

有 ITO 透明导电膜的平面分层介质系统的 电磁波性能理论研究*

张维佳 王天民 崔 敏 戎霏伦

(北京航空航天大学理学院, 北京 100083)

(2005 年 4 月 13 日收到, 2005 年 8 月 29 日收到修改稿)

理论研究了有 ITO(indium tin oxide)透明导电膜的多层平面分层介质系统的电磁性能, 给出的理论曲线和实测曲线符合很好. 多层平面分层介质系统的电磁性能与 ITO 膜(方块电阻为 8Ω)所在界面位置和平面分层介质系统层数及各层厚度等有关. 优化设计了一种含有 ITO 透明导电膜的厚度仅 7.35mm 的四层平面分层介质系统, 其在 $8\text{--}18\text{GHz}$ 频段内电磁波反射性能很好. 作为多层平面分层系统中的 ITO 导电膜, 其方块电阻应低于 30Ω , 并且越小, 其反射性能越好.

关键词: 多层平面介质系统, 电磁性能, ITO 透明导电膜

PACC: 5253H, 8140R, 8160C

1. 引 言

ITO 膜是一种铟锡氧化物膜, 具有优良的透明导电性, 并且其红外发射率也很低^[1, 2]. 因此, ITO 膜可作为透明电极广泛用于显示屏, 也可作为红外隐身材料表现军事价值等. 然而 ITO 膜也具有优良的电磁波性能且研究甚少, 本文在这方面作了较深入的理论探讨, 取得了有价值的结果. 本文研究可广泛用于各种电磁波屏蔽系统如飞机座舱隐身涂层设计和微波炉窗结构设计等.

2. 平面分层系统的电磁波反射透射理论

有 ITO 透明导电膜的平面分层系统如图 1 所示. 对于该系统的电磁性能计算, 一般采用等效波阻抗法, 即将双平行平面界面转换为单平面界面来计算反射系数, 逐层递推可求得各界面的反射系数. 但是, 这种方法计算复杂, 并且对透射系数不适用^[3, 4]. 而采用介质层特征矩阵(传输矩阵)计算该系统的电磁性能需要较深的理论知识, 但便于编程计算^[5, 6]. 我们采用后者, 并给出一种简单而清晰的推导.

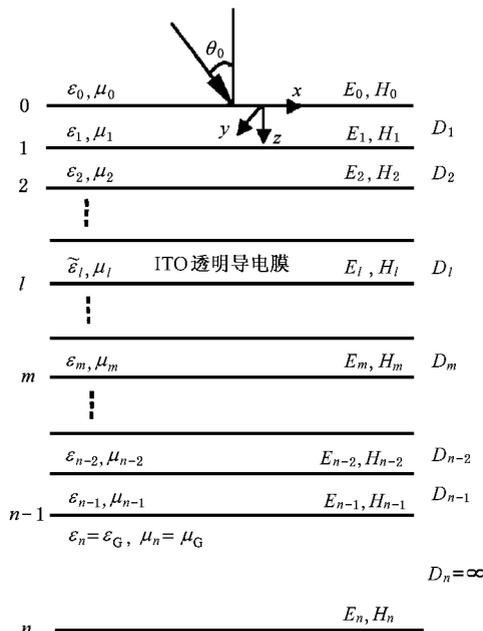


图 1 有 ITO 透明导电膜的平面分层系统

电磁波可分为垂直极化波和平行极化波(见图 2 图 3). 对于平行极化波矢量有

$$E_y = 0, E_x = E_{x0} e^{i(\omega t - k_{x0} x - k_z z)}, E_z = E_{z0} e^{i(\omega t - k_{x0} x - k_z z)}, \quad (1)$$

$$H_y = H = H_0 e^{i(\omega t - k_{x0} x - k_z z)}, H_x = H_z = 0. \quad (2)$$

* 国防预研项目(批准号 413100202)资助的课题.

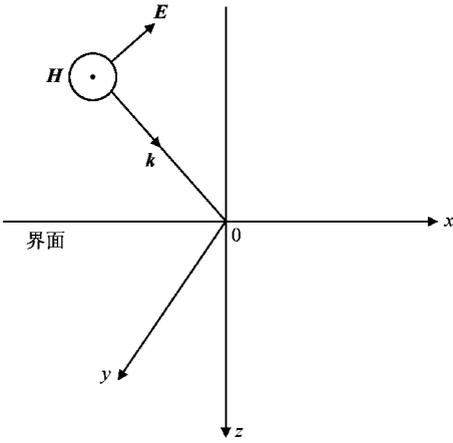


图 2 平行极化波入射界面示意图

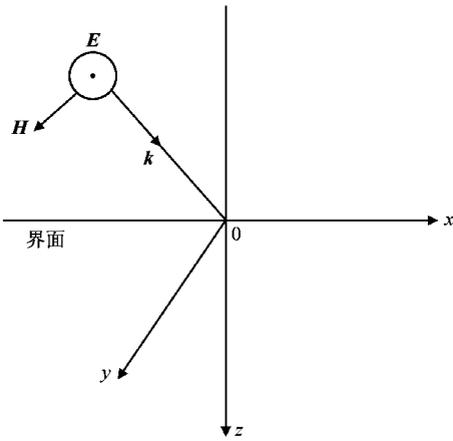


图 3 垂直极化波入射界面示意图

由无源的麦克斯韦电磁方程组中两个旋度方程有

$$\nabla \times \mathbf{E} = \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} + jk_{x0} E_z \right) \mathbf{j} = -j\omega\mu H_y \mathbf{j}, \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = -\frac{\partial H_y}{\partial z} \mathbf{i} + \frac{\partial H_y}{\partial x} \mathbf{w} = j\omega\epsilon E_x \mathbf{i} + j\omega\epsilon E_z \mathbf{w} \quad (4)$$

$\epsilon(z)$ 是 z 缓慢变化的函数, 所以有波动方程.

显然, 除出射场区外, 在各介质层内都有入射波和反射波. 对 z 方向, 若以第 m 界面上的电磁波为参考且上述两电磁波在此界面以上即 $z - z_m < 0$, 则入射波在相位上超前参考电磁波, 其相位因子为 $e^{-jk_m(z-z_m)}$, 而反射波在相位上落后参考电磁波即相位因子为 $e^{jk_m(z-z_m)}$. 对 x 方向, 若以第 $x=0$ 面上的电磁波为参考且入射波在左 ($x < 0$) 而反射波在右 ($x > 0$) 则入射波在相位上超前参考电磁波即相位因子为 $e^{-jk_{x0}x}$, 而反射波在相位上落后参考电磁波即相位因子为 $e^{-jk_{x0}x}$. 设 A_m, B_m 分别为入射波振幅

和反射波振幅. 考虑到界面上电磁矢量的切向分量连续, 并利用 (3) 和 (4) 式, 则能满足波动方程的第 m 介质层内 H_y 和 E_x 分别为

$$H_y = (A_{m//} e^{-jk_m(z-z_m)\lambda\cos\theta_m} + B_{m//} e^{jk_m(z-z_m)\lambda\cos\theta_m}) \times e^{-jk_m x \sin\theta_m}, \quad (5)$$

$$E_x = \eta_{m//} (A_{m\perp} e^{-jk_m(z-z_m)\lambda\cos\theta_m} - B_{m//} e^{jk_m(z-z_m)\lambda\cos\theta_m}) \times e^{-jk_m x \sin\theta_m}, \quad (6)$$

其中

$$\eta_{m//} = \frac{k_m \cos\theta_m}{\omega\epsilon} = \sqrt{\mu_0 \mu_m (\epsilon_0 \epsilon_m)} \cos\theta_m, \quad (7)$$

显然, 根据在 $z = z_m$ 面上的电磁场值和在 $z = z_m$ 面上的电磁场值的关系, 可以建立介质层间电磁矢量的递推关系, 进而得到第 0 界面上的电磁矢量为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_{0//} \\ H_{0//} \end{bmatrix} &= K_{1//} K_{2//} \dots K_{n//} \begin{bmatrix} E_{n//} \\ H_{n//} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} a_{11//} & a_{12//} \\ a_{21//} & a_{22//} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{n//} \\ H_{n//} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中

$$K_{m//} = \begin{bmatrix} \cos\delta_m & j\eta_{m//} \sin\delta_m \\ j\frac{1}{\eta_{m//}} \sin\delta_m & \cos\delta_m \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\delta_m = 2\pi\nu \sqrt{\epsilon_m \mu_m} D_m \cos\theta_m.$$

在 $z = z_m$ 面上的平行极化波反射系数 $r_{m//}$ 和表面阻抗 $Z_{m//}$ 分别为

$$r_{m//} = \frac{B_{m//}}{A_{m//}} = \frac{\eta_{m//} - Z_{m//}}{\eta_{m//} + Z_{m//}},$$

$$Z_{m//} = \frac{E_{m//}}{H_{m//}}. \quad (10)$$

显然, 就是该平面分层系统的平行极化波反射系数. 注意到出射场区 $D_n = \infty$, 无反射波即 $B_n = 0$, 因此, $r_n = 0$, 由 (10) 式知 $Z_{n//} = \eta_{n//}$. 再利用 (8) 式, 则表面阻抗 $Z_{0//}$ 为

$$Z_{0//} = \frac{a_{11//} \eta_{n//} + a_{12//}}{a_{22//} + a_{21//} / \eta_{n//}}, \quad (11)$$

$r_{0//}$ 就是该平面分层系统的平行极化波反射系数 $r_{//}$. 显然, 平面分层系统的平行极化波功率反射率 $R_{//}$ 为

$$R_{//} = r_{//} r_{//}^* = \left[\frac{(a_{21//} \eta_{0//} - a_{11//}) \eta_{n//} + a_{22//} \eta_{0//} - a_{12//}}{(a_{21//} \eta_{0//} + a_{11//}) \eta_{n//} + a_{22//} \eta_{0//} + a_{12//}} \right]^2 \quad (共轭的), \quad (12)$$

若某介质层属导电层 (如 ITO 膜) 来说, 只须引入复

介电常数 $\tilde{\epsilon} = \epsilon' - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon}$ 即可。

采用同样的方法, 并注意到在 $z = z_{n-1}$ 面以下仅有透射波以及因垂直极化波 $E_{m\perp}$ 与 $H_{m\perp}$ 反号而导致其表面阻抗 $Z_{m\perp}$ 的表达式有负号(见图 3), 可以得到平面分层系统的平行极化波透射率和垂直极化波反射率及透射率分别为

$$T_{//} = \sqrt{\frac{\mu_{rG} \cos\theta_G}{\epsilon_{rG} \cos\theta_0} \frac{2\eta_{0//}(a_{11//} - a_{21//} Z_{0//})}{Z_{0//} + \eta_{0//}}} \quad (13)$$

(共轭的),

$$R_{\perp} = \left[\frac{(a_{11\perp} + a_{21\perp} \eta_{0\perp})\eta_{n\perp} - a_{22\perp} \eta_{0\perp} - a_{12\perp}}{(a_{11\perp} - a_{21\perp} \eta_{0\perp})\eta_{n\perp} + a_{22\perp} \eta_{0\perp} - a_{12\perp}} \right] \quad (14)$$

(共轭的),

$$T_{\perp} = \sqrt{\frac{\epsilon_{rG} \cos\theta_G}{\mu_{rG} \cos\theta_0} \left[\frac{\chi a_{12\perp} + a_{22\perp} Z_{0\perp}}{\eta_{0\perp} + Z_{0\perp}} \right]} \quad (15)$$

(共轭的),

其中

$$\begin{bmatrix} E_{0\perp} \\ H_{0\perp} \end{bmatrix} = K_{1\perp} K_{2\perp} \dots K_{n\perp} \begin{bmatrix} E_{n\perp} \\ H_{n\perp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11\perp} & a_{12\perp} \\ a_{21\perp} & a_{22\perp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{n\perp} \\ H_{n\perp} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$K_{m\perp} = \begin{bmatrix} \cos\delta_m & -j\eta_{m\perp} \sin\delta_m \\ -j \frac{1}{\eta_{m\perp}} \sin\delta_m & \cos\delta_m \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$Z_{0\perp} = \frac{a_{11\perp} \eta_{n\perp} - a_{12\perp}}{a_{22\perp} - a_{21\perp} \eta_{n\perp}},$$

$$\eta_{m\perp} = \frac{\omega\mu}{k_m \cos\theta_m} = \frac{\sqrt{\mu_0 \mu_{rm}} (\epsilon_0 \epsilon_{rm})}{\cos\theta_m}. \quad (18)$$

电磁波功率反射率 $R(\%) = 0.5(R_{\perp} + R_{//})$ 用 dB 表示即 $R(\text{dB}) = 10\lg R(\%)$ 。

3. 理论计算结果及分析

多层复合玻璃结构如图 4 所示。

航空无机玻璃的相对介电常数 ϵ_r 为 6.7; PVB 胶片的相对介电常数 ϵ_r 为 2.8。考虑到复合玻璃的透光性, 选取 ITO 透明导电膜。其电导率 σ 为 $1066\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, 膜厚 d 为 1200nm, 其方块电阻为 8Ω 。由于 ITO 膜均属非磁性材料, 所以取 $\mu_r = 1$ 。该 ITO 膜置于图 4 所示复合玻璃第 2 界面处, 电磁波垂直入射其复合玻璃的反射率理论曲线与实测曲线如图 5 所示。由此可见, 理论曲线与实测曲线基本符合。含有 ITO 导电膜的复合玻璃的电磁波反射率远

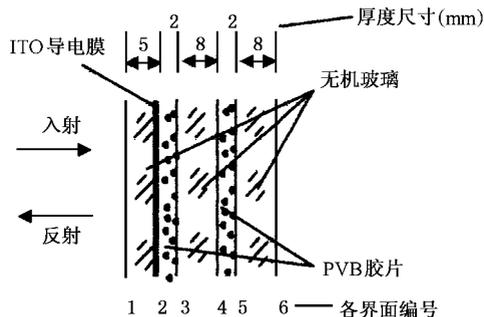


图 4 含导电膜的六层复合玻璃结构图

大于无导电膜复合玻璃的。对于图 4 含有导电膜复合玻璃来说, 在 17.4GHz 附近出现反射率极小波谷, 这理论结果与实测是一致的。

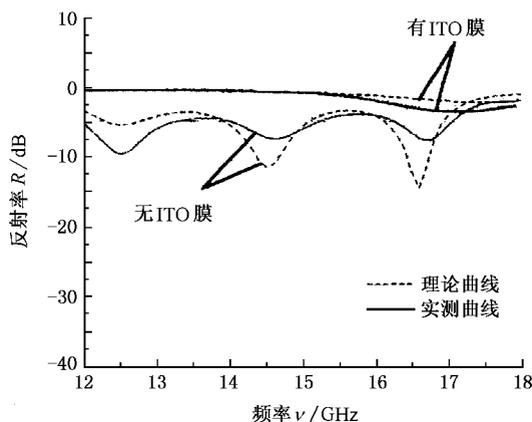


图 5 六层复合玻璃的电磁波反射率理论曲线与实测曲线的比较

图 6 是 ITO 导电膜在图 4 复合玻璃不同界面处的电磁波反射率理论曲线。由该图可知, 当 ITO 导电膜在第一界面处时, 其电磁波反射率最大。但是导电膜暴露在大气之中, 其导电性能会随时间而变差, 从而影响复合玻璃电磁性能。因此, 应将导电膜置于复合玻璃内界面处。对于图 4 含有导电膜复合玻璃来说, 将导电膜置于第 3 界面处, 其复合玻璃反射电磁性能最好。

事实上, 复合玻璃反射电磁波性能与复合玻璃各层厚度有关。因此, 在复合玻璃层数和各层厚度上以及导电膜位于的界面位置都存在一个优化组合。为设计这种复合玻璃优化结构, 不妨设评价函数 FR_v 为

$$FR_v = \sum_{i=0}^{20} R(d_1, d_2, \dots, d_n, \nu = 8\text{GHz} + 0.5i). \quad (19)$$

显然, 可以评价函数 FR_v 为最大进行寻优。统计计

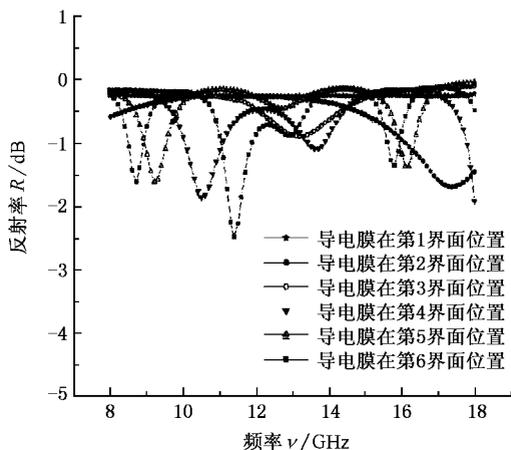


图 6 ITO 导电膜在六层复合玻璃不同界面处的电磁波垂直入射的反射率理论曲线

试验法和单纯形法相结合进行数值逼近^[7],得到含有 ITO 导电膜的优化复合玻璃结构如图 7 所示.该

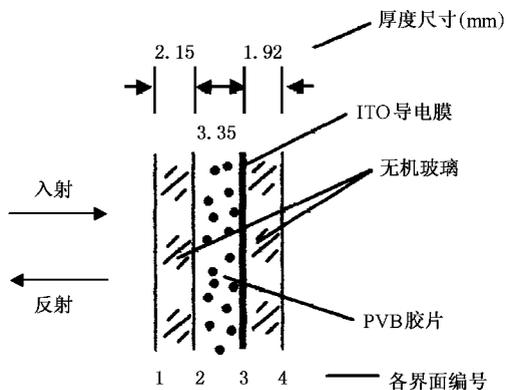


图 7 ITO 导电膜在第 3 界面处的优化复合玻璃结构图

结构总厚度才 7.35mm,方块电阻分别为 8Ω,16Ω,32Ω 的 ITO 导电膜在第 3 界面处,其电磁波反射率理论曲线如图 8 所示.可见,对于方块电阻为 8Ω 的 ITO 导电膜来说,在 8—18GHz 波段范围内其优化复合玻璃结构电磁波反射率很大,即使在该波段两端的电磁波反射率也大于 -0.6dB.然而,电导率 σ 为 $1066\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的 ITO 导电膜,其厚度须 1200nm,方块电阻才为 8Ω.尽管 ITO 膜的消光系数很小,但是太厚的 ITO 膜仍不利于透光,并且也费原材料.从图 8 可以看出,对于方块电阻为 16Ω 的 ITO 导电膜来说,其优化复合玻璃结构电磁波反射率仍大于 -1.0dB,可以满足使用要求.但方块电阻为 32Ω 的 ITO 膜,其复合玻璃的电磁波反射性能稍差.

对于镀有 ITO 膜的 10mm 单层有机玻璃($\epsilon_r =$

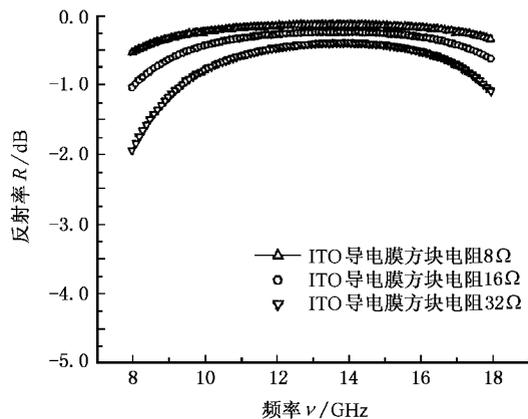


图 8 含有导电膜的优化复合玻璃结构的电磁波(8—18GHz)垂直入射的反射率理论曲线

2.37),采用本方法也很容易计算其电磁波反射性能如图 9 和图 10 所示(ITO 膜在第 2 界面处).由图可

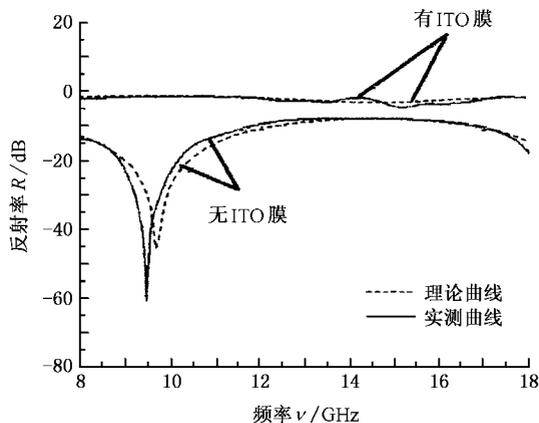


图 9 含有 ITO 导电膜的有机玻璃的电磁波反射率理论曲线和实测曲线的比较

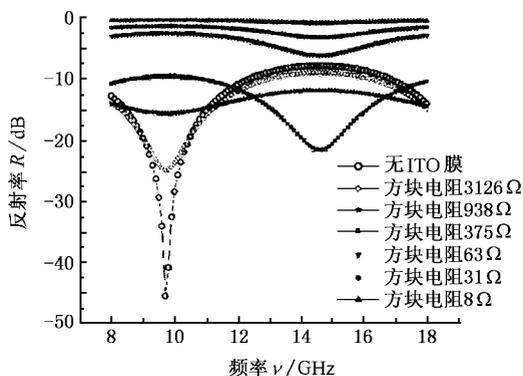


图 10 含有不同阻值 ITO 导电膜的有机玻璃的电磁波反射率理论曲线

见,同样有理论曲线和实测曲线吻合,并且当 ITO 膜

方块电阻约为 375Ω 时,干涉峰位发生变化.这表明,方块电阻小于 375Ω 的 ITO 膜与有机玻璃间才具有电磁波干涉效应.这是显然的,因为 ITO 膜厚最多是微米数量级,而雷达电磁波波长是毫米数量级.因此,若 ITO 膜不导电的话,则其特征矩阵近乎单位矩阵.而只有当 ITO 膜的电导率大到一定程度时,其特征矩阵才表现出来.这可以通过(9)式和(17)式看出.

4. 结 论

理论研究了有 ITO 透明导电膜的多层平面分层介质系统的电磁性能,给出了一种简单而清晰的其电磁波反射透射的推导方法,并且公式简洁,易编程

计算任意多层平面分层介质系统的电磁反射透射吸收等,可推广使用.计算的理论曲线和实测曲线吻合很好.研究表明,多层平面分层介质系统的电磁性能与 ITO 膜(方块电阻为 8Ω)所在界面位置和复合玻璃层数及各层厚度等有关. ITO 导电膜位于入射侧第 1 界面处,其多层平面分层介质系统的电磁波反射性能最好,但薄膜暴露于大气而受环境腐蚀.优化设计了一种含有 ITO 透明导电膜的厚度仅 7.35mm 的四层复合玻璃结构,其在 $8\text{—}18\text{GHz}$ 频段内电磁波反射性能很好,并且 ITO 导电膜在系统内界面处.只有当 ITO 膜的方块电阻小于 375Ω 时,其特征矩阵才表现出来.作为多层平面分层系统中的 ITO 导电膜,其方块电阻应低于 30Ω ,而且越小,其反射性能越好.

- [1] Zhan W J, Wang T M, Zhong L Z, Wu X W, Cui M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 565 (in Chinese) [张维佳、王天民、钟立志、吴小文、崔敏 2005 物理学报 **54** 565]
- [2] Zhang W J, Wang T M 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1923 (in Chinese) [张维佳、王天民 2004 物理学报 **53** 1923]
- [3] Ma H W, Wang L L, Zhao X H 2004 *Fundamentals of Electromagnetics Theory* (Beijing: Beijing Post University Press) p153—155 (in Chinese) [马海武、王丽黎、赵仙红 2004 电磁场理论(北京:北京邮电大学出版社)第 153—155 页]
- [4] Pan Z E 2003 *Electromagnetic Wave, Antenna and Radiowave Propagation* (Beijing: China Machine Press) p147—148, 169—171

(in Chinese) [潘仲英 2003 电磁波、天线与电波传播(北京:机械出版社)第 147—148, 169—171 页]

- [5] Jin Au Kong, Wu J (translator) 2003 *Electromagnetic Wave Theory* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p216—223 (in Chinese) [Jin Au Kong 著,吴季译 2003 电磁波理论(北京:电子工业出版社)第 216—223 页]
- [6] Gong Z L, Xiu C H 1990 *Modern Electromagnetics Theory* (Beijing: Beijing University Press) p69—72 (in Chinese) [龚仲麟、徐承和 1990 近代电磁理论(北京:北京大学出版社)第 69—72 页]
- [7] Zheng Q 1978 *Journal of Applied Mathematics* **1** 161 (in Chinese) [郑权 1978 应用数学学报 **1** 161]

Electromagnetic performance of plane delamination media with ITO transparent conductive film *

Zhang Wei-Jia Wang Tian-Min Cui Min Rong Ai-Lung

(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics, School of Science, Beijing 100083, China*)

(Received 13 April 2005 ; revised manuscript received 29 August 2005)

Abstract

Electromagnetic performances of multilayer plane delamination media with an ITO (indium tin oxide) transparent conductive film have been researched theoretically and the calculated curve well agrees with the measured curve. The research shows that the electromagnetic performances of the multilayer media are related to ITO (with sheet resistance 8Ω) film 's interface location, the layer number of the plane delamination media and the thickness of the plane delamination media, and so on. An optimized system of four-layer plane delamination mediums with a thickness of only 7.35mm and very large electromagnetic reflectance within the range of 8—18GHz has been designed. The sheet resistance of the ITO film in the multilayer plane delamination media should be less than 30Ω and the smaller the sheet resistance, the larger the electromagnetic reflectance of the multilayer plane delamination media.

Keywords : multilayer plane delamination media , electromagnetic performances , indium tin oxide transparent conductive film

PACC : 5253H , 8140R , 8160C

* Project supported by the National Defence Pre-research Foundation of China (Grant No. 413100202).