

文章编号:1674-8190(2017)01-078-06

# 飞机座舱玻璃铌掺杂 ITO 镀膜工艺参数选择

刘战合<sup>1</sup>, 姬金祖<sup>2</sup>, 王晓璐<sup>1</sup>, 王菁<sup>1</sup>

(1. 郑州航空工业管理学院 航空工程学院, 郑州 450046)

(2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 对飞机座舱玻璃镀膜能够有效提高飞机的头向隐身性并能优化座舱光电性能参数。针对座舱玻璃铌掺杂 ITO 镀膜, 重点研究参与溅射的靶材数目、氧气流量等工艺参数对其性能参数的影响规律。结果表明: 参与溅射的靶材数目增加, 方块电阻快速降低, 之后下降斜率变小, 趋于定值; 透光率振荡变化, 且当方块电阻大小稳定后逐渐变小。氧气流量增加时, 方块电阻先减小后增加, 当氧气流量大于 6 sccm 时, 方块电阻迅速增加, 透光率振荡后降低。不同基底的铌掺杂 ITO 薄膜, 其方块电阻和透光率变化不大, 仅影响真空度等其他工艺过程。各工艺参数对薄膜颜色有一定的制约作用。

**关键词:** 溅射; 铌掺杂 ITO; 座舱; 透光率; 隐身

**中图分类号:** V218

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2017.01.012

## Parameter Selection of Nb-doped ITO Coating Process for Aircraft Cockpit Glass

Liu Zhanhe<sup>1</sup>, Ji Jinzu<sup>2</sup>, Wang Xiaolu<sup>1</sup>, Wang Jing<sup>1</sup>

(1. School of Aeronautical Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China)

(2. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Aircraft cockpit glass coating can improve the stealth performance of the cockpit glass and optimize the cockpit's photoelectric performance parameters. For the Nb-doped ITO (Indium Tin Oxides) coating of the aircraft cockpit glasses, the Nb-doped ITO coating performance parameters' influence rule of the technological parameters is mainly studied such as the number of sputtering targets and oxygen flow. The experiment results show that, with the number of targets involved in sputtering increasing, the sheet resistance first decreases rapidly. Then the falling slope becomes small, and at last tends to constant value. The light transmittance oscillates, and when the sheet resistance is stable, the light transmittance gradually becomes smaller. As the oxygen flow increases, the sheet resistance decreases at first, and then increases. When the flow is greater than 6 sccm, the sheet resistance increases rapidly, and the transmittance decreases after oscillation. The sheet resistance and transmittance of the Nb-doped ITO films with different substrates have a little change, and the different substrates just affect the degree of vacuum and other process. The technological parameters also have certain effects on the film color.

**Key words:** sputtering; Nb-doped ITO; cockpit; light transmittance; stealth

## 0 引言

座舱、雷达舱、进气道被称为常规飞机的三大散射源<sup>[1-3]</sup>, 它们对飞机的前向雷达散射截面(Radar Cross Section, 简称 RCS)贡献较大, 会严重影响飞机的隐身性能<sup>[4-5]</sup>。采用镀膜技术在飞机座舱

收稿日期:2016-11-07; 修回日期:2016-12-19

基金项目:国家重点基础研究计划(973计划)(61320)

河南省高等学校重点科研项目计划(17B590002)

河南省科技攻关计划(172102210530)

通信作者:刘战合, nwpulzh@163.com

有机玻璃表面沉积一层或多层透明导电薄膜,可以有效控制入射电磁波的反射、透射过程,从而提高飞机头向隐身性能和飞机的生存能力<sup>[6-9]</sup>,同时座舱玻璃应具备足够高的可见光透光率,以保证飞行员视野和飞行安全性<sup>[10-11]</sup>。

薄膜沉积技术(镀膜技术)是通过物理或化学方法在基材表面(例如飞机座舱玻璃)沉积一层或多层薄膜材料,用以改变原材料表面性能的技术<sup>[6,12]</sup>。国内外对 ITO(Indium Tin Oxides)镀膜的研究主要集中在电子信息领域,而专门针对飞机座舱玻璃的铌掺杂 ITO 镀膜技术鲜有报道。

本文采用非平衡磁控溅射技术、中频交流电源、平面阴极靶型式,对铌掺杂 ITO 镀膜<sup>[13-15]</sup>工艺参数进行实验分析,通过系列化实验,研究溅射靶材数目对铌掺杂 ITO 薄膜方块电阻、可见光透光率和薄膜颜色的影响;同时研究各工艺参数(真空度、电源功率、电压、电流等)尤其是氧气和氩气的流量比对方块电阻、可见光透光率的影响规律;分析不同基底材料(包括超白浮法玻璃、有机玻璃(Polymethyl Methacrylate,简称 PMMA)、PET 膜(聚对苯二甲酸乙二醇酯,其化学式为  $\text{COC}_6\text{H}_4\text{COOCH}_2\text{CH}_2\text{O}$ )等)对铌掺杂 ITO 性能参数的影响特性,以期为现役飞机座舱隐身化快速改进提供参考。

## 1 座舱玻璃镀膜工艺流程

薄膜沉积技术(镀膜技术)可分为物理气相沉积(Physical Vapor Deposition,简称 PVD)和化学气相沉积(Cheical Vapor Deposition,简称 CVD)两类。磁控溅射技术<sup>[16-17]</sup>属于物理气相沉积技术,具有薄膜附着力高、均匀性好等优点,结合中频电源,可有效实现金属、非金属及其氧化物、氮化物等薄膜的沉积,应用较为广泛。

根据磁场的分布方式,磁控溅射镀膜技术可分为平衡和非平衡两类,非平衡磁场能够较大幅度地提高沉积速率和膜层致密性。本文使用非平衡磁控溅射镀膜设备,结合中频交流电源(功率 10.0 kW)、平面阴极靶,采用恒定功率方式,完成不同基底材料的有效、快速薄膜沉积。溅射阴极采用同一平面布置的孪生方式,共有两对阴极,即两对靶材,靶材为铌掺杂 ITO<sup>[18-19]</sup>,靶材表面与基片架的距离约为 15 cm,基片架可往复运行。

镀膜时室内温度为 18~26 °C、湿度小于 55%。基本工艺流程如下:开启镀膜设备真空泵系统,使镀膜设备的所有腔室达到本底真空要求,即镀膜室真空度小于  $8.0 \times 10^{-4}$  Pa、其他真空室真空度小于 0.3 Pa;基底(玻璃或有机玻璃)经过表面清洗后,进入镀膜设备,隔离室气压维持在 1.5 Pa 以内,镀膜工艺室通入氩气,维持气压范围为 0.3~0.8 Pa,待稳定后再通入氧气;将基底待镀膜面正对阴极靶面,开启阴极中频电源,待辉光稳定后沉积;镀膜过程中基底传输速度保持平稳均匀。实验中采用的氧气和氩气的纯度均大于 99.99%,考虑到薄膜均匀性,应用常温镀膜技术,即基底不进行特别加热<sup>[20-22]</sup>,镀膜中基底样品为室温(16~26 °C),可节约镀膜成本。

## 2 工艺参数对薄膜性能影响实验

### 2.1 飞机头向隐身对薄膜性能参数的要求

目前,用于座舱有机玻璃的薄膜主要包含两种:一种是以金或银为功能层的介质/金或银/介质膜系;另一种是 ITO 膜层,即透明导电氧化物氧化铟锡<sup>[18-19,22]</sup>。前一种为早期飞机座舱采用的薄膜技术,但金和银在空气中(尤其是湿盐环境或高湿度环境)极易被氧化,从而失去电磁屏蔽功能,影响使用寿命;而 ITO 薄膜具有优良的耐腐蚀性能,且附着力强、透光率高,现已成为飞机座舱玻璃隐身的重要手段之一<sup>[21]</sup>。

考虑到工作特性,飞机座舱的玻璃镀膜在满足机械性能(例如耐摩擦、附着力强等)的同时,还应具备较低的表面方块电阻和高可见光透光率。综合考虑头向隐身性能、机械性能、成本及工艺技术可实现性等要求,ITO 薄膜的方块电阻一般要求为 20~30  $\Omega/\text{m}^2$ ,可见光透光率(550 nm 波段)应大于 80%。为了进一步提高飞机座舱玻璃镀膜的透光率,同时降低方块电阻,本文采用铌掺杂 ITO 来实现。以方块电阻和透光率为评价目标,研究各工艺参数的优化选择对其影响规律,实验中薄膜表面方块电阻采用手持式四探针方块电阻仪测试,透光率采用透光率雾度测试仪测试。

### 2.2 溅射靶材数目的影响

镀膜过程中工艺参数的选择对方块电阻和透

光率的影响较大<sup>[12,15-16,28]</sup>。方块电阻通常随镀膜时间的增加而减小、随电源功率的增大而减小,但是对于不同的靶材、阴极型式、磁场布置方式等均有不同的表现。对铌掺杂 ITO 镀膜工艺技术,研究其溅射靶材数目对薄膜性能参数的影响。

实验中,基底为 3 mm 厚超白浮法玻璃,采用恒功率(2.7 kW)电源,溅射时真空度约为 3.5 Pa,氧气、氩气流量分别为 2 和 98 sccm,镀膜时改变参与溅射沉积的靶材数目,依次为 2、3、4、5、6、8、10。所沉积薄膜的方块电阻  $R_{\square}$ 、可见光(波长为 550 nm)透光率  $T$  与靶材数目  $N$  的变化关系分别如图 1~图 2 所示。

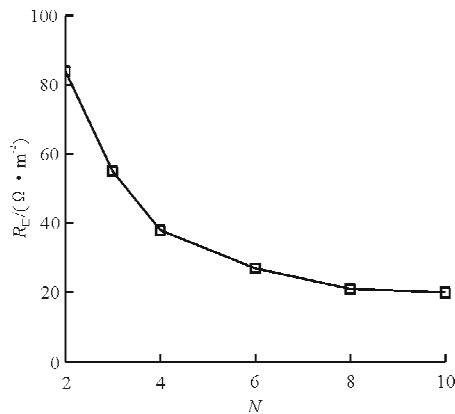


图 1 方块电阻随靶材数目的变化曲线  
Fig. 1 Variation curve of sheet resistance based on the number of targets

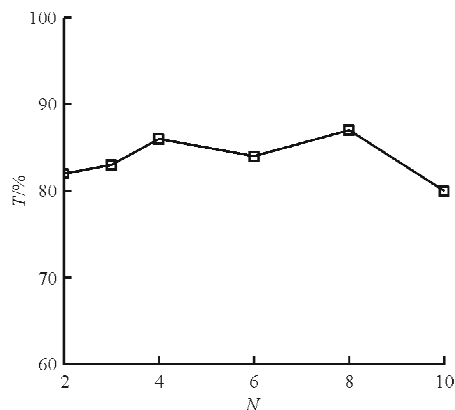


图 2 透光率随靶材数目的变化曲线  
Fig. 2 Variation curve of transmittance based on the number of targets

镀膜时不同溅射靶材数目  $N$  对应的变化参数如表 1 所示。

表 1 不同靶材数目对应的溅射工艺参数与性能参数  
Table 1 Sputtering process and performance parameters for different targets' number

$N$	$R_{\square} / (\Omega \cdot m^{-2})$	$T / \%$	$U / V$	$I / A$	$P / Pa$	颜色
2	84	84	450	6	3.7	无色
3	55	83	450	6	3.6	无色
4	38	86	450	6	3.7	淡紫
6	27	84	450	6	3.7	淡紫
8	21	86	450	6	3.6	淡紫
10	20	80	450	6	3.6	淡黄

从图 1~图 2 和表 1 可以看出:

(1) 薄膜方块电阻  $R_{\square}$  随溅射靶材数目的增加逐渐减小,且在初始阶段变化趋势较明显,当  $N > 6$  时,  $R_{\square}$  的下降趋势逐渐变缓;  $N=8$  和  $N=10$  时的方块电阻非常接近,表明若  $N$  再进一步增大,对使方块电阻减小的贡献意义不大。

(2) 透光率  $T$  随靶材数目的增加呈震荡变化趋势,但整体在  $N$  为 4、6、8 时稍高,分别为 86%、84% 和 86%,对应的方块电阻分别为 38、27 和 21  $\Omega/m^2$ 。

(3) 薄膜颜色随溅射靶材数目的增加逐渐加深,依次为无色、淡紫色和淡黄色,即随着薄膜膜层厚度的增加,膜层颜色逐渐发生变化。

(4) 镀膜过程中,在不同的靶材数目下,对应的电源电压和电流基本保持不变,分别为 450 V 和 6 A,腔体内真空度维持在 3.6~3.7 Pa 之间,表明镀膜过程、等离子体发生过程持续状态良好,利于实现镀膜工艺稳定性。

综上所述,随着靶材数目的增加,即膜层厚度逐渐增加,方块电阻减小且逐渐接近恒值,透光率呈震荡变化趋势,先增加后减小。对于飞机座舱玻璃镀膜,  $N$  为 6 和 8 时对应的方块电阻和透光率均可满足技术要求,而  $N=10$  时对应的方块电阻为 20  $\Omega/m^2$ ,仅比  $N=8$  时的 21  $\Omega/m^2$  稍小;但其透光率降低较为明显,由 86% 降低为 80%。根据实际变化情况和飞机座舱玻璃镀膜需求,可选择  $N$  为 6~8 进行飞机座舱玻璃的铌掺杂 ITO 薄膜沉积工艺实验。

### 2.3 氧气流量的影响

ITO 薄膜是由氧化铟和氧化锡按一定比例组成的 N 型氧化物半导体,广泛应用于电子电器行业,是一种典型的透明导电氧化物,铌掺杂后对方

块电阻和透光率具有积极影响。非平衡磁控溅射镀膜过程中,靶材中金属氧化物在电场和磁场的共同作用下,以分子或离子形式高速撞击基底并附着于基底表面形成薄膜,但在该薄膜的形成过程中氧元素会有一定损失,这在一定程度上影响了薄膜的方块电阻和透光率等性能参数。因此,在实际溅射过程中,应通入少量高纯氧气以补充损失的氧元素。

实验过程中,参数的选取根据 2.2 节的分析结果,参与溅射的靶材数目为 7 且保持不变,中频电源的功率为 2.7 kW,采用恒功率模式,每次镀膜前本底真空度小于  $8.0 \times 10^{-4}$  Pa,实验基底为 3 mm 厚超白浮法玻璃。保持气体总流量不变,即 100 sccm,氧气流量依次为 0、1、2、3、4、5、6、8、10 sccm,对应的氩气流量依次为 100、99、98、97、96、95、92、90 sccm。

方块电阻、可见光透光率随氧气流量的变化分别如图 3~图 4 所示。

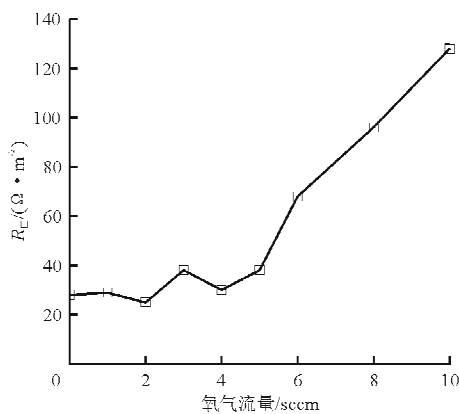


图 3 方块电阻随氧气流量的变化曲线  
Fig. 3 Variation curve of sheet resistance based on oxygen flow

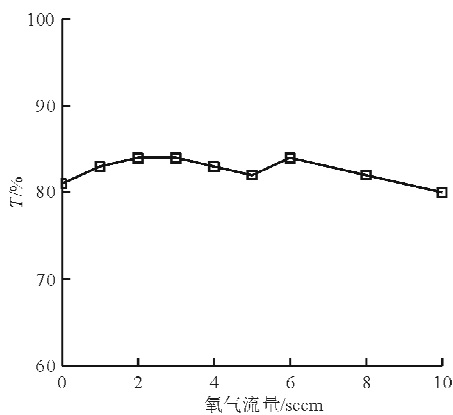


图 4 透光率随氧气流量的变化曲线  
Fig. 4 Variation curve of transmittance based on oxygen flow

从图 3~图 4 可以看出:

(1) 氧气流量在 0~5 sccm 范围内时,方块电阻呈震荡增加趋势;氧气流量为 2 sccm 时,方块电阻最小,之后逐渐振荡增大,其原因是铌掺杂 ITO 靶材在沉积过程中的氧含量在溅射时被真空泵部分抽出,致使氧气含量为 0 和 1 sccm 时,方块电阻较大;且由于缺少氧气含量,其透光率也相对较低。

(2) 氧气流量逐渐增大时,由于补充的氧含量与溅射中损失的氧含量基本平衡,电阻率接近靶材的电阻率值,之后氧含量继续增大,透光率逐渐增大,电阻值趋于振荡增加;特别地,在氧气流量大于 5 sccm 后,电阻增加速度变大,表明随着氧含量的增加,ITO 本质上已经由半导体转化为氧化物,引起电阻的突然增大,同时透光率也逐渐降低。

(3) 氧气流量的增加可适当增加透光率,当氧气流量增加至 8~10 sccm 之间时,透光率逐渐下降;透光率整体上表现为先振荡增加后振荡减小的趋势,但均大于 80%,在 80%~84%之间变化。

实验中,各中频电源电压、电流、镀膜真空度等工艺参数与薄膜性能参数如表 2 所示。

表 2 各工艺参数、方块电阻及透光率

Table 2 Process parameters, sheet resistance and transmittance

氧气流量/sccm	$R_{\square}/(\Omega \cdot m^{-2})$	$T/\%$	$U/V$	$I/A$	$P/Pa$	颜色
0	28	81	450	6	3.6	无色
1	29	83	455	6	3.4	无色
2	25	84	455	6	3.4	无色
3	38	84	450	6	3.5	淡紫
4	30	83	450	6	3.5	淡紫
5	38	81	450	6	3.5	淡黄
6	68	84	450	6	3.4	淡黄
8	96	82	450	6	3.5	淡黄
10	128	80	455	6	3.4	淡黄

从表 2 可以看出:

(1) 在其他工艺条件相同的情况下,镀膜功率为 2.7 kW 时,不同氧气流量下的电源电压始终保持在 450~455 V 之间,对应的电流均为 6 A,表明溅射实验过程气氛稳定;溅射镀膜时真空度气压范围为 3.4~3.6 Pa,变化较小。

(2) 从量化角度考虑,氧气流量为 0 sccm 时,其氧含量全部来自铌掺杂 ITO 靶材,而在电场、磁场共同作用下的溅射过程,由于真空泵抽取掉少量

的氧离子,致使沉积在玻璃基底上的氧含量偏低,薄膜方块电阻较大;随着氧气流量的增加,薄膜表面方块电阻在氧气流量为 2 sccm 时取值最低,为  $25 \Omega/\text{m}^2$ ;随后由于氧含量的增加,电阻逐渐增大,在氧气流量为 6 sccm 以后,方块电阻大于  $60 \Omega/\text{m}^2$ ,甚至在氧气流量为 10 sccm 时,方块电阻达到  $128 \Omega/\text{m}^2$ 。飞机座舱玻璃镀膜要实现电磁屏蔽,要求方块电阻最好在  $30 \Omega/\text{m}^2$  以内,故当氧气流量大于 6 sccm 以后,已远不能满足要求,这一电阻增加的现象是由于氧含量的增加使 ITO 更加接近于金属氧化物。

(3) 随着氧气流量的增加,薄膜透光率呈振荡趋势,其原因是:首先,氧气含量的增加弥补了氧原子的缺失,提高了透光率,然后,氧气含量继续增加,使得薄膜表面的材料属性发生实质变化,透光率降低。但从整体来看,薄膜透光率均大于 80%,满足飞机座舱透光率的需求。同时,也表明 2.2 节取氧气含量为 2 sccm 是合理的、正确的。

(4) 随着氧气流量的增加,薄膜颜色的变化顺序为无色、淡紫色、淡黄色,这是由于氧含量掺杂后使得薄膜本质发生了改变。

### 3 不同基底镀膜实验对比

飞机座舱玻璃为有机玻璃,其本身的透光率可达 90% 以上,因此本文选择浮法玻璃作为基底材料,但这与实际座舱玻璃稍有区别。考虑到这一差异,分别选用 3 mm 厚超白浮法玻璃、有机玻璃 (PMMA)<sup>[6]</sup> 和 0.175 mm 厚 PET 膜三种材料作为基底<sup>[21]</sup>,研究不同基底掺杂 ITO 薄膜的性能参数关系,对比实验结果如表 3 所示。其中,PMMA 基底的透光率约为 90%,PET 膜基底的透光率为 91%,选择  $N=7$ ,氧气、氩气流量分别为 2、98 sccm,中频电源采用恒功率模式,功率为 2.7 kW,本底真空度为  $8.0 \times 10^{-4}$  Pa,基片传动速度为 2.8 m/min。

表 3 不同基底实验结果

Table 3 Experimental results of different substrates

基底	$R_{\square}/(\Omega \cdot \text{m}^{-2})$	$T/\%$	$U/\text{V}$	$I/\text{A}$	$P/\text{Pa}$
浮法玻璃	25	84	455	6	3.4
PMMA	25	83	455	6	3.6
PET	26	83	455	6	3.6

从表 3 可以看出:浮法玻璃、PMMA、PET 三种基底对应的方块电阻分别为 25、25、26  $\Omega/\text{m}^2$ ,透光率分别为 84%、83%、83%,说明不同基底材料对薄膜方块电阻和透光率的影响均在可接受的范围内;但 PMMA 和 PET 基底的透光率较小,PET 基底的方块电阻稍大,这与不同材料的表面结构有关;对于 PMMA 和 PET 两种基底,镀膜时的真空度稍大,原因是这两种材料在镀膜过程中有放气现象,虽然本底真空度一致,却仍在镀膜时出现真空度增大现象,致使透光率和方块电阻的性能降低。

### 4 结 论

(1) 参与溅射的靶材数目增加时,膜层方块电阻快速降低,随后趋近于定值;同时,透光率呈振荡变化趋势,在方块电阻稳定后,透光率逐渐降低;薄膜颜色逐渐加深。

(2) 氧气流量逐渐增加时,方块电阻先减小后增加,透光率呈振荡变化趋势,当氧气流量大于 6 sccm 时,方块电阻迅速增加,透光率对应降低;薄膜颜色逐渐加深。

(3) 不同基底材料对方块电阻和透光率的影响不大,但由于放气属性不同,对真空度影响较大。

本文针对飞机座舱玻璃镀膜,重点研究了两个关键参数——方块电阻和可见光透光率,对于其他性能参数(例如附着力、耐摩擦性等)将在以后展开详细研究。

#### 参考文献

- [1] Li Y, Wu Z, Huang P L, et al. A new method for analyzing integrated stealth ability of penetration aircraft[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(2): 187-193.
- [2] Liu Z H, Huang P L, Wu Z, et al. Improvement and performance of parallel multilevel fast multipole algorithm[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(1): 164-169.
- [3] 姬金祖,王岩,黄沛霖,等. 基于矩量法的机身截面电磁散射特性分析[J]. 航空工程进展, 2013, 4(1): 37-42. Ji Jinzu, Wang Yan, Huang Peilin, et al. Study on electromagnetic scattering characteristics of fuselage section based on method of moment[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013, 4(1): 37-42. (in Chinese)
- [4] 陈世春,黄沛霖,姬金祖. 典型隐身飞机的 RCS 起伏统计特性[J]. 航空学报, 2014, 35(12): 3304-3314. Chen Shichun, Huang Peilin, Ji Jinzu. Radar cross section fluctuation characteristics of typical stealth aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(12): 3304-

3314. (in Chinese)
- [5] Yue K Z, Liu W L, Li G X, et al. Numerical simulation of RCS for carrier electronic warfare airplanes[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(2): 545-555.
- [6] 李玉杰, 陈东林, 李玉琴, 等. 飞机座舱有机玻璃与 ITO 薄膜附着力优化[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(1): 113-117. Li Yujie, Chen Donglin, Li Yuqin, et al. Optimization of adhesion force between ITO films and PMMA used in airplane canopy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(1): 113-117. (in Chinese)
- [7] Jiang X W, Zhao Q J, Zhao G Q, et al. Integrated optimization analyses of aerodynamic/stealth characteristics of helicopter rotor based on surrogate model[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(3): 737-748.
- [8] 冯博宇, 王瑛, 安航, 等. 机载雷达射频隐身性能风险的计算模型[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(1): 73-77. Feng Boyu, Wang Ying, An Hang, et al. Computational model of ratio frequency risk on stealth performance of airborne radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(1): 73-77. (in Chinese)
- [9] Liu Z H, Huang P L, Gao X, et al. Multi-frequency RCS reduction characteristics of shape stealth with MLFMA with improved MMN[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(3): 327-333.
- [10] 邓金萍, 李闯, 俞金海, 等. 基于视觉仿真的飞机座舱风挡炫光分布影响研究[J]. 航空工程进展, 2012, 3(3): 284-288. Deng Jinping, Li Wen, Yu Jinhai, et al. Cockpit windshield glare analysis based on optical simulation[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2012, 3(3): 284-288. (in Chinese)
- [11] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013. Sang Jianhua. Low-observable technologies of aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [12] 刘媛媛, 赵继风, 李延辉, 等. 溅射气压对铌锡锌氧化物薄膜晶体管性能的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(4): 391-396. Liu Yuanyuan, Zhao Jifeng, Li Yanhui, et al. Fabrication and characterization of  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2\text{-ZnO}$  thin film transistor[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, 36(4): 391-396. (in Chinese)
- [13] Noh M, Lee Y S, Park J, et al. Post-annealing effect on the optical property of indium tin oxide sputtered films[J]. Current Applied Physics, 2016, 16(12): 1576-1580.
- [14] Tina W, Sabrina Z, Jonas H, et al. Thin indium tin oxide nanoparticle films as hole transport layer in inverted organic solar cells[J]. Thin Solid Films, 2016, 616(10): 419-424.
- [15] Raad S S, Ibrahim R A, Asaad M. Free catalyst growth of indium oxide nanostructures and their structural and optical properties[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(19): 2228-2230.
- [16] Shina L I, Ruixin M A, Chunhong M A, et al. Bias voltage dependence properties of Nb-doped indium tin oxide thin films by RF magnetron sputtering at room temperature[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2013, 17(1): 216-221.
- [17] Chung S M, Shin J H, Cheong W S, et al. Characteristics of Ti-doped ITO films grown by DC magnetron sputtering[J]. Ceramics International, 2012, 38(1): 617-621.
- [18] 张维佳, 王天民, 崔敏, 等. 高密度高导电性 ITO 靶研制[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(7): 1021-1024. Zhang Weijia, Wang Tianmin, Cui Min, et al. Manufacture of ITO target with high density and high conductivity[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2006, 35(7): 1021-1024. (in Chinese)
- [19] 马晓波, 张维佳, 王东新, 等. 共沉淀粉末与混合粉烧结 ITO 靶材的微观组织结构研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(12): 2937-2942. Ma Xiaobo, Zhang Weijia, Wang Dongxin, et al. Comparing microstructures of ITO sputtering targets prepared by tin doped indium oxide powders and  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$  mixed powders[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2015, 44(12): 2937-2942. (in Chinese)
- [20] Sheong W S, Hong C H, Shin J H, et al. Low temperature fabrication of indiumtin oxide film by using ionized physical vapor deposition method[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 266(3): 10-13.
- [21] Tang W, Wang Y Q, Liu J, et al. Electrical and optical properties of Si-doped indium tin oxides as transparent electrode and anti-reflection coating for solar cells[J]. Current Applied Physics, 2015, 15(7): 794-798.
- [22] Tang W, Wang Y Q, Liu J, et al. Scratch behavior, microstructure, resistivity and optical properties of indium tin oxide film grown at low deposition temperature[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(11): 2683-2687.
- [23] 辛荣生, 林钰. 工艺条件对直流磁控溅射沉积 ITO 薄膜光电特性的影响[J]. 稀有金属, 2005, 29(6): 931-933. Xin Rongsheng, Lin Yu. Influence of technological factors on electrical and optical properties of ITO films deposited by DC magnetron sputtering method[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2005, 29(6): 931-933. (in Chinese)

#### 作者简介:

刘战合(1977—),男,博士,讲师。主要研究方向:飞行器隐身设计、薄膜沉积工艺。

姬金祖(1982—),男,博士,讲师。主要研究方向:飞行器隐身设计、飞机结构设计。

王晓璐(1982—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:飞机总体设计、空气动力学。

王菁(1991—),女,硕士,助教。主要研究方向:飞行器设计、民航飞机设计。

(编辑:马文静)