内,结构1中光学窗口温升速率最高,结构3的光学窗口温升速率最低;达到热平衡后,三种结构的光学窗口温度分别为310、282、159 °C。在激光作用的过程中,薄膜和光学窗口对激光的吸收均会导致温度升高,不同结构温升差异显著的原因在于对1.06 μm激光的透过率差异。结构1和结构2对激光的反射较弱,使高强度的激光能量入射到光学窗口内,导致温度提升明显。从激光热效应角度考虑,结构2和结构3均能够起到降低光学窗口热效应的作用,且结构3的效果更加明显。

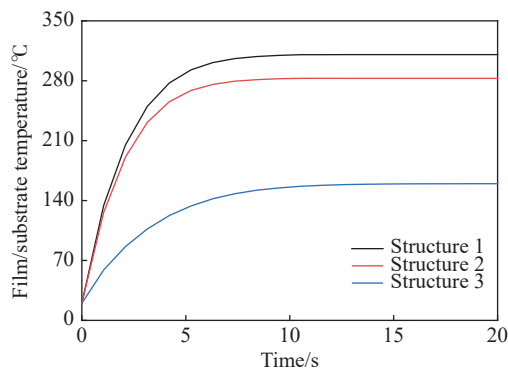


图5 不同结构下光学窗口温度随时间变化情况

Fig.5 Optical window temperature over time under different structures

### 2.3 影响多层膜光学性能和激光热效应的因素

在薄膜制备过程中,由于薄膜的沉积速率和光学常数影响因素众多,膜层的物理厚度、折射率和消光系数与理论值通常会存在一定偏差。仍然以 ZnS 基底上的 HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 多层膜结构为例,通过变量分离误差分析方法,研究了膜层厚度和光学常数误差对多层

膜光学性能和激光热效应的影响。

#### 2.3.1 膜层厚度误差影响分析

在膜系设计时,主要通过优化多层膜最外三层进行厚度来进行结构匹配,从而实现高反和增透等功能。因此通过改变最外三层薄膜的物理厚度,研究其对多层膜的光学性能和激光热效应的影响。假设最外三层厚度的误差系数  $f_d$  的变化范围为-10%~10%,数据点间隔为2%。计算厚度误差系数  $f_d$  对膜基界面温度、光学性能的影响,1.06 μm 反射率和 3~5 μm 平均透过率结果如图6所示。当最外三层厚度比理论值高10%时,膜基界面温度将提高至1.88倍,1.06 μm 反射率下降0.5%,3~5 μm 平均透过率下降0.2%。当最

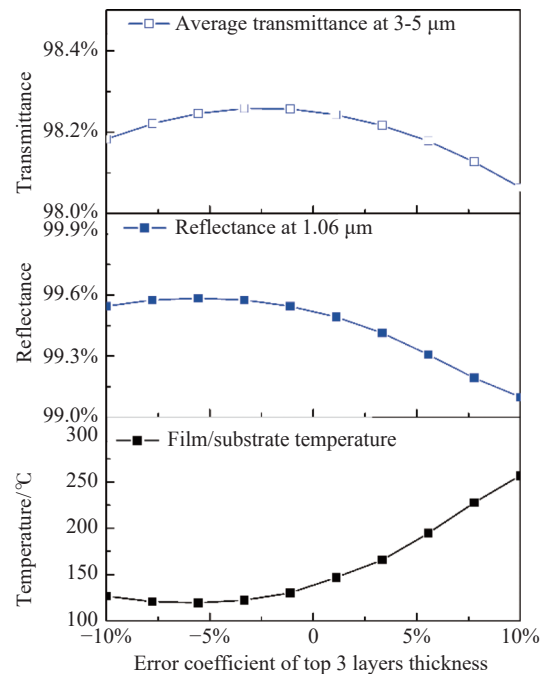


图6 最外三层厚度误差系数  $f_d$  对光热性能的影响

Fig.6 Effects of top three layer thickness error  $f_d$  on optical and thermal performance

外侧三层厚度变化时,膜系优化得到的激光反射结构和中红外增透膜系发生失配,导致多层膜在 1.06 μm 的反射率和中红外透过率下降,进而导致入射到光学窗口的激光能量增大,光学窗口热效应增强,导致膜-基界面的温度升高。

当  $f_d$  变化范围在  $\pm 3.3\%$  内时,膜基界面温度变化最大为 27 °C, 1.06 μm 反射率的变化最大为 1%, 3~5 μm 平均透过率变化最大为 0.4%, 此时,最外三层的物理厚度误差对多层膜的光学性能和激光热效应影响可忽略不计。

### 2.3.2 膜层材料折射率误差影响分析

为了研究膜层折射率对光学性能和激光热效应的影响,假设 HfO<sub>2</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 的折射率误差系数  $f_H$  和  $f_L$  变化范围均为  $-10\% \sim 10\%$ , 数据点间隔为 2%, 当  $f_H$  变化时, SiO<sub>2</sub> 的折射率固定为 1.46; 当  $f_L$  变化时, HfO<sub>2</sub> 的折射率固定为 1.92。

计算折射率误差系数对膜基界面温度、光学性能的影响, 1.06 μm 反射率和 3~5 μm 平均透过率结果如图 7 所示。

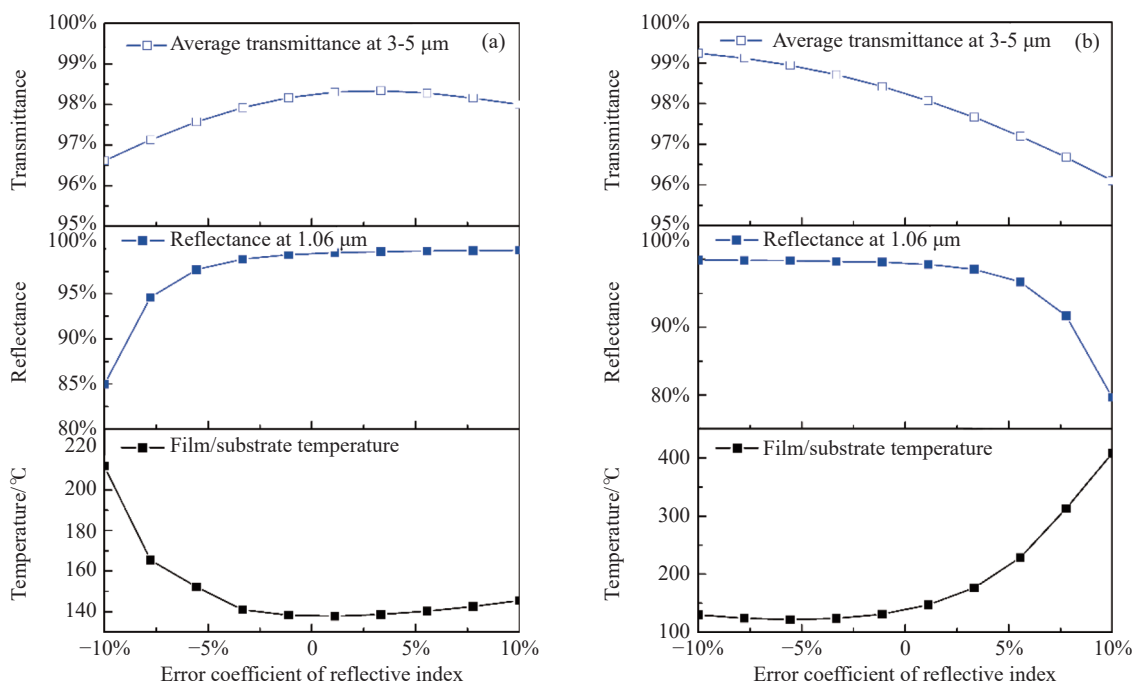


图 7 (a)HfO<sub>2</sub> 折射率误差  $f_H$  对多层膜光热性能的影响; (b)SiO<sub>2</sub> 折射率误差  $f_L$  对光热性能的影响

Fig.7 (a) Effects of refractive index error  $f_H$  on optical and thermal performance; (b) Effects of refractive index error  $f_L$  on optical and thermal performance

从图 7 中可以看出,膜层材料折射率误差对多层膜的光学性能和激光热效应也均产生了影响。当 HfO<sub>2</sub> 的折射率比理论值低 10% 时,膜基界面温度提高至 211 °C,为理论值的 1.56 倍,在 1.06 μm 处的反射率下降了 14.43%,在 3~5 μm 的平均透过率下降了 1.7%;当 SiO<sub>2</sub> 的折射率比理论值高 10% 时,膜基界面温度提高至 408 °C,为理论值的 2.95 倍,在 1.06 μm 处的反射率下降了 19.75%,在 3~5 μm 的平均透过率下降了 2.1%。当一种材料折射率变化时,固定另一种材料折射率,两者之间产生的折射率差值对膜基界面

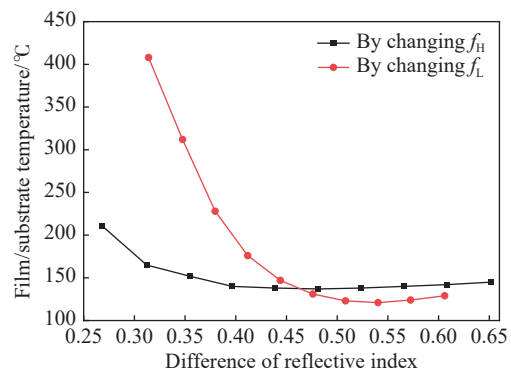


图 8 不同情况下的折射率差值与膜基界面温度关系

Fig.8 Relationship between difference of refractive index and film/substrate temperature under different condition

的影响情况如图 8 所示。可以看出,在不同情况下,随着折射率差值的提高,膜基界面温度均表现出降低后升高的现象。

决定膜基界面温度的因素可以分为材料吸收系数和激光能量强度两部分,折射率变化将会导致多层膜对电场调控情况发生变化,影响多层膜内的电场强度分布,进而影响多层膜的吸收。不同折射率差值对多层膜在 1.06 μm 处吸收的影响如图 9 所示,随着折

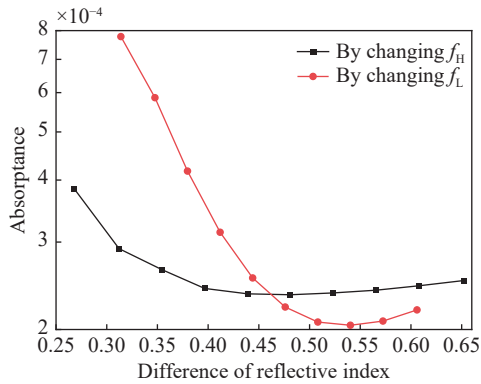


图 9 不同情况下折射率差值与吸收率的关系

Fig.9 Relationship between difference of reflective index and film absorbance under different condition

射率差值的提升,尽管消光系数没有变化,多层膜的吸收率仍呈现出先减小后增大的趋势,与膜基界面温度变化趋势相似。

结合图 7 和图 9,当折射率差值减小时,由于反射率降低使进入光学窗口的能量增大,进而导致窗口的热效应增强,产生明显温升;而折射率差值增大时,膜层内部电场强度被改变,使吸收较大的最外低折射率层内电场变大,薄膜的吸收增大,使膜基界面温度提高。

$f_H$  在  $\pm 3.3\%$  范围内变化时,膜基界面温度与理论值相比最大偏差为 4 °C, 1.06 μm 反射率和 3~5 μm 平均透过率最大偏差分别为 0.8% 和 0.4%,可以认为折射率误差在 3.3% 以内时,对多层膜光学性能和激光热效应的影响并不明显。

### 2.3.3 膜层材料消光系数影响分析

在其他材料参数不变的条件下,设置 HfO<sub>2</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 膜层消光系数  $k_H$  和  $k_L$  的变化范围为  $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ ,在该范围内等间隔选取 10 个点,计算膜层材料消光系数对膜基界面温度和光学性能的影响。消光系数对膜基界面温度以及 1.06 μm 反射率和 3~5 μm 平均透过率的影响结果如图 10 所示。

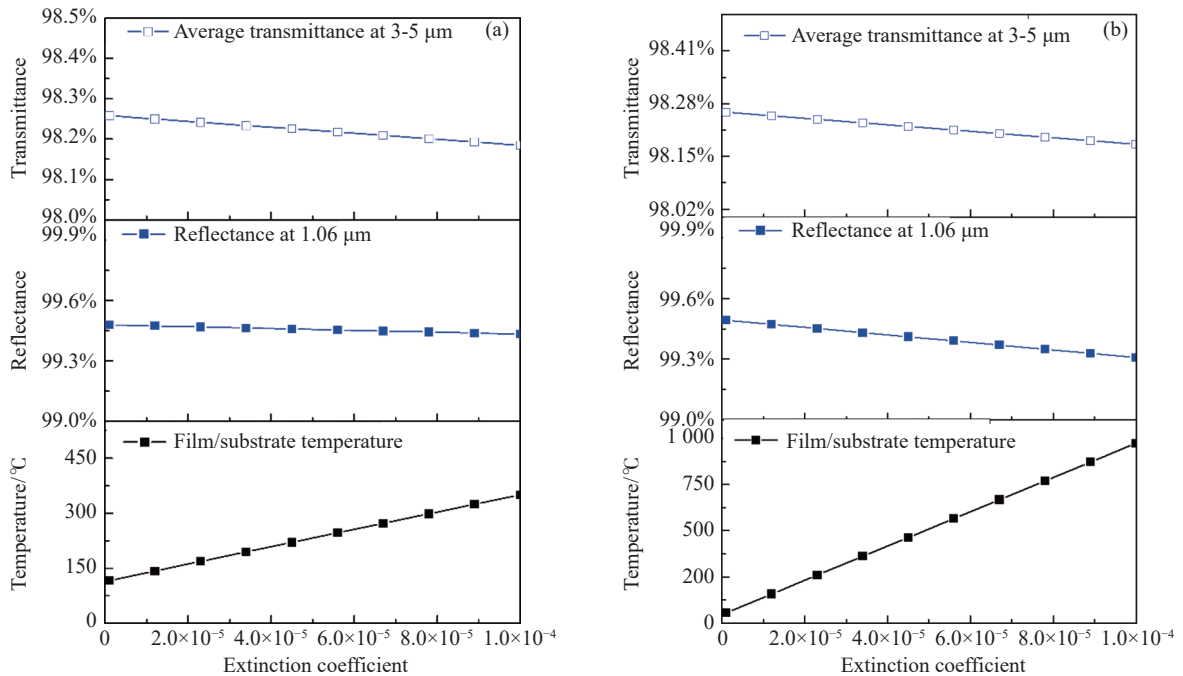


图 10 (a) HfO<sub>2</sub> 消光系数  $k_H$  对多层膜光热性能的影响; (b) SiO<sub>2</sub> 消光系数  $k_L$  对多层膜光热性能的影响

Fig.10 (a) Effects of extinction coefficient  $k_H$  on optical and thermal performance; (b) Effects of extinction coefficient  $k_L$  on optical and thermal performance

膜层材料消光系数的增加将直接导致膜基界面温度的升高。对比薄膜的光学性能,由于反射率变化极小,膜基界面升温的主要原因是薄膜的激光热效应而非光学窗口的热效应。根据公式(4),当消光系数增大时,多层膜对激光的吸收将增大,导致膜基界面的温度提高。当 $k_H$ 提高两个数量级时,膜基界面温度升高一倍;当 $k_L$ 提高两个数量级时,膜基界面温度升高一个数量级。因此,在膜层制备过程中通过降低膜层材料消光系数抑制多层膜温度升高,是提高ZnS光学窗口多层膜抗激光损伤能力的有效手段之一。且计算结果表明,低折射率材料消光系数的降低对膜基界面的热效应影响权重更大。

### 3 结论

文中设计了ZnS光学窗口激光反射/红外增透多层膜结构,在实现中波红外增透功能的同时,可有效提高对1.06  $\mu\text{m}$ 激光的防护能力,利用有限元软件进行了光学性能和激光热效应的仿真计算,并着重分析了多层膜结构和材料参数对薄膜激光作用热相应的影响。研究表明,多层膜最外侧三层的厚度变化时会导致膜基界面温度变化,总体上表现为反射率越低,膜基界面温度越高;当膜层材料折射率差值提高时,多层膜的吸收率将发生变化,导致膜基界面温度呈现先降低后增高的趋势;当膜层材料的消光系数升高时,多层膜的温度将会明显提升,且低折射率材料的消光系数对温度的影响较高折射率材料更大。激光作用热效应的强弱由材料内激光强度和材料对激光的吸收能力同时决定,当膜层厚度和材料折射率变化时,内部激光能量将会发生改变,进而导致吸收和产热产生变化;而消光系数的变化将直接影响多层膜对材料的吸收能力。因此,当三者发生变化时,多层膜的温度均会受到一定的影响。文中的研究内容可对激光防护/中红外增透膜的设计和 optimization 具有一定指导意义。

#### 参考文献:

- [1] ZHONG Zhong. Development of US hypersonic defense system [J]. *Modern Defence Technology*, 2023, 51(5): 25-30. (in Chinese)
- [2] DING Yu, YANG Ju, ZHENG Rongshan, et al. Analysis of Peresvet laser weapon system in Russian in-depth [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2020, 35(5): 6-12. (in Chinese)
- [3] CHEN Junyan, LIAO Longwen, ZENG Peng. Development analysis of American anti-satellite ground-based laser weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S1): 20190352. (in Chinese)
- [4] YOUNIS A Y, MOHAMMAD T Y, KHALED K M. A review of multilayer thin film filter in the infrared region[C]//2022 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications, 2022.
- [5] NI Yaru, LU Chunhua, XU Zhongzi, et al. Study on the laser induced damage and the enhancing methods for optical materials [J]. *Laser Journal*, 2005, 26(5): 18-20. (in Chinese)
- [6] LI Yangliang, YE Qing, WU Yunlong, et al. Research progress of laser protection technology for optoelectronic imaging system (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(6): 20230192. (in Chinese)
- [7] XIONG Yuqing, LUO Chongtai. Laser protection thin film for satellite-borne remote sensing instrument [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 902-905. (in Chinese)
- [8] ALEKSEEV V N, SVECHNIKOV M B, CHERNOV V N. Damage to multilayer dielectric coatings by nanosecond laser pulses[J]. *Kvantovaya Elektron*, 1985, 12: 729-738.
- [9] QI Wenyan, SU Junhong. Analysis and simulation of laser-induced thermal damage of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> thin film [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2023, 21(1): 94-101. (in Chinese)
- [10] ZHENG Mengke, LI Jie, ZHANG Rongzhu, et al. Analysis and simulation on damage characteristics of multilayer optical film by pulsed laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 0131001. (in Chinese)
- [11] LIN Xiangkun, ZHAO Yuan'an, LIU Xiaofeng, et al. Nanosecond laser damage characteristics of multilayer dielectric films and gratings [C]//SPIE, 2021, 11912: 1191200.
- [12] LI Mian, XU Junqi, WANG Jian. Spectral transmission and laser damage characteristic of ZnS thin films irradiated by laser at 532 nm wavelength [J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2019, 39(4): 388-393. (in Chinese)
- [13] YAN Leilei. Research on laser damage of silicon dioxide films prepared by magnetron sputtering[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [14] WANG Yunzhen, ZHANG Luwei, SHAO Junfeng. Damage effect of pulsed laser on Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> filter film on quartz substrate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 20220482. (in Chinese)



- [15] LIU Zhiwei, LU Yuan, HOU Dianxin, et al. Temperature field distribution and transmittance characteristics of VO<sub>2</sub> Film Irradiated by Laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(11): 1604-1612. (in Chinese)
- [16] ZHANG Yinhua, HUANG Wei, ZHANG Yundong. Mechanical properties of YbF<sub>3</sub> thin film deposited by thermal evaporation [J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2008, 20(8): 1306-1308. (in Chinese)
- [17] GUAN Xiangyu. Molecular dynamics simulation and experimental study on thermal properties of HfO<sub>2</sub> Thin Films[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)

## Photothermal simulation of laser protective/mid-infrared antireflective multilayer on ZnS window

CAO Yuanrui<sup>1</sup>, WANG Lishuan<sup>1</sup>, LIU Huasong<sup>1\*</sup>, YANG Shiqi<sup>1</sup>, SUN Peng<sup>1</sup>, NIU Xinshang<sup>2</sup>

(1. Tianjin Key Laboratory of Optical Thin Film, Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China;

2. Key Laboratory of Advanced Micro-Structure Materials, Tongji University, Shanghai 200092, China)

### Abstract:

**Objective** Infrared optical system is vital for aircraft in the terminal stage. As a fragile part of optical system, optical windows are under the threat of external environment, which could bring interference and damage to the windows. With the development of laser theory and technology, laser protection becomes more and more important for infrared optical windows. Laser protection can be sorted as linear protection, nonlinear protection, phase transition protection and so on. Among those protection methods, linear protection has the characteristic of low-cost and high performance on small angles incident, which is suitable for optical windows in the terminal stage. Linear protection method usually includes multilayers which have high reflectivity during the wave band of laser. Due to the small scale, high reflective films have lower laser damage endurance. Thus the laser induced damage theory of thin film is widely discussed around world. The relevant study about high laser induced damage threshold thin film is usually on single layer and double layers, also the film material is in visible band. It's important to know the laser damage of laser protective multilayer for infrared optical window. Therefore, the laser thermal effect and optical characteristic of a laser protective/mid infrared anti-reflective multilayer is studied.

**Method** A model of laser damage on laser protective/mid infrared anti-reflective multilayer is establish (Fig.1) with the help of finite element analysis method. Using two couples of material HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> and ZnS/YbF<sub>3</sub>, two types of multilayers are designed on ZnS optical window substrate. By comparing the optical performance and laser thermal effect(Fig.3-Fig.4), the multilayer structure of HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> is used for further study. Single variable method is chosen and the effect of thickness, reflective index and extinction coefficient of layer material on multilayer is studied.

**Results and Discussions** By comparing infrared window without protection, infrared window with single layer coating and infrared window with laser protective/mid infrared anti-reflective multilayer coating, the result shows that laser protective/mid infrared antireflective multilayer can reduce the temperature of optical window when laser incident. The analysis of HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> multilayer concludes three parts: thickness of top three layers, reflective index of HfO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub>, extinction coefficient of HfO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub>. All three variables can influence the temperature of multilayer, reflectance at 1.06 μm and average transmittance during 3-5 μm. When the error of thickness of top three layers goes to 10% larger than the ideal value, temperature of multilayer grows to 88% higher, reflectance at 1.06 μm becomes 0.5% lower and average transmittance during 3-5 μm becomes 0.2% lower. When the error of

reflective index of  $\text{HfO}_2$  goes to 10% smaller than the ideal value, temperature of multilayer grows to 55% higher, reflectance at  $1.06 \mu\text{m}$  becomes 14.4% lower and average transmittance during  $3\text{-}5 \mu\text{m}$  becomes 1.7% lower. The result shows that film/substrate temperature grows one order of magnitude higher when extinction coefficient  $k_L$  grows two orders of magnitude higher. When the extinction coefficient of  $\text{SiO}_2$  grows  $1 \times 10^{-5}$  larger, the temperature becomes 93 degrees larger, meanwhile the temperature becomes 25 degrees larger for  $\text{HfO}_2$  at the same condition.

**Conclusions** When preparing optical multilayers, there always have error on structure and material properties. By establishing finite element analysis model about laser protective/mid infrared anti-reflective multilayer on ZnS substrate, thickness, reflective index and extinction coefficient are studied to confirm the relationship with multilayer laser thermal effect and optical properties. At the range of  $-3\%$ - $3\%$ , influence of thickness and reflective index error on temperature and optical properties can be ignored. By comparing two materials, the change of temperature caused by extinction coefficient of  $\text{SiO}_2$  is much stronger than  $\text{HfO}_2$ , which mean that reducing the extinction coefficient of  $\text{SiO}_2$  is a good way to reduce laser thermal effect and advance the ability to endure laser attack. The study can provide an idea for designing laser protective and mid infrared antireflective multilayer with high induced laser damage threshold.

**Key words:** laser thermal effect; finite element analysis; multilayer; reflective index; thickness error

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (61975150); Open Subject Fund of Key Laboratory of Advanced Microstructure Materials of Tongji University, Natural Science Foundation of Tianjin (23JCZDJC00150)