

## 兼容型低目标特征涂层

黄巍, 高海潮, 戴松涛\*

清华大学物理系, 原子分子纳米科学教育部重点实验室, 北京 100084

**摘要** 掺锡氧化铟(ITO)薄膜同时具备在近红外波段的低反射和红外波段的高反射特性, 其介电常数可由Drude自由电子模型描述。SiO薄膜在特定的红外波长处有很强的吸收。将二者结合, 可实现特定的光谱选择性。本文对SiO/ITO膜系的光谱选择性进行了研究, 讨论了膜系结构对反射光谱的影响。通过用特征矩阵计算反射光谱, 发现适当调整膜系的组合方式及选择膜层参数, 用SiO/ITO膜系可以做成兼容型红外低目标特征涂层。

**关键词** 红外; 低目标特征; 兼容型涂层

中图分类号: T B34 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2008)09-1987-03

## 引言

隐身技术(即低目标特征技术)是通过改变武器系统外形或在其表面覆盖介质层等手段, 来控制、降低其信号特征, 使其难以被敌方探测系统发现、识别的技术<sup>[1,3]</sup>。红外和激光是被广泛应用的探测手段<sup>[4,5]</sup>, 前者属于被动式的, 后者类似于雷达, 属于主动式的。单一的针对红外或激光的隐身材料是比较容易实现的, 例如红外吸波可用氟化物<sup>[6]</sup>和多孔材料<sup>[7,8]</sup>来实现。现代复合模式的探测和制导技术的发展, 往往使目标同时面临激光和红外探测系统的威胁。这就需要实现红外和激光兼容隐身, 才能够确保目标的安全。

红外和激光的兼容隐身, 可以通过在目标表面涂敷红外和激光的兼容隐身涂层来实现。对波长位于红外波段内的激光与红外的兼容隐身, 可采用“光谱挖孔”的方法来实现<sup>[9]</sup>, 文献[10]讨论了通过掺杂光子晶体实现光谱挖孔的途径, 实现了波长为10.6 μm的激光和红外的兼容隐身。本文将探讨进一步提升兼容性的可能途径。

## 1 需求分析

红外隐身和激光隐身对于材料有着不同的要求。红外隐身要求材料具有低发射率, 而激光隐身要求材料具有低反射率。对于不透明材料, 低发射率将导致高反射率, 不利于激光隐身; 低反射率会导致高发射率, 不利于红外隐身<sup>[11]</sup>。特别是, 对于同一波段既要实现红外隐身又要求激光隐身, 矛

盾将更加突出。

目前军用激光器的主要波长是0.93, 1.06和10.6 μm<sup>[12]</sup>。对波长位于红外波段内的激光, 考虑到激光探测系统的单一工作波长和窄线宽的特点, 可使得隐身材料的反射光谱呈现在激光波长附近的窄波段内有极低的反射率, 而在红外的其他波段有高反射率的光谱挖孔形式<sup>[9, 10]</sup>。因此对波长为10.6 μm的激光, 可采用光谱挖孔方案来实现红外与激光的兼容隐身。而对波长为0.93和1.06 μm的激光和红外的兼容隐身可以通过阶跃型反射光谱来实现<sup>[13]</sup>。

若兼顾这两种情况, 即同时实现波长为0.93, 1.06和10.6 μm的激光与红外的兼容隐身, 材料的理想反射光谱应具有图1的形式。

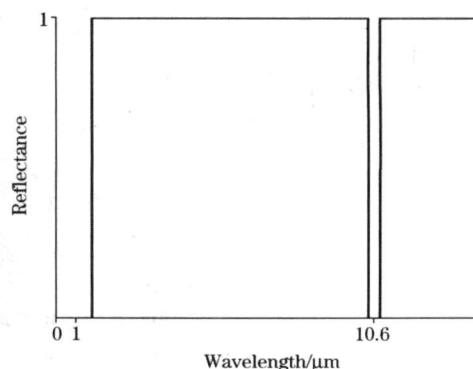


Fig 1 Schematic diagram of expectant reflection spectrum

基于对一些材料光学性质的考察和分析, 我们了解到

$\text{SiO}$  在  $10.6 \mu\text{m}$  处有很强的吸收<sup>[14]</sup>, 而 ITO 具有阶跃型的反射光谱<sup>[12-15]</sup>。将二者结合, 在目标表面覆盖  $\text{SiO}/\text{ITO}$  膜系, 就有可能同时实现波长为  $0.93, 1.06$  和  $10.6 \mu\text{m}$  的激光和红外的兼容隐身。

## 2 涂层设计

以下我们研究以金属铜(Cu)和铝(Al)为基底的  $\text{SiO}/\text{ITO}$  膜系的反射光谱。其中  $\text{SiO}$ 、Al 和 Cu 的复折射率数据取自于文献[14]。ITO 薄膜的复介电常数  $\epsilon = (n - ik)^2 = \epsilon_1 + i\epsilon_2$  可由 Drude 自由电子模型描述<sup>[15]</sup>, 即

$$\epsilon_1(\omega) = n^2 - k^2 = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2} \quad (1)$$

$$\epsilon_2(\omega) = 2nk = \frac{\gamma}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2} \quad (2)$$

$$\omega_p^2 = (\omega_N^2/\epsilon_\infty) - \gamma^2 \quad (3)$$

式中  $n$  是折射率,  $k$  是消光系数,  $\epsilon_\infty$  为高频介电常数,  $\omega$  为入射光的角频率,  $\omega_p$  为等离子体共振频率,  $\omega_N$  为等离子体振动

能频率,  $\gamma$  为弛豫能频率。由此可知, 只需要知道  $\epsilon_\infty$ 、 $\omega_p$ 、 $\gamma$ , 就可以得到 ITO 薄膜的复折射率。

在计算中我们采用薄膜光学中的特征矩阵方法<sup>[16]</sup>。正入射时, 多层膜系的等效复折射率  $N = C/B$ , 其中  $B$  和  $C$  满足以下关系

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{i=1}^n \begin{bmatrix} \cos\delta_i & j \sin\delta_i / N_i \\ j N_i \sin\delta_i & \cos\delta_i \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ N_A \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\delta_i = 2\pi N_i d_i / \lambda$ ,  $\delta_i$ 、 $d_i$  和  $N_i$  分别是第  $i$  层介质的相位因子、膜层厚度和复折射率,  $\lambda$  为光波的波长,  $N_A$  为金属基底的复折射率。由  $N$  可以得到反射率

$$R = \left( \frac{1-N}{1+N} \right) \left( \frac{1-N}{1+N} \right)^* \quad (5)$$

由文献[15]可得到 ITO 的 Drude 自由电子模型的 3 个参数( $\epsilon_\infty$ 、 $\omega_p$ 、 $\gamma$ )可取的值, 进而可以算出 ITO 的复折射率。采用特征矩阵法进行计算, 并调整  $\text{SiO}$  层的厚度  $d_1$  和 ITO 层的厚度  $d_2$ , 当金属基底上只覆盖着一层 ITO 薄膜(内层)和一层  $\text{SiO}$  薄膜(外层)时, 得到的结果如图 2 所示。

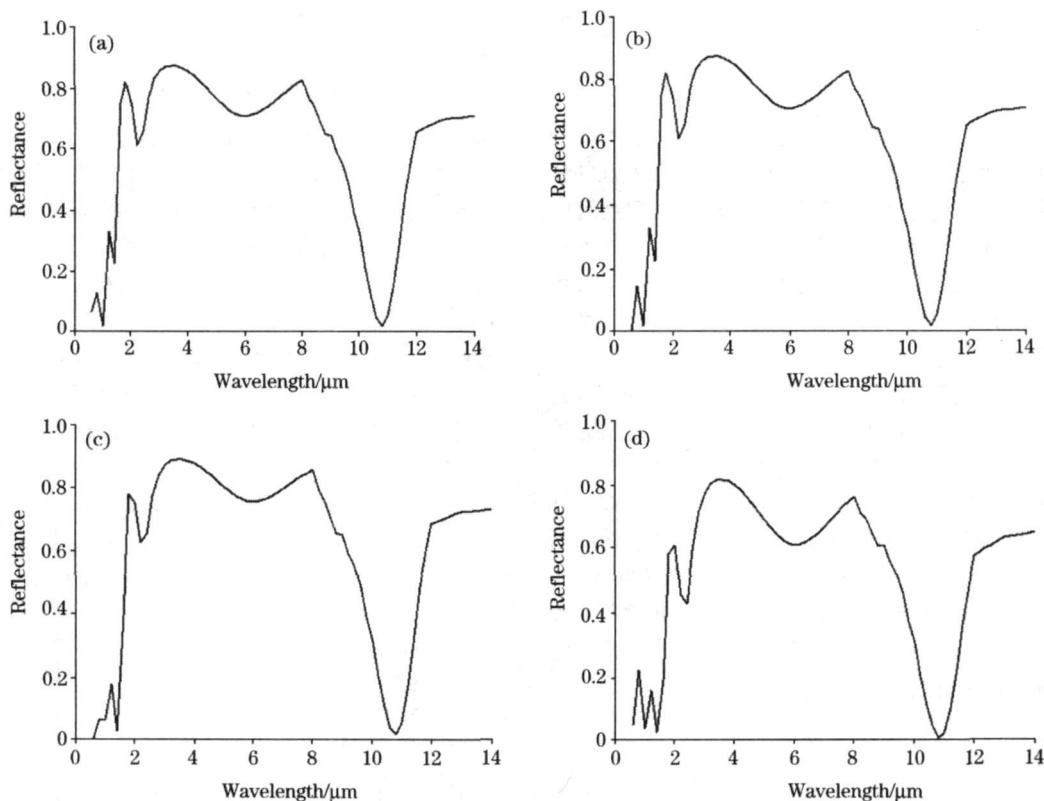


Fig 2 Reflection spectra under different conditions

(a): Substrate Al, ITO( $d_2 = 5 \mu\text{m}$ ,  $\hbar\omega_p = 0.9 \text{ eV}$ ,  $\hbar\gamma = 0.10 \text{ eV}$ ,  $\epsilon_\infty = 3.5$ ),  $\text{SiO}(d_1 = 0.8 \mu\text{m})$

(b): Substrate Cu, ITO( $d_2 = 5 \mu\text{m}$ ,  $\hbar\omega_p = 0.9 \text{ eV}$ ,  $\hbar\gamma = 0.10 \text{ eV}$ ,  $\epsilon_\infty = 3.5$ ),  $\text{SiO}(d_1 = 0.8 \mu\text{m})$

(c): Substrate Al, ITO( $d_2 = 5 \mu\text{m}$ ,  $\hbar\omega_p = 0.77 \text{ eV}$ ,  $\hbar\gamma = 0.075 \text{ eV}$ ,  $\epsilon_\infty = 4.45$ ),  $\text{SiO}(d_1 = 0.8 \mu\text{m})$

(d): Substrate Al, ITO( $d_2 = 5 \mu\text{m}$ ,  $\hbar\omega_p = 0.71 \text{ eV}$ ,  $\hbar\gamma = 0.12 \text{ eV}$ ,  $\epsilon_\infty = 4.0$ ),  $\text{SiO}(d_1 = 0.8 \mu\text{m})$

在图 2(a)和图 2(b) 中, 波长为  $0.93, 1.06, 10.6 \mu\text{m}$  处的反射率分别约为  $2\%, 2\%, 5\%$ ; 在图 2(c) 中, 波长为  $0.93, 1.06, 10.6 \mu\text{m}$  处的反射率分别约为  $7\%, 7\%, 4\%$ , 而在图 2(d) 中, 波长为  $0.93, 1.06, 10.6 \mu\text{m}$  处的反射率分

别约为  $4\%, 4\%, 5\%$ 。在四种情形中, 波长为  $0.93, 1.06, 10.6 \mu\text{m}$  处的反射率都小于等于  $7\%$ , 且在其他红外波段有高反射率。因此  $\text{SiO}/\text{ITO}$  膜系可以较好地满足上述激光和红外兼容隐身的要求。同时由图 2(a)和图 2(b)可知, 基底为铝

和基底为铜时,计算得到的结果差别不大。

### 3 结 论

将阶跃型反射光谱和挖孔型反射光谱相结合,可以拓宽

红外和激光兼容隐身的范围。我们采用 SiO/ITO 膜系,实现了波长为 0.93, 1.06 和 10.6 μm 的激光与红外的兼容隐身。进一步的研究应考虑如何使反射光谱中波长为 10.6 μm 处的孔变得更窄,以更好地满足隐身兼容性的要求。

致谢:感谢张光寅教授和张存洲教授的帮助和讨论。

### 参 考 文 献

- [1] ZHANG Kao, MA Li dong (张考, 马立东). Military Aircraft Survivability and Stealth Design(军用飞机生存力与隐身设计). Beijing: National Defence Industry Press(北京: 国防工业出版社), 2002.
- [2] XING Li ying (邢丽英). Stealth Materials (隐身材料). Beijing: Chemical Industry Press (北京: 化学工业出版社), 2004.
- [3] ZHUANG Zhaowen, YUAN Naichang, LIU Shaobin, et al(庄钊文, 袁乃昌, 刘少斌, 等). Plasma Stealth Technology (等离子体隐身技术). Beijing: Science Press (北京: 科学出版社), 2005.
- [4] XUAN Yimin, HAN Yuge(宣益民, 韩玉阁). Infrared Characterizations of Ground Targets and Backgrounds(地面对目标与背景的红外特征). Beijing: National Defence Industry Press(北京: 国防工业出版社), 2004.
- [5] ZHONG Hua, LIZI li(钟华, 李自力). Stealth Technology(隐身技术). Beijing: National Defence Industry Press(北京: 国防工业出版社), 1999.
- [6] ZHANG Guangyin, DAI Songtao, ZHANG Cunzhou(张光寅, 戴松涛, 张存洲). J. Infrared Millim. Waves(红外与毫米波学报), 1993, 12(2): 144.
- [7] ZHANG Guangyin, DAI Songtao, ZHANG Cunzhou, et al(张光寅, 戴松涛, 张存洲, 等). J. Infrared Millim. Waves(红外与毫米波学报), 1995, 14(4): 283.
- [8] PENG Qi, TU Changcun, DAI Songtao, et al(彭其, 屠长存, 戴松涛, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2000, 20(1): 1.
- [9] DAI Songtao, ZHANG Guangyin, ZHANG Cunzhou(戴松涛, 张光寅, 张存洲). Stealth Technology(隐身技术), 1993, (3): 1.
- [10] GAO Haichao, DAI Songtao(高海潮, 戴松涛). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(4): 671.
- [11] ZHOU Jiawen, LIU Shicai(周建勋, 刘世才). Infrared and Laser Technology(红外与激光技术), 1992, (2): 30.
- [12] HU Chuarxin(胡传). Stealth Coating Technology(隐身涂层技术). Beijing: Chemical Industry Press(北京: 化学工业出版社), 2004.
- [13] ZHANG Guangyin, ZHANG Cunzhou, DAI Songtao, et al(张光寅, 张存洲, 戴松涛, 等). In Research Progress of Optical Properties of Condensed Matter(见:凝聚态光学性质研究进展), eds.: ZHANG Cunzhou, XIONG Guangan, ZHANG Guangyin(张存洲, 熊光楠, 张光寅编). Tianjin: Nankai University Press(天津: 南开大学出版社), 1994. 172.
- [14] Palik Edward D. Handbook of Optical Constants of Solids. Orlando: Academic Press, 1985.
- [15] Hamberg I, Hjortsberg A, Granqvist C G. Appl. Phys. Lett., 1982, 40(5): 362.
- [16] LIN Yongchang, LU Weiqiang(林永昌, 卢维强). Principles of Optical Thin Films(光学薄膜原理). Beijing: National Defense Industry Press(北京: 国防工业出版社), 1990.

## Compatible Low Target Feature Coatings

HUANG Wei, GAO Haichao, DAI Songtao\*

Key Laboratory of Atomic and Molecular Nanosciences of Ministry of Education, Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** Indium tin oxide (ITO) film has low reflectance in near infrared band while high reflectance in infrared band, and its dielectric constant can be described by Drude free electron model. SiO film has very strong absorption at certain infrared wavelength. By combining them, certain spectral selectivity can be realized. In the present paper, the authors investigated SiO/ITO films in terms of spectrum selectivity, and discussed the influence of film structure on reflection spectrum. By means of the computation of reflection spectrum with characteristic matrix, the authors found that SiO/ITO film can be used as a compatible infrared low target feature coating by properly adjusting film arrangement and selecting suitable film parameters.

**Keywords** Infrared; Low target feature; Compatible coating

\* Corresponding author

(Received Jun. 21, 2007; accepted Sep. 18, 2007)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>