

低发射率薄膜的红外隐身特性研究

刁训刚 郝维昌 王天民 武哲 黄俊

(北京航空航天大学, 北京 100083)

文 摘 利用磁控溅射法制备了氧化铟锡(ITO)、掺铝氧化锌(ZAO)、 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 纳米多层等三种透明的低发射率薄膜。研究了这些低发射率薄膜以及降低材料红外发射率对降低红外辐射强度和红外隐身所起的作用。结果表明:降低红外发射率可以有效地抑制由于温度升高所带来的附加红外辐射;低红外发射率薄膜在红外隐身中有潜在应用价值。

关键词 低发射率, 红外隐身, 薄膜

Infrared Stealth Properties of Low Emissivity Thin Films

Diao Xungang Hao Weichang Wang Tianmin Wu Zhe Huang Jun

(Beihang University, Beijing 100083)

Abstract Three kinds of transparent low-emissivity thin films, i. e. indium-tin oxide (ITO), aluminum-doped zinc oxide (ZAO) and $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ nano-multilayers, are prepared by magnetron sputtering. Effects of low infrared emissivity materials on restriction of object infrared radiation are analyzed theoretically and experimentally. The results show that lowering infrared emissivity is an effective measure to restrain additive infrared radiation caused by temperature rise. The low emissivity thin films are promising to play an important role in infrared stealth field.

Key words Low emissivity, Infrared stealth, Thin films

1 前言

雷达隐身、红外隐身、全频段隐身、智能化隐身是先进国家竞相研究的武器装备新技术^[1~3]。红外隐身在我国处于起步阶段,依据背景的不同,红外隐身应采取两种措施。对于空天飞行器,背景环境在 3 ~ 25 μm 波段的红外辐射强度很弱,应以降低隐身对象在可探测红外波段或通常的两个大气窗口 3 ~ 5 μm 和 8 ~ 14 μm 波段的绝对红外辐射强度为目标;对于地面目标,其红外辐射特征非常复杂,应以红外迷彩为目标,而不是单纯降低其红外辐射强度。本文以降低红外辐射强度为目标,讨论降低红外发射率在降低或抑制红外辐射强度中所起的作用,从而寻求一种红外隐身的新途径。

2 低发射率薄膜的红外隐身机理

降低绝对红外辐射强度有两个途径:降低目标表面材料的红外发射率和绝对温度。根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律^[4]:

$$M = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

式中, M 为物体的热红外辐射能量, ε 为材料的红外辐射率, T 为材料表面的绝对温度。 $\sigma = 5.673 \times 10^{-12} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4)$, 称为斯蒂芬-玻尔兹曼常数。物体在温度 T 下的单色辐出度 $M(\lambda, T)$ 为:

$$M(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{e^{hc/(\lambda k_B T)} - 1} \quad (2)$$

式中, λ 为波长, T 为材料表面的绝对温度, $\varepsilon(\lambda, T)$ 为材料在温度为 T 时的光谱发射率, h 为普朗克常数, k_B 为玻尔兹曼常数, c 为光速。对于黑体, $\varepsilon(\lambda, T)$ 等于 1。由(2)式得到的黑体辐射能量随红外光频率的变化规律见图 1。随着温度的升高,物体红外热辐射峰值向低频段方向移动。可以针对隐身目标的温度特征,选取不同的红外波段而采取不同的隐身措施。比如固定翼飞行器的蒙皮表面温度在 300 ~ 400 K, 考虑到大气传输的影响,其红外威胁主要来自 8 ~ 14 μm 波段。在尾喷口附近,温度可达到 1 200 K,其红外威胁主要来自于 3 ~ 5 μm 波段。目前,通用红外探测器和红外

收稿日期:2007-06-25;修回日期:2007-08-03

基金项目:国家自然科学基金资助(90305026)

作者简介:刁训刚,1965 年出生,副教授,主要从事功能薄膜材料的研究工作

成像仪的可视探测波段也主要集中在这两个频段。

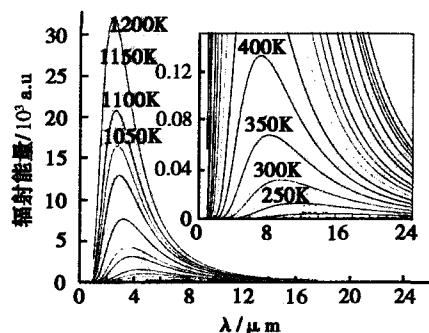


图1 黑体红外热辐射能量与红外波长的关系

Fig. 1 Wavelength dependence of infrared radiation energy from black body surface

不同红外发射率材料的红外辐射能流密度与温度的关系曲线见图2。

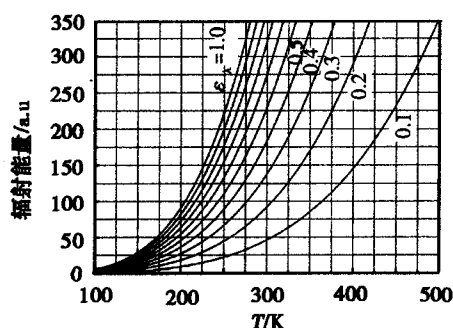


图2 不同红外发射率材料的热辐射能量随温度的依赖关系

Fig. 2 Temperature dependence of infrared radiation energy from materials surface with different emissivity

从图2可以看出,在红外发射率一定的情况下,物体的红外热辐射能量是温度的单值函数。在相同的温度下(图中网格竖线),不同材料红外热辐射能量有明显差别,且温度越高,差别越大。如在275 K时,红外发射率为0.1的物体的热辐射能量密度只有黑体的1/10左右,是常见材料(红外发射率为0.9左右)的1/9左右。假定红外发射能量相同(图中网格横线——等能线),不同发射率曲线对应于等能线上的不同温度点。即,不同温度的材料,当红外发射率不同时,它们的红外热辐射能量可以相同。这说明,降低红外发射率可以有效抑制由于温度升高带来的红外辐射能量。

如果两种不同材料物体的红外发射能量相等,也就是说两物体被红外探测的几率相同,则两物体的红外发射率之比与其表面温度之比存在如下关系:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 \quad (3)$$

ε_1 、 ε_2 、 T_1 、 T_2 代表材料1和材料2的发射率和绝对温

度。发射率、辐射能量与温度的对应关系为:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\Delta M}{M} - 4 \frac{\Delta T}{T} \quad (4)$$

(4)式表明:红外辐射能量不变时,红外发射率的变化率与温度的变化率成线性关系。将式(3)以图3表示。

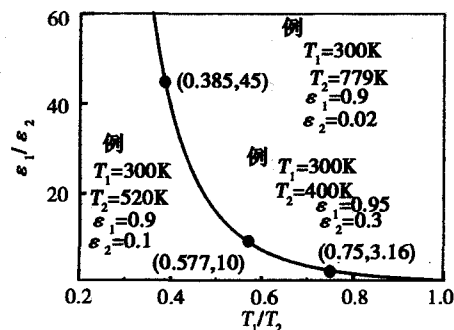
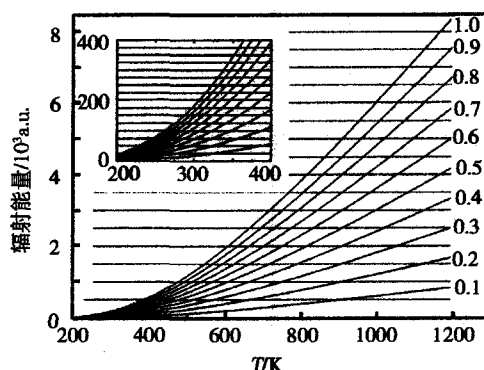


图3 材料在具有相同表面热辐射能量的情况下其表层红外辐射率变化

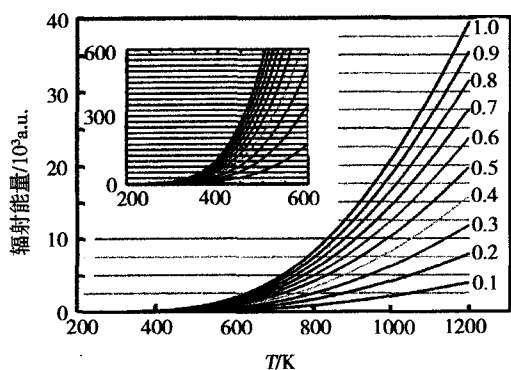
Fig. 3 Equal radiation energy line with relevant temperature and emissivity

图3曲线是一条等能线,右起第一点说明两个红外辐射率各为0.95和0.3的材料,当温度相差100℃时,其热辐射能量相等,即:低红外辐射率的材料可以在一定程度上补偿由于温度升高而产生的多余辐射热。从右起第二点和第三点可以看出:材料的红外辐射率越低,对温度的补偿作用越大。由于大面积柔性基地薄膜红外发射率可以达到非常低,低红外发射率薄膜材料在红外隐身技术中的应用前景广阔。

对于(2)式分别在3~5 μm和8~14 μm波段对波长λ求积分就可得出材料在此波段红外辐射能量随温度的依赖关系,见图4。其变化规律和对应关系与全频段基本一致。通过图4中的等能线与各条曲线的交点,可以看出红外发射率与温度的相互补偿关系。例如:在8~14 μm波段,发射率为0.1的材料在1200 K的红外热辐射能量等于黑体在450 K的。在3~5 μm波段,发射率为0.1的材料在1200 K的红外热辐射能量等于黑体在680 K的。



(a) 8~14 μm



(b) 3 ~ 5 μm

图4 材料的热辐射能量随温度的依赖关系

Fig. 4 Temperature dependence of infrared radiation energy from materials surface with different emissivity

3 结果与讨论

在理论分析的基础上,重点对氧化铟锡(ITO)、掺铝氧化锌(ZAO)和 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 纳米多层等三种透明的低发射率薄膜进行了实验。选择氧化物半导体作为低红外发射率薄膜候选材料的原因是:其红外发射率随温度升高而降低或不变。薄膜通过真空磁控溅射制备。薄膜的基底分别选用了柔性的透明聚酯薄膜和普通载玻片玻璃。薄膜在可见光波段透明,不影响目标在其他波段的隐身特性,并在红外波段具有低红外发射率。

通过调整掺杂浓度和改变制备工艺,制备出红外发射率从 0.1 ~ 0.9 连续可调的 ITO 薄膜样品,得到了 ITO 半导体薄膜红外发射率与电阻率之间相互关系的规律性结果。如图 5 所示。

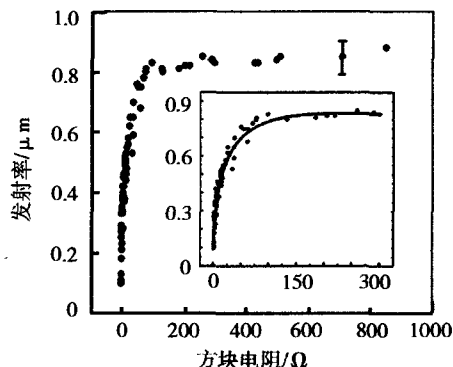


图5 氧化铟锡薄膜的红外发射率与方块电阻的关系

Fig. 5 Dependence of infrared emissivity on sheet electrical resistivity of ITO films

这种薄膜材料可以满足不同的红外隐身要求。不同红外发射率 ITO 薄膜的热红外成像见图 6。在图 6 中,发亮的背景是温度为 50℃ 加热垫。成像环境为大气环境。图中圆形参照物是一角人民币。方形图案为表面镀有不同红外发射率的 ITO 薄膜样品。在温度相同时,发射率越高,红外成像亮度越接近背景材料工艺 2007 年 第 5 期

景;发射率越低,红外成像亮度越接近硬币参照物。掺铝氧化锌半导体薄膜的红外发射率也与掺杂浓度和制备工艺有密切的关系。通过对实验条件的严格控制,也已经制备出红外发射率在 0.25 ~ 0.9 的薄膜样品。其他物理特性与氧化铟锡薄膜相近,但原材料成本只有 ITO 的 1/100 左右。掺铝氧化锌薄膜的红外成像效果与 ITO 薄膜类似。它可以达到的最低红外发射率比 ITO 薄膜略高。

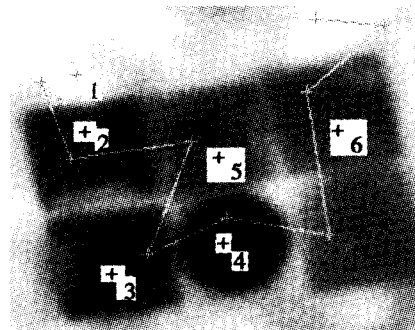


图6 不同红外发射率的氧化铟锡薄膜的红外成像

Fig. 6 Infrared images of ITO films with different emissivities

图 7 显示了掺铝氧化锌薄膜红外发射率与电阻率之间的相互关系。其变化趋势和规律与 ITO 基本一致,热红外成像图也基本相似。

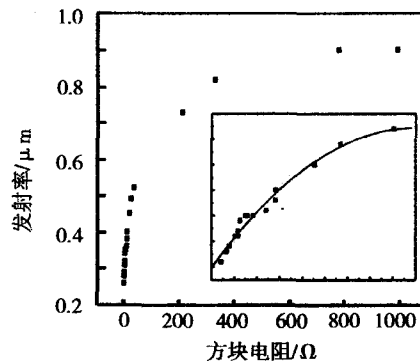


图7 掺铝氧化锌薄膜的红外发射率与方块电阻的关系

Fig. 7 Dependence of infrared emissivity on sheet electrical resistivity of ZnO: Al films

当方块电阻较小时,ITO 薄膜和掺铝氧化锌半导体薄膜的红外发射率随薄膜方块电阻的增大而呈单调增加的趋势,当方块电阻较大时,红外辐射率趋近于一定值。对方块电阻趋于饱和之前的结果进行拟合,分别得到 ITO 和 ZAO 的曲线方程为:

$$\text{ITO: } \varepsilon = 0.0126R_{\square} - 6.7 \times 10^{-5}R_{\square}^2$$

$$\text{ZAO: } \varepsilon = 0.248 + 0.0122R_{\square} - 1.36 \times 10^{-4}R_{\square}^2$$

该拟合结果与 J. Szczyrbowski 等人^[5]给出的有关低发射率材料的经验公式 $\varepsilon = 0.0129R_{\square} - 6.7 \times 10^{-5}R_{\square}^2$ 类似。这说明当方块电阻较小时,ITO 和 ZAO 薄膜的红外辐射率随方块电阻的变化趋势遵循

二阶函数变化规律。该影响可能与 ITO 和 ZAO 薄膜的电子状态有关。当载流子浓度或迁移率增大,ITO 和 ZAO 薄膜的方块电阻减小,而迁移率的大小直接与载流子所受到的晶格散射程度有关,同时红外辐射与晶格振动密切相关,因此方块电阻的减小与红外辐射的降低是一致的。当方块电阻较大时,实验结果显示这二阶函数的变化关系已不适用,薄膜的红外比辐射率受方块电阻的影响很小,趋近于一饱和值。

氧化物/金属/氧化物多层膜体系可包含多种材料。本文研究的体系主要是二氧化钛/银/二氧化钛多层膜。它的红外发射率最低可达 0.05 左右。氧化物的作用是阻挡和减缓热传导速度。玻璃基底的多层膜样品的红外成像图见图 8。柔性基底镀膜与未镀膜样品的红外成像图分别见图 9 和图 10。

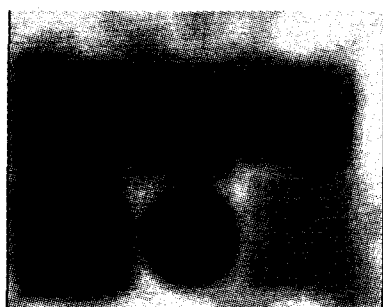


图 8 低红外发射率的 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 纳米多层膜的红外成像

Fig. 8 Infrared images of low emissivity $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ nano multi-layer films



图 9 镀膜柔性基底 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 纳米多层膜红外成像

Fig. 9 Infrared images of low emissivity $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ nano multi-layer films on flexible PET substrate



图 10 未镀膜柔性基底薄膜红外成像

Fig. 10 Infrared images of flexible PET substrate

从图中可以看出,低红外发射率的 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 纳米多层膜的红外辐射能量远低于相同温度下的背景基底(通过红外图像的明暗对比),柔性基底可以方便地用于红外隐身贴膜。

4 结论

研究了几种红外发射率可以调控的低红外发射率纳米氧化物半导体薄膜。其中氧化铟锡薄膜的红外发射率可在 0.1 ~ 0.9 连续可调,掺铝氧化锌薄膜的红外发射率可以在 0.25 ~ 0.9 连续可调; $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 多层膜的红外发射率最低可达 0.05。

降低红外发射率是实现红外隐身的一条重要途径。低红外发射率薄膜可以直接应用于多种武器装备的红外隐身技术中。

参考文献

- 1 Steve Douglass, Bill Sweetman. Hiding in plane sight-stealth aircraft own the night. Now They Own the Day, 1997; (5) 54 ~ 59
- 2 Bill Sweetman. The invisible men. Air & Space Magazine, 1997; (5) 18 ~ 27
- 3 里查森 D. 现代隐身飞机. 北京: 科学出版社, 1991
- 4 Jacobs P A. 地面目标和背景的热红外特性. 北京: 国防工业出版社, 2004
- 5 Szczyrkowski J, Brauer G, Ruske M et al. New low emissivity coating based on twin-mag sputtered TiO_2 and Si_3N_4 layers. Thin Solid Films, 1999; 351: 254

(编辑 吴坚)