

# 基于钛酸锶钡介电非线性效应的可调谐太赫兹人工电磁媒质\*

赵强<sup>†</sup> 文岐业 戴雨涵 张继华 陈宏伟 杨传仁 张万里

(电子科技大学, 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 610054)

(2012年7月3日收到; 2012年8月21日收到修改稿)

数值仿真研究了内嵌钛酸锶钡薄膜夹层的金属网格谐振单元人工电磁媒质的谐振行为. 垂直电磁波激励下, 电磁响应频率随着内嵌夹层钛酸锶钡薄膜介电常数的变大呈现红移, 调谐率为 22.6%. 本文提出的人工电磁媒质调谐方法只需要以结构单元的上下两层金属图形本身作为电极对内嵌夹层钛酸锶钡薄膜施加电压, 极大地简化了可调谐人工电磁媒质的制备及应用, 在太赫兹人工电磁媒质调制器等方面具有潜在的应用.

**关键词:** 人工电磁媒质, 钛酸锶钡薄膜, 介电非线性, 调谐

**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Bs

**DOI:** 10.7498/aps.62.044104

## 1 引言

太赫兹 (THz) 技术在现代科学技术、国民经济及国防建设中有着巨大的应用潜力, 近些年来, 人们为填补“THz 空白”做了大量的努力<sup>[1-4]</sup>. 然而相对于 THz 辐射的产生和探测技术的飞速发展, 如何操控 THz 波的技术却显得大为落后, THz 器件如 THz 滤波器、相位控制器、开关和调制器的发展进步缓慢. 这是因为自然界中很多材料在 THz 频段都没有电磁响应, 长久以来人们都无法找到一种合适的材料来制造相应的器件以高效地控制 THz 波的传输. 所幸 THz 人工电磁媒质的实现大大拓展了传统 THz 技术的研究领域, 导致产生全新的 THz 波操控技术.

控制 THz 辐射的振幅、频率或相位需要人工电磁媒质的电磁响应能够主动调控, 这可以通过将构成人工电磁媒质的结构单元与其他功能材料结合, 利用其他功能材料对外界因素的响应实现. 利用电压控制人工电磁媒质对电磁波传播方式的调控一直是研究人员探索的重要方向, 因为不论从操

作方式、反应时间、控制精度等方面来看, 电压控制方式是最为有利和方便的. 在早期微波频段人工电磁媒质研究中, Gil 等<sup>[5]</sup>在开口谐振环 (SRRs) 的内环之间加载变容二极管, 发现在不同的二极管偏压下, 人工电磁媒质的电磁响应频率 (磁谐振频带) 发生了变化. 随后, Shadrivov 等<sup>[6]</sup>在 SRRs 的外环开口缝处加载变容二极管, 通过对二极管施加不同的电压改变电容器的容值, 实现了谐振频率的明显变化. 这两项工作揭示了可调人工电磁媒质的工作原理, 通过改变人工电磁媒质的等效电容和电感可以实现负磁导率材料谐振频率的调制, 从而实现人工电磁媒质对电磁波传播方式的调控.

在此基础上, Chen 等<sup>[7,8]</sup>在电压调控人工电磁媒质方面做出了创新性的工作. 他们将人工电磁媒质结构单元制作在掺杂半导体上, 利用外场调控半导体的载流子浓度, 影响 LC 等效回路电容, 调节 SRRs 电磁谐振, 控制 THz 波传输. 基于 Chen 等的 THz 波调制原理, Chan 等<sup>[9]</sup>制备出包括  $4 \times 4$  单元阵列的 THz 人工电磁媒质, 每一个单元包括一个制备在半导体基底上的电谐振器阵列, 并由独立的偏

\* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61131005)、国家自然科学基金 (批准号: 61201007) 和中央高等院校基本科研业务费 (批准号: ZYGX2011J022, ZYGX2010J034) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: zqphys@gmail.com

压进行控制,对透射 THz 波振幅的调制幅度达到 40%.最近,Jeong 等<sup>[10,11]</sup>利用 VO<sub>2</sub> 的电致相变也实现了电压调控的 THz 人工电磁媒质.除此之外,利用液晶的电致相变也是实现电压调控 THz 人工电磁媒质的一种方法<sup>[12,13]</sup>.

利用电压方式实现人工电磁媒质对电磁波传播方式的调控使得 THz 的应用有了一定的基础.然而,在早期的研究中,在人工电磁媒质结构单元加载电容的电压加载方式成为瓶颈.例如在 Hand 和 Cummer<sup>[14]</sup>的研究中,在每个人工电磁媒质结构单元开口处加电容器,但是对每个电容器加载电压时,引线的布局又会对人工电磁媒质的电磁响应造成影响,所以为了尽量减小引线造成的影响,他们的试验样品尺寸达到了 160 mm × 55 mm × 27 mm,限制了这种加载方式的应用.尤其在 THz 领域,更短的波长要求人工电磁媒质结构单元尺寸进一步减小,对电压加载方式和控制方式提出更高的要求.

本文通过数值仿真研究了金属网格谐振单元人工电磁媒质的谐振行为,发现这种金属网格谐振单元在垂直 THz 波激励下表现出窄带磁谐振.当以铁电钛酸锶钡 (BST) 薄膜作为双层金属网格谐振单元的夹层时,随着 BST 薄膜介电常数的变化,人工电磁媒质结构的磁谐振频率发生移动,谐振强度也发生变化.本文提出的人工电磁媒质调谐方法以上下两层金属网格谐振单元作为电极,不需要在人工电磁媒质结构中另外对每个谐振单元增加引线电极,极大地简化了可调谐人工电磁媒质的制备及应用,拓展了 THz 人工电磁媒质的实际应用.

## 2 数值仿真

图 1 所示为我们设计的金属网格谐振单元结构示意图,金属厚度为 0.2 μm,金属网格谐振单元阵列在 x, y 方向的晶格常数相同,均为 164 μm.

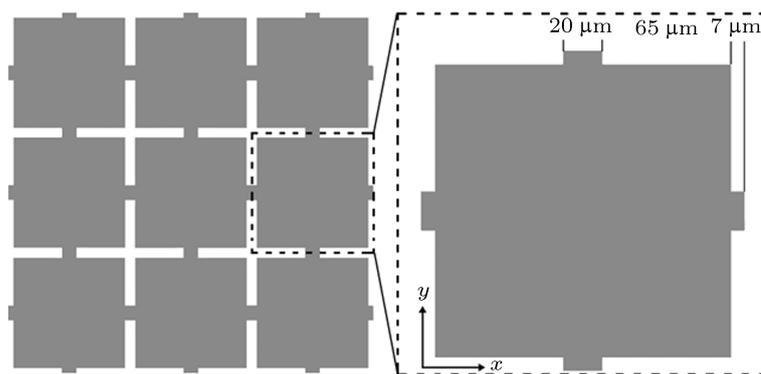


图 1 金属网格谐振单元结构示意图

本文的数值仿真采用基于有限元积分技术的商业软件 CST Microwave Studio.仿真时,将 x 方向设置为理想电边界, y 方向设置为理想磁边界, THz 波沿垂直于 x-y 平面的方向入射,模拟周期性阵列在平面波激励下的电磁响应特性.

## 3 结果及讨论

### 3.1 透射系数曲线及电磁谐振模式

依据上述的结构参数和设置,数值仿真得到的透射系数曲线如图 2 中 a 所示.可以看出,该结构人工电磁媒质对 0.1—1.8 THz 波段电磁波表现出窄带电磁响应.透射参数  $S_{21}$  在 1.03 THz 处达到极大值,表现为 THz 波的高透射,透过率大于 0.9 的

带宽为 0.13 THz.该结构人工电磁媒质在 THz 波的激励下发生磁谐振是形成 THz 波窄带通过的根本原因.图 2 中左上角的插图为该人工电磁媒质单元结构在 1.03 THz 的表面感应电流分布图,可以看出该结构颈部电流方向与金属平板电流方向相反,在反向电流相遇的区域产生电荷积聚.同时,颈部强电流表示颈部有强烈的磁响应.

本文主要研究以 BST 作为加载层时,金属网格人工电磁媒质对 THz 波的响应特性,为了便于比较,我们数值仿真了双层金属网格人工电磁媒质对 THz 波的响应特性,双层金属网格人工电磁媒质的层间距为 0.2 μm.仿真结果如图 2 中曲线 b 所示,可以看出未加载 BST 薄膜层时,人工电磁媒质的电磁响应特性(响应频率和透射率)均未有较大变化,这主要是因为双层金属人工电磁媒质的间距远小

于响应频段电磁波的波长  $300\ \mu\text{m}$ , 双层人工电磁媒质单元产生的电磁耦合不足以对电磁响应特性产生较大影响.

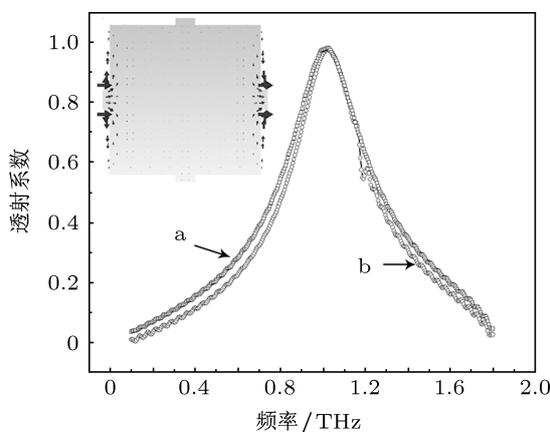


图2 未加载 BST 薄膜层 THz 人工电磁媒质的透射系数曲线  
a 单层; b 双层

### 3.2 金属网格人工电磁媒质 THz 波响应特性的调制

人工电磁媒质谐振频率受内嵌介质介电常数的影响较大, 通过改变内嵌介质的介电常数可以实现人工电磁媒质谐振频率的调制. Zhao 等<sup>[15]</sup> 以此为出发点利用液晶实现了其谐振频率的可调. 在本文研究中, 我们通过在两层金属网格结构人工电磁媒质之间加载一层 BST 薄膜, 利用 BST 薄膜的介电非线性效应实现金属网格结构人工电磁媒质谐振特性的电压可调制性. 其结构如图 3 所示, BST 薄膜层厚度为  $0.2\ \mu\text{m}$ .

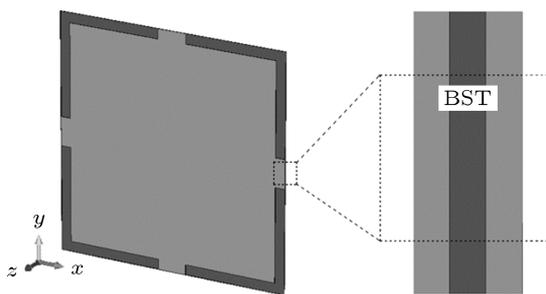


图3 加载 BST 薄膜金属网格人工电磁媒质结构示意图

BST 薄膜的介电非线性是指材料的极化强度随外加电场强度呈非线性变化, 因而介电常数随外加电场变化的特性. 利用 BST 薄膜的这一特性, 可以实现上述人工电磁媒质 THz 波响应特性的电压

调制. 本课题组早期对 BST 薄膜介电非线性效应的研究发现, 薄膜在  $20\ \text{V}$  偏压下介电调谐率达到  $29.4\%$ , 薄膜介电常数变化范围为  $300\text{--}600$ <sup>[16]</sup>. 仿真中设置 BST 薄膜层的介电常数为  $300, 400, 500, 600$ . 图 4 为数值仿真得到夹层不同介电常数人工电磁媒质结构对应的 THz 波透射系数曲线.

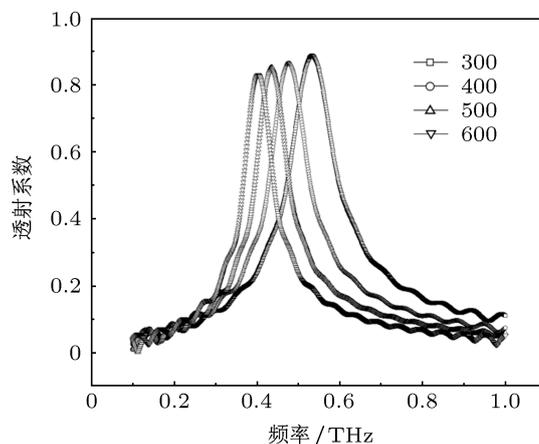


图4 加载 BST 薄膜层 THz 人工电磁媒质的透射系数曲线

可以看出, 相比较于未加载 BST 薄膜的双层金属网格, 加载后的人工电磁媒质谐振峰出现了较大的低频移动. 且人工电磁媒质谐振峰随着夹层 BST 介电常数的增大, 呈现红移. 随着 BST 薄膜介电常数从  $300$  变化到  $600$ , 谐振峰从  $0.53\ \text{THz}$  移动到  $0.41\ \text{THz}$ , 调谐率为  $22.6\%$ . THz 波透射率从  $0.9$  变化到  $0.83$ , 呈现小幅度变化. 数值仿真结果表明, 通过改变双层金属网格内嵌 BST 薄膜介电常数可以有效调节这种结构人工电磁媒质的电磁响应频率. 相比较以前的调节方式, 这种方法只需要以上下两层人工电磁媒质金属图形本身作为电极对内嵌夹层 BST 薄膜施加电压, 就能调节人工电磁媒质的 THz 波响应特性, 有效地简化了人工电磁媒质谐振特性调制的实现.

人工电磁媒质对电磁波的谐振特性一般都伴随着相应的相位突变. 图 5 给出了内嵌 BST 夹层不同介电常数对应的透射曲线的相位曲线. 从图 5 可以看出, 不同 BST 介电常数对应的相变频率不同, 且随着介电常数的增大, 相变频率呈现红移. 相位曲线与透射系数曲线的谐振频率能很好地相符. 因此, 这种结构的人工电磁媒质也可以有效地调节透射 THz 波的相位变化频率, 有望用来实现 THz 波相位调制器.

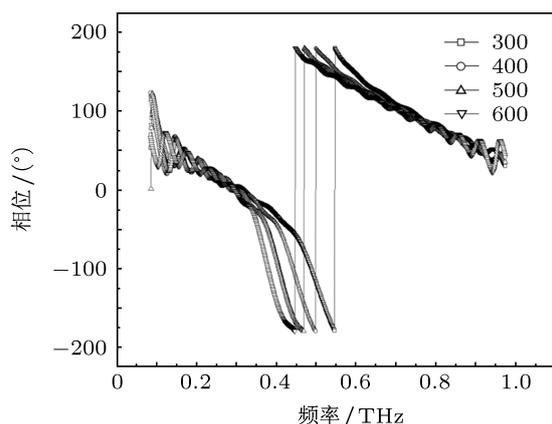


图5 加载BST薄膜层THz人工电磁媒质的透射系数相位曲线

的金属网格谐振单元人工电磁媒质的谐振行为,在垂直电磁波的激励下,这种结构人工电磁媒质的电磁响应频率随着内嵌夹层BST薄膜介电常数的变化呈现红移.且随着夹层BST介电常数从300变化到600,人工电磁媒质的响应频率从0.53 THz移动到0.41 THz,调谐率为22.6%.电磁波透射率从0.9变化到0.83.本文提出的人工电磁媒质调谐方法只需要以结构单元的上下两层金属图形本身作为电极对内嵌夹层BST薄膜施加电压,不需要额外对每个结构单元增加引线施加电压,极大地简化了可调谐人工电磁媒质的制备及应用,在THz人工电磁媒质调制器等方面具有潜在的应用.

## 4 总结

本文通过数值仿真研究了内嵌BST薄膜夹层

感谢空军工程大学理学院屈绍波教授和王甲富老师.

- [1] Ferguson B, Zhang X C 2002 *Nat. Mater.* **1** 26
- [2] Siegel P H 2004 *IEEE Trans. Microwave Theor. Tech.* **52** 2438
- [3] Tonouchi M 2007 *Nat. Photonics* **1** 97
- [4] Malik H K, Malik A K 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 251101
- [5] Gil J, Garcia-Garcia J, Bonache J 2004 *Electron. Lett.* **40** 1347
- [6] Ilya V S, Steven K M, Yuri S K 2006 *Opt. Express* **14** 9344
- [7] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O 2006 *Nature* **444** 597
- [8] Chen H T, Padilla W J, Cich M J 2009 *Nat. Photonics* **3** 148
- [9] Chan W L, Chen H T, Taylor A J 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 213511
- [10] Seo M, Kyoung J, Park H 2010 *Nano Lett.* **10** 2064
- [11] Jeong Y G, Bernien H, Kyoung J S 2011 *Opt. Express* **19** 21211
- [12] Bossard J A, Liang X T, Li L 2008 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **56** 1308
- [13] Zhang F L, Zhang W H, Zhao Q 2011 *Opt. Express* **19** 1563
- [14] Hand T H, Cummer S A 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 066105
- [15] Zhao H J, Zhou J, Zhao Q 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 131107
- [16] Chen H W, Yang C R, Fu C L, Zhao L, Gao Z Q 2005 *Journal of Vacuum Science and Technology* **25** 96 (in Chinese) [陈宏伟, 杨传仁, 符春林, 赵莉, 高志强 2005 真空科学与技术学报 **25** 96]

# Tunability THz metamaterials base on the dielectric nonlinear of barium strontium titanate\*

Zhao Qiang<sup>†</sup> Wen Qi-Ye Dai Yu-Han Zhang Ji-Hua Chen Hong-Wei  
Yang Chuan-Ren Zhang Wan-Li

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 3 July 2012; revised manuscript received 21 August 2012)

## Abstract

We present the tunable resonance behavior of laminated metal mesh metamaterial embedded by barium strontium titanate (BST) thin film. The electromagnetic frequency response shows a redshift when the dielectric constant of BST thin film increases, and the tunability is about 22.6%. For the tunable metamaterial proposed in this paper, the structural unit of metal graphics is used as electrodes to apply the electric potential, which simplifies the preparation and application of tunable THz metamaterials greatly. It has potential application in the THz media modulators.

**Keywords:** metamaterial, barium strontium titanate thin film, dielectric nonlinear, tunability

**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Bs

**DOI:** 10.7498/aps.62.044104

---

\* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61131005), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61201007), and the Fundamental Research Fund for the Central Universities of China (Grant Nos. ZYGX2011J022, ZYGX2010J034).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: zqphys@gmail.com