

平面电磁波用匹配电阻薄膜全吸收的理论模型

尚学府,王亚伟,纪玉金,李建玲,王 健

(江苏大学理学院,江苏镇江 212013)

摘要:通过经典电磁学理论推导,提出一种完全吸收入射平面电磁波的电阻薄膜-介质层-全反射导体膜结构。该结构要求电阻薄膜与真空波阻抗匹配,电阻薄膜背面衬以 $\lambda/4$ 厚度的无损介质,介质的底部放置全反射导体膜,即可保证全吸收入射电磁波,这对红外辐射计和隐身材料均适用,为此类特殊功能材料的研究提供依据。

关键词:平面电磁波;电阻薄膜;全吸收

中图分类号:O441.4 文献标志码:A

Total absorption of a plane electromagnetic wave by a matching resistive film model

SHANG Xuefu, WANG Yawei, JI Yujin, LI Jianling, WANG Jian

(Faculty of Science, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

Abstract: In this paper a two-layer film structure with a resistive film-dielectric layer-total reflection film is provided to completely absorb the incident plane electromagnetic wave by the classical electromagnetic theory. The structure requires that the resistive film and the vacuum wave impedance match, the resistive film's back be lined with lossless media of a quarter wavelength thickness, and the total reflection conductor film should be placed at the bottom of the media. The structure ensures total absorption of the incident electromagnetic wave and can be used for infrared radiometers and stealth materials. The model provides theoretical basis for researching such special functional materials.

Key words: plane electromagnetic wave; resistive film; total absorption

吸收和屏蔽电磁波的干扰已经成为商业和军事中非常重要的研究课题^[1]。随着近年来电子和军事通信中密密麻麻的敏感的电子设备和系统的使用,电磁干扰屏蔽的研究受到越来越多的关注。隐身技术是最典型的对电磁波吸收技术的应用。隐身技术可分为 2 种方法:一种是形状优化的方法,减少探测飞机或军舰的雷达横截面,使入射电磁波产生的反射波最小,从而躲避雷达探测;另一种是调整电磁波吸收材料或结构^[2]。在早期阶段,研究人员主要精力集中在雷达横截面减缩和雷达吸波材料的发展方面,但目前雷达吸波结构的研究逐步成为关注的热点^[3-6]。

笔者提出一种电阻薄膜-介质层-全反射导体膜结构,该结构可以完全吸收指定波长入射平面电磁波,因此对完全吸波结构的研究具有重要意义,研究结果能对特殊功能材料的研究提供理论依据。

收稿日期:2012-11-05;修回日期:2012-12-20;责任编辑:张 军

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21146004);高等学校博士学科点专项科研基金联合资助项目(20113227110018);江苏省高校重大资助项目(09KJA140001);江苏省博士后科研资助计划项目(1101113C);江苏大学高级人才基金资助项目(10JDG077);江苏大学第 11 批学生科研课题立项资助项目(11A172)

作者简介:尚学府(1981-),男,河南新乡人,讲师,博士,主要从事光信息科学方面的研究。

E-mail:shangxuefu@yeah.net

1 平面波电磁场的表达

没有自由电荷的麦克斯韦方程组:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{D} = 0, \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0, \\ \nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t, \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \partial \vec{D} / \partial t, \end{cases} \quad (1)$$

其中(对于非铁磁材料):

$$\begin{cases} \vec{J} = \sigma \vec{E}, \\ \vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}, \\ \vec{B} = \mu_0 \vec{H}. \end{cases} \quad (2)$$

假定电磁波传播方向沿 Z 轴,则有电场 E 方向平行于 X 轴,表示为 $E_x(z)$,而磁场 H 方向平行于 Y 轴,表示为 $H_y(z)$ 。 $E_x(z)$, $H_y(z)$ 分别用复数表示为

$$\begin{cases} E_x = \text{Re}\{\epsilon_x e^{-i\omega t}\}, \\ H_y = \text{Re}\{H_y e^{-i\omega t}\}. \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)麦克斯韦方程组,得

$$\begin{cases} \partial \epsilon_x / \partial z = i\omega \mu_0 H_y, \\ -\partial H_y / \partial z = J_x - i\omega \epsilon \epsilon_x, \end{cases} \quad (4)$$

由各参数之间的关系可得: $\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}$, $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$, $J = \sigma \epsilon_x$ 。

在真空中 $\sigma = 0$, $\epsilon = \epsilon_0$, 所以,由

$$\begin{cases} \partial^2 \epsilon_x / \partial z^2 = -\omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_x \equiv -k_0^2 \epsilon_x, \\ \partial^2 H_y / \partial z^2 = -k_0^2 H_y, \\ H_y = (\pm)(k_0 / \omega \mu_0) \epsilon_x \end{cases} \quad (5)$$

可得

$$\begin{cases} \epsilon_x = \epsilon_0^{(\pm)} e^{\pm i k_0 z}, \\ H_y = H_0^{(\pm)} e^{\pm i k_0 z}, \end{cases} \quad (6)$$

式中,“ \pm ”代表传播方向,取“+”代表传播沿 Z 轴正方向,取“-”代表沿 Z 轴反方向。

对于沿 Z 轴正方向传播的平面电磁波,设入射波长为 1 cm,则 $\omega \approx 1.88 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$, $k_0 \approx 0.627 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$,其真空波阻抗为

$$Z_0 = \epsilon_x / H_y = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 377 \Omega. \quad (7)$$

2 电阻薄膜中的电磁场

如图 1 所示,设薄膜垂直于 Z 轴,金属电导率 σ 一般大于 $10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,这里采用较高阻材料, $\sigma_m \approx 10^5 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,且 $\epsilon \approx \epsilon_0$ 。则麦克斯韦方程组可表示为

$$\begin{cases} \partial \epsilon_x / \partial z = i\omega \mu_0 H_y, \\ \partial H_y / \partial z = -(\sigma_m - i\omega \epsilon_0) \epsilon_x, \\ \partial^2 \epsilon_x / \partial z^2 = -(\omega^2 \mu_0 \epsilon_0 + i\omega \mu_0 \sigma_m) \epsilon_x \equiv -k_1^2 \epsilon_x, \\ \partial^2 H_y / \partial z^2 = -k_1^2 H_y. \end{cases} \quad (8)$$

若真空入射波长为 1 cm,则

$$k_1^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 + i\omega \mu_0 \sigma_m, \quad (9)$$

式(9)中实部是虚部的 10^{-5} 倍,可忽略,即 $k_1^2 = i\omega \mu_0 \sigma_m$ 。所以 $k_1^2 = i2.37 \times 10^{10} \text{ m}^{-2}$,由此可得, $k_1 = \pm 1.09 \times 10^5 (1+i) \text{ m}^{-1}$ 。

因此如果 k_1 取正号,电阻薄膜层中的电磁场应为

$$\begin{cases} \epsilon_x^{(\pm)} = \epsilon_1^{(\pm)} e^{\pm i k_1 z}, \\ H_y^{(\pm)} = H_1^{(\pm)} e^{\pm i k_1 z}, \end{cases} \quad (10)$$



图1 电阻薄膜结构示意图

Fig. 1 Resistance membrane structure diagram

其中 $H_1^{(\pm)} = (\pm) \frac{k_1}{\omega\mu_0} \epsilon_1^{(\pm)}$ 。

如果设薄膜厚度为 d , 使其电阻与真空阻抗相匹配, 则 $1/(\sigma_m d) = 377 \Omega$, 可得 $d = 2.7 \times 10^{-8} \text{ m} = 27 \text{ nm}$ 。

3 电磁波在电阻薄膜中全吸收的可能性

薄膜中电磁场可以由沿 Z 轴正反两方向传播波的线性组合表示为

$$\begin{cases} \epsilon_x^{(1)} = \epsilon_1^{(+)} e^{ik_1 z} + \epsilon_1^{(-)} e^{-ik_1 z}, \\ H_y^{(1)} = H_1^{(+)} e^{ik_1 z} + H_1^{(-)} e^{-ik_1 z}, \end{cases} \quad (11)$$

用界面 ($z=0$) 的边界条件: $\vec{\epsilon}$ 的正切和 \vec{H} 连续, 并设在真空中无 Z 轴反方向传播的波 (无反射), 则得

$$\begin{cases} \epsilon_0 = \epsilon_1^{(+)} + \epsilon_1^{(-)}, \\ k_0 \epsilon_0 = k_1 \epsilon_1^{(+)} - k_1 \epsilon_1^{(-)}, \end{cases} \quad \text{由此解得} \quad \begin{cases} \epsilon_1^{(+)} = (1/2)(1 + k_0/k_1) \epsilon_0, \\ \epsilon_1^{(-)} = (1/2)(1 - k_0/k_1) \epsilon_0, \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)就可以得到薄膜中的电磁场分布。

考虑到 $k_1 z$ 的虚部及实部数值均小于 3×10^{-3} , 故可作如下近似: $e^{\pm ik_1 z} \doteq 1 \pm ik_1 z$, 可得

1) $\epsilon_x^{(1)} = \epsilon_0 + izk_0 \epsilon_0$, 由于 $|k_0 z| < 10^{-5}$, 故右边第2项可以略去, $\epsilon_x^{(1)} = \epsilon_0$, 可见电场与参数 z 无关;

2) $H_y^{(1)} = (k_0/\omega\mu_0) \epsilon_0 + ik_1 z (k_1/\omega\mu_0) \epsilon_0 = (k_1/\omega\mu_0) \epsilon_0 = (1 + ik_1^2 d/k_0 \cdot z/d) \doteq (k_1/\omega\mu_0) \epsilon_0 (1 - z/d)$, 可见磁场随参数 z 线性衰减。当 $z=d$ 时, $H_y^{(1)}$ 降为零。

如果薄膜下面的材料分布可以保证薄膜的底面 ($z=d$ 处), $\epsilon_x \neq 0, H_y = 0$, 则无反射 (全吸收)。如果不能保证, 则上面假设 $z=0$ 处无反射不能成立, 将出现反射波。

笔者提出一种可以满足上述条件的理论模型 (见图2), 即在薄膜底面以下波长处放置全反射金属膜。在金属反射面上, 反射波与入射波的电场方向相反 (总 $\epsilon^{(2)} = 0$), 而磁场同向 (总 $H^{(2)} \neq 0$)。造成在 $z=d$ 处, $\epsilon \neq 0, H = 0$ (或称波阻抗 $z \rightarrow \infty$)。

保证真空界面 ($z=0$) 无反射情况, 真空中单位面积单位时间内流入能量为 $E_0 H_0 = (k_0/\omega\mu_0) E_0^2$; 电阻膜中单位面积单位时间内的损耗能量为 $E_0 J d = \sigma_m d E_0^2$ 。

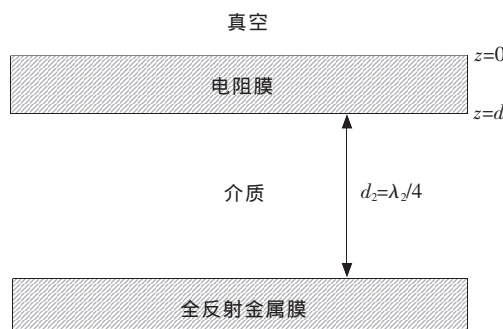


图2 平面电磁波无反射匹配电阻薄膜模型

Fig. 2 Total absorption of a plane electromagnetic wave by a matching resistive film model

由于 $k_0/(\omega\mu_0) = 1/(c\mu_0) = \sqrt{\epsilon_0/\mu_0} = \sigma_m d$, 故入射能流全损耗在膜中, 膜底面能流密度为零 ($H_y = 0$)。电阻膜下面介质中虽有电磁场, 但无损耗, 且平均能流密度为零。

4 结论

与真空波阻抗匹配的电阻薄膜, 只要背面衬以 $\lambda/4$ 厚度的无损耗介质, 底部有全反射导体膜, 即可保证全吸收入射电磁波, 这对红外辐射计和隐身材料均适用。

如果辐射波长变化为 λ_2 , 使下部介质厚度不为 $\lambda_2/4$, 则表面必有反射, 反射率可根据 $z=0$ 和 $z=d$ 处的边界条件算出, 其中 $z=d$ 处的边界条件是: $Z = \frac{\epsilon_x}{H_y} = i \frac{Z_v}{\sqrt{\epsilon_{r(2)}}} \tan\left(\frac{2\pi d_2}{\lambda_2}\right)$ 。如果下部介质厚度变化, 同样会使该结构对于完全吸收平面电磁波的波长改变。如果技术上可以实现膜结构中的介质层为可调节厚度的真空层, 那理论上该模型可以实现根据需求调整完全吸波所对应的电磁波波长。

这种电阻薄膜-介质层-全反射导体膜结构是一种新型的完全吸波材料结构理论模型。由于该模型对于相应波长的入射电磁波具有完全吸收特性, 所以特别适用于辐射计等对单色吸收有较高要求的器件。随着吸波材料和薄膜加工技术的发展, 该结构将会具有越来越大的应用前景。

参考文献/References:

- [1] OHJ H, OHK S, KIM C G, et al. Design of radar absorbing structures using glass/epoxy composite containing carbon black in X-band frequency ranges[J]. Composites Part B, 2004, 35: 49-56.
- [2] VINOY K J, JHA R M. Radar absorbing materials from theory to design and characterization[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [3] 雷前召, 阴国富. 多层介质中平面电磁波传播特征[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2012, 40(2): 77-80.
LEI Qianzhao, YIN Guofu. Plane wave propagation in multilayer media[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2012, 40(2): 77-80.
- [4] 刘晓春. 电磁波吸收层的设计与吸波材料的应用[J]. 工程塑料应用, 1996, 24(6): 21-28.
LIU Xiaochun. Design of electromagnetic wave absorbing sheets and application of absorbing materials[J]. Engineering Plastics Application, 1996, 24(6): 21-28.
- [5] 吴振华, 张开春, 刘盛纲. 特殊多层结构中电磁波传播特性研究[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(4): 505-508.
WU Zhenhua, ZHANG Kaichun, LIU Shenggang. Research on characteristics of electromagnetic wave propagation in multi-layer structure [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010, 39(4): 505-508.
- [6] 步文博, 徐洁, 丘泰, 等. 吸波材料的基础研究及微波损耗机理的探讨[J]. 材料导报, 2001, 15(5): 14-17
BU Wenbo, XU Jie, QIU Tai, et al. Discussion on fundamental research and microwave loss mechanism of microwave absorbing materials [J]. Materials Review, 2001, 15(5): 14-17.

(上接第17页)

- [2] 文立平. 一族多步二阶导数方法的收缩性[J]. 计算数学, 2001, 23(3): 265-270.
WEN Liping. The contractivity of a class of second derivative multistep methods[J]. Mathematica Numerica Sinica, 2001, 23(3): 265-270.
- [3] LINIGER W, NEVALINNA O. Contractive methods for stiff differential equations Part I [J]. BIT, 1978, 16: 457-474.
- [4] LINIGER W, NEVALINNA O. Contractive methods for stiff differential equations Part II [J]. BIT, 1979, 19: 53-72.
- [5] ENRIGHT E H. Second derivative multistep methods for stiff ordinary differential equations[J]. SIAM J Numer Anal, 1974, 11(2): 321-331.
- [6] 杨小远. 基于抛物线逼近法方法的常微分方程数值解法研究[J]. 河南科学, 2011, 29(2): 127-132.
YANG Xiaoyuan. Improved Euler's method-parabolic approximation[J]. Henan Science, 2011, 29(2): 127-132.
- [7] 张宇平, 姜晗, 朱爱玲. 常微分方程的梯形外推法[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2012, 27(1): 29-31.
ZHANG Yuping, JIANG Han, ZHU Ailing. The extrapolation trapezoidal method of ordinary differential equation[J]. Journal of Shandong Normal University(Natural Science), 2012, 27(1): 29-31.
- [8] AZIZ A K, MONK D. Continuous finite elements in space and time for the heat equation[J]. Math Comp, 1969, 52: 255-274.
- [9] DAVID C L. Linear Algebra and Its Applications[M]. [S. l.]: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [10] WILLD D R. Experiments in stepsize control for adams linear multistep methods[J]. Advances in Computatkrall Mathematics, 1998, 8: 335-344.