

磁性 Salisbury 屏的高频响应

伍瑞新[†] 陈 平

(南京大学电子科学与工程系, 南京 210093)

(2003 年 11 月 3 日收到, 2003 年 12 月 9 日收到修改稿)

研究了利用磁性薄膜构造 Salisbury 屏的可能性及其在微波频段的反射率频率特性. 结果表明, 利用铁磁性材料在铁磁共振频率附近磁化率具有 $\chi'' > \chi'$ 的特性, 可以构造出对电磁波有良好吸收性能的磁性 Salisbury 屏. 通过对铁磁材料高频磁谱物理机理的分析后指出, 具有弛豫型共振磁谱的铁磁材料可以构造出薄膜型 Salisbury 屏, 其厚度为微米甚至亚微米量级. 反射率的频率特性与磁性材料的特征阻抗 z_r 有关, 它取决于铁磁共振频率和静态磁化率. 反射率的频率响应显示磁性薄膜 Salisbury 屏具有较宽的吸收带宽.

关键词: 磁性 Salisbury 屏, 反射率, 频带响应, 磁性薄膜

PACC: 2842Q, 5235H, 5270G

1. 引言

近年来通信、计算机网络等高技术的发展使得电磁兼容的矛盾日益突出, 如何解决这一问题已成为技术发展中必须要解决的问题. 用电磁波吸收材料来解决电子系统或器件间的电磁干扰是一种行之有效的办法. Salisbury 屏是一种性能良好的电磁波吸收材料, 经过精心设计的 Salisbury 屏能在一定的频率范围内有效地吸收电磁波.

传统的 Salisbury 屏是由介质层和电阻层交替排列构成的一种电损耗型吸收材料. 当介质层和电阻层的电磁参数满足一定的条件时, Salisbury 屏在一定的频率范围内有着很小的反射率, 电磁波的损耗来源于屏中的电阻层. 对 Salisbury 屏的设计、频率响应特性等问题人们已做了深入地研究^[1-5]. 文献 [6] 较深入地研究了金属导电薄膜型 Salisbury 屏的高频响应问题. 作为电性 Salisbury 屏的对偶问题, 从理论上讲应存在着磁性 Salisbury 屏, 它同样具有对电磁波的吸收功能. 本文就如何构造磁性 Salisbury 屏以及磁性 Salisbury 屏的高频特性进行讨论.

2. 基本原理

考虑如图 1 所示的磁性 Salisbury 屏, 它由金属衬底、介质隔离层和磁性薄膜层构成. 如有平面电磁

波垂直入射到磁性薄膜表面(如图 1 所示), 根据传输线理论^[7], 在介质隔离层和磁性薄膜的交界面 I、磁性薄膜表面 II 处的输入阻抗分别为

$$Z_I = j\eta_1 \tan(\beta_1 D), \quad (1)$$

$$Z_{II} = \eta_2 \frac{Z_I + j\eta_2 \tan(\beta_2 L)}{\eta_2 + jZ_I \tan(\beta_2 L)}, \quad (2)$$

其中 η_1, β_1, D 为介质隔离层的波阻抗、传播常数和厚度, η_2, β_2, L 为磁性薄膜的波阻抗、传播常数和厚

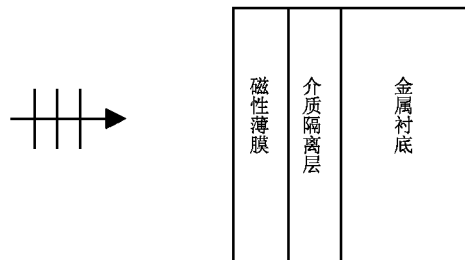


图 1 磁性薄膜型吸收材料示意图

度. 磁性 Salisbury 屏的电磁损耗主要来源于磁性薄膜的磁损耗, 为使电磁波和磁性薄膜有最大的相互作用, 磁性薄膜应置于衬底附近磁场强度最强处. 对金属衬底它就是金属表面. 如果磁性薄膜是非金属的, 则将薄膜直接置于衬底之上. 如果磁性薄膜是金属性的, 考虑到金属损耗主要来源于金属趋肤深度范围内, 因此薄膜的厚度通常取为微米量级, 并且隔离层厚度 D 不能为零, 但应尽量小使得 $\beta_1 D \ll 1$. 当

[†]E-mail: rxwu@nju.edu.cn

D 为微米量级时,对大多数的介质材料条件 $\beta_1 D \ll 1$ 均能满足.

由于金属薄膜型磁性 Salisbury 屏在结构上更具有一般性,在下面的讨论中只考虑金属磁性薄膜的情形.对金属磁性薄膜而言,如果其厚度为微米量级,则通常有 $\beta_2 L \ll 1$,这样 (1) 和 (2) 式化为

$$Z_{\perp} = j\eta_1 \beta_1 D, \quad (3)$$

$$Z_{\parallel} = \frac{Z_{\perp} + j\eta_2 \beta_2 L}{1 + jZ_{\perp} \left(\frac{\beta_2}{\eta_2} \right) L}. \quad (4)$$

考虑到 $\beta\eta = \omega\mu$, $\beta/\eta = \omega\epsilon$, 并将 (3) 式代入 (4) 式, 则有

$$Z_{\parallel} = \frac{j\omega\mu_0(D + \mu_{r2}L)}{1 - k_0^2\epsilon_{r2}DL}, \quad (5)$$

其中 ω , k_0 是入射电磁波的圆频率和波数, μ_0 是真空磁导率, μ_{r2} , ϵ_{r2} 是磁性薄膜的相对磁导率和相对介电常数. 对于金属磁性薄膜, ϵ_{r2} 可以由 Drude-Lorentz 模型^[8]给出,

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\alpha)}, \quad (6)$$

其中 ω_p 是等离子振荡频率, α 是阻尼系数. 对金属而言 $\omega_p \approx 10^{15}$ Hz, $\alpha = \omega_p/100$ Hz, 故在微波频段 $\epsilon_{r2} \approx -j10^8$. 如果取 D, L 为微米量级, 则有

$$1 - k_0^2\epsilon_{r2}DL \approx 1,$$

故

$$Z_{\parallel} = j\omega\mu_0(D + \mu_{r2}L). \quad (7)$$

为简单起见, 令 $D = L$ 并且薄膜为铁磁性金属材料, 则上式成为

$$Z_{\parallel} = j\omega\mu_0 L(1 + \mu_{r2}) \approx j\omega\mu_0 L\chi_2, \quad (8)$$

其中 χ_2 是金属磁性薄膜的磁化率. 通常磁化率为复数 $\chi = \chi' - j\chi''$, 并且是频率的函数, 因此在一般情况下磁性薄膜表面的反射率

$$R = \left| \frac{Z_{\parallel} - \eta_0}{Z_{\parallel} + \eta_0} \right| \quad (9)$$

总是有限大小, 式中 η_0 为空气的波阻抗. 然而, 如果 $\chi'' \gg \chi'$, 则由 (8) 式得到

$$Z_{\parallel} \approx \omega\mu_0 L\chi''_2, \quad (10)$$

因此只要有恰当的频谱 $\chi''_2(\omega)$ 就能实现在磁性薄膜表面只有很小的反射.

3. 铁磁材料的高频磁谱和磁性 Salisbury 屏的高频响应

对铁磁性材料, 在铁磁共振频率附近磁化率具

有 $\chi'' \gg \chi'$ 的特性, 这就为利用铁磁薄膜构造电磁波吸波材料创造了先决条件, 而 χ 随频率的变化就决定了 Salisbury 屏的频率响应.

χ 随频率的变化特性就是通常所说的磁谱. 我们知道, 铁磁材料的高频磁谱主要有两种物理机理, 即自然共振机理和畴壁共振机理^[9]. 对于自然共振而言, 若铁磁材料是立方晶系的, 并且铁磁阻尼系数 $\alpha \ll 1$, 则

$$\chi'' = \frac{2}{3} \frac{\omega_m \alpha \omega (\omega_a^2 + \omega^2)}{(\omega_a^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2 \omega_a^2}, \quad (11)$$

其中 $\omega_m = \gamma M_s$, γ 为旋磁比, M_s 为样品的饱和磁化强度, $\omega_a = \gamma H_a$, H_a 为各向异性等效场, ω 为外加交变磁场的圆频率. 将上式以 ω_a 归一化, 令 $\bar{\omega} = \omega/\omega_a$, $\bar{\omega}_m = \omega_m/\omega_a$ 则有

$$\chi'' = \frac{2}{3} \bar{\omega}_m \frac{\alpha \bar{\omega} (\bar{\omega}^2 + 1)}{(\bar{\omega}^2 - 1)^2 + 4\alpha^2 \bar{\omega}^2}, \quad (12)$$

由此可得

$$\begin{aligned} Z_{\parallel} &= \omega\mu_0 L \frac{2}{3} \bar{\omega}_m \frac{\alpha \bar{\omega} (\bar{\omega}^2 + 1)}{(\bar{\omega}^2 - 1)^2 + 4\alpha^2 \bar{\omega}^2} \\ &= \frac{\mu_0 \omega_a \bar{\omega}_m L}{3\alpha} g_1(\bar{\omega}, \alpha), \end{aligned} \quad (13)$$

其中

$$g_1(\bar{\omega}, \alpha) = \frac{2\alpha^2 \bar{\omega}^2 (\bar{\omega}^2 + 1)}{(\bar{\omega}^2 - 1)^2 + 4\alpha^2 \bar{\omega}^2}.$$

如果 $\mu_0 \omega_a \bar{\omega}_m L/3\alpha \approx \eta_0$, 则铁磁薄膜的反射率零点出现在频率为 ω_a 处, 它的反射率带宽取决于函数 $g(\bar{\omega}, \alpha)$. 对铁磁性金属材料 $\omega_a \approx 10^9$, $\bar{\omega}_m \approx 10^0 - 10^1$, 如取 $\alpha \approx 0.01$, 则使反射为零的磁性层厚度为 $L \approx 10^{-3}$ m. 由于 L 远大于金属趋肤深度的量级, 故磁谱为自然共振型的铁磁性材料难以构造出微波频段的吸收材料.

如果复数磁化率是由于畴壁运动引起的, 那么磁化率的实部和虚部可以写成

$$\begin{aligned} \chi' &= \chi_0 \frac{1 - (\omega/\omega_r)^2}{[1 - (\omega/\omega_r)^2]^2 + (\omega/\omega_r)^2}, \\ \chi'' &= \chi_0 \frac{1 - (\omega/\omega_r)^2}{[1 - (\omega/\omega_r)^2]^2 + (\omega/\omega_r)^2}, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 χ_0 为静磁化率

$$\chi_0 = \frac{4M_s^2}{\alpha l}.$$

对于弛豫型共振 $\omega_r \gg \omega_r$, 则

$$\chi' = \chi_0 \frac{1}{1 + (\omega/\omega_r)^2},$$

$$\chi'' = \chi_0 \frac{(\omega/\omega_\tau)}{1 + (\omega/\omega_\tau)^2}.$$

从而 $Z_{\parallel}$ 变为

$$\begin{aligned} Z_{\parallel} &= \omega\mu_0 L\chi_0 \frac{(\omega/\omega_\tau)}{1 + (\omega/\omega_\tau)^2} \\ &= \omega_\tau\mu_0 L\chi_0 g_2(\omega/\omega_\tau), \end{aligned} \tag{15}$$

其中

$$g_2(\omega/\omega_\tau) = \frac{(\omega/\omega_\tau)^2}{1 + (\omega/\omega_\tau)^2}.$$

因此只要磁性材料的特征阻抗 $Z_r = \omega_\tau\mu_0 L\chi_0 \approx \eta_0$, 就可以使磁性 Salisbury 屏在 $\omega \gg \omega_\tau$ 的区域反射率趋于零. 对于某些金属磁性材料, 如 Fe , permalloy 等它们的静磁化率 χ_0 可以有很大的值, 其量级可达 $10^3\text{--}10^5$, 甚至更高, 因此 L 的可以在微米乃至亚微米量级, 故有可能在微波频段构造出薄膜型 Salisbury 吸收材料.

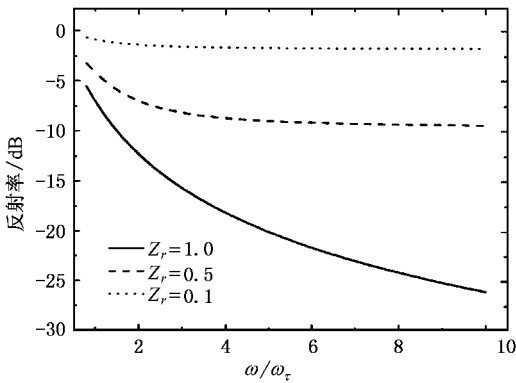


图2 具有弛豫型畴壁共振磁谱的磁性薄膜构成的 Salisbury 屏的反射率频率响应

当磁谱为弛豫型畴壁共振时,我们计算了磁性 Salisbury 屏的反射率频率响应. 计算结果如图 2 所示,其中磁性薄膜的 z_r 是归一化阻抗 $z_r = \omega_\tau\mu_0 L\chi_0/\eta_0$,计算中考虑了磁导率实部 χ' 的频率响应. 由图可以看到,当 $z_r = 1$ 时磁性 Salisbury 屏的反射率随着 ω/ω_c 远离 1 而下降,并在 $\omega/\omega_c \gg 1$ 时 Salisbury 屏反射率具有很小的数值. Salisbury 屏的反射率大小及其频率响应同 z_r 的数值有密切的关系,当逐渐偏离 $z_r = 1$ 时,反射率大小会有明显的增长,并且在圆频率 ω 距 ω_τ 较近时就趋于和频率无关. 磁性 Salisbury 屏的反射率频率响应特性,使得有可能制备出具有较宽频带的吸收材料.

4. 结 论

本文研究了利用磁性薄膜构造 Salisbury 屏的可能性及其在微波频段的反射率频率特性. 研究表明,利用铁磁性材料在铁磁共振频率附近磁化率具有 $\chi'' \gg \chi'$ 的特性,可以构造出对电磁波有良好吸收性能的 Salisbury 屏. 通过对铁磁材料高频磁谱物理机理的分析,指出具有弛豫型共振磁谱的铁磁材料可以构造出薄膜型 Salisbury 屏,其厚度为微米甚至亚微米量级. 反射率的频率特性及反射率的大小同磁性材料的特征阻抗 z_r 有关,当逐渐偏离 $z_r = 1$ 时,反射率大小会有明显的增长,并且在圆频率 ω 距 ω_τ 较近时就趋于和频率无关. 反射率的频率响应显示磁性薄膜 Salisbury 屏具有较宽的吸收带宽.

[1] Ruck G T , Barrick D E , Stuart W D and Krichgaum C D 1970 *Radar Cross-Section Handbook*(New York : Plenum)

[2] Fante R L and Maccormack M T 1988 *IEEE Trans . Antennas Propagat .* **36** 1443

[3] Neo C P *et al.* 2003 *IEEE Microwave and Wireless Components* **13** 24

[4] Takizawa K and Hashimoto O 1999 *IEEE Trans . Microwave Theory Thech .* **47** 1137

[5] Smith F C 2002 *Electronic Letter* **38** 1052

[6] Wu R X *et al* 2004 *Acta Phys . Sin .* **53** 745 (in Chinese [伍瑞新等 2004 物理学报 **53** 745])

[7] Tang H 1990 *The principle of microwaves* (Nanjing : Nanjing Univeristy Press (in Chinese [唐 汉 1990 微波原理(南京 : 南京大学出版社)])

[8] Zhang K Q 1998 *Electromagnetic Theory for Microwaves and Optoelectronics*(Springer , Berlin)

[9] Liao S B 1998 *Ferromagnetism* vol.3 (Beijing Science Press [廖绍彬 1998 铁磁学(第三册 [北京 : 科学出版社])]

Magnetic Salisbury screen and its high-frequency response

Wu Rui-Xin[†] Chen Ping

(*Department of Electronic Sciences and Engineering , Nanjing University , Nanjing 210093 ,China*)

(Received 3 November 2003 ; revised manuscript received 9 December 2003)

Abstract

We have studied the possibility of constructing magnetic Salisbury screen , and the frequency response of reflectivity of the screen in microwave frequency range . We have found that magnetic Salisbury screen has a lower reflectivity when magnetic susceptibility satisfies $\chi'' \gg \chi'$. If the frequency response of magnetic susceptibility is in the relax type of domain wall resonance , we could make film-type Salisbury screen , in which the thickness of the screen may be in the order of micrometer or even sub-micrometer . The reflectivity of the screen depends on the characteristic impedance z_r of the magnetic film that is determined by ferromagnetic resonant frequency and susceptibility under a static field . The frequency response of reflectivity shows that the magnetic film Salisbury screen has a broadband frequency range for absorbing microwaves well .

Keywords : magnetic Salisbury screen , reflectivity , frequency response , magnetic film

PACC : 2842Q , 5235H , 5270G

[†]E-mail : rxwu@nju.edu.cn