

具有极化选择特性的超材料频率选择表面的设计*

吴翔¹⁾ 裴志斌¹⁾ 屈绍波^{1)†} 徐卓²⁾ 柏鹏³⁾ 王甲富¹⁾ 王新华¹⁾ 周航¹⁾

1)(空军工程大学理学院,西安 710051)

2)(西安交通大学电子陶瓷与器件教育部重点实验室,西安 710049)

3)(空军工程大学综合电子信息系统研究中心,西安 710051)

(2010年7月5日收到;2011年1月22日收到修改稿)

基于超材料结构的设计理论,通过长金属线周期阵列和具有 Lorentz 谐振形式等效介电常数的金属短线的组合可频率选通特性. 由不同周期排布和结构尺寸的长金属线和金属短线组合而成的频率选择表面具有不同频段的选通特性. 文章提出了双层及单面两种具有极化选择特性的频率选择表面,两种结构均可实现对特定频段 TE 及 TM 波选通. 具有极化选择特性的超材料频率选择表面的设计为极化滤波器以及极化波产生器的设计提供了借鉴.

关键词: 频率选择表面, 超材料, 极化选择

PACS: 42. 25. Ja, 42. 25. Bs, 78. 20. Bh, 78. 20. Fm

1. 引言

频率选择表面 (frequency selective surface, FSS) 是在导电金属表面上周期地刻蚀缝隙或黏贴金属贴片单元形成电振子结构. 当入射电磁波频率在单元谐振频率上时呈现全反射(贴片型)或全透射(孔径型),因此 FSS 对入射电磁波呈现出滤波器的功能,FSS 已经被广泛应用于微波天线和雷达罩的设计中^[1].

极化和振幅、相位一样是电磁信号的特征之一,任何极化形式的电磁波都可以分解为 TE 及 TM 两种线极化波的叠加. 极化选择特性是指 FSS 能反射某一特定方向的线极化波,而只让与这个方向垂直的极化波通过. 目前的 FSS 大多着重研究各向同性的频率选通特性^[2-5],而对 FSS 的极化选择特性研究^[6,7]较为鲜见. 研究具有极化选择特性的 FSS 对提高天线抗干扰性能和探测能力具有重要意义.

周期排列的人工结构单元所构成的超材料因具有自然界中一切物质所不具备的奇异电磁特性而受到众多学者的关注^[8-10]. 文献[11]提出长金属线阵列可实现在等离子频率以下为负的等效介电

常数,文献[12]提出了具有等效磁导率为负的双开口环单元结构(SRR),文献[13]提出了在 Lorentz 谐振区域等效介电常数为负的电谐振单元. 超材料的出现极大地丰富了电磁工程人员的材料库,使得一些奇异的物理现象,如隐身罩^[14,15]、完美成像^[16]、能流旋转^[17]等得以实现. 根据超材料结构的设计原理,本文首先设计了由长金属线和金属短线阵列共同组成的具有极化选择特性的双层结构 FSS. 这种 FSS 在平面的 x 及 y 方向具有不同周期及结构尺寸,从而实现了针对不同频段 TE 和 TM 波的频率选通特性. 最后,基于这种原理设计并验证了结构更为简单的单面极化选择特性 FSS. 超材料极化选择特性 FSS 为极化滤波器以及极化波产生器的设计提供了新的设计思路.

2. 极化选择 FSS 设计

电磁波在电磁参数(介电常数及磁导率)为单负的材料中无法传播. 长金属线周期结构^[10]在低于等离子频率的频段内介电常数小于 0,而金属短线周期结构在高于其谐振频率的频段内介电常数小于 0,通过合理设计结构尺寸,使金属短线周期结构

* 国家自然科学基金(批准号:50632030, 60871027)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2009CB613306)和陕西省自然科学基金(批准号: SJ08F01)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn

谐振频率高于长金属线周期的等离子频率,就可得到一个传输通带.为设计极化选择特性 FSS,我们首先在介质基板的单侧构建了长金属线和金属短线结构平行排布的结构单元(如图 1 所示),以实现 TE 波的极化选通特性,并在 CST microwave studio 电磁仿真软件进行仿真验证.

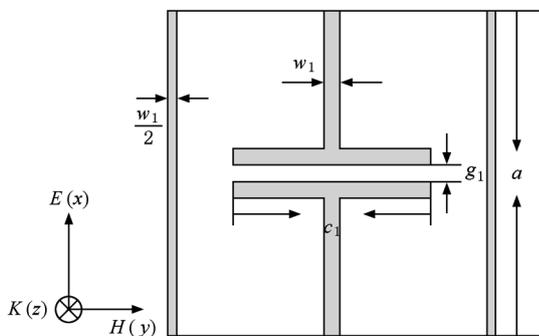


图 1 具有 TE 极化选择特性的 FSS 单元结构示意图

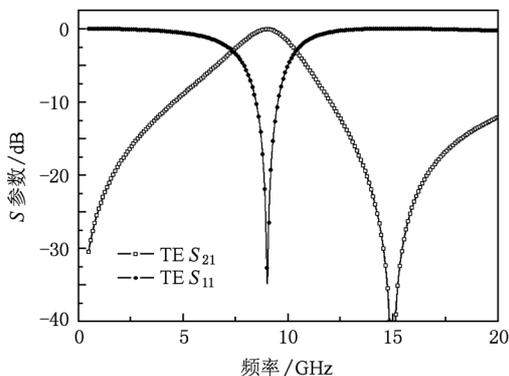


图 1 为边长 $a = 4 \text{ mm}$ 的正方形结构单元,金属结构(图中深色部分)蚀刻在介电常数为 2.33;损耗角正切为 0.0012,厚度为 0.381 mm 的 Rogers 5870 基板上,基板上的覆铜厚度为 0.017 mm.图中 $c_1 = 2.4 \text{ mm}$, $w_1 = 0.2 \text{ mm}$, $g_1 = 0.2 \text{ mm}$,仿真时的边界条件设为单元(unit cell),使用 TE(电场沿 x 方向)及 TM(磁场沿 x 方向)波沿波矢 K 方向垂直入射进行计算,得到传输曲线和反射曲线如图 2 所示.

从图 2 可看出,在 TE 馈波时,在 7.53—10.77 GHz 出现 -3 dB 传输通带,其他频段发生全反射;TM 馈波时,则没有禁带出现.这是当入射电磁波的电场分量平行长金属线时,长金属线可等效为等离子体^[8],其等效介电常数具有如下形式:

$$\epsilon_{\text{eff}} = 1 - \left(\frac{w_p}{w}\right)^2. \quad (1)$$

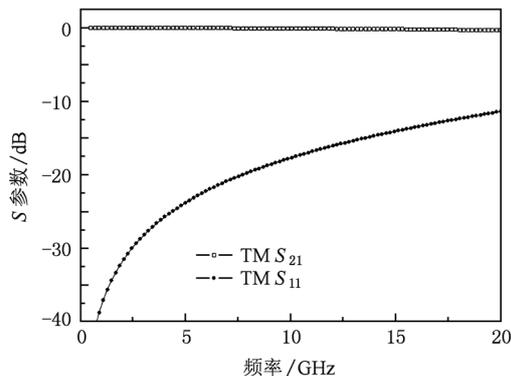


图 2 对 TE 极化选择表面 TE 及 TM 馈波时得到的传输和反射曲线

入射波频率低于等离子频率 w_p 时,等效介电常数小于 0,出现传输禁带. TE 波电场分量在与之平行的金属短线上感应出与电场方向相反的电偶极子,从而产生具有 Lorentz 谐振形式的等效介电常数

$$\epsilon(w) = 1 + \frac{w_0^2}{w_0^2 - w^2 + i\gamma w}, \quad (2)$$

其中, w_0 是金属短线结构的谐振频率, i 为虚部单位, γ 是阻尼系数.由(2)式可知,在大于谐振频率

w_0 而小于 $\sqrt{\frac{3w_0^2 - \gamma^2 + \sqrt{\gamma^4 - 6\gamma^2 w_0^2 + w_0^4}}{2}}$ 的频带

(7.53—10.77 GHz)内出现全反射.对于 TM 波,电场分量与长金属线相互垂直,不能等效为等离子体,而电场分量也无法感应出电偶极子,所以传输禁带消失.

根据以上分析,在图 1 中结构的背面构建了与

之垂直的结构,如图 3 所示.

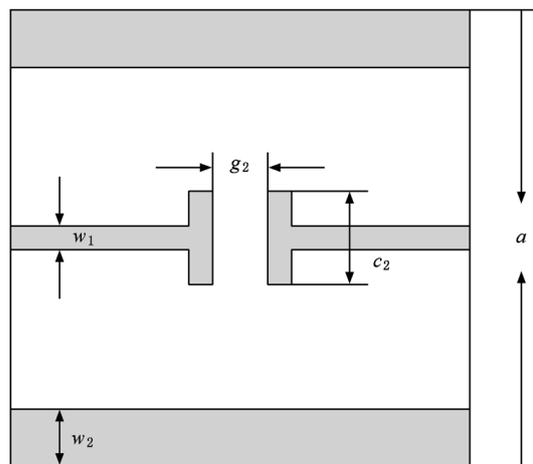


图 3 具有 TM 波极化选择特性的 FSS

图3中结构参数 $c_2 = 0.8 \text{ mm}$, $g_2 = 0.5 \text{ mm}$, $w_1 = 0.2 \text{ mm}$, $w_2 = 0.5 \text{ mm}$. 根据等效电路理论^[18,19],图3中金属短线的间距增大,端线缩短,等效电容减小,导致 Lorentz 谐振频率 w_0 升高,而长金属线宽度增加导致其等离子频率明显上升. 由于图3中结构对 TM 波具有极化选择特性,且传输通带出现在更高频段,通过正反面分别刻蚀图2和图3所示金属结构的双层结构,可得到对不同频率 TE 和 TM 波的极化选择表面. 使用 TE 及 TM 波馈波进行仿真验证,得到了如图4所示的传输和反射曲线.

从图4可以看出,对于双层极化选择 FSS, TE 馈波时 7.3—10.3 GHz 为 -3 dB 传输通带;TM 波入射时在 13—16.6 GHz 为 -3 dB 传输通带. 由于 7.3—10.3GHz 频段内 TM 波的传输率小于 -10dB,而在 13—16.6GHz 频段内,TE 波的传输率小于 -16 dB,在 15GHz 甚至达到 -50 dB. 所以,这种极化选择 FSS 对 7.3—10.3 GHz 频段内的 TE 波和 7.3—10.3 GHz 频段内 TM 波实现了良好的极化选择特性.

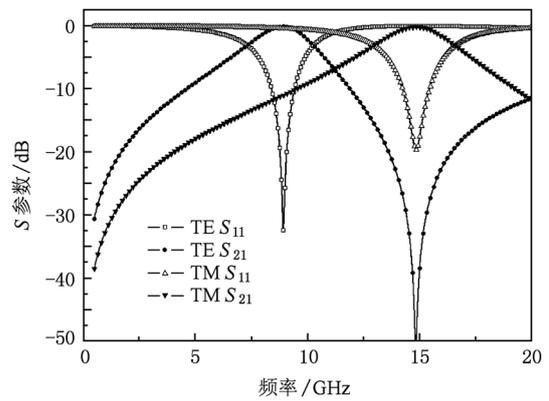


图4 TE及TM馈波时极化选择FSS的传输及反射曲线

为验证双层极化选择 FSS 对极化波入射角的敏感度,对不同入射角的 TE 及 TM 波进行了仿真,TE 波电场沿 x 轴方向不变,磁场方向随入射角发生变化, TM 波磁场沿 x 轴方向不变,电场方向随入射角发生变化. 不同入射角的 TE 及 TM 波入射下的仿真曲线如图5所示.

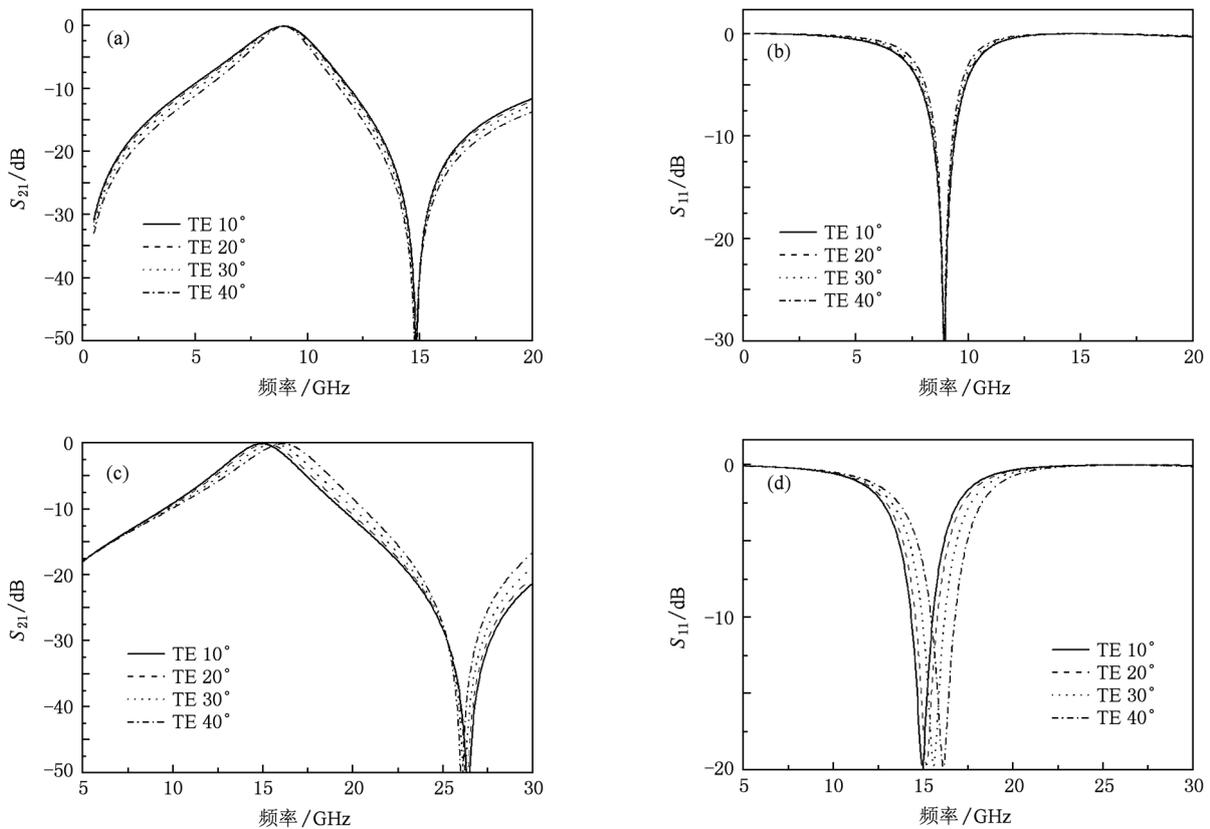


图5 不同入射角 TE 及 TM 波馈波时仿真计算得到的传输曲线及反射曲线

从图5中可以看出,在 10° — 40° 入射角范围内,TE波馈波时通带没有发生偏移,而TM波馈波时则略向高频移动.这是由于TM波选通频率较高,且选通结构中的长金属线较宽,入射角增大时等离子频率向高频移动所致.仿真结果表明,这种极化选择FSS对 0° — 40° 范围内的入射波均具有较好的极化选择特性.

3. 单面极化选择 FSS

为实现结构更为简单,加工更加方便的极化选择FSS.在介质基板一侧构建了如图6所示的极化选择FSS单面结构.

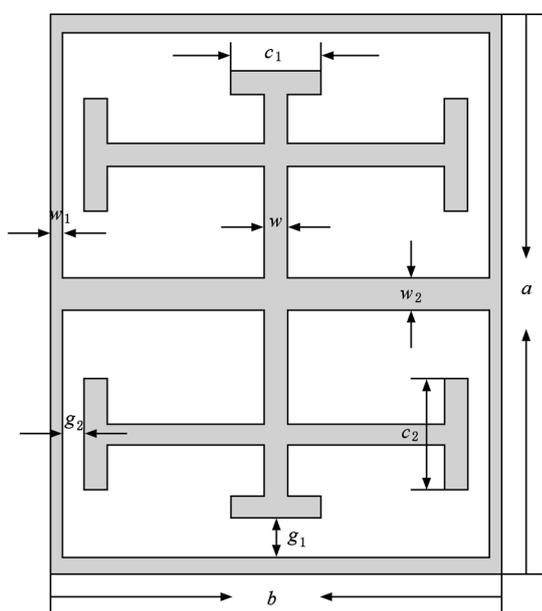


图6 单面极化选择 FSS 单元结构示意图

图6中 $a = 5 \text{ mm}$, $b = 4 \text{ mm}$, $c_1 = 0.8 \text{ mm}$, $c_2 = 1 \text{ mm}$, $w = 0.2 \text{ mm}$, $w_1 = 0.1 \text{ mm}$, $w_2 = 0.3 \text{ mm}$, $g_1 = 0.35 \text{ mm}$, $g_2 = 0.2 \text{ mm}$. 仿真计算中单元的边界设为 unit cell,图中 x 方向金属短线长度大于 y 方

向,造成 Lorentz 谐振频率较低,同时对于TM波(y 方向)长金属线周期为 $\frac{a}{2} = 2.5 \text{ mm}$,而TE波为 $b = 4 \text{ mm}$,使得对于TE波的等离子频率低于TM波,选通频率较低.通过调整在 x 方向与 y 方向单元周期及尺寸,实现了TE波和TM波的极化选择(如图7所示).

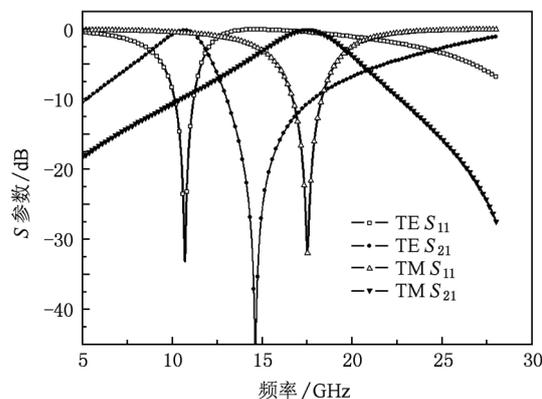


图7 对单面极化选择 FSS TE 及 TM 馈波时得到的 S 参数

从图7可以知,TE馈波时在8.8—10.7 GHz -3 dB 频段内出现通带,而TM波透射率小于 -10 dB ;TM馈波时在15—19.5 GHz -3 dB 频段内出现通带,TE波透射率小于 -8 dB ,说明了这种单面结构同样具有较好的极化选择性.

4. 总 结

基于超材料的设计方法,设计了由长金属线和与之平行的金属短线构成的FSS,在平面内 x 及 y 方向构建不同周期尺寸的该结构实现了极化选择FSS.仿真结果验证了所提出的双层和单面结构在特定频段内具有极化选择特性.超材料极化选择FSS对极化滤波器的设计以及极化波产生器件的设计具有一定的借鉴意义.

[1] Li X Q, Gao J S, Zhao J L, Sun L C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3803 (in Chinese) [李小秋、高劲松、赵晶丽、孙连春 2008 物理学报 **57** 3803]
 [2] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surface: Theory and Design* (New York: Wiley) p120
 [3] Baena J D, Jelinek L, Marqués R 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 191105

[4] Yang H Y, Gong S X, Zhang P F, Guan Y 2010 *Elec. Lett.* **46** 1
 [5] Bayatpur Farhad, Sarabandi Kamal 2008 *IEEE Trans. Micro. Theory Tech.* **56** 12
 [6] Hao J M, Yuan Y, Ran L X 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 063908
 [7] Tang Q, Meng F Y, Zhang K, Wu Q, Li L W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014206 (in Chinese) [汤奇、孟繁义、张狂、吴

- 群、李乐伟 2011 物理学报 **60** 014206]
- [8] Jia H Y, Gao J S, Feng X G, Shun L C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 505 (in Chinese) [贾宏燕、高劲松、冯晓国、孙连春 2009 物理学报 **58** 505]
- [9] Anthony L, Itoh T, Caloz C 2004 *Micro. Magaz. IEEE* **5** 34
- [10] Ferrari J A, Perciante C D 2009 *J. Opt. Soc. Am. A* **26** 1
- [11] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 25
- [12] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Micro. Theory Tech.* **47** 11
- [13] Schurig D, Mock J J, Smith D R 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 041109
- [14] Schurig D, Mock J J, Justice B J 2006 *Science* **314** 977
- [15] Kanté Boubacar, Germain Dylan, Lustrac A D 2009 *Phys. Rev. B* **80** 201104
- [16] Houck A A, Brock J B, Chuang I L 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 137401
- [17] Chen H Y, Hou B, Chen S Y 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 183903
- [18] Sauviac B, Simovski C R, Tretyakov S A 2004 *Electromagnetics* **24** 317
- [19] Baena J D, Bonache J, Martín F 2005 *IEEE Trans. Micro. Theory Tech.* **53** 1451

Design of metamaterial frequency selective surface with polarization selectivity*

Wu Xiang¹⁾ Pei Zhi-Bin¹⁾ Qu Shao-Bo^{1)†} Xu Zhuo²⁾ Bai Peng³⁾ Wang Jia-Fu¹⁾ Wang Xin-Hua¹⁾ Zhou Hang¹⁾

1) (College of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

2) (Key Laboratory of Electronic Ceramics and Devices, Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

3) (Synthetic Electronic Information System Research Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

(Received 5 July 2010; revised manuscript received 22 January 2011)

Abstract

Two kinds of frequency selective surfaces with polarization selective characteristics are proposed in this paper. According to the design method of metamaterial, frequency selectivity capability can be achieved by the combination of continuous conducting wire and cut-wire whose effective permittivity is Lorentz-type. By different dimensions and structures in the x -axis and the y -axis of frequency selective surface unit cells, the passband properties for TE and TM waves are separated, so a polarization selective surface in GHz band can be achieved. The design method demonstrates the feasibility of metamaterial frequency selective surface and is of great reference value in fabricating polarization filter and polarization wave generator of specified frequency.

Keywords: metamaterial, frequency selective surface, polarization selective characteristic

PACS: 42.25. Ja, 42.25. Bs, 78.20. Bh, 78.20. Fm

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50632030, 60871027), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2009CB613306), and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province of China (Grant No. SJ08F01).

† Corresponding author. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn