

文章编号:1674-8190(2018)01-062-07

铌掺杂 ITO 镀膜玻璃电磁散射特性试验

刘战合¹, 王菁¹, 王晓璐¹, 姬金祖², 黄沛霖²

(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: 座舱玻璃镀膜是实现飞行器隐身技术的重要途径之一。利用雷达散射截面(RCS)均值增益研究铌掺杂 ITO 镀膜玻璃隐身性能; 针对不同方块电阻的铌掺杂 ITO 镀膜玻璃, 进行系列化 RCS 暗室测试, 分析不同入射频率、极化方式的电磁散射特性。结果表明: 方块电阻增大时电磁散射减弱, 合适的方块电阻(小于 $40 \Omega/\text{m}^2$)有利于实现座舱外形隐身, 散射特性与金属接近, 频率较高时, 镜面散射波峰较窄。

关键词: 铌掺杂 ITO; 电磁散射; 薄膜; 雷达散射截面; 隐身

中图分类号: V218; TN011

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.01.008

Experiment on Electromagnetic Scattering Characteristics of Nb-doped ITO Coated Glass

Liu Zhanhe¹, Wang Jing¹, Wang Xiaolu¹, Ji Jinzu², Huang Peilin²

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

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

Abstract: The coating for cockpit glass is one of the important ways to realize aircraft stealth technology. The stealth characteristics of Nb-doped ITO (Indium Tin Oxides) coated glass is studied by using the RCS (Radar Cross Section) mean gain. A series of RCS darkroom tests are carried out for Nb-doped ITO coated glasses with different sheet resistance, and the electromagnetic scattering characteristics with different incident frequencies and polarization modes are analyzed. It is found that, when the sheet resistance increases, the electromagnetic scattering decreases, and the appropriate sheet resistance (less than $40 \Omega/\text{m}^2$) is beneficial to realize the shape-stealth of cockpit, and its scattering characteristic is also close to the metal's, the peak of specular scattering is narrow when the frequency is high.

Key words: Nb-doped ITO; electromagnetic scattering; thin film; RCS (radar cross section); stealth

0 引言

随着现代军事技术的发展, 隐身技术成为先进

武器平台的主要技术指标^[1-3]。对于飞行器(例如战斗机、武装直升机等), 座舱是其头向雷达散射截面(Radar Cross Section, 简称 RCS)影响较大的三个散射源之一^[4-6], 现代先进的隐身飞机(例如 F-22、J-20 等战斗机)及部分隐身化改进的飞机, 采用薄膜沉积技术, 在座舱玻璃表面涂覆一层或多层导电膜, 以达到控制电磁波透射率、反射率的目的^[7-9]。

结合外形隐身技术, 座舱玻璃镀膜可以实现对电磁波反射波峰的大小、方向等的控制。用于座舱玻璃透明导电功能的膜系可以分为早期的金属复合膜系和透明导电膜系(Transparent Conductive

收稿日期: 2017-07-26; 修回日期: 2017-10-08

基金项目: 国家重点基础研究计划(973 计划)(61320)

航空科学基金(2015ZD55005)

河南省科技攻关计划(172102210530, 152102210137)

河南省高等学校重点科研项目计划(17B590002)

郑州航空工业管理学院青年骨干教师资助计划(2017-12)

通信作者: 刘战合, nwpulzh@163.com

Oxides, 简称 TCO)^[10]。金属复合膜系(例如 TiO₂/Au/TiO₂ 膜系^[11])以金属为功能层(金属通常选择金属金或银),实际工程中由于金属本身极易氧化,尤其是湿盐环境下,电磁波控制性能将大幅降低,甚至损失基本功能,同时,金属膜层透光率较低;相对而言,TCO 通常为单层金属氧化物或多层金属氧化物氮化物膜系,例如单独采用 ITO(Indium Tin Oxides)^[12-13],或者在 ITO、AZO(ZnO:Al₂O₃)^[10]的基础上辅以其他介质保护或光学控制的膜层,该类膜系由于采用的金属氧化或氮化物通常具有较高的稳定性,尤其适合飞行器、武器系统在极端环境下的高效工作。从电磁隐身功能实现角度来讲,金属具有较高的电磁反射效果,是实现电磁波控制的有效途径;对于座舱玻璃的电磁隐身,通常是通过提高表面导电率来实现,但 TCO 与金属导电原理不同,TCO 本质上属于半导体,区别于金属的自由电子导电原理,TCO 根据 P 型、N 型的掺杂原子替代原理的不同有电子和空穴导电两种情况,当前飞行器座舱玻璃隐身主要采用 N 型半导体材料(例如 ITO、AZO)。基于方块电阻对电磁散射的影响考虑,李玉杰等^[7]针对飞机座舱有机玻璃,研究了 ITO 薄膜附着力影响关系及优化方法;刘战合等^[8]研究了铌掺杂 ITO 薄膜工艺参数对方块电阻和透光率的影响。基于磁控溅射工艺,Z. Ghorannevis 等^[14]研究了 AZO 等薄膜方块电阻、透光率等的影响因素。但是,对两种薄膜方块电阻、可见光透过率、RCS 等的相互耦合关系缺乏深入研究,尤其对 RCS 的反射、屏蔽特性尚需进一步研究。

针对以上情况,本文以非平衡磁控溅射镀膜的铌掺杂 ITO(Nb-Doped Indium Tin Oxides)镀膜玻璃为研究对象,系列化测试 10、15 GHz 入射频率下不同方块电阻镀膜玻璃的 RCS 曲线,研究其 RCS 散射规律,分析方块电阻对 RCS 的影响规律,以对应金属板为基础,分析导电玻璃不同角域上 RCS 与方块电阻、可见光透过率的变化规律。

1 研究方法

1.1 铌掺杂 ITO 镀膜玻璃

采用非平衡磁控溅射技术^[15]在 3 mm 厚浮法玻璃表面沉积具有不同方块电阻的铌掺杂 ITO 薄

膜^[8,13],镀膜时室内温度 18~26 °C、湿度小于 55%,镀膜中基底样品为室温,即采用室温镀膜方法。系列铌掺杂 ITO 镀膜玻璃,尺寸均为 10 cm × 10 cm,采用优化的工艺参数,保证可见光透过率满足飞行器座舱玻璃对采光需求,为了提高导电性,方块电阻为 20~150 Ω/m²,依次分为 7 个镀膜玻璃试件,分别对其编号为 1#~7#,同时为了研究铌掺杂 ITO 电磁散射特性,将其 RCS 结果与同等大小金属铝板(编号为 0#)进行对比分析,研究铌掺杂 ITO 镀膜玻璃的 RCS 分布及与方块电阻之间的内在影响关系。本文用于试验的铌掺杂 ITO 镀膜玻璃的方块电阻 R 、可见光透过率 T 如表 1 所示。

表 1 铌掺杂 ITO 镀膜玻璃光电参数

Table 1 Optoelectronic parameters of Nb-doped ITO coated glass

| 编号 | $R/(\Omega \cdot \text{m}^{-2})$ | $T/\%$ |
|----|----------------------------------|--------|
| 1# | 20 | 80 |
| 2# | 21 | 86 |
| 3# | 27 | 84 |
| 4# | 38 | 86 |
| 5# | 55 | 83 |
| 6# | 84 | 84 |
| 7# | 127 | 86 |

1.2 试验方法

本文研究 ITO 镀膜玻璃相对于金属板的电磁散射特性,而对于散射而言,其重点关注的影响范围为垂直其表面的一定角域。针对以上情况,在暗室进行测试,其测试方案如图 1 所示。

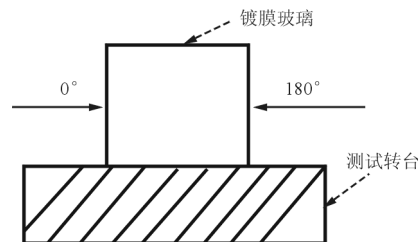


图 1 暗室测试试件安装示意图

Fig. 1 Installation diagram of specimen in darkroom test

实际测试过程中,铌掺杂 ITO 镀膜玻璃试件随测试转台旋转,完成不同方位角 RCS 测试,定义入射电磁波垂直薄膜表面为 0°,沿旋转台旋转范

围为 $0\sim 180^\circ$ 。为了便于分析,定义 $80^\circ\sim 100^\circ$ 为头向 20° 角域, $60^\circ\sim 120^\circ$ 为头向 60° 角域,测试频率为 10、15 GHz,实际暗室测试如图 2 所示。

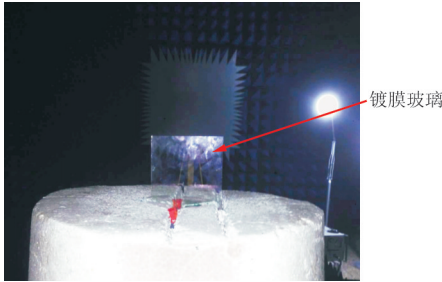


图 2 铌掺杂 ITO 镀膜玻璃暗室 RCS 测试图

Fig. 2 Sketch of NB-doped ITO coated glass's RCS test in darkroom

2 镀膜玻璃隐身性能评估方法

座舱玻璃镀膜的外形隐身是飞行器座舱隐身的主要技术手段,用于座舱玻璃的透明导电膜机理不同,其导电性和电磁散射性能表现不同。针对飞行器座舱镀膜玻璃,评价其隐身性能或电磁散射性能,可与相应几何尺寸大小的金属板进行对比,来研究其对飞机座舱隐身性能贡献。

记金属板在某一入射频率的 RCS 测试结果为 σ_{metal} ,单位为 dBsm^[16-17],对应铌掺杂 ITO 镀膜玻璃的 RCS 测试结果为 $\sigma_{\text{Nb-ITO}}$,理想的具有外形隐身性能的座舱玻璃镀膜具有与同等条件金属材料的电磁散射相同或接近,因此,评价其隐身性能可由二者差异来确定。

为了定量描述其外形隐身性能差异,从 RCS 角度出发,定义 RCS 增益如下:

$$G = \sigma_{\text{metal}} - \sigma_{\text{Nb-ITO}} \quad (1)$$

当 RCS 增益 G 接近或等于 0 dB 时,铌掺杂 ITO 镀膜玻璃具有与金属同等的隐身或电磁散射性能,而当 G 越大时,铌掺杂 ITO 镀膜玻璃的隐身效果越差。

由于 RCS 曲线对入射角比较敏感,RCS 分析时,通常采用一定角域内 $[a, b]$ 的 RCS 算术均值或几何均值来研究电磁散射特性, a, b 分别为起始、结束方位角,记 N 为 $[a, b]$ 角域上 RCS 测试采样点数目, σ_i 为第 i 个方位角上的 RCS,此时角域 $[a, b]$ 内 RCS 的算术均值为

$$\bar{\sigma}_a^b = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i}{N} \quad (2)$$

通常计算测试结果普遍采用 dBsm 为单位,记 $\sigma_{\text{dBsm}, i}$ 为第 i 个方位角上的 RCS,与式(2)类似,相应的以 dBsm 为单位的算术均值为

$$\bar{\sigma}_{a, \text{dBsm}}^b = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_{i, \text{dBsm}}}{N} \quad (3)$$

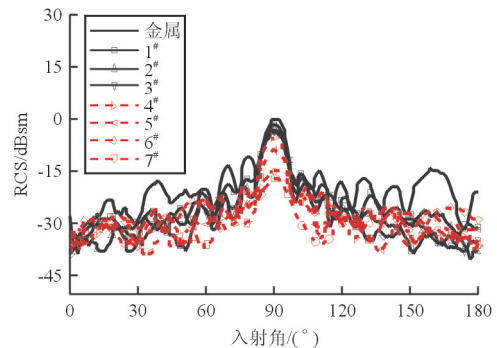
本文测试结果为 dBsm,分别以金属和铌掺杂 ITO 镀膜玻璃的 RCS 算术均值为基准,计算其 $[a, b]$ 角域内的 RCS 算术均值增益(简称增益)。

$$\bar{G} = \bar{\sigma}_{\text{metal}} - \bar{\sigma}_{\text{Nb-ITO}} \quad (4)$$

理论上讲,上述定义在 $[a, b]$ 角域内的 RCS 算术均值增益大于 0 dB,但不排除由于测试和计算精度的原因,引起有稍小的差异。同时,该值表示在角域 $[a, b]$ 范围内的隐身性能高低,通常增益越大时,表明用于座舱玻璃的透明导电薄膜的外形隐身性能越低,即其电磁散射特性与对应金属散射性能差异越大;反之,增益越低,甚至接近于 0 dB 时,表明座舱玻璃的外形隐身越接近金属化效果。从外形隐身角度考虑,通常重点讨论镜面散射区别,为了更加详细地研究座舱玻璃方块电阻对隐身性能、电磁散射特性的影响,本文重点讨论正入射左右 20° 角域和 60° 角域上的增益,以研究座舱玻璃的电磁散射特性。

3 铌掺杂 ITO 镀膜玻璃 RCS 特性

为了研究铌掺杂 ITO 镀膜玻璃的电磁散射特性,对不同方块电阻及对应金属板进行测试。10、15 GHz 入射频率的 HH、VV 极化时的系列化试件 RCS 测试曲线如图 3~图 4 所示。



(a) HH 极化

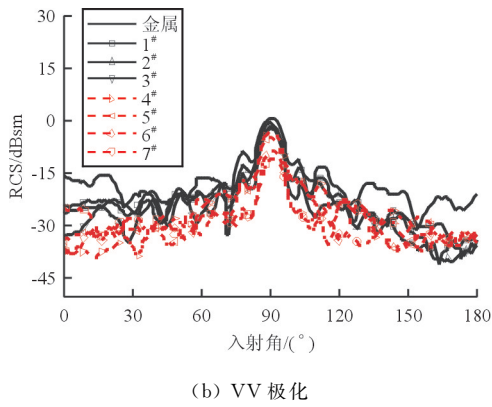


图 3 10 GHz HH 极化和 VV 极化 RCS 测试曲线
Fig. 3 RCS curves with 10 GHz and HH polarization, VV polarization

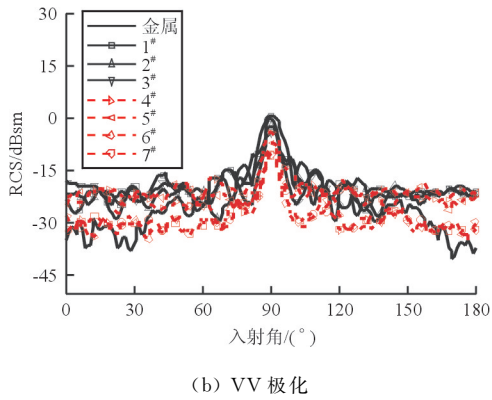
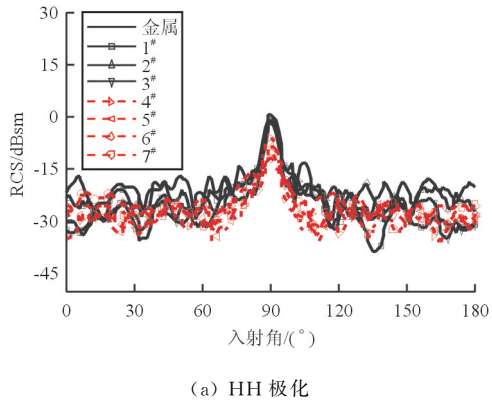


图 4 15 GHz HH 极化和 VV 极化 RCS 测试曲线
Fig. 4 RCS curves with 15 GHz and HH polarization, VV polarization

从图 3~图 4 可以看出, 铌掺杂 ITO 镀膜玻璃具有以下电磁散射特点:

①曲线分布特性。与对应金属板散射分布类似, 在头向 20°角域, 为典型的镜面散射, 其余角域

RCS 逐渐降低, 镜面散射部分是本文重点研究部分, 该部分对外形隐身较为明显, 因此以下分析中, 以该部分为主要研究对象。

②方块电阻影响。方块电阻对 RCS 散射曲线有重要影响, 方块电阻变大时, RCS 在各个角域上趋于变小; 对于镜面散射部分, 当方块电阻值较小时 (小于 40 Ω/m²), 镜面散射的波峰与金属基本一致, 表明具有较好的外形隐身效果, 随着方块电阻变大, 波峰逐渐变小, 尤其在方块电阻大于 100 Ω/m² 时, 尽管由于具有一定导电性, 仍然存在波峰, 但其峰值已有较大降低。

③频率特性和极化特性。15 GHz 时, HH 和 VV 极化的镜面散射波峰宽度比 10 GHz 要窄, 同时, 铌掺杂 ITO 镀膜玻璃的散射波峰在 15 GHz 表现得更窄; 与 HH 极化曲线相比, VV 极化的 RCS 曲线变化较为敏感, 方块电阻变大时, 其 RCS 曲线在较大角域范围内有所降低。

4 铌掺杂 ITO 镀膜玻璃电磁散射特性

4.1 头向 20°角域 RCS 算术均值特性分析

本文主要研究角域为头向 20°和 60°角域, 但从算术均值角度看, 60°角域与 20°角域散射规律类似, 因此讨论算术均值时重点讨论对外形隐身产生重要影响的头向 20°角域。以暗室 RCS 测试数据的算术均值为研究对象, 计算得到铌掺杂 ITO 镀膜玻璃在头向 20°角域的 RCS (以 dBsm 为单位) 算术均值, 如表 2 所示。

表 2 头向 20°角域 RCS 算术均值
Table 2 RCS arithmetic means in angle domains of heading 20 degree

| $R/(\Omega \cdot m^{-2})$ | RCS 算术均值/dBsm | | | |
|---------------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| | 10 GHz | | 15 GHz | |
| | HH | VV | HH | VV |
| 金属 | -3.946 2 | -2.857 2 | -4.942 5 | -3.193 5 |
| 20 | -5.818 4 | -4.621 1 | -6.523 8 | -5.526 3 |
| 21 | -6.787 9 | -6.101 6 | -7.031 4 | -7.560 0 |
| 27 | -7.508 7 | -6.236 3 | -6.810 0 | -8.884 3 |
| 38 | -9.127 7 | -7.033 4 | -11.634 2 | -8.856 3 |
| 55 | -12.671 8 | -8.650 8 | -13.147 5 | -12.667 7 |
| 84 | -17.649 2 | -12.479 4 | -15.257 0 | -15.739 0 |
| 127 | -19.806 3 | -14.863 2 | -16.390 0 | -15.509 8 |

4.2 不同角域 RCS 算术均值增益分析

为了进一步分析外形隐身效果,以 RCS 算术均值增益为研究对象进行研究。考虑铌掺杂 ITO 镀膜玻璃与对应金属材质在更大角域内的贡献,关注头向 20° 和 60° 角域;对其他角域,由于受 RCS 分布影响,从外形隐身角度出发,研究意义较小。铌掺杂 ITO 镀膜玻璃在头向 20° 和 60° 角域内的 RCS 算术均值增益分别如表 3~表 4 所示。

表 3 头向 20° 角域增益

Table 3 Gains in angle domains of heading 20 degree

| $R/(\Omega \cdot m^{-2})$ | RCS 算术均值增益/dB | | | |
|---------------------------|---------------|----------|----------|-----------|
| | 10 GHz | | 15 GHz | |
| | HH | VV | HH | VV |
| 20 | 1.872 2 | 1.763 9 | 1.581 3 | -2.332 8 |
| 21 | 2.841 7 | 3.244 4 | 2.088 9 | -4.366 5 |
| 27 | 3.562 5 | 3.379 1 | 1.867 5 | -5.690 8 |
| 38 | 5.181 5 | 4.176 2 | 6.691 7 | -5.662 8 |
| 55 | 8.725 6 | 5.793 6 | 8.205 0 | -9.474 2 |
| 84 | 13.703 0 | 9.622 2 | 10.314 5 | -12.545 5 |
| 127 | 15.860 1 | 12.006 0 | 11.447 5 | -12.316 3 |

表 4 头向 60° 角域增益

Table 4 Gains in angle domains of heading 60 degree

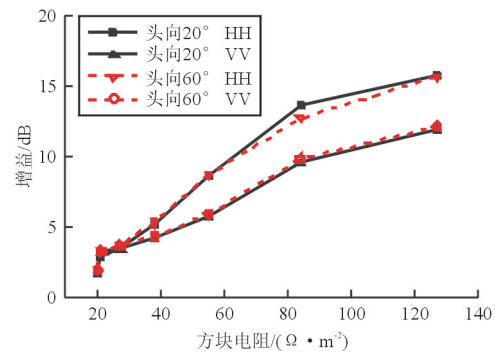
| $R/(\Omega \cdot m^{-2})$ | RCS 算术均值增益/dB | | | |
|---------------------------|---------------|----------|----------|----------|
| | 10 GHz | | 15 GHz | |
| | HH | VV | HH | VV |
| 20 | 2.019 2 | 1.938 8 | 1.916 6 | 2.705 2 |
| 21 | 3.300 6 | 3.313 9 | 2.188 3 | 4.807 8 |
| 27 | 3.705 1 | 3.679 5 | 2.682 0 | 5.784 3 |
| 38 | 5.354 4 | 4.359 4 | 6.743 1 | 5.991 2 |
| 55 | 8.758 5 | 5.977 9 | 8.096 5 | 9.334 3 |
| 84 | 12.754 1 | 9.865 9 | 10.118 2 | 12.656 4 |
| 127 | 15.727 4 | 12.155 1 | 11.139 9 | 12.659 5 |

从表 3~表 4 可以看出:在铌掺杂 ITO 镀膜玻璃方块电阻较小时,增益较小,与金属板相比在 $-1 \sim 4$ dB,结合图 4,方块电阻较小时,该镜面散射区域的 RCS 曲线基本重合,差异较小;方块电阻增大时,增益迅速变大,达到 $80 \Omega/m^2$ 以上时,增益增大约 10 dB,表明铌掺杂 ITO 镀膜玻璃的 RCS 降低一个数量级,即,从曲线角度看,尽管仍具有一定的外形隐身作用,但其影响显著降低;对于增益变化来说,也有一定的极化特性,对于头向 20° 角域,

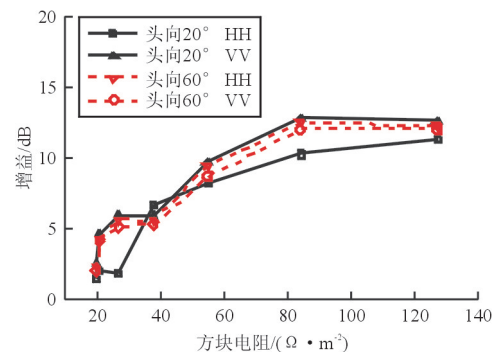
VV 极化增益相比 HH 极化大,表明 VV 极化影响较为明显,但在方块电阻较小时,即小于 $40 \Omega/m^2$ 时,仍具有较高的外形隐身作用,增益在 5 dB 以内,同时 RCS 测试曲线也说明了这一点;对于头向 60° 角域,由于受一定非镜面散射区域影响,增益在方块电阻较小时相对较大,而在方块电阻较大时,其增益变大,但也有部分情况下增益变化较小情况。其他变化规律基本与头向 20° 角域类似。

4.3 方块电阻对 RCS 均值增益的影响

为了进一步分析方块电阻、入射频率、极化方式等对 RCS 算术均值增益的影响,10、15 GHz 的方块电阻 R 与增益 G 的变化关系如图 5 所示。对于飞机座舱玻璃,从飞行安全角度考虑,可见光透过率应大于 75%。而本文所有铌掺杂 ITO 镀膜玻璃试件的透过率均大于 80%,满足飞机座舱玻璃可见光需求,因此在曲线中并未对可见光透过率进行专门论述。



(a) 10 GHz



(b) 15 GHz

图 5 10 GHz 和 15 GHz 增益变化曲线

Fig. 5 Curves of gains in 10 GHz and 15 GHz

从图 5 可以看出:

(1) 方块电阻增大时,在头向 20° 和 60° 角域

内, 10、15 GHz 情况下的增益均逐渐变大, 尤其在头向 20° 角域, 真正有外形隐身作用的是在方块电阻小于 $40 \Omega/\text{m}^2$ 。

(2) 对于 10 GHz, 方块电阻较小时, 在 $20\sim 40 \Omega/\text{m}^2$, 头向 20° 和 60° 角域的 RCS 增益均比较小, 表明此范围均有较高的外形隐身效果; 而方块电阻较大时, HH、VV 极化的影响规律逐渐分散, 两个角域内的 HH 极化 RCS 均值增益较为明显; 对于 15 GHz, 方块电阻较小时, VV 极化 RCS 增益较为明显, 但增益在外形隐身接受范围内, 方块电阻变大时, 与 10 GHz 规律基本一致, 而 HH、VV 极化差异相对较小。

(3) 对于头向 20° , 两个频率、两种极化下的增益变化曲线趋势基本一致, 而头向 60° 角域的增益变化曲线表现为一定的震荡性。

分析以上结果, 其原因主要是: 在头向 20° 角域, 主要表现为镜面散射效果, 结合散射曲线, 此时影响因素比较单一, 也更能体现出铌掺杂 ITO 镀膜玻璃的外形隐身作用; 而在头向 60° 角域, 计入了大量镜面散射之外的 RCS 散射效果, 影响外形隐身效果的分析, 由于不同频率、不同方块电阻下的测试曲线在镜面散射之外震荡较为明显, 且不具有明显一致现象, 导致对增益的影响产生震荡效果。

从测试结果来看, 铌掺杂 ITO 镀膜玻璃的方块电阻对 RCS 增益有较大影响, 方块电阻较小时, 具有较好的外形隐身效果, 但方块电阻过低会带来薄膜增厚、透光率降低、工艺过程复杂、成本较高的缺点, 因此, 应根据实际需求, 合理调整方块电阻和外形隐身、透光率的关系。

5 结 论

(1) 具有外形隐身效果的铌掺杂 ITO 镀膜玻璃的 RCS 曲线分布规律与对应金属板基本一致, 表现为镜面散射区(即头向 20° 角域)的散射曲线波峰形式、宽度、高度等相似。

(2) 铌掺杂 ITO 镀膜玻璃在不同入射频率、不同极化情况下均具有外形隐身效果, 且当方块电阻小于 $40 \Omega/\text{m}^2$ 时, 具有与金属材质类似的外形隐身作用, 不影响座舱内采光需求; 频率较高时, 波峰较窄, VV 极化变化更敏感。

(3) 铌掺杂 ITO 镀膜玻璃的方块电阻越大,

其 RCS 增益越大, 隐身性能变弱, 通常为了获得优异的外形隐身效果, 方块电阻应小于 $40 \Omega/\text{m}^2$ 。

参考文献

- [1] Yue K Z, Liu W L, Ji J Z, et al. Numerical simulation of RCS for carrier electronic warfare airplanes[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(2): 545-555.
- [2] 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)
- [3] 刘战合, 王晓璐, 王菁, 等. 理想缺陷目标电磁散射特性提取新方法[J]. 航空工程进展, 2017, 8(2): 236-243.
Liu Zhanhe, Wang Xiaolu, Wang Jing, et al. Novel extraction approach of electromagnetic scattering for ideal discontinuities[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2017, 8(2): 236-243. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] 刘战合, 姬金祖, 王晓璐, 等. 飞机座舱玻璃铌掺杂 ITO 镀膜工艺参数选择[J]. 航空工程进展, 2017, 8(1): 78-83.
Liu Zhanhe, Ji Jinzu, Wang Xiaolu, et al. Parameter selection of Nb-Doped ITO coating process for aircraft cockpit glass[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2017, 8(1): 78-83. (in Chinese)
- [9] 邓金萍, 李闻, 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)
- [10] Kyu Ung Sim, Seung Wook Shin, Moholkar A V, et al. Effects of dopant(Al, Ga, and In) on the characteristics of ZnO thin films prepared by RF magnetron sputtering system[J]. *Current Applied Physics*, 2010, 10(3): 463-467.
- [11] Zhou J, Wu Z, Liu Z H. Optical and electrical properties of TiO₂/Au/TiO₂ multilayer coatings in large area deposition at room temperature [J]. *Rare Metals*, 2008, 27 (5): 457-462.
- [12] 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)
- [13] 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(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 In₂O₃-SnO₂ mixed powders[J]. *Rare Metal Materials & Engineering*, 2015, 44(12): 2937-2942. (in Chinese)
- [14] Ghorannevis Z, Akbarnejad E, Salar A, et al. Application of RF magnetron sputtering for growth of AZO on glass substrate [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2016, 447: 62-66.
- [15] Zhou J, Wu Z, Liu Z H. Influence and determinative factors of ion-to-atom arrival ratio in unbalanced magnetron sputtering systems[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2008, 15(6): 775-781.
- [16] 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.
- [17] Ji J Z, Huang P L. Series expansion feasibility of singular integral in method of moments[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2014, 25(3): 386-392.

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。

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。

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。

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。

黄沛霖(1975—),男,博士,副教授。主要研究方向:飞行器隐身设计、飞机总体设计。

(编辑:赵毓梅)