

基于介质与铁氧体的通阻捷变磁可调频率选择 表面设计研究

韩鹏 王军 王甲富 马华 邵腾强 陈红雅 张介秋 屈绍波

Design and research of magnetic tunable frequency selective surface based on dielectric and ferrite

Han Peng Wang Jun Wang Jia-Fu Ma Hua Shao Teng-Qiang Chen Hong-Ya Zhang Jie-Qiu Qu Shao-Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 197701 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.197701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.197701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铌镁酸铅-钛酸 μ 掺杂 μ 掺杂 (5) 渊匪

Electron emission from $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 ferroelectric cathode

物理学报.2015, 64(24): 247701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.247701>

交联聚丙烯压电驻极体的压电性能及振动能量采集研究

Piezoelectric property of cross-linked polypropylene piezoelectret and its application in vibration energy harvester

物理学报.2015, 64(17): 177701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.177701>

钛酸钡纳米颗粒铁电性临界尺寸的理论分析

Theoretical analysis on ferroelectricity critical dimension of BaTiO_3 nanoparticles

物理学报.2015, 64(17): 177702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.177702>

聚(偏氟乙烯-三氟乙 烯)纳米薄膜极化反转与疲劳特性

Study of ferroelectric switching and fatigue behaviors in poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) copolymer nano-films

物理学报.2015, 64(16): 167701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.167701>

极化电压对聚丙烯压电驻极体膜压电性能的影响

Influence of polarization voltage on piezoelectric performance of polypropylene piezoelectret films

物理学报.2014, 63(15): 157703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.157703>

基于介质与铁氧体的通阻捷变磁可调频率选择表面设计研究*

韩鹏¹⁾²⁾ 王军^{1)†} 王甲富^{1)‡} 马华¹⁾ 邵腾强¹⁾ 陈红雅¹⁾
张介秋¹⁾ 屈绍波¹⁾

1)(空军工程大学理学院, 西安 710051)

2)(空军航空大学飞行教官训练基地, 蚌埠 233000)

(2016年4月23日收到; 2016年7月8日收到修改稿)

提出了利用介质陶瓷和铁氧体材料构建可调型带通频率选择表面的设计思路. 在C波段波导模式下通过仿真设计出高介电常数方形柱状结构, 优化后使其产生宽频的负介电常数, 基于等效媒质理论对该结构通阻特性进行分析研究, 其传输禁带的产生途径在于介质中产生了具有类Drude谐振形式的电单极子. 在相同的仿真环境下对铁氧体结构进行设计优化, 调节外加偏置磁场, 使铁磁谐振在相应的频点发生, 产生负磁导率. 利用负介电常数与负磁导率的“双负”特性规律, 将两种结构进行组合, 协同优化, 使电磁谐振相互耦合, 实现通带特性. C波段波导模式下的分析表明, 两种结构在同一个频点电磁谐振耦合, 可以实现“双负”通带的传输效果. 在由于铁氧体的磁可调特性, 通过改变外加偏置磁场, 该通带可以在6—8 GHz范围内可调. 对电磁场矢量分布状况和等效参数提取结果进行了数值分析研究, 确定了电磁耦合的性质和形成机理, 充分验证了这种方法的可行性. 对该结构材料样品进行加工, 并测试验证, 最终实验结果与仿真结果基本一致, 实现了“双负”通带的可调. 该方法拓展了频率选择表面的设计思路, 可用于设计多通带、可调谐频率选择表面.

关键词: 全介质频率选择表面, 铁氧体, 负磁导率, 负介电常数

PACS: 77.84.-s, 87.19.rf, 73.20.Mf, 77.22.Ch

DOI: 10.7498/aps.65.197701

1 引言

频率选择表面(frequency selective surface, FSS)^[1-5]是一种空间滤波器, 由完全相同的谐振单元周期排列构成的二维或三维阵列, 对入射电磁波表现出一个或多个带通、带阻特性. 传统FSS的贴片、缝隙结构谐振单元由金属材料构成, 因其独特的频率选择滤波特性, 被广泛地应用于微波、红外等频段的雷达天线罩和反射面等领域. 然而金属材料设计的FSS存在各向异性、高频损耗、功率

过载、易氧化腐蚀等难以克服的弊端, 在特殊情况下存在工程应用局限性. 近几十年以来, 利用全介质超材料的频率选择特性制作的FSS研究已经吸引了国内外众多学者的关注, 特别是采用高介电常数、低损耗的介质材料设计频率选择表面的研究逐渐兴起. 如马尔什大学的Gerini和Zappelli^[6]基于多模式等效网络Multimode Equivalent Network Approach的方法设计了改进型的全介质频率选择表面(all-dielectric metamaterial frequency selective surface, ADMFSS); 德克萨斯大学的Bar-

* 国家自然科学基金(批准号: 11274389, 61471388, 11504428)、全国优秀博士学位论文作者专项基金(批准号: 201242)和陕西省自然科学基金面上项目(批准号: 2015JM6300, 2016JM6026)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangjun563@163.com

‡ 通信作者. E-mail: wangjiafu1981@126.com

ton 课题组^[7,8]基于导波模式谐振的方法做了大量工作,设计了多项适用于高功率微波条件下的带阻型 ADM FSS. ADM 的特性可以克服传统金属材料的缺陷,其介电特性和结构参数较金属具有更好的可调性,有望代替金属实现空间滤波特性.以损耗为例,传统金属 FSS 的损耗主要来自于电阻损耗,如铜,这种损耗一般意义上来说是难以克服、难以调节的,很多苛刻的环境导致其无法使用. ADM FSS 的损耗主要是由于介质材料介电常数的虚部引起的,这就可以根据需求对材料内部各组分的含量进行有选择的配置、烧结,以此调节介电常数,降低损耗.

高介陶瓷材料在设计不同的几何结构参数、不同的工作频段下,具有不同的谐振模式,根据这些特性可以设计出不同需求的带通、带阻 ADM FSS. 如 Li 等^[9]利用高介陶瓷介质块设计了 X 波段内带宽约为 1.5 GHz 阻带;各国研究者也在不断扩展频率选择表面应用研究^[10-14]. 在 ADM FSS 研究设计飞速发展的同时,也出现了很多难以克服的问题,比如介质材料在电磁波的入射下谐振模式复杂多样,在当前物理机理、物理模型、基础理论还尚未成熟的情况下,分析起来比较困难.就频选可调性而言,当前调谐 FSS 很多是基于液晶做衬底材料,通过调节液晶配比浓度、外加电压等方式改变液晶的相对介电常数,调控不同区域层间的耦合,达到频选效果,但液晶对外界磁场、温度、应力都非常敏感,外界因素稍有变化就会导致调谐难度增加^[15-17]. 鉴于金属 FSS 的缺陷和液晶衬底 FSS 调谐难度大的问题,我们考虑利用铁氧体材料的铁磁共振在外磁场下频率可调这一特性来调节 ADMFSS 通/阻带的频率.

国内对铁氧体材料的研究和应用技术已相对成熟,目前存在多个系列的商用铁氧体,其饱和和磁化强度和铁磁共振线宽均可在很宽泛的范围内供选择.例如,对于钇铁石榴石系列,其饱和和磁化强度可以从 300 到 1800 Gs. 铁氧体也被应用在隔离器、平面波导、微波天线、吸波等诸多方面.其电磁特性在铁磁共振下会发生变化,这一特性可以用来设计磁场可调的超材料.如文献^[18-23]利用金属开口谐振环和铁氧体(钇铁石榴石)柱阵列进行组合,实现磁可调的通带特性;用钇铁石榴石长柱和

周期排列的铜金属线复合制备了可由外加磁场调制的左手超材料;这些超材料实现方式大多是利用铁氧体的铁磁谐振实现负磁导率,金属结构实现负介电常数.

本文引入了铁氧体材料与介质材料结构相结合的设计思路,通过外加磁场和时谐场的共同作用,调节铁氧体铁磁谐振的频点,实现负磁导率,利用介质结构电谐振实现负介电常数的性质.通过两种结构的合理重组,使二者电磁谐振的频率点重合从而实现“双负”通带,由于铁氧体铁磁谐振的频率能够随着外加偏置磁场的变化而改变,所以能够满足对不同频段通阻特性的需求,也大大增强了全介质材料在未来工程方面的适用性.

2 模型仿真设计与结果分析

2.1 全介质柱的带阻特性结构设计与分析

矩形陶瓷长柱电磁响应类似于金属线结构的 Drude 谐振,通过合理的设计能够产生宽频带的负介电常数.介质材料选用高介陶瓷,组分为 $\text{Ba}_{4.5}(\text{Sm}_{0.8}\text{Nd}_{0.2})_9\text{Ti}_{18}\text{O}_{54}$ (介电常数 $\epsilon_r = 80$, 损耗角正切 $\tan \delta = 0.0008$),如图 1(a). 利用 CST 仿真软件计算其散射参数.边界条件 x 方向和 y 方向设置为完美电边界 (electric, $E_t = 0$),模拟 BJ-70 波导(端口为 $34.85 \text{ mm} \times 15.8 \text{ mm}$)环境,仿真正入射情况下电磁波激励.图 1(b)为阵列在 TE_{10} 模式的电磁波正入射时介质柱的 S 参数曲线.从图 1(b)中可以看出,在 C 波段内, S_{21} 参数非常低,而 S_{11} 则接近于 1,也就是说,在这个频段内电磁波没有透射过去.

基于准静态条件下等效媒质理论,通过波导内散射参数提取方法提取陶瓷介质柱的等效电磁参数,得到图 1(c)和图 1(d)所示的等效参数图.由图 1(c)可以看出,在 C 波段内,介质柱表现出宽频负介电常数的性质.由图 1(d)可以看出此时磁导率为正值.电磁参数在宽频域内具有单负的特性,这一特性使得阻抗失配,从而导致了宽频的阻带,进一步的场分析可以揭示此宽频域的单负特性的起源.

选取 6.779 GHz 处介质柱内部电、磁场矢量分布情况进行分析,如下图 2(a)和图 1(b)所示.

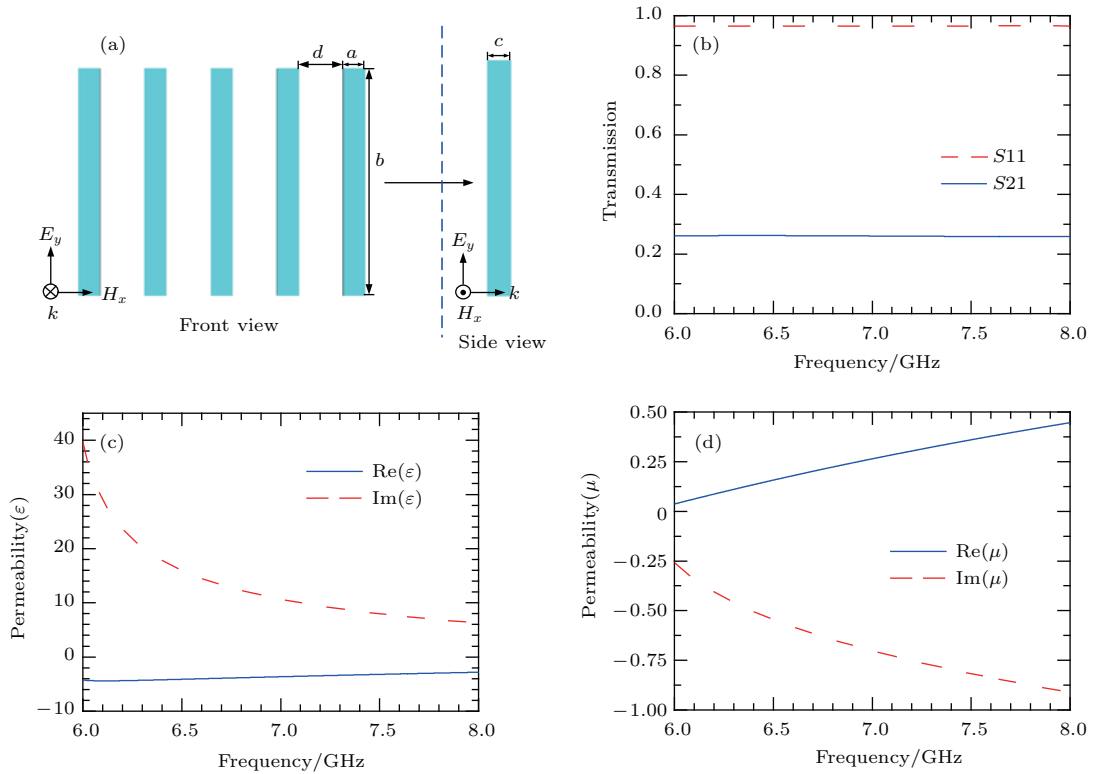


图1 (网刊彩色) (a) 五个长柱, 等间距 $d = 4$ mm, $a = c = 2$ mm, $b = 15.8$ mm; (b) TE_{10} 模式下的传输特性曲线; (c) 等效介电常数; (d) 等效磁导率
 Fig. 1. (color online) (a) Five Rectangular block, $d = 4$ mm, $a = c = 2$ mm, $b = 15.8$ mm; (b) the transmission characteristic curve of TE_{10} mode; (c) effective permittivity; (d) effective permeability.

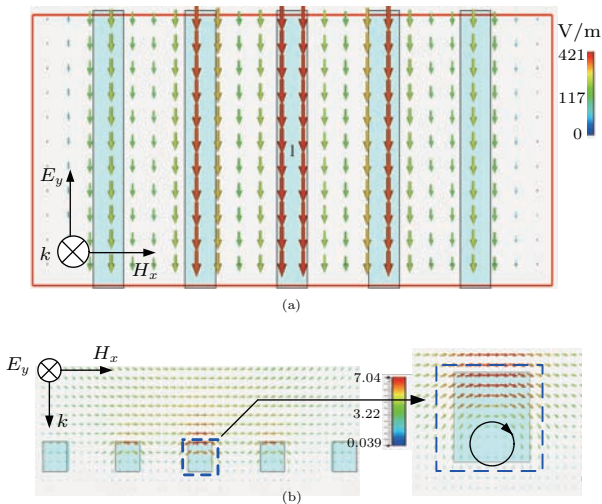


图2 (网刊彩色) (a) 6.779 GHz处电场矢量图; (b) 6.779 GHz处磁场矢量图
 Fig. 2. (color online) Field distributions of the element at 6.779 GHz: (a) Electric field distribution; (b) magnetic field distribution.

由图2(a)可知, 6.779 GHz处介质柱内部Y方向电场分布存在单一指向的净位移电流, 这个位移电流在外场作用下周期性地改变方向. 由于介质柱与导体壁相接触, 金属壁对位移电流的镜像作用使

得此时的位移电流为无限长, 这种方向周期性反转的无限长位移电流可以等效为谐振的电单极子. 因此, 整体的谐振特性表现为Drude谐振. Drude谐振能够产生如图1(c)所示的宽频负介电常数. 电场与磁场的耦合效应使得介质柱内部磁场绕y轴成环状旋转[见图2(b)], 可以明显看到随着电磁波逐渐向介质柱传播, 磁特性在逐渐衰减, 磁场强度越弱, 磁场形成的环路也越弱, 但整体的环形模式并没有改变. 这种场的分布特征也符合传输阻带的特点.

2.2 铁氧体柱的带阻特性结构设计与分析

选取的铁氧体材料为钇铁石榴石 (yttrium iron garnet, YIG), 其介电常数 $\epsilon_r = 14$, 损耗角正切 $\tan \delta = 0.0002$, 饱和磁化强度 $4\pi M_s$ 为1600 Gs, 铁磁共振线宽 $\Delta H = 10$ Oe, 朗德因子 $g = 2$. 将尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的铁氧体块按照图3所示的方式进行组合. 利用CST仿真软件计算其散射参数. 边界条件同2.1节相同.

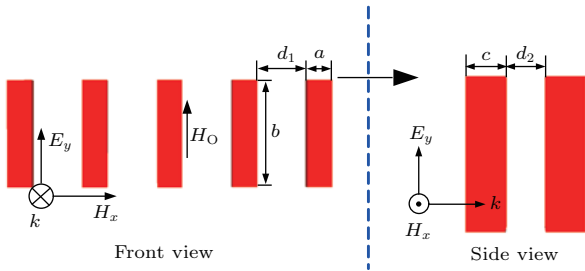


图3 (网刊彩色) 十个铁氧体柱镜像对称等间隔排列, $d_1 = 4$ mm, $d_2 = a = c = 2$ mm, $b = 6$ mm
 Fig. 3. (color online) $d_1 = 4$ mm, $d_2 = a = c = 2$ mm, $b = 6$ mm, the mirror symmetry of ten ferrite rectangular block.

当给铁氧体外加恒定磁场 H_0 时, 电子一方面自旋, 一方面绕 H_0 的方向旋进, 这种运动也称为拉莫进动. 当谐变场的角频率接近进动角频率时, 很小的时谐磁场就可以产生很强的磁化强度, 这种现象称之为铁磁谐振. 给铁氧体 y 轴正方向施加偏置磁场 H_0 , 就会使铁氧体磁偶极矩沿同一方向排列, 产生一个大的总磁矩. 磁偶极矩 \bar{m} 的运动方程为

$$\frac{d\bar{m}}{dt} = -\mu_0\gamma\bar{H}_0,$$

μ_0 为磁导率, γ 旋磁比. 可以得出, 大小不同的偏置磁场 H_0 产生不同大小的磁偶极矩, 对应不同大小的进动角频率:

$$\omega_0 = \mu_0\gamma\bar{H}_0.$$

当施加偏置磁场 H_0 时, 磁偶极矩绕 $H_0(y)$ 轴做强迫进动, 观察其 S 参数、等效磁导率实部变化情况: 随着外加磁场 H_0 磁性的改变, 产生不同的

进动角频率, 当与进动角频率接近的时谐场微波频率进入铁氧体界面时, 就会产生谐振, 如图 4(a) 和图 4(b) 铁氧体的 S_{21} 散射参数谐振点及其相应的等效磁导率实部均随着外加偏置磁场的增加逐渐向高频偏移.

由图 4 可以得到, 当外加磁场为 $H_0 = 1700$ Oe 时, 在 6.778 GHz 处, S_{21} 有一个极小值, 表现为一个窄带的阻带, 在 6.5 GHz 右侧, 对应的等效磁导率随着频率的增加先达到最大值再迅速下降, 到 6.778 GHz 达到最小负值, 随后缓慢上升趋近于零, 这种等效磁导率曲线特征表明 6.778 GHz 处为铁磁谐振. 为了进一步确认谐振类型, 我们观察铁氧体阵列在 6.778 GHz 的场分布情况, 如图 5.

图 5(a) 所示为铁氧体在 xz 平面内的磁场分布情况. 可以明显看到单个铁氧体内部出现谐振增强的磁场, 且磁场绕 y 轴周期性旋转. 这是由于铁氧体中的自旋磁矩绕外加磁场进动导致的, 进动方向绕 H_0 成右手螺旋关系, 表现为磁场绕 y 轴的逆时针旋转. 这一效应也会导致入射电磁波进入铁氧体界面后发生旋磁偏转. 图 5(b) 所示为铁氧体在 yz 平面内的电场分布情况. 可以看出, 左右两侧的铁氧体电场成环状矢量分布, 环状电流所激发的磁场位于 x 方向(时谐场的磁场方向), 在入射电磁波的激励下往复振动, 宏观上表现为 y 方向的磁偶极子. 结合铁氧体的性质, 可以判断此时的磁偶极子是由铁氧体的铁磁谐振导致的. 正是这个等效的磁偶极子的存在导致了在 6.778 GHz 附近的阻抗失配, 进而产生了阻带.

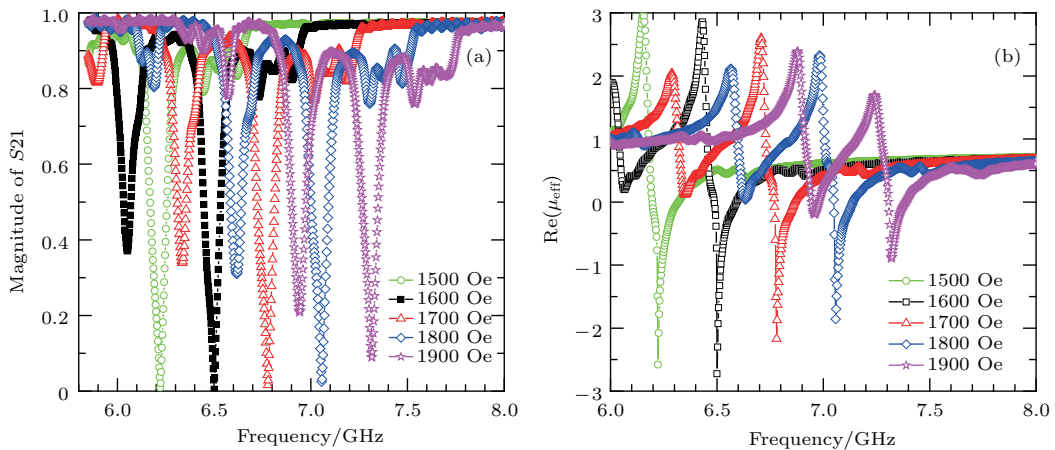


图4 (网刊彩色) (a) 不同外加偏置磁场下 S_{21} 散射参数曲线; (b) 不同外加偏置磁场下磁导率实部曲线
 Fig. 4. (color online) (a) Simulated transmission spectra for the ferrite rectangular block under a series of applied magnetic fields H_0 ; (b) the real part of permeability retrieved from the simulated scattering parameters under a series of applied magnetic fields H_0 .

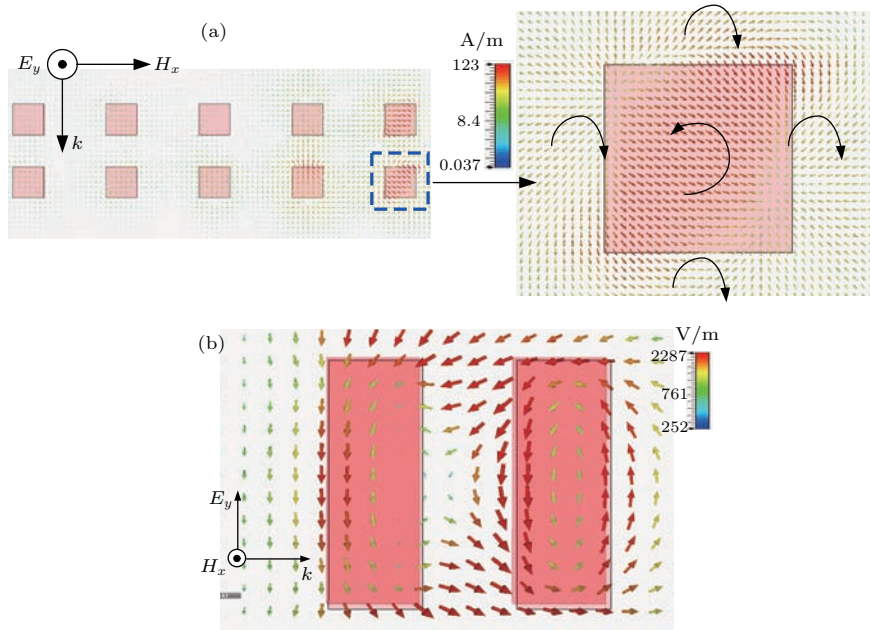


图5 (网刊彩色) (a) 磁场矢量分布图; (b) 电场矢量分布图

Fig. 5. (color online) Field distributions of the element at 6.778 GHz: (a) Magnetic field vector distribution; (b) electric field vector distribution.

2.3 全介质柱与铁氧体柱结构组合设计与频选特性的分析

为了实现“双负”通带频选效果, 将上述高介电常数全介质柱阵列和铁氧体阵列进行图6所示的组合. 利用CST仿真软件计算其散射参数. 边界条件设置同2.1, 2.2节仿真环境相同, 仿真正入射情况下电磁波激励.

对铁氧体 y 轴矢量方向施加稳恒外部磁场, 大小为 $H = 1700$ Oe, 得到如下 S 参数仿真结果如图7(a)所示. 利用双端口网络的参数提取方法可得到复合媒质的阻抗参数、等效介电常数和磁导率, 参数提取结果如图7(b)—(d)所示. 显然, 由图7(a)可以得到, 在施加1700 Oe的偏置磁场

时, 6.758 GHz中心频率处出现一个通带. 图7(c)中, 在6.6 GHz到6.8 GHz处等效介电常数为负, 等效磁导率在6.5 GHz右侧逐渐上升到最大值, 在6.6 GHz陡然下降至最小负值, 然后再缓慢上升. 磁导率在6.5 GHz右侧逐渐上升到最大值, 在6.7 GHz附近迅速下降至最小负值, 形成强烈的磁谐振. 介电常数和磁导率的“双负”的特性表明6.758 GHz处的通带是由介质长柱和铁氧体共同作用产生的. 通带的插损约为 -4 dB, 这是由于铁氧体材料中自旋磁矩与周围介质的相互作用引起的; 另外, 为产生持续的铁磁谐振, 需要克服阻尼力矩, 此时铁磁材料对入射电磁波能量的吸收也是导致较大插损的又一原因.

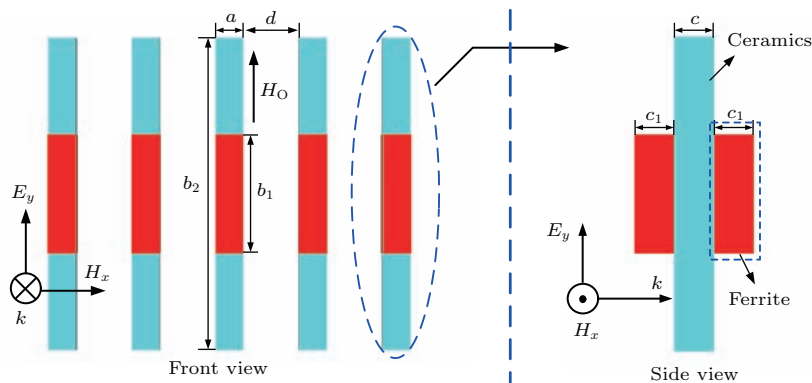


图6 (网刊彩色) 阵列组合 $a = c = c_1 = 2$ mm, $b_1 = 6$ mm, $b_2 = 15.8$ mm, $d = 4$ mm

Fig. 6. (color online) Combined array $a = c = c_1 = 2$ mm, $b_1 = 6$ mm, $b_2 = 15.8$ mm, $d = 4$ mm.

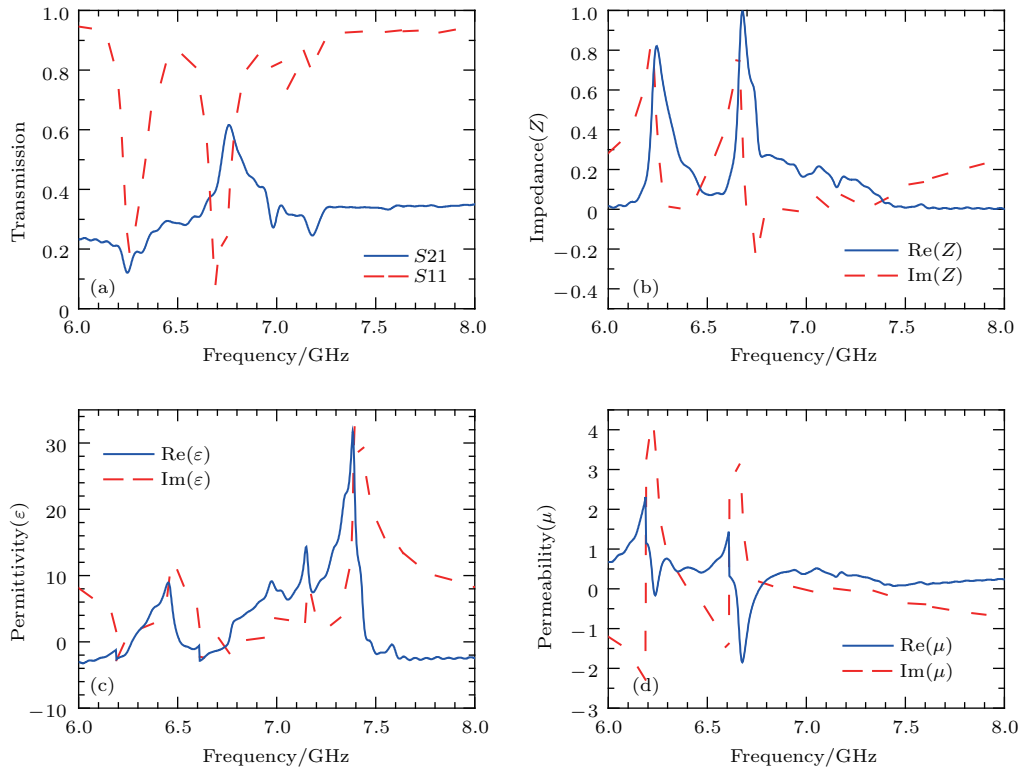


图7 (网刊彩色) (a) S 参数; (b) 阻抗值; (c) 等效介电常数; (d) 等效磁导率

Fig. 7. (color online) (a) Transmission and reflection coefficients; (b) impedance; (c) effective permittivity; (d) effective permeability.

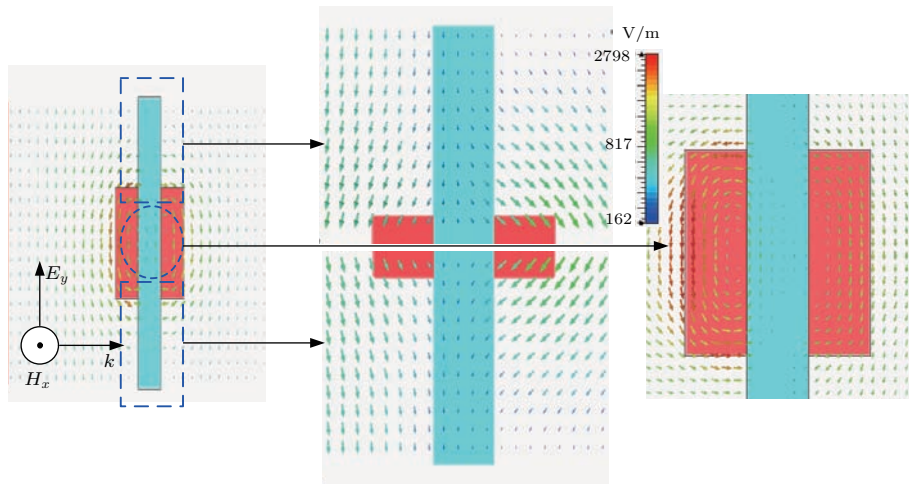


图8 (网刊彩色) 6.758 GHz 全介质铁氧体电场矢量分布图

Fig. 8. (color online) Electric field distributions at 6.758 GHz.

仅依靠等效参数曲线的线型特征判断谐振模式还不够充分, 需要进一步对谐振频率处动态场矢量分布跟踪和分析, 探究谐振和通阻特性的形成机理 (如图8所示).

由图8的中间图可以看出, 介质柱电场矢量分布情况受到铁磁谐振的影响, 随外加电磁场的相位

变化展现出动态分布的特性, 电场矢量周期性旋转, 但在交变电场方向上的大致谐振趋势没有改变, 依然在介质柱内部上下振荡. 最右侧图中铁氧体上的电场呈环状分布, 可以判断是由于各自内部磁谐振导致的. 所以两者结构重组后, 在同频点产生的电、磁谐振耦合是产生通带的主要原因.

鉴于铁氧体的磁可调性,我们在全介质结构介电常数为负的区域,可以适当地调节铁氧体负磁导率的谐振频点,这样便会产生新的频率通带,达到了通带可调的效果(如图9所示).当外加稳恒磁场从1500 Oe增加到1750 Oe时,传输通带的中心频率由6.2 GHz变化为6.9 GHz.因此,通过外加磁场的调节,可以实现某一频率下通带和阻带的快速变化,并实现通带在不同频率间的快速跳变.

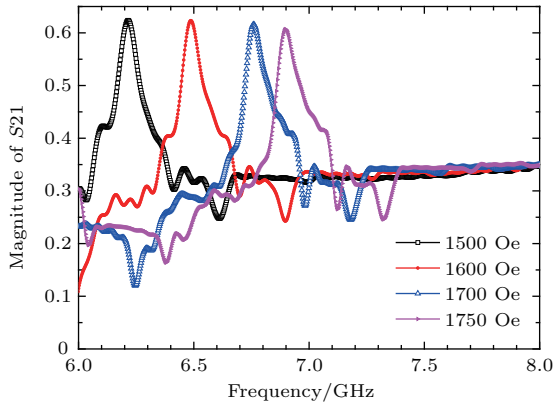


图9 (网刊彩色) 外加偏置磁场从1500 Oe到1750 Oe变化时 S21 变化曲线

Fig. 9. (color online) Simulated transmission spectra for the FSS under a series of applied magnetic fields H_0 .

3 实验

实验选用了理论仿真对应参数的陶瓷柱和铁氧体柱材料,测试样品及实验设备如图10所示,其

中图10(a)为实验设备图,图10(b)和图10(c)为实验样品.首先,将铁氧体放置于3D打印好的光敏树脂模型内(该材料模型 $\epsilon_r = 3$,经测试,使用前后对实验结果没有影响),随后放入C波段波导内进行测试,通过调节电流的方式改变外加偏置磁场大小,得到图11所示的磁导率测试结果和图12(a)—(d)中 S21(A) 的测试结果.

在实验测试过程中主要通过改变电磁铁的电流对外磁场进行调制,3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 A 对应的磁场分别位于1650, 1695, 1740, 1795, 1830 Oe附近.图11中磁导率的谐振区域随着外加电流的变化从6.9 GHz移动到7.6 GHz.图12(a)—(d)中 S21(A) 选取上述3.4 A到3.7 A的实验数据,对应阻带的中心频率分别为7.0, 7.2, 7.4, 7.6 GHz.从磁导率和对应阻带中心频率的变化情况来看,实验结果符合铁氧体铁磁谐振的规律.由于波导设备磨损,波导连接部位结合不够严密等因素导致散射不够均衡,引起 S21(A) 曲线产生杂峰,导致测试误差的放大.此外,铁氧体材料制备烧结过程中成分均衡与否、温控条件的不同都会导致样品质地不够均匀,材料的缺陷使得局部磁偶极子进动与整体进动不完全一致,从而产生谐振杂峰.结合铁氧体的整体铁磁性能及图4中 S21、磁导率仿真结果分析,上述实验结果和仿真结果是一致的,表现出铁氧体在外磁场作用下的磁可调性.

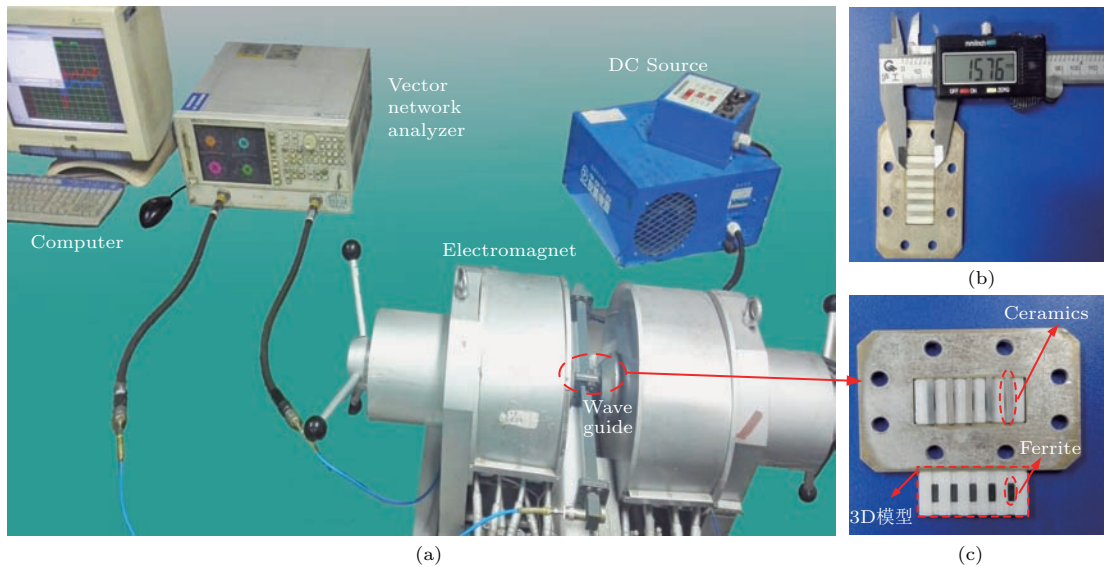


图10 (网刊彩色) 基于矢量网络分析仪与偏置磁场的实验设备及测试样品

Fig. 10. (color online) Experimental equipment and samples.

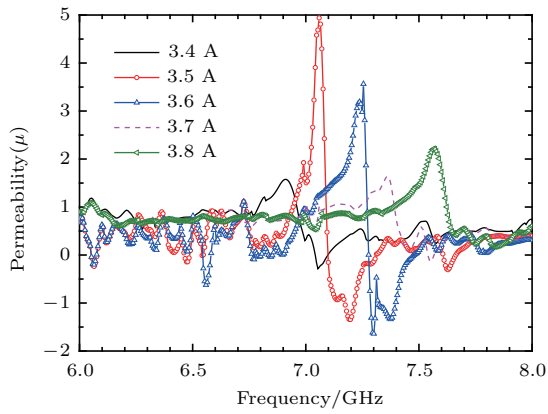


图 11 (网刊彩色) 不同外加偏置磁场下磁导率实部曲线
Fig. 11. (color online) The real part of permeability retrieved from the scattering parameters under a series of applied electric current.

将陶瓷柱放入3D模型, 波导内测试得到图 12 中 $S_{21}(B)$ 的测试结果, 图中曲线的幅值基本在 0.35 上下波动, 与图 1 (b) 仿真结果相比, 整体的平均值比仿真结果略有偏高, 但依然是宽频

阻带模式, 实验结果的趋势基本和仿真一致. 将介质陶瓷柱与铁氧体柱结构相结合, 置于波导内测试, 得到图 12 (a)—(d) 中 $S_{21}(A+B)$ 测试曲线, 图 12 选取了外加电流分别为 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 A 时的实验数据, 并与 $S_{21}(A)$, $S_{21}(B)$ 实验结果进行组合对比. 从图 12 (a) 可以看出, $S_{21}(A+B)$ “双负”通带中心频率产生于 6.9 GHz 处, 相比于 $S_{21}(A)$ 的阻带中心频点 7.05 GHz 处, 向左偏移了 0.15 GHz, 这是由于组合后的结构无论从厚度还是介质间的耦合都发生了变化, 导致谐振频点发生略微的偏移. 通带损耗约 -4 dB 是由于铁氧体克服阻尼力矩及能量损耗导致. 波导设备的测试精度、样品制备与加工的精度都可能引起谐振杂峰的出现. 同理对图 12 (b)—(d) 所有 $S_{21}(A+B)$ 测试结果观察分析, 通带中心频率分别位于 7.0, 7.2, 7.4 GHz 处, 效应同图 12 (a) 一致, 最终得出该通带随着外加偏置磁场的逐渐增加向高频移动, 实现了通带可调.

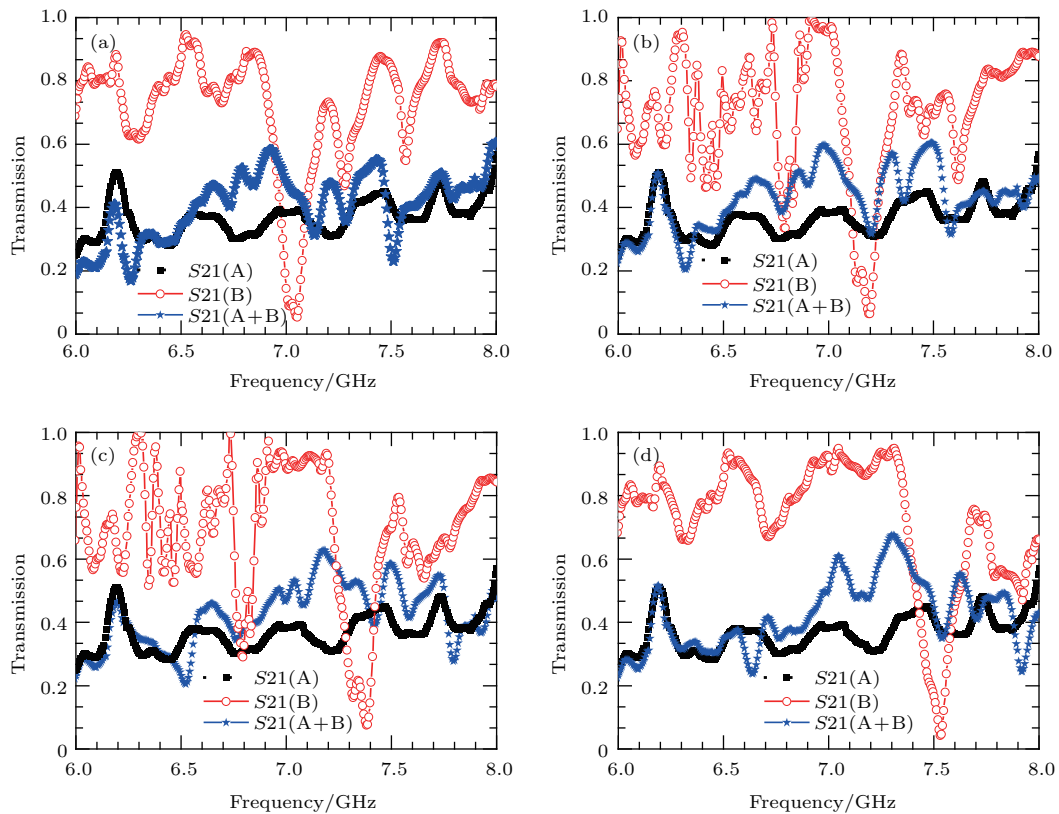


图 12 (网刊彩色) 组合对比图 (a) 施加 3.4 A 电流; (b) 施加 3.5 A 电流; (c) 施加 3.6 A 电流; (d) 施加 3.7 A 电流
Fig. 12. (color online) Contrast diagram: (a) Apply 3.4 A current; (b) to apply 3.5 A current; (c) to apply 3.6 A current; (d) to apply 3.7 A current.

注 $S_{21}(A)$, 仅对铁氧体施加外加磁场时, S_{21} 的传输情况; $S_{21}(A+B)$, 仅对陶瓷柱与铁氧体组合结构施加外加磁场时, S_{21} 的传输情况; $S_{21}(B)$, 仅对

陶瓷柱进行测试, S_{21} 的传输情况 (A, only ferrite; B, only ceramic cuboid; A+B, ferrite and ceramic cuboid).

4 结 论

本文通过介质谐振理论对高介电常数介质柱和铁氧体柱频选结构中出现的谐振模式进行了仿真设计与分析,判断各自电、磁谐振的模式来源,通过调节铁氧体的磁谐振频点,使电谐振和磁谐振的频段重合,然后将两者结构进行合理组合,分析了电磁耦合的情况,及“双负”通带频选特性产生的原因。从最终的仿真结果可以得出,在中心频率6.758 GHz处实现“双负”通带的同时,在C波段波导环境下该通带具备一定的可调性,这与预期的想法相符合。同时将模拟仿真设计结果与实验结果进行比对分析,得出“双负”通带的产生与仿真基本一致,实现了通带可调。

利用铁氧体来调节全介质频率选择表面是一个新的方法,这与铁氧体与金属频选结构的结合具有一定的相似性,但对未来的研究意义与应用环境是截然不同的。在今后的研究工作中,可以利用铁氧体磁场可调这一重要性能,实现不同的通、阻带频选需求,从而也提高了全介质材料在未来工程领域的应用,可见对这两种物质的深入研究是非常有意义的。在接下来的工作中,将把如何降低插入损耗作为一个研究重点。

参考文献

- [1] Wu T K, Lee S W 1994 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **42** 1484
- [2] Wu T K, Busby R W, Houston T A 1995 *J. Bacteriol.* **177** 3714
- [3] Wu T K 1994 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **42** 1659
- [4] Wu T K, Griffin J H 2002 *Biochemistry* **41** 8238
- [5] Al-Joumayly M, Behdad N 2009 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **57** 452
- [6] Gerini G, Zappelli L 2004 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **52** 1843
- [7] Barton J H, Garcia C R, Berry E 2015 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **63** 1032
- [8] Barton J H, Rumpf R C, Smith R W, Kozikowski C 2012 *Prog. Electromag. Res. B* **62** 269
- [9] Li L Y, Wang J, Wang J F 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 1398
- [10] Yu F, Wang J, Wang J F 2016 *J. Appl. Phys.* **119** 134104
- [11] Jiang S, Wang X M, Li J Y, Zhang Y, Zheng T, Lü J W 2016 *Chin. Phys. B* **25** 037701
- [12] Du B, Wang J, Xu Z, Xia S, Wang J F, Qu S B 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 234104
- [13] Zappelli L 2009 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **57** 1105
- [14] Ayan C, Kumar P S 2015 *Microw. Opt. Techn. Lett.* **57** 2016
- [15] Petrov A G, Marinov Y, D'Elia S, Marion S, Versace C, Scaramuzza N 2007 *J. Optoelectron. Adv. M* **9** 420
- [16] Werner D H, Kwon D H, Khoo I C 2007 *Opt. Express* **15** 3342
- [17] Sambles J R, Kelly R, Yang F 2006 *Phil. Trans. R. Soc. A* **364** 2733
- [18] Kang L, Zhao Q, Zhao H J, Zhou J 2008 *Opt. Express* **16** 17269
- [19] Kang L, Zhao Q, Zhao H J, Zhou J 2008 *Opt. Express* **16** 8825
- [20] Bi K, Zhou J, Zhao H J, Liu X M, Lan C W 2013 *Opt. Express* **21** 10746
- [21] Bai Y, Zhou J, Yue Z X, Gui Z L, Li L T 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 3901
- [22] Xu F, Bai Y, Qiao L J 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 114104
- [23] Bi K, Guo Y S, Zhou J, Dong G Y, Zhao H J, Zhao Q, Xiao Z Q, Liu X M, Lan C W 2014 *Scientific Reports* **4** 4139

Design and research of magnetic tunable frequency selective surface based on dielectric and ferrite*

Han Peng¹⁾²⁾ Wang Jun^{1)†} Wang Jia-Fu^{1)‡} Ma Hua¹⁾ Shao Teng-Qiang¹⁾
Chen Hong-Ya¹⁾ Zhang Jie-Qiu¹⁾ Qu Shao-Bo¹⁾

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

2) (Air Force Aviation University Flight Instructor Training Base, Bengbu 233000, China)

(Received 23 April 2016; revised manuscript received 8 July 2016)

Abstract

In this paper, a method of designing tunable bandpass frequency selective surface via ceramics and ferrite material is proposed. The ferromagnetic resonance frequency can be tuned when magnetic field is applied. According to this property, the center-frequencies of the pass and stop band can be adjusted. The proposed model is composed of the ceramic part and ferrite part, and CST simulation under C band waveguide condition is employed in the research. For the ceramic part, five high-permittivity rectangular blocks are included. The aim is to achieve negative permittivity in broad band. The band-pass and band-stop properties of the frequency selective surface are clarified based on the effective medium theory. The stop band originates from a similar Drude resonant electric monopole in the medium. The part of ferrite is composed of ten rectangular blocks. By adjusting the applied magnetic field, the ferromagnetic resonance and negative permeability are obtained at corresponding frequencies. Based on the “double negative” characteristics, the two parts are combined together to realize the pass band. For instance, when the magnetic field H_0 is 1700 Oe, the ferromagnetic resonance appears at a frequency of 6.778 GHz. In this case, the center frequency of the pass band is at 6.758 GHz. By interacting with the electromagnetic wave, the electric resonance can take place in the ceramic blocks, and the ferromagnetic precession will appear in the ferrite blocks. The simulation results indicate that the pass band is switchable and tunable in a range of 6–8 GHz by changing the bias magnetic field. The distributions of electric and magnetic fields, and the parameters of permittivity, permeability and impedance are obtained and discussed. Finally, the samples are fabricated and tested. The experimental results are basically consistent with the simulation results, indicating that the “double negative” passband can be adjusted via the applied magnetic field. This proposal provides a route to designing all-dielectric frequency selective surface and it can be used to design multi-band or tunable frequency selective surface.

Keywords: all-dielectric metamaterial frequency selective surface, ferrite, negative permeability, negative permittivity

PACS: 77.84.-s, 87.19.rf, 73.20.Mf, 77.22.Ch

DOI: 10.7498/aps.65.197701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11274389, 61471388, 11504428), the Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation of China (FANEDD) (Grant No. 201242), and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant Nos. 2015JM6300, 2016JM6026).

† Corresponding author. E-mail: wangjun563@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: wangjiafu1981@126.com