

钛酸锶钡基介质材料微波特性及频率选择特性设计

韩鹏^{①②}, 余斐^{①③}, 张介秋^{①*}, 王军^{①*}, 屈绍波^①, 马华^①, 王甲富^①, 师严^②

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;

③ 中国航天员科研训练中心, 北京 100094

* 联系人, E-mail: wangjun563@163.com; zhangjiq0@163.com

2016-04-19 收稿, 2016-06-07 修回, 2016-06-12 接受, 2016-09-21 网络版发表

国家自然科学基金重点项目(61331005)、国家自然科学基金(61471388, 11504428)、全国优秀博士学位论文作者专项基金(201242)和陕西省自然科学基金(2016JM6026)资助

摘要 选用传统的固相烧结法合成 $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ 陶瓷, 其中 x 为0.2, 0.3, 0.4, 0.45, 分别记为BST20*, BST30*, BST40*, BST45*, 对上述不同组分的 $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ 陶瓷进行介电性能的测试分析, 最终选择了烧结温度为1420℃且具有高介电常数低损耗 $\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3$ 陶瓷作为后续的研究对象. 为解决纯BST陶瓷的介电常数和介电损耗偏高导致的插损高、性能优化困难等问题, 在BST40*的中掺杂钛酸镁(Mg_2TiO_4 , MT)和镁钛酸锶($\text{La}(\text{Mg}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$, LMT)改性, 得出了掺杂不同组分的 $\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3$ 陶瓷在微波频段下具有介电常数可调($\epsilon=48\sim108$)的特性, 同时介电损耗降至 1×10^{-3} 数量级. 选取介电常数为 $\epsilon=65.87$ 高介电低损陶瓷, 仿真设计了一款在X波段具有三通带的频率选择表面结构. 基于准静态条件下的等效媒质理论和介质谐振理论对等效参数提取结果进行了数值分析, 对等效磁导率、等效介电常数和归一化阻抗的关系做了一定的说明, 确定电磁谐振是产生通带的主要原因, 并对动态场矢量分布情况进行了跟踪分析, 进一步确定了谐振模式和通阻特性的形成机理. 相关研究为制作高介电低损的全介质频率选择表面提供了一种方法.

关键词 $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ 陶瓷, MT 和 LMT 掺杂, 微波介电特性, 全介质频率选择表面

频率选择表面(frequency selective surface, FSS)是一类具有空间滤波效能的电磁功能器件, 可以在特定频段实现电磁波的高效导通或反射, 广泛应用于微波、红外、太赫兹等电磁频段^[1,2]. 传统FSS多使用金属材料进行设计, 将金属制备成特定图案的单元结构阵列, 通过周期排列的方式实现对电磁波的频率选择特性进行调制. 金属材料虽然具有易于加工, 易于共形等优势, 然而也存在高温烧蚀, 高频损耗大、功率承载小等问题. 金属结构主要依靠金属表面的传导电流实现对电磁波频率选择特性的调控. 根据麦克斯韦方程组, 传导电流和位移电流在激励

变场时具有相同的地位. 因此, 如果能够对介质材料中的位移电流进行有效调制, 则能够以新的机理进行FSS的设计.

具有高介电常数的全介质超材料(all-dielectric metamaterial, ADM)结构, 在波长与结构尺寸相匹配的情况下, 外加电磁场可以激励出谐振增强的位移电流, 替代金属材料中的传导电流进行电磁特性设计. 例如, 周济课题组基于Mie谐振原理, 采用高介电常数陶瓷介质设计了具有各向同性的负的等效参数的超材料^[3]; Davy等人^[4~6]将相同材料的全介质加工成不同尺度的立方颗粒, 分别实现了负的介电常

引用格式: 韩鹏, 余斐, 张介秋, 等. 钛酸锶钡基介质材料微波特性及频率选择特性设计. 科学通报, 2016, 61: 3278–3287

Han P, Yu F, Zhang J Q, et al. Microwave characteristics and design of frequency selective properties based on barium strontium titanate (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 3278–3287, doi: 10.1360/N972016-00513

数和磁导率; Barton课题组^[7,8]基于导波模式谐振的方法(guided mode resonance method, GMR)做了大量关于全介质型的FSS, 设计了多款适用于高功率条件下的带阻型全介质FSS. 由此可见, 对介质材料频率选择特性的研究引了国内外众多学者的关注^[9,10].

然而, 微波频段的全介质频率选择表面在设计选材时, 会出现诸多难以克服的问题. 如纯钛酸锶钡($\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$, BST)是一种具有钙钛矿结构的传统介质材料, 在微波频段, 具有高介电常数、高损耗的特点, 无法在外场下激励出谐振增强的位移电流, 难以调节带通或带阻的频率选择特性; 此外, 较高的介电损耗也可能造成带通型频率选择表面的通带内部插损过大、截止频段过宽等问题. 为了解决BST陶瓷的介电常数过高、损耗偏大的问题, 通常采用的方法是掺杂一些价位、电子层结构、物理化学性质相近的低介电常数、低损耗的非铁电材料.

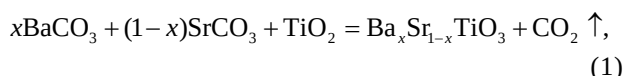
本文选用具有尖晶石结构的钛酸镁(Mg_2TiO_4 , MT)和氧化镧掺杂钛酸镁形成的镁钛酸镧($\text{La}(\text{Mg}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$, LMT)为掺杂材料, 两者具有介电常数低、损耗低的特性, 且均可以与钛酸锶钡掺杂后烧结形成复合陶瓷, 利用这两种材料的低介电常数、低损耗特性来改善钛酸锶钡基陶瓷的微波性能, 制备烧结出不同微波介电性能的微波陶瓷^[11~14]. 之后对各陶瓷的介电性能、掺杂性能进行了测试. 高介材料对空气而言阻抗匹配差, 更容易在介质的内部形成驻波, 在不同频率产生多种模式的谐振, 将这些谐振在各频段调节耦合或叠加可实现比低介材料更为优异的带通滤波特性. 文中第三部分仿真分析, 选取了介电常数为 $\epsilon=65.87$ 高介陶瓷, 经过结构的组合级联、优化设计出一款在X波段具备三通带特性的四方孔型全介质FSS, 基于准静态条件下的等效媒质理论^[15], 分析位移电流走势判断谐振类型; 根据提取的等效参数, 分析了电磁谐振的机理及谐振模式, 对电磁场的动态矢量分析进一步确定了通阻特性产生的原因^[16~19]. 最终在X波段电磁波呈现3个明显的传输通带, 该三通带具备带宽窄、插损小、截止反射率高的特点, 适用于多频段微波通信系统.

1 实验

1.1 钛酸锶钡基陶瓷的制取

采用分析纯的 BaCO_3 , SrCO_3 , TiO_2 为原料, 以固

相烧结法合成 $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$, 其中Ba的摩尔含量 x 为0.2, 0.3, 0.4, 0.45, 分别记为BST20*, BST30*, BST40*, BST45*. 实验按照BST20*, BST30*, BST40*, BST45*中不同的 BaCO_3 , SrCO_3 , TiO_2 摩尔比称量各组原料, 以无水乙醇为球磨介质, 将配好的原料放入球磨罐中球磨12 h, 将球磨后混合均匀的浆料烘干后, 在1150℃下预烧2 h, 合成BST粉体, 其反应方程式为



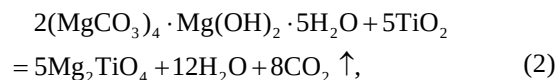
将BST粉体再次球磨12 h后在不超过65℃下烘干, 加入质量分数为5%的聚乙烯醇(PVA)造粒, 在10 MPa的压力下用直径为 Φ , 高度为 h 的磨具($\Phi=10$ 或12, $h=1$ 或5, 单位: mm)将BST粉体压制成的圆柱或圆片形状的生胚. 在550℃下经过3 h的排胶继续升温, 在1380℃, 1400℃, 1420℃和1450℃烧结成瓷. 在上述烧结温度下每个样品均烧结3个 $\Phi=12$ mm, $h=1$ mm的圆片试样.

1.2 BST40*基掺杂钛酸镁与镁钛酸镧后的制取

进行频率选择表面结构设计时, 纯BST陶瓷的介电常数过高, 会在很窄的频段内产生多次谐振, 不易于调节带通或带阻的频率选择特性; 同时介电损耗相对较高, 会造成频率选择表面插损过大、截止频段过宽等问题. 为解决上述问题, 通过掺杂的方式进行改性.

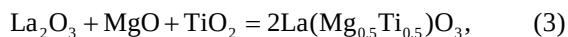
选取BST40*作为基体, 掺杂具有尖晶石结构的钛酸镁(Mg_2TiO_4 , MT)和氧化镧掺杂钛酸镁形成的镁钛酸镧($\text{La}(\text{Mg}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$, LMT), 两者均可以与钛酸锶钡形成复合陶瓷, 利用这两种材料的低介电常数、低损耗特性改善钛酸锶钡基陶瓷的微波性能, 将BST40*调节到合适的介电常数, 并降低材料的介电损耗.

MT粉末利用碱式碳酸镁($(\text{MgCO}_3)_4 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)和 TiO_2 合成, 事先将原料碱式碳酸镁和易吸收二氧化碳和水的氧化镧放在干燥箱里干燥处理24 h, 干燥温度为120℃, 低于碳酸镁分解温度220℃^[20]. 按照化学式 Mg_2TiO_4 配料, 以乙醇为介质球磨12 h, 烘干后将预烧温度设为1200℃, 保温时间6 h, 反应方程式如下:



LMT粉末利用氧化镁(MgO)、三氧化二镧(La_2O_3)和

TiO₂合成,按照化学式La(Mg_{0.5}Ti_{0.5})O₃配料,以乙醇为介质球磨12 h,烘干后将预烧温度设为1400℃,保温时间2 h,方程式如下:



将预烧后的MT和LMT粉末分别按质量比0.47BST40*+0.53MT, 0.43BST40*+0.57MT, 0.7BST40*+0.3LMT, 0.65BST40*+0.35LMT, 0.6BST40*+0.4LMT的配比混合,再次球磨12 h后在不超过65℃下烘干,加入质量分数为5%的聚乙烯醇(PVA)造粒,在10 MPa的压力下用直径为 $\Phi=10$ mm,高度为 $h=5$ mm的磨具将粉体压制成的圆柱状生胚.在550℃下经过3 h的排胶继续升温,掺杂MT的生胚升温到1345℃,掺杂LMT的生胚升温到1550℃,保温3 h烧结成瓷.在上述烧结温度下每个组分的每个样品均烧结3个.

2 结果与分析

2.1 物相分析

图1(a)和(b)分别是在不同温度下烧结后BST20*, BST30*, BST40*, BST45*陶瓷的相对密度和收缩率,分析结果表明:1420℃烧结的BST40*陶瓷的相对密度和收缩率最高,相对致密性最好.因此选择BST陶瓷的最佳烧结温度为1420℃.

2.2 介电性能

图2所示为利用精密阻抗分析仪测得BST陶瓷的介电频谱,测试频率为100 Hz~1 MHz,测试温度为25℃.从图中可以看出,随着测试频率的增加,BST

介质陶瓷的介电常数下降,因为介电常数是极化对电场的偏导,极化包括电子极化、离子极化、偶极子极化和界面极化等,当频率越来越大时,电子极化和离子极化能跟上电场的变化,偶极子极化和界面极化等跟不上电场的变化,因此介电常数会随频率的增加而降低.

此外,随着Ba²⁺摩尔含量的增加,BST介质陶瓷的介电常数明显增加,对于极化类型主要为离子位移极化的BST电介质陶瓷,介电性能变化主要来源于陶瓷晶粒内部空间电荷的贡献而非陶瓷晶粒间空间电荷的贡献,因此材料介电常数的大小取决于离子半径的大小. Ba²⁺的离子半径大于Sr²⁺的离子半径,对应的极化加强,对介电常数的贡献较高,从而引起介电常数的增加.介电损耗随Ba²⁺含量的增大而增大,同时介电损耗的变化经历两个过程:一是发生于低频区域(100 Hz~100 kHz),二是发生于高频区域(100 kHz~1 MHz).在低频区域(100 Hz~100 kHz)介电损耗随着频率增加不断减小,在高频区域(100 kHz~1 MHz)介电损耗随着频率的增加趋于稳定.

当外加电场频率逐渐升高时,弛豫极化跟不上电场的变化速率,介电损耗也逐渐增大.随电场频率加快,复介电常数实部从静态介电常数降至光频介电常数,同时介电损耗角正切 $\tan\delta$ 出现峰值,总体介电损耗角正切 $\tan\delta$ 的表达式如(4)式所示:在这一频率范围内,由于 $\omega\tau \ll 1$,故 $\tan\delta$ 随 ω 升高而增大.

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{[\varepsilon_s - \varepsilon_\infty]\omega\tau / (1 + \omega^2\tau^2)}{\{\varepsilon_\infty + [\varepsilon_s - \varepsilon_\infty] / (1 + \omega^2\tau^2)\}} = \frac{[\varepsilon_s - \varepsilon_\infty]\omega\tau}{\varepsilon_\infty + [\varepsilon_s - \varepsilon_\infty]}. \quad (4)$$

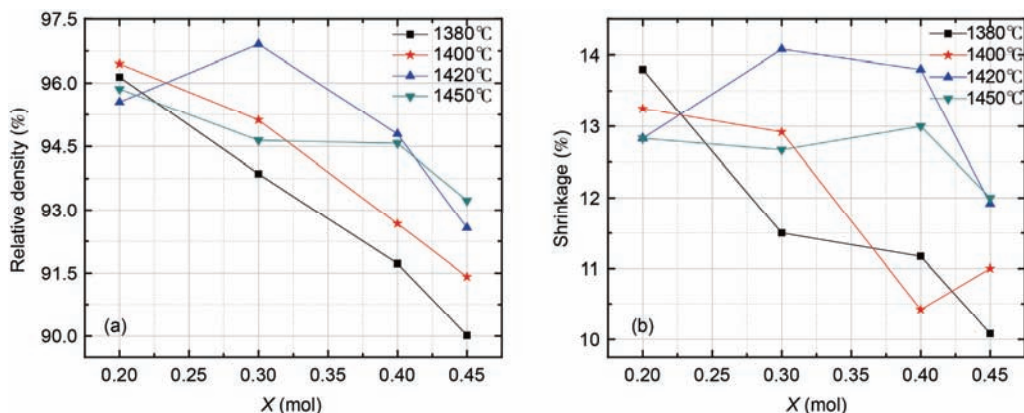


图1 (网络版彩色)BST陶瓷试样的相对密度与收缩率. (a) 相对密度; (b) 收缩率

Figure 1 (Color online) Relative density and shrinkage of BST Ceramic sample. (a) Relative densit; (b) shrinkage

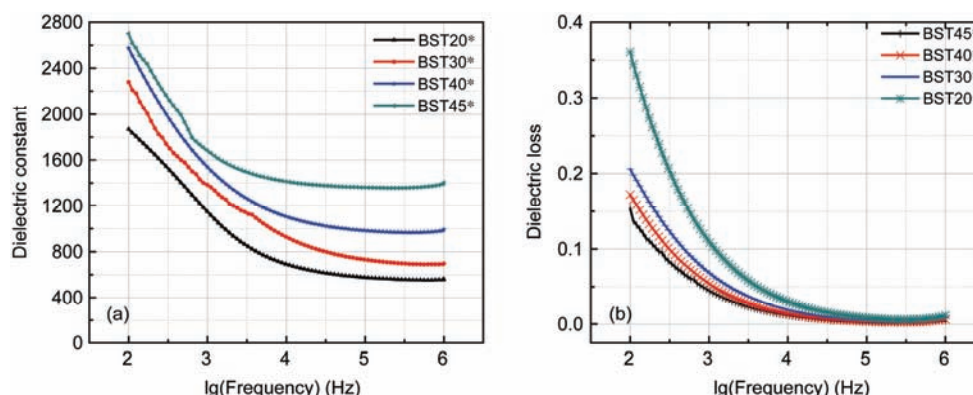


图2 (网络版彩色) BST陶瓷的介电频谱. (a) 介电常数; (b) 介电损耗

Figure 2 (Color online) Dielectric spectrum of BST Ceramic sample. (a) Dielectric constant; (b) dielectric loss

2.3 微波性能

表1为内径 $\Phi=10$ mm的圆柱模具压制的BSTx*陶瓷样品通过谐振腔法测得的微波频段的介电参数.

可以看出,在微波频段BSTx*陶瓷的介电常数比低频段小,主要原因是当频率逐渐增大到微波频段后,空间电荷极化与界面极化逐渐跟不上电场的变化,离子极化减弱,电子极化方式的介电常数和损耗都要明显小于离子位移极化.同时,随着 Ba^{2+} 离子含量降低,陶瓷的晶粒尺寸也进一步减小.因此介电常数和损耗也随之减小.

2.4 MT, LMT掺杂性能

用谐振腔法测得掺杂后陶瓷在微波频段介电性

能的平均值如表2所示.

可以看出,通过合理的掺杂改性,使得BST40*微波频段下的介电常数在48~108范围内,介电损耗降至 1×10^{-3} 数量级.由于测试仪器精度不同、每个样品造粒的大小及成瓷后均匀与否都直接影响着测试结果,误差在所难免.我们可以根据不同的需求掺杂不同含量的MT, LMT,来改变介电性能,烧结出具有不同介电常数的陶瓷成品.

3 仿真设计与分析

为验证该类材料在微波频段的频率选择特性,建立图3(a)所示模型,其基本参数为: $a=20$ mm, $a_1=6.5$ mm, $c=2$ mm, $d=7$ mm;在表2中选取介电常数为

表1 BSTx*陶瓷样品的微波介电性能

Table 1 Microwave dielectric properties of BSTx* ceramic samples

合成物	热处理温度(°C)	介电常数	频率(MHz)	品质因数	介电损耗
BST45*	1420/3 h	680.73	1397	282.75	0.00350
BST40*	1420/3 h	484.07	1657	383.56	0.00258
BST30*	1420/3 h	363.18	1912	400.75	0.00247
BST20*	1420/3 h	278.53	2145	483.56	0.00207

表2 BST40*掺杂MT和LMT陶瓷样品的微波介电性能

Table 2 Microwave dielectric properties of BST40* doped MT and LMT ceramic samples

合成物	热处理温度(°C)	介电常数	频率(MHz)	品质因数	介电损耗
0.47BST40*+0.53MT	1345/3 h	65.87	4466	666.67	0.00150
0.43BST40*+0.57MT	1345/3 h	48.59	5252	632.91	0.00158
0.7BST40*+0.3LMT	1550/3 h	108.73	3556	680.27	0.00147
0.65BST40*+0.35LMT	1550/3 h	100.31	3627	724.634	0.00138
0.6BST40*+0.4LMT	1550/3 h	85.65	3922	793.65	0.00126

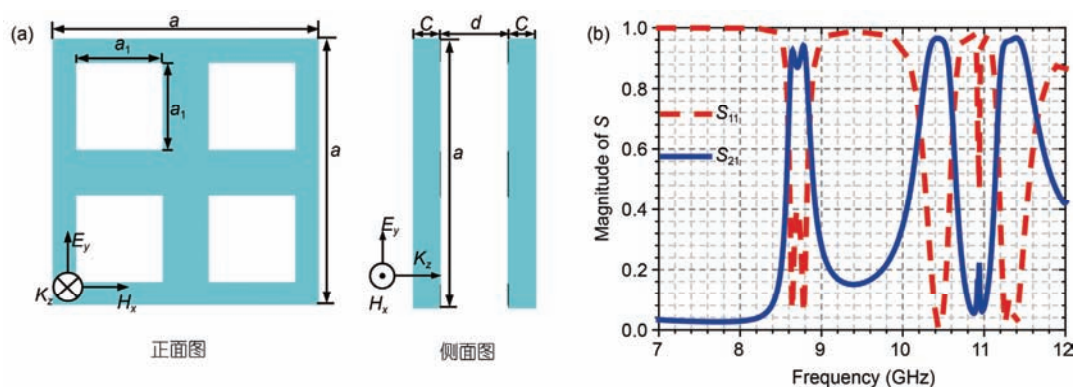


图3 (网络版彩色)对ADM FSS的仿真. (a) 仿真模型; (b) S参数

Figure 3 (Color online) The simulation of ADM FSS. (a) Simulation model; (b) magnitude of S

$\varepsilon=65.87$, 损耗角正切 $\tan\delta=0.0015$ 的陶瓷介质进行模拟仿真结构设计, 该周期结构层与层之间用厚度为 d 空气层隔开. 利用CST MWS计算其传输系数. 边界条件 x 方向和 y 方向设置为周期边界(unit), 模拟无限大表面结构, z 方向为开放边界(open), 仿真正入射情况下电磁波激励, 由于单元结构为中心对称, 所以对于不同极化方式的入射波S参数保持一致. 图3(b)为在TE极化模式的电磁波正入射时, 该全介质超材料频率选择表面(all-dielectric metamaterial frequency selective surface, ADM FSS)的S参数曲线, 其中实线代表传输系数 S_{21} , 虚线代表反射系数 S_{11} .

由图中的曲线可以看出, 该四方孔型ADM FSS在TE波正入射时, 在X波段对电磁波呈现3个明显的传输通带, 通带的中心频率分别为8.7, 10.4和11.3 GHz, 带内平坦, -3 dB通带带宽分别为 $\Delta f_1=0.26$ GHz (8.5 GHz~8.8 GHz), $\Delta f_2=0.42$ GHz(10.2~10.6 GHz)和 $\Delta f_3=0.50$ GHz (11.1~11.6 GHz).

基于准静态条件下的等效媒质理论, 通过散射参数提取四方孔型ADM FSS的等效电磁参数. 图4(a)和(b)分别为该四方孔型ADM FSS的等效介电常数和等效磁导率, 实线代表实部, 虚线代表虚部. 可以明显观察到等效电磁参数曲线发生剧烈的变化, 说明入射的电磁波激发出强烈的电谐振和磁谐振.

对于第一个传输通带(8.5~8.8 GHz), 在8.0 GHz右侧, 等效介电常数曲线先上升到最大值, 在8.6 GHz处急剧下降达到最小值后为负值, 形成强烈的电谐振. 而在8.0 GHz右侧, 等效磁导率曲线同样先上升到最大值, 8.6 GHz处急剧下降达到最小负值, 形成强烈的磁谐振. 所以, 电磁谐振的耦合实现通带滤波特性. 对于第二个传输通带(10.2~10.6 GHz), 在10.0 GHz右侧等效介电常数曲线先上升到最大值, 10.6 GHz之后急剧下降到最小负值, 之后缓慢上升; 而等效磁导率曲线同样先上升到最大值, 之后急剧下降在10.6 GHz达到最小值又缓慢上升. 所以仍然

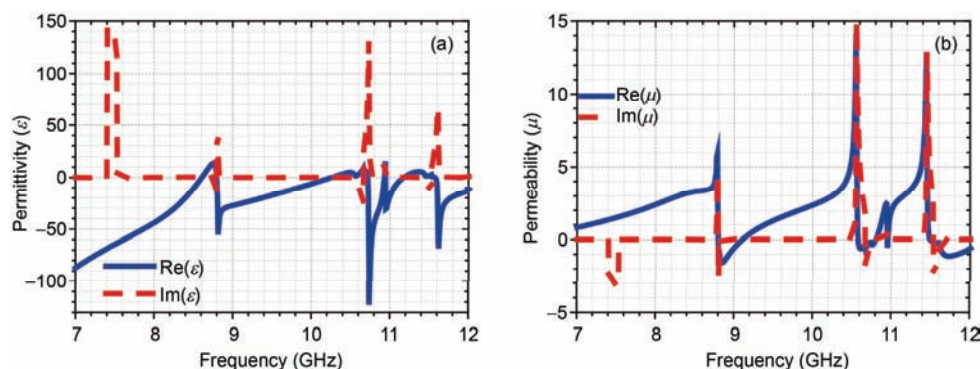


图4 (网络版彩色) (a) 等效介电常数; (b) 等效磁导率

Figure 4 (Color online) (a) Effective permittivity; (b) effective permeability

可以判断该通带是电磁谐振耦合实现的“双负”通带滤波特性。同理,对于第三个传输通带(11.1~11.6 GHz),观察电磁参数曲线,可以判断此处通带仍为电磁谐振的耦合所实现。

自由空间法测试平台S参数的问题都可以等效为二端口网络问题,为简化求解的复杂性,实验制备的超材料都具有对称的特性,即电磁波从正反两个方向入射时,超材料的性质完全一致。此种情况下,超材料与空气接触的两个边界波阻抗相同,相应的二端口网络为对称网络。该ADM FSS的归一化阻抗 Z_n 可以用S散射参数表示为

$$Z_n^2 = \frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}, \quad (5)$$

介质结构的特征阻抗与空气特征阻抗的比值为归一化特征阻抗。介质的特征阻抗又与FSS等效介电常数和等效磁导率有着必然的关系,则该结构的归一化阻抗 Z_n 表示为

$$Z_n = \frac{Z_r}{Z_0} = \sqrt{\mu_r/\epsilon_r} / \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}, \quad (6)$$

其中, Z_r 为频选表面的等效阻抗, ϵ_r 、 μ_r 分别为介质频选表面的等效介电常数和等效磁导率,这两者的变化直接影响着 Z_r , ϵ_r 、 μ_r 的变化则是由介质谐振模式的变化所决定。 ϵ_0 、 μ_0 为空气的等效介电常数和等效磁导率, Z_0 为空气的特征阻抗,大小约377 Ω 。

阻抗完美匹配意味着 Z_r 与 Z_0 相等,即 $Z_n=1$,此种情况只能导致一种可能: $|S_{11}|=0$, $|S_{21}|=1$,此时入射波传输过程没有反射和吸波两种效应。然而自然材料不可避免存在一定的损耗,这就要求 $|S_{21}|$ 应尽量接近于1,才能使归一化阻抗 Z_n 无限的接近于1。

图5为该ADM FSS的归一化阻抗,实线代表阻抗的实部,虚线代表阻抗的虚部。在第一个通带的频段内,8.6 GHz右侧阻抗实部由大于1逐渐降至1后继续降至小于1,对空气而言阻抗值等于1说明匹配良好,大于和小于1时,匹配略差,尽管第一个通带 $|S_{21}|$ 最低处值约为0.87,但插入损耗依然很小,仍然能够实现良好透射。观察第二、三通带对应的阻抗值实部,在峰值两侧边缘处均大于1,阻抗匹配略差,峰值中间大部分在1附近, $|S_{21}|$ 最低处值约为0.97,实现了良好透射。

为了进一步说明通带产生的机理,分别观察3个通带的电场与磁场矢量分布状况,如图6~8

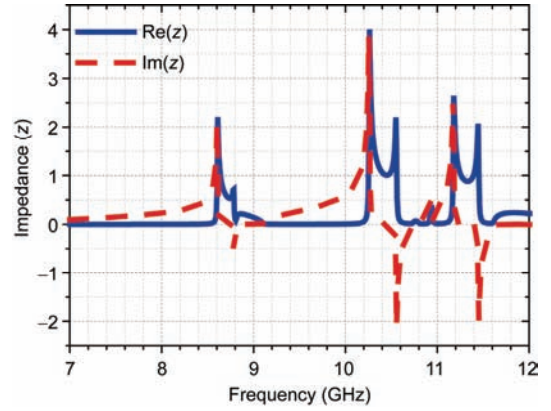


图5 (网络版彩色)归一化阻抗

Figure 5 (Color online) Normalized dimpedance with real and imaginary parts

所示。

图6可以观察8.7 GHz处xoy平面电场矢量分布,电场矢量在 $x=0, \pm 5, \pm 10$ 附近形成了增强的沿y轴正负方向振荡的电场矢量分布,强烈振荡的电场引起了磁场在xoz平面内的相应区域形成了绕着y轴的环状磁场矢量分布,平面 $y=0, 10, -10$ 处可以直观观察到。从远场看,这种场矢量分布如同电偶极子,在8.7 GHz附近出现了强电谐振,实现负的介电常数。同理,xoz平面内也存在沿z方向往复振荡的磁场矢量,如在 $x=\pm 2.5, \pm 7.5$ 附近,该磁谐振引起了在相应区域电场的环状矢量分布。即电磁谐振的耦合产生了通带滤波特性。

图7可以观察10.44 GHz处xoy平面电场矢量分布,电场矢量在 $x=0, \pm 10$ 附近形成了增强的沿y轴正负方向振荡的电场矢量分布,强烈振荡的电场引起了磁场在xoz平面内的相应区域形成了绕着y轴的环状磁场矢量分布,平面 $y=0, \pm 6$ 处可以直观观察到。从远场看,这种场矢量分布如同电偶极子,在10.44 GHz附近出现了强电谐振,实现负的介电常数。同理,xoz平面内也存在沿z方向往复振荡的磁场矢量,该磁谐振引起了在相应区域电场的环状矢量分布。即电磁谐振的耦合产生了通带滤波特性。

图8可以观察11.3 GHz处xoy平面电场矢量分布,电场矢量在 $x=\pm 2.5, \pm 7.5$ 附近形成了增强的沿y轴正负方向振荡的电场矢量分布,强烈振荡的电场引起了磁场在xoz平面内的相应区域形成了绕着y轴的环状磁场矢量分布,平面 $y=0, 10$ 处可以直观观察到。此外, $x=0, \pm 10$ 附近同样形成了增强的沿y轴正负方向振荡的电场矢量,同理可以在平面 $y=6$ 处直观观察到环

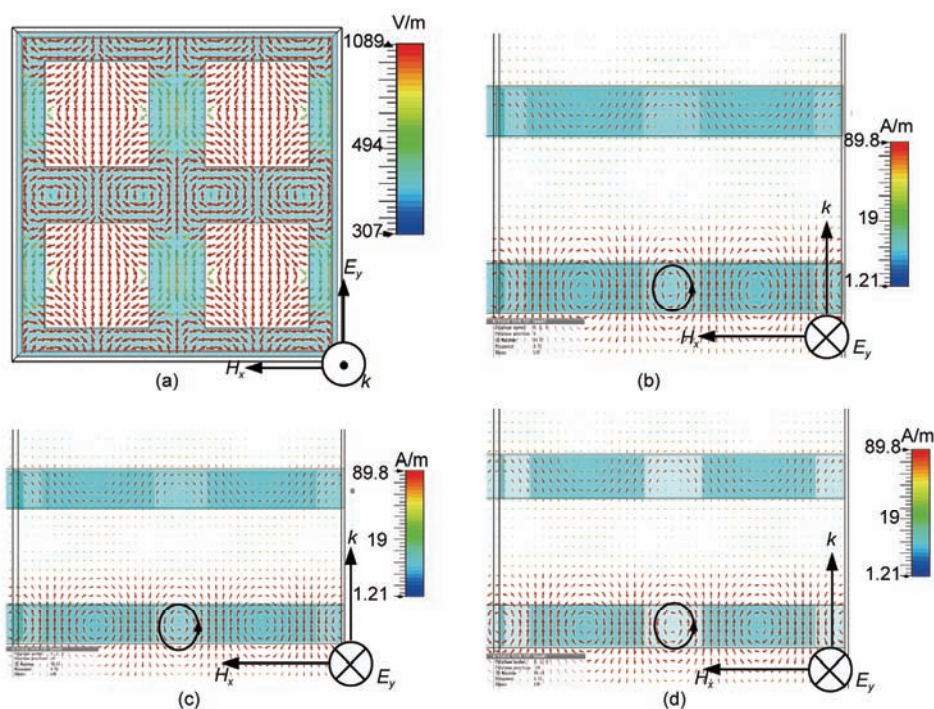


图6 (网络版彩色)8.7 GHz处电场与磁场的分布情况. (a) TE波入射xoy面的电场矢量分布; (b) 平面 $y=0$ 处磁场矢量分布; (c) 平面 $y=10$ 处磁场矢量分布; (d) 平面 $y=-10$ 处磁场矢量分布

Figure 6 (Color online) Vector distribution of electric field and magnetic field at 8.7 GHz. (a) Electric field distribution in plane $z=0$ mm; (b) magnetic field distribution in plane $y=0$ mm; (c) magnetic field distribution in plane $y=10$ mm; (d) magnetic field distribution in plane $y=-10$ mm

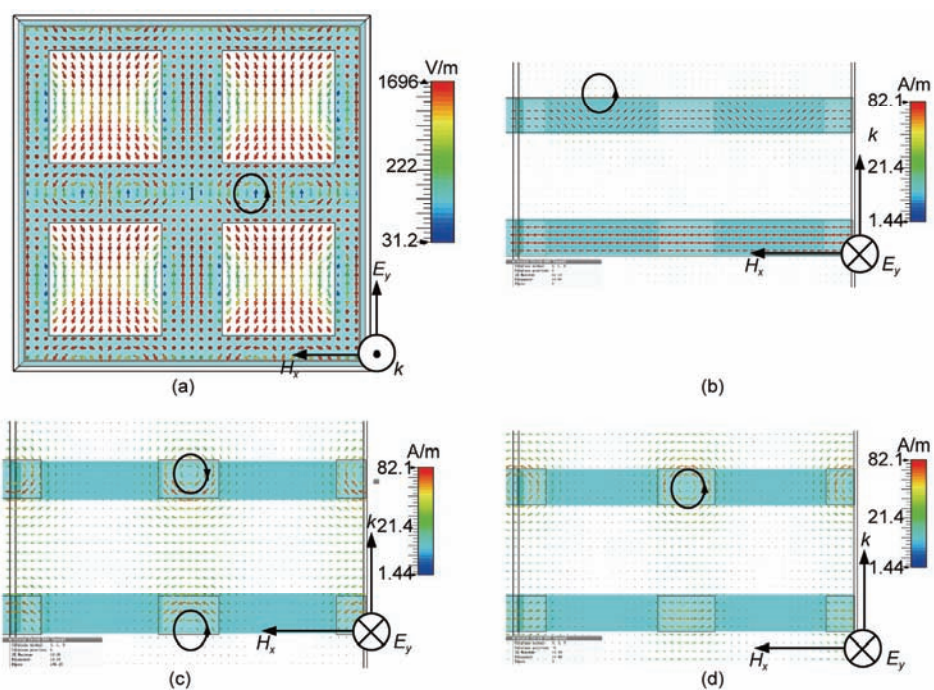


图7 (网络版彩色)10.44 GHz处电场与磁场的矢量分布情况. (a) TE波入射xoy面的电场矢量分布; (b) 平面 $y=0$ 处磁场矢量; (c) 平面 $y=6$ 处磁场矢量分布; (d) 平面 $y=-6$ 处磁场矢量分布

Figure 7 (Color online) Vector distribution of electric field and magnetic field at 10.44 GHz. (a) Electric field distribution in plane $z=0$ mm; (b) magnetic field distribution in plane $y=0$ mm; (c) magnetic field distribution in plane $y=6$ mm; (d) magnetic field distribution in plane $y=-6$ mm

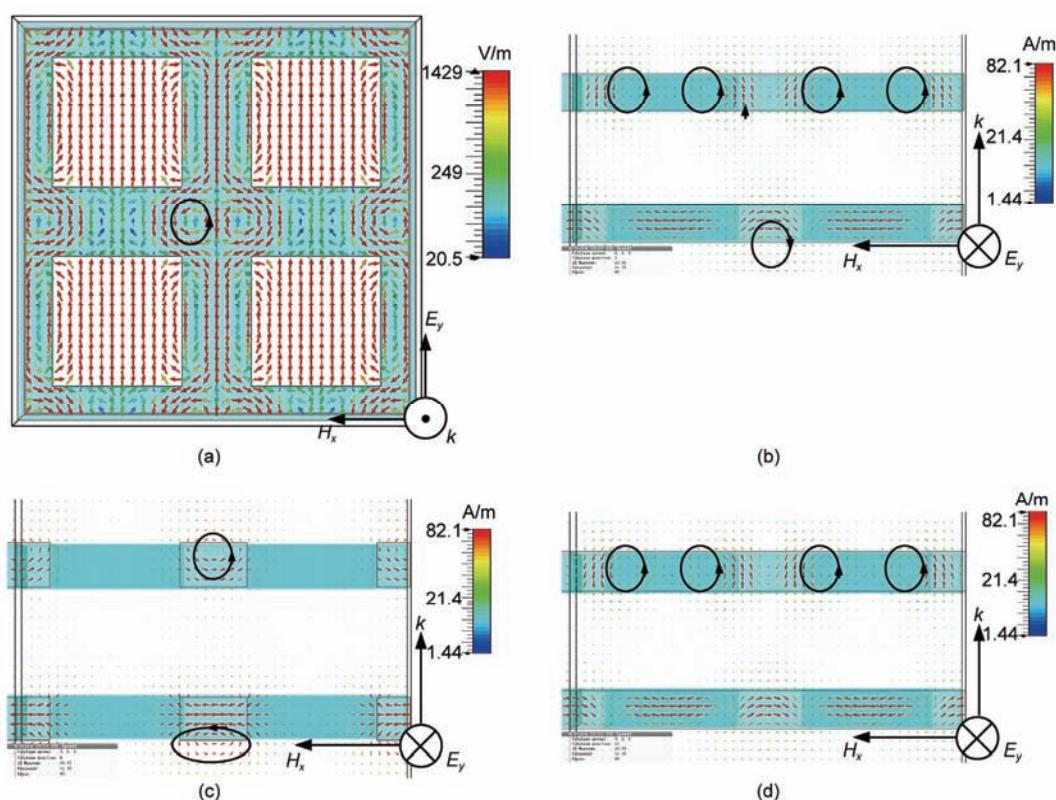


图8 (网络版彩色)11.3 GHz处电场与磁场的矢量分布情况. (a) TE波入射xoy面的电场矢量分布; (b) 平面y=0 处磁场矢量分布; (c) 平面y=6 处磁场矢量分布; (d) 平面y=10 处磁场矢量分布

Figure 8 (Color online) Vector distribution of electric field and magnetic field at 11.3 GHz. (a) Electric field distribution in plane $z=0$ mm; (b) magnetic field distribution in plane $y=0$ mm; (c) magnetic field distribution in plane $y=6$ mm; (d) magnetic field distribution in plane $y=10$ mm

状磁场矢量分布. 在从远场看, 这种场矢量分布如同电偶极子, 在11.3 GHz附近出现了强电谐振, 实现负的介电常数. 同理, xoz 平面内也存在沿 z 方向往复振荡的磁场矢量, 如 $x=\pm 1, \pm 9$ 处. 该磁谐振引起了在相应区域电场的环状矢量分布. 仍然是电磁谐振的耦合产生了通带滤波特性.

4 结论

本文优化出了介电常数高、介电损耗低、性能优异的BST陶瓷, 以组分(BST40*)陶瓷为基体分别掺

杂定量的钛酸镁(MT)和镁钛酸镧(LMT), 最终通过合理的掺杂改性, 使得BST40*的微波频段下的介电常数在48~108可调节, 介电损耗降至 1×10^{-3} 数量级. 最后选择介电常数 $\epsilon=65.87$ 的0.47BST40*+0.53MT陶瓷, 仿真设计出在X波段具有良好透射性能的三通带四方孔型ADM FSS结构, 该三通带具备带宽窄、插损小、截止反射率高的特点, 可适用于多频段微波通信系统. 在今后的工作中, 可以根据不同的介电性能设计出不同需求的带通或带阻型FSS. 相关研究为制作高介低损的ADM FSS提供了一种可行性方法.

参考文献

- 1 Munk B A. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. New York: Wiley-Interscience, 2000
- 2 Panwar R, Puthucheri S, Agarwala V, et al. Fractal frequency-selective surface embedded thin broadband microwave absorber coatings using heterogeneous composites. IEEE Trans Microw Theroy, 2015, 63: 2438–2448
- 3 Zhao Q, Zhou J, Zhang F L, et al. Mie resonance-based dielectric metamaterials. Mater Today, 2009, 12: 60
- 4 Davy M, Lepetit T, Rosny J D, et al. Detection and imaging of human beings behind a wall using the dort method. Prog Electromagn

- Res, 2010, 110: 353–369
- 5 Burokur S N, Lepetit T, Lustrac A D. Incidence dependence of negative index in asymmetric cut wire pairs metamaterials. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 191114
- 6 Lepetit T, Akmansoy É, Ganne J P. Experimental evidence of resonant effective permittivity in a dielectric metamaterial. *J Appl Phys*, 2011, 109: 023115
- 7 Barton J H, Garcia C R, Berry E, et al. 3-D printed all-dielectric frequency selective surface with large bandwidth and field of view. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2015, 63: 1032–1039
- 8 Barton J H, Rumpf R C, Smith R W, et al. All-dielectric frequency selective surfaces with few number of periods. *Prog Electromagn Res B*, 2012, 62: 269–283
- 9 Li L Y, Wang J, Wang J F, et al. All-dielectric metamaterial frequency selective surfaces based on high-permittivity ceramic resonators. *Appl Phys Lett*, 2015, 106: 1398–1399
- 10 Yu F, Wang J, Wang J F, et al. Polarization and angle insensitive dual-band bandpass frequency selective surface using all-dielectric metamaterials. *J Appl Phys*, 2016, 119: 134104
- 11 Liu M, Zhu H K, Zhou H Q. Study on properties of magnesium titanate/lanthanum titanate multiphase ceramics (in Chinese). *Mater Rev*, 2006, 20: 349–350 [刘敏, 朱海奎, 周洪庆. 钛酸镁/钛酸镧复相陶瓷性能的研究. *材料导报*, 2006, 20: 349–350]
- 12 Wang M N, Qiu T, Shen C Y. Microwave sintering of magnesium titanate dielectric ceramics (in Chinese). *Mater Mech Eng*, 2009, 33: 23–25 [王美娜, 丘泰, 沈春英. 钛酸镁基介电陶瓷的微波烧结. *机械工程材料*, 2009, 33: 23–25]
- 13 Deng C, Zhang S R, Tang B, et al. Study on preparation and modification of pure magnesium titanate (in Chinese). *Electron Comp Mater*, 2009, 28: 9–11 [邓超, 张树人, 唐斌, 等. 纯钛酸镁的制备及改性研究. *电子元件与材料*, 2009, 28: 9–11]
- 14 Zhang L, Liang H, Xu T X. Doping modification and application of $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ dielectric (in Chinese). *J Chin Ceramic Soc*, 2002, 30: 785–788 [张磊, 梁辉, 徐廷献. 钛酸锶钡电介质材料的掺杂改性及其应用. *硅酸盐学报*, 2002, 30: 785–788]
- 15 Jacobsen K W, Norskov J K, Puska M J. Interatomic interactions in the effective-medium theory. *Phys Rev B Cond Matter*, 1987, 35: 7423–7442
- 16 Steinke J M, Shepherd A P. Comparison of Mie theory and the light scattering of red blood cells. *Appl Opt*, 1988, 27: 4027–4033
- 17 Jylhä L, Kolmakov I, Maslovski S, et al. Modeling of isotropic backward-wave materials composed of resonant spheres. *J Appl Phys*, 2006, 99: 043102
- 18 Yannopapas V, Moroz A. Negative refractive index metamaterials from inherently non-magnetic materials for deep infrared to terahertz frequency ranges. *J Phys Condens Matter*, 2005, 17: 3717–3734
- 19 Koschny T, Markos P, Smith D R, et al. Resonant and antiresonant frequency dependence of the effective parameters of metamaterials. *Phys Rev E*, 2003, 68: 1855–1862
- 20 Wang C Y, Du Z M, Cong X M, et al. Investigation in thermal decomposition of basic magnesium carbonate (in Chinese). *Appl Chem Indust*, 2008, 37: 657–660 [王春迎, 杜志明, 丛晓民, 等. 碱式碳酸镁的热分解研究. *应用化工*, 2008, 37: 657–660]

Microwave characteristics and design of frequency selective properties based on barium strontium titanate

HAN Peng^{1,2}, YU Fei^{1,3}, ZHANG JieQiu¹, WANG Jun¹, QU ShaoBo¹, MA Hua¹,
WANG JiaFu¹ & SHI Yan²

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

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

³ Astronaut Scientific Research Training Center of China, Beijing 100094, China

Frequency selective surface (FSS) is a kind of electromagnetic functional devices with a spatial filtering efficiency. It can transmit or reflect electromagnetic waves at certain frequencies and is widely used in microwave, infrared and terahertz electromagnetic frequency. Conventional FSSs usually consist of a 2D periodic array of metal structures, but they are prone to breakdown, oxidization and corrosion, especially in high-power and high-temperature applications. According to Maxwell's equations, the conduction current and displacement current have similar effect in the excited time-varying field. Hence, high-permittivity ceramic particles can be employed as the elementary unit cell to fabricate all-dielectric metamaterial FSSs. First, solid sintering method is used to prepare $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ ceramics. Here, the x refers to 0.2, 0.3, 0.4 and 0.45, the $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ are marked as BST20*, BST30*, BST40*, BST45* respectively. The induced density and dielectric properties of different $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ ceramics were tested and discussed. The testing results indicate that when sinter temperature is up to 1420°C, the $\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3$ ceramics can obtain a high dielectric constant and a low loss and it is selected for the following research. For the pure BST ceramics, the dielectric constant is high, which results that the resonant occurs many times in a narrow frequency band. So, it's difficult for designing of the FSS. In addition, the relative higher dielectric loss leads to a larger insertion loss and a wide cut-off frequency band. In order to improve its performance, the Mg_2TiO_4 (MT) and $\text{LA}(\text{Mg}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_3)$ (LMT) are mixed into BST40*. Through testing, the dielectric constant of the improved $\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3$ ceramics with different components can be obtained ($\epsilon=48-108$) and dielectric loss is reduced to 10^{-3} order of magnitudes. After that, the high-permittivity and low-loss ceramics with $\epsilon=67.87$ is chosen to design the 3 band-pass all-dielectric FSSs, which implemented by the two-dimensional periodic arrays. The center frequencies are 8.7, 10.4 and 11.3 GHz respectively, and the passband fluctuation is flat. The -3 dB bandwidths of the lower and upper passbands are $f_1=0.26$ (8.5–8.8 GHz), $f_2=0.42$ (10.2–10.6 GHz) and $f_3=0.50$ GHz (11.1–11.6 GHz) respectively. Based on the effective medium and dielectric resonance theory, the effective permeability, the effective permittivity and the normalized impedance are discussed. The results show that the major cause of the passing band is electromagnetic coupling. Finally, the distribution of dynamic vector field is investigated. Through which, the mechanism of resonance and band-pass characteristics are further verified. Take the first transmission pass band (8.5–8.8 GHz) as an example, after 8 GHz, the effective permittivity gradually increases to a maximum value (15) at 8.6 GHz, and then decreases rapidly until reaches a negative value (-50), which means a strong electric resonance occurred. In addition, at the right side of the 8 GHz, the effective permeability firstly increases to a maximum value, and then decreases to a minimum value at the 8.6 GHz, which means strong magnetic resonance occurred. Therefore, the electric and magnetic resonance can be coupled to achieve the passband filtering characteristics. In the first passband, the real part of normalized impedance gradually decreases from more than 1 to 1 on the right side of at 8.6 GHz, and then continues to decrease until less than 1. When the impedance value is 1, it is fine for air matching, while larger or smaller than 1, slightly worse. Although the minimum $|S_{21}|$ value of the first passband is approximately 0.87, the insertion loss is small and it still can achieve a good transmission effect. This proposal provides a method for designing the high-permittivity and low-loss all-dielectric FSS.

$\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ ceramic, MT and LMT mix, microwave dielectric properties, all-dielectric metamaterial frequency selective surface

doi: 10.1360/N972016-00513