

文章编号:1001-9014(2006)02-0143-04

基于光子晶体的电磁吸收材料

高强¹, 银燕², 闫敦豹¹, 袁乃昌¹

(1. 国防科学技术大学微波技术发展中心, 湖南长沙 410073;

2. 国防科学技术大学理学院应用物理系, 湖南长沙 410073)

摘要:研究了微波光子晶体在雷达吸收材料上的应用,提出了一种应用PBG的新型雷达吸收材料.该种材料相对于传统的电Salisbury屏,具有厚度薄、重量轻的优点,而且吸收带宽取决于高阻表面的带隙,不再受到厚度为 $\lambda/4$ 的限制.

关键词:雷达吸波材料,光子晶体,Salisbury屏

中图分类号:TN822 **文献标识码:**A

RADAR ABSORBING MATERIALS BASED ON PBG

GAO Qiang¹, YIN Yan², YAN Dun-Bao¹, YUAN Nai-Chang¹

(1. Microwave Center, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract:The application of microwave photonic crystals in radar absorbing materials (RAM) was studied and a new RAM using PBG was introduced. This material is thinner and weaker than traditional electric Salisbury screen. And its bandwidth, which is not limited by the thickness of $\lambda/4$, depends on the bandgap of high impedance surface.

Key words:radar absorbing material; PBG; salisbury screen

引言

光子晶体是一种新型的人工电磁材料,其基本特征是具有电磁频率带隙(EBG-Electromagnetic Band-Gap),频率处于带隙范围中的电磁波将不能在光子晶体中传播.自1987年E. Yablonovitch和S. John分别独立地提出光子晶体的概念以来,光子晶体受到世界各国研究人员的极大关注.光子晶体的研究范围涉及到光学、电磁学、声学波段,在微波与毫米波领域又被称为电磁带隙结构.由于微波波段的光子晶体易于制备,发展尤为迅速,已经进入实用化阶段.目前,国内外对于微波波段光子晶体的研究主要集中在光子晶体在微波器件、微波天线的应用上^[1].

微波光子晶体由于具有电磁带隙,呈现出许多新颖的电磁特性,具有极大的应用潜力.本文中,我们提出了一种应用Sievenpiper的高阻表面^[1]的新型电磁吸收材料.这种材料采用贴片集中电阻作为

损耗,其吸收频带决定于高阻表面的电磁带隙.

1 Salisbury屏的理论分析

在电子对抗中,降低军事目标的雷达散射截面(Radar Cross Section)可以减小目标被敌方发现的概率,从而提高军事目标的生存率和突防率,一直是人们的研究热点.最常用的降低RCS的手段是用雷达吸波材料覆盖目标.雷达吸波材料(RAM-Radar Absorber Material)是一种有效吸收入射电磁波,显著降低目标回波强度的一类功能材料.其发展趋势是:厚度薄、重量轻、吸收频带宽.目前,世界各国都在积极研制多波段隐身材料,并不断探索开发新的隐身材料.

Salisbury屏是一种最常用的雷达吸收材料.Salisbury屏是由损耗层和间隔层组成的一种结构,如图1所示.其中 Y 是隔离层的归一化导纳, d 是隔离层的厚度, Δ 是损耗层的厚度, R_1 、 R_2 分别为隔离层和真空的反射系数,定义为相应层内的反射波

收稿日期:2005-04-20,修回日期:2005-09-15

基金项目:973国家安全重大基础预研(51307)资助项目

作者简介:高强(1979-),男,河南信阳人,博士研究生,主要从事光子晶体与频率选择表面、隐身技术等方面的研究.

Received date: 2005-04-20, revised date: 2005-09-15

(B_n) 和入射波(A_n)之比: $R_n = \frac{B_n}{A_n}$ ($n = 1, 2$). 每一层内, 反射波和入射波的波矢是等值反向的, 波矢大小记为 k_n .

Salisbury 屏的理论分析已有很多文献讨论^[2-4]. 文献[3]给出了 n 层 Salisbury 屏每一层反射系数之间的递推关系, 由此易导出图 1 所示单层 Salisbury 屏的反射系数

$$R_2 = \frac{(a + R_1 b) \cdot \cos k_1 d + (a - R_1 b) \cdot j \cdot \sin k_1 d}{(c + R_1 g) \cdot \cos k_1 d + (c - R_1 g) \cdot j \cdot \sin k_1 d} \quad (1)$$

其中, $a = (1 - \beta) - Y(1 - \alpha)$,
 $b = (1 - \beta) + Y(1 - \alpha)$,
 $c = (1 + \beta) + Y(1 + \alpha)$,
 $g = (1 + \beta) - Y(1 + \alpha)$.

$$\alpha = \frac{\hat{Z}_m}{Z_0} = \frac{j\omega \int_0^d \mu(z) dz}{Z_0}$$

是损耗层的归一化磁阻抗

$$\beta = \frac{\hat{Y}_c}{Y_0} = \frac{j\omega \int_0^d \varepsilon(z) dz}{Y_0}$$

是损耗层的归一化电导纳,

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}, Y_0 = \frac{1}{Z_0}$$

分别为真空阻抗和导纳.

在传统 Salisbury 屏的设计中, 底板是要屏蔽的金属板, $R_1 = -1$, 由式(1) 易得: 当损耗层为电损耗材料($\alpha = 0$) 时, 只有当 $k_1 d = \pi/2, \beta = 1$ 时, 才有 $R_2 = 0$, 这相当于要求间隔层厚度为 $\lambda_1/4$; 当损耗层为磁损耗材料($\beta = 0$) 时, 只有当 $k_1 d = 0, \alpha = 1$ 时, 才有 $R_2 = 0$. 由于电损耗 Salisbury 屏具有厚度限制, 只能应用于微波暗室等不限制吸收材料尺寸的场所. 磁损耗 Salisbury 屏很薄, 广泛用于飞行器军事目标的隐身, 但磁损耗材料难于获得, 且重量较大、在高温等极端条件下还会因为退磁而丧失吸收性能, 故应用上也有一定的限制.

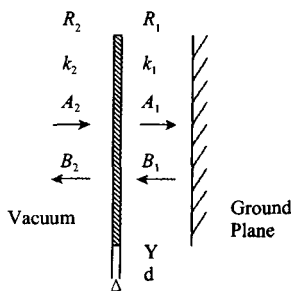


图 1 单层 Salisbury 屏
 Fig. 1 Single Salisbury screen

2 应用高阻表面的 Salisbury 屏

我们希望能够制备这样一种 Salisbury 屏: 其损耗层采用易于制备且性能稳定的电损耗材料, 而又具有如磁损耗屏一样的超薄特性.

在式(1) 中, 令 $\alpha = 0, d = 0$, 可得

$$R_2 = \frac{(1 + R_1)(1 - \beta) - Y(1 - R_1)}{(1 + R_1)(1 + \beta) + Y(1 - R_1)} \quad (2)$$

显然, $R_2 = 0$ 要求满足以下 2 个条件:

1. $\beta = 1$: 又称为匹配条件, 意味着损耗层的电导纳和真空电导纳相等, 这可以通过选择合适的电损耗材料来实现.

2. $R_1 = 1$: 具有这种反射特性的材料称为理想导磁面. 自然界中不存在理想磁导面, 但可以通过在金属表面上制备周期结构来获得这种特性. 这种具有周期结构的金属表面统称为 metamaterials, 由于其在某些频率上呈现理想导磁面的特性, 有时又被称为人工磁导体 (AMC: Artificial Magnetic Conductor).

N. Engheta 首次提出用 metamaterial 来获得超薄吸收材料的思想^[5]. D. J. Kern 等人用含损耗的频率选择表面 (HFSS)^[6,7] 实现了超薄宽带吸收材料, 但设计方法较为复杂. 这里, 本文提出用一种微波光子晶体: Sievenpiper 的高阻表面 (HIGP: High Impedance Ground Plane) 来实现理想导磁面的反射特性, 从而获得超薄电磁吸收材料.

这种高阻表面是一种局域谐振型光子晶体, 是由一族金属突起物在导体平面上按二维网格排列而得到的, 通常这些突起物被加工成金属片, 通过垂直的导电过孔与下面的连续导体面相连. 对高阻表面人们已经进行了大量理论和实验研究, 发现高阻表面具有表面波带隙, 在带隙内, 高阻表面具有非常高的表面阻抗, 呈现出类似于磁导体的特性. 在带隙中心点, 高阻表面相当于一个理想导磁面, 反射波与入射波相位差为 0.

用高阻表面和贴片集中电阻构成电磁吸收结构, 如图 2 所示. 图 2(a) 为高阻表面的结构图, 金属贴片按方格子周期排列. 图 2(b) 为应用高阻表面的 Salisbury 屏的示意图, 金属贴片通过过孔与金属底板连接, 介质基板厚度为 h , 相对介电常数 ε_r , 贴片之间有集中电阻 $2R$; 图 2(c) 是等效电路, L, C 为 Sievenpiper 的高阻表面的等效电感电容^[3]. 这种结构和图 1 所示的单层 Salisbury 屏是大致相同的, 只是用高阻表面代替了图 1 中的底板, 将高阻表面放

在待屏蔽目标上,损耗层在高阻表面层上,则式(2)中的 R_1 为电磁波在高阻表面上的反射系数.

不考虑高阻表面的损耗,电磁波在高阻表面上的反射系数可以表示为

$$R_1 = \exp(j\phi) \quad (3)$$

其中 ϕ 为高阻表面的反射相位. 随入射波频率在 $(-\pi, \pi)$ 内连续变化.

将式(3)代入式(2),为了方便计算,取 $\beta = 1$, 损耗层与高阻表面之间间隔实际为 0,则式(2)中表征隔离层归一化导纳的 $Y = 1$,可得

$$R_2 = \frac{-(1 - R_1)}{2(1 + R_1) + (1 - R_1)}$$

易求得

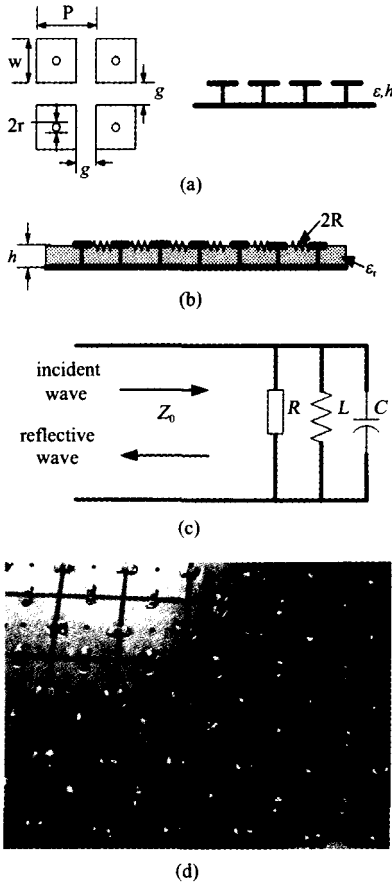


图2 Sievenpiper 的高阻表面及其构成的雷达吸收材料 (a) Sievenpiper 的高阻表面的结构 (b) 应用高阻表面的吸收材料 (c) 等效电路 (d) 实际制作的吸收材料

Fig.2 The Sievenpiper high impedance surface and RAM based on it (a) the structure of the Sievenpiper high impedance surface (b) the RAM using high impedance surface (c) equivalent circuit model (d) the practical ultra-thin absorber

$$\frac{1}{R_2} = -1 - j \frac{2}{\text{tg}(\phi/2)}$$

则 Salisbury 屏的功率反射系数为

$$R_p = |R_2|^2 = \frac{\text{tg}^2(\phi/2)}{4 + \text{tg}^2(\phi/2)} \quad (4)$$

本文作出了 R_p 随 ϕ 的变化曲线,如图 3 所示. 图 3 表明,在 $\phi = 0$ 处有强烈的吸收;随 $|\phi|$ 增大,吸收性能降低. 由于高阻表面的反射相位 ϕ 是入射电磁波频率 ω 的非线性函数,可以预测,如果能够在 一个频带内实现小的反射相位,则在该频带内可以实现对电磁波的有效吸收.

Sievenpiper 的高阻表面的结构参数如下:

$P = 7.2\text{mm}, w = 6.8\text{mm}, r = 0.4\text{mm}, g = 1\text{mm}, h = 1.5\text{mm}, \epsilon = 2.65$. 集中贴片电阻 $R = 375\Omega$,用来匹配自由空间的特性阻抗 Z_0 . 吸收特性如图 4 所示.

从图 4 中可以看到,这种高阻表面 Salisbury 屏在 6.0 ~ 6.6 GHz 的频带内呈现出良好的吸收特性,吸收达 -11dB,带宽为 600MHz;吸收最强处发生在 $f_0 = 6.3\text{GHz}$,相应于波长 $\lambda_0 = 4.72\text{cm}$,达到 -22dB. 高阻表面的厚度 $h = 1.5\text{mm}$,远小于最强吸收波长: $h/\lambda_0 \approx 0.031$. 测量结果与计算结果基本吻合,从图 4 (d) 可以发现电磁吸收的带宽基本上决定于 Sievenpiper 高阻表面的带隙.

3 结语

本文给出了一种应用高阻表面的新型超薄 RAM 的设计,并通过理论数值仿真和实验给出了该 RAM 的吸收曲线. 这种新型超薄 RAM 最引人注目的特性是:吸收频带决定于高阻表面的表面波带隙,可以通过调整高阻表面的几何参数和物理参数来进

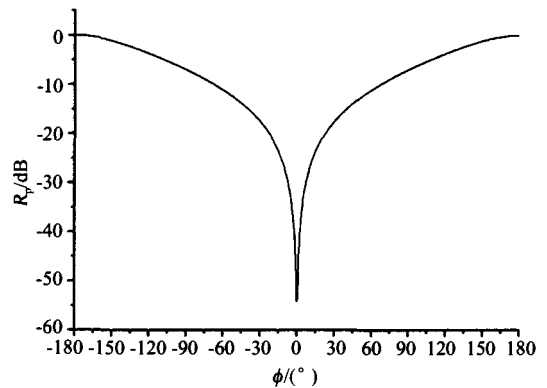


图3 功率反射系数随高阻表面反射相位的变化 Fig.3 Dependence of power reflection coefficient on the reflection phase of HIGP

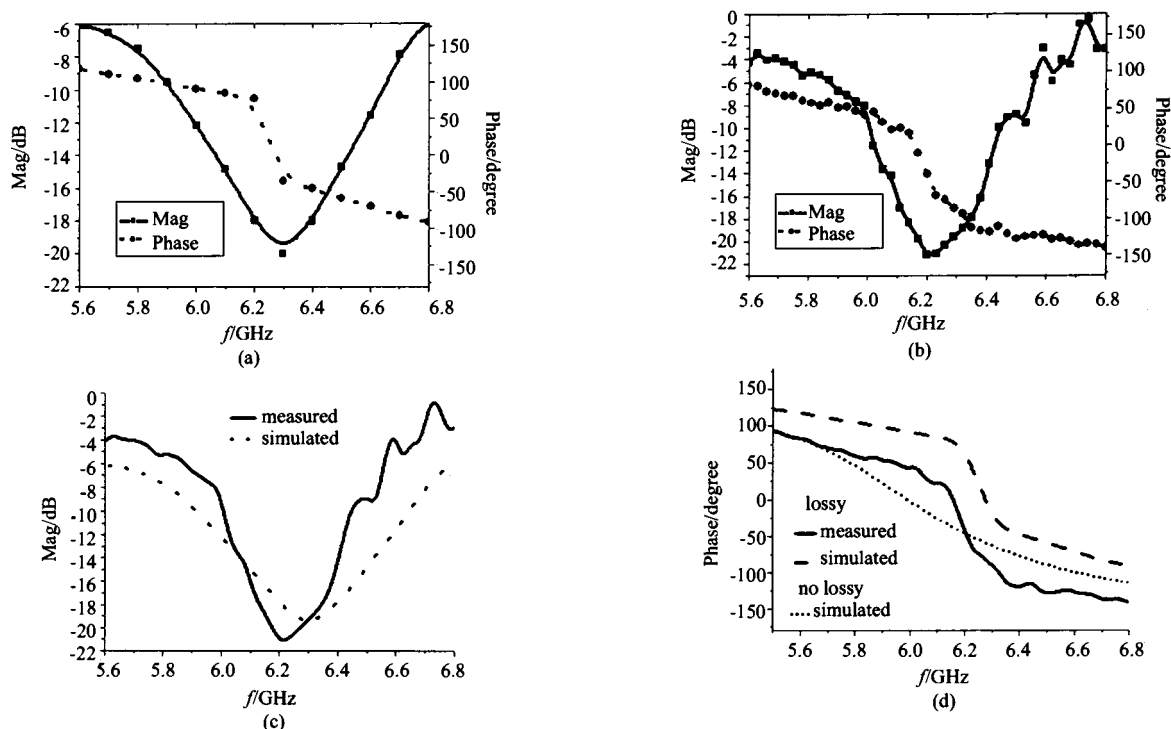


图4 雷达吸收材料的反射系数 (a)计算的反射系数 (b)测量的反射系数 (c)反射系数的幅度比较 (d)反射系数的相位比

Fig. 4 The reflection coefficient of the radar absorbing material (a) the computed reflection coefficient (b) the measured reflection coefficient (c) the comparison of magnitude (d) the comparison of phase

行设计,吸收带宽可达几百 MHz;厚度仅为高阻表面和损耗材料的厚度,仅为工作波长的几十分之一。

REFERENCES

- [1] Sievenpiper D, *et al.* High-impedance electromagnetic surface with a forbidden frequency band [J]. *IEEE. Trans on Microwave Theory and Techniques*, 1999, **47**(11): 2059—2074.
- [2] Fante R L, McCormack M T. Reflection properties of the Salisbury screen [J]. *IEEE. Trans Antennas Propagat.*, 1988; 1443—1454.
- [3] Vinoy K J, Jha R M. *Radar Absorbing Materials: From Theory to Design and Characterization* [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [4] Engheta N. Thin absorbing screens using metamaterial sur-

- faces [C]. 2002 IEEE Antennas and Propagation Society (AP-S) International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting. San Antonio: Texas, 2002: 16—21.
- [5] Kern D J, Werner D H. A genetic algorithm approach to the design of ultra-thin electromagnetic bandgap absorbers [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2003, **38**(1): 61—64.
- [6] Salisbury W. Absorbent body for electromagnetic waves [P]. U. S. Patent 2599944, 1952.
- [7] WANG Huan-Qing, LU Ming-Yun, WU Zhe. Experiment on the influence of dielectric loading on transmission properties of frequency selective surfaces [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (王焕青, 吕明云, 武哲. 介质加载对频率选择表面传输特性影响的实验研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(1): 27—31.