

文章编号: 1000-5862(2014)01-0078-05

基于 VO_2 相变可调制的复合结构异向介质的研究

余 萍,熊狂炜

(华东交通大学基础学院物理系 江西 南昌 330013)

摘要: 设计了一种新颖的太赫兹频段的复合结构异向介质,并用仿真软件对其进行模拟研究.当十字叉结构有效长度发生改变时,复合异向介质的谐振频率也发生改变.这种改变是由于连在十字叉 4 个顶点的二氧化钒(VO_2)薄膜桥的金属-绝缘相变导致的结果.模拟结果表明:该复合结构产生的双带谐振,而且这种结构的复合异向介质具有可调制性、频率灵敏性、容易制作和无偏振等特点.

关键词: 复合异向介质; 二氧化钒; 太赫兹调制

中图分类号: TB 34 **文献标志码:** A

0 引言

异向介质最早是由苏联科学家 V. G. Veselag 于 1968 年提出^[1],当电磁波在这种介质中传播时会表现出与传统媒质不同的“异向”效应与“奇异”特性^[2-7],能适合不同波段的需要,从而引起研究者的较大兴趣.近年来,世界各地的科研小组分别研制出在太赫兹频段上呈现的负磁导率现象的异向介质材料.该异向介质在解决太赫兹(THz)技术难题方面有着巨大的应用潜力,可以作为 THz 的调制器、吸收器、滤波器等.

异向介质是一种新型的人工合成材料,由能发生电磁谐振的金属结构单元组成,其结构单元的形状和尺寸一旦固定,谐振频率很难进行改变.因此在这种尺寸固定的情况下想要调制其谐振频率,可以在掺杂的半导体基底上或者将半导体的载流子引入电磁结构中,结合电或光激励改变电磁谐振的电容或电感来实现.如 Chen Houtong 等^[8]在超材料太赫兹调制方向做出了创新性的贡献,近年来有较多关于太赫兹波段异向介质谐振主动调制的研究^[9-13].

在这些主动调制中,二氧化钒(VO_2)材料有着极大的优势.研究者发现 VO_2 薄膜具有皮秒量级的绝缘-金属相变特性,如果利用光激发方式,相变速度甚可达飞秒量级^[14].而时域太赫兹光谱也表明 VO_2 相变时透过率有较大的改变,说明 VO_2 在太赫

兹调制和开关方面有较强的应用价值. VO_2 相变不仅可以用光和电激励,热方式也可以.体材料的 VO_2 在 68 °C 左右,能发生从绝缘相到金属相的转变,而且这种转变是可逆的.研究者们通过 VO_2 薄膜与异向介质的组合,已经成功研制出了太赫兹开关和调制器^[15-21].

本文设计了一个新颖的复合结构的异向介质:闭合的方形环中镶嵌 1 个十字叉结构.因此这种结构有 2 种调制频率,低频处的谐振是有方形闭合环产生的,而高频处的谐振由经典的十字叉结构带来. VO_2 薄膜桥位于十字叉 4 个顶点处,当发生相变时,十字叉结构的有效长度发生改变,因此导致谐振频率发生改变,从而达到一种主动调制的效果.

1 设计和模拟

图 1(a) 为设计的单元结构示意图,其中灰色部分代表金属,方形闭合环和十字叉结构厚度都设为 200 nm;深灰色部分为 VO_2 薄膜,在十字叉 4 个顶点处,厚度也设为 200 nm;图 1(b) 为模拟结构透视图,白色部分是金属,灰黑色部分为背景衬底,该衬底在太赫兹波段几乎透明,能量损耗可以忽略,这里设定背景材料为蓝宝石,其厚度设为 380 μm .复合介质结构参数为:单元周期 $P = 64 \mu\text{m}$,方形闭合环的边长 $a = 48 \mu\text{m}$,十字叉的长度 $l = 36 \mu\text{m}$,宽为 $w = 3 \mu\text{m}$, VO_2 薄膜桥的边长 $b = 3 \mu\text{m}$.

收稿日期: 2013-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(11047115)和 华东交通大学校立科研基金(12JC02)资助项目.

作者简介: 余 萍(1978-),女,江西临川人,讲师,主要从事光电子材料和器件的研究.

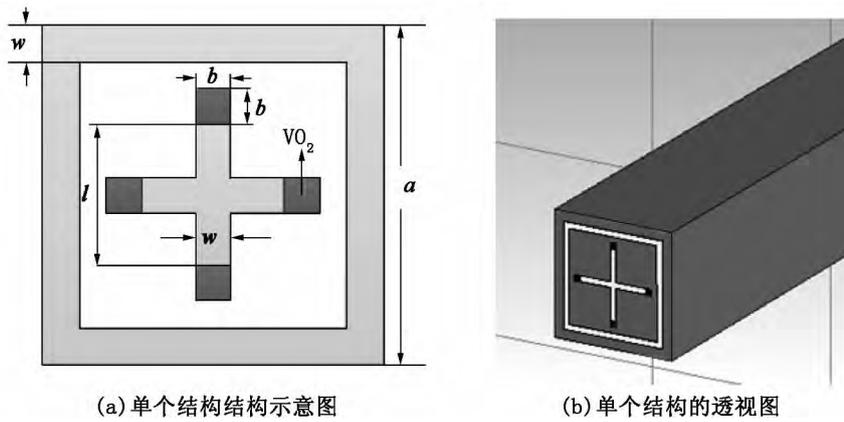


图 1 异向介质结构示意图

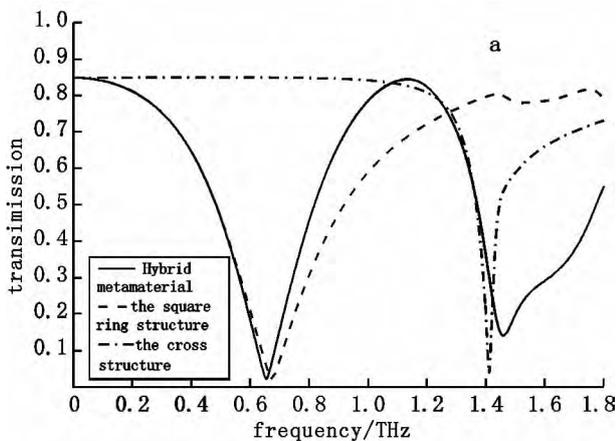
在整个模拟过程中,VO₂薄膜是一种绝缘导电相共存介质,复介电常数一般用 Burgman-Drude 模型^[19]来描述.因而,当 VO₂呈绝缘相时,设置其介电常数 $\epsilon = 9.0$;而当 VO₂为金属相时,设置散色为 Drude 模型;中间相通过改变它的电导率来说明.用常用的商业软件 CST microwave studio 2011 模拟复合异向介质在共振频率处的 S 参数 S_{21} 以及对应的电场和表面电流的一些特性.

2 结果和讨论

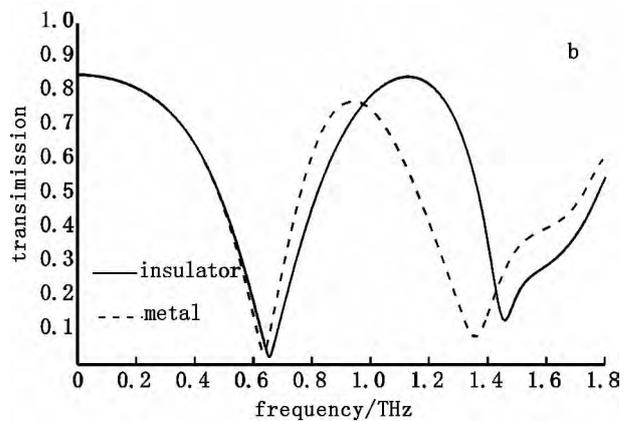
仿真时,用 y 轴极化入射电磁波,选择合适的边界条件,得到图 2 所示的透射谱和频率之间不同情况下的曲线:图 2(a) 没有 VO₂ 薄膜桥;图 2(b) 有 VO₂ 薄膜桥.图 2(a) 中还仿真了单个方形环结构和单个十字叉结构的透射谱,从图 2 可以看到复合结构的异向介质有 2 个谐振频率,分别为 0.656 THz

和 1.456 THz. 相对单个方形环共振频率为 0.674 THz 和单个十字叉谐振频率为 1.414 THz,低频的向左移动而高频的向右移动.这可能是当电磁波入射到复合的 2 个结构时,2 个结构之间的电磁场相互作用而导致的.

图 2(b) 是有 VO₂ 薄膜桥的透射曲线,可以发现当 VO₂ 呈绝缘相时,谐振频率分别为 0.656 THz 和 1.458 THz,相对没有 VO₂ 薄膜桥的谐振频率 0.656 THz 和 1.456 THz 几乎没什么变化.这是因为 VO₂ 相对入射的 THz 电磁波几乎没什么能量损耗,而且介电常数 $\epsilon = 9.0$ 和背景的衬底材料蓝宝石 $\epsilon = 10.5$ 也比较接近产生的结果.但是当 VO₂ 为金属相时,谐振频率分别为 0.636 THz 和 1.356 THz,可以看到很明显的频率漂移,2 个谐振频率分别漂移了 3.05% 和 6.87%,更进一步调制的深度也发生改变,这是因为当 VO₂ 为金属相时,十字叉的有效长度发生改变带来的直接调制效果.



(a) 没有 VO₂ 薄膜桥



(b) 有 VO₂ 薄膜桥

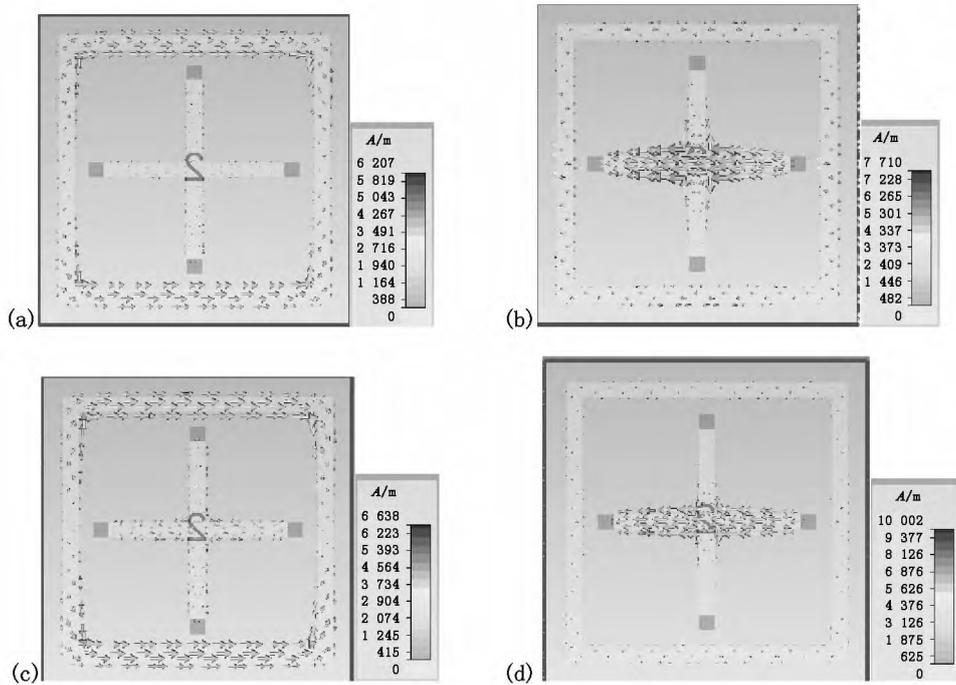
图 2 异向介质透射谱模拟曲线图

图 3 和图 4 中分别给出了谐振频率处表面电流和电场强度的分布图.箭头的方向和大小代表表面

电流的流向和相对强度,旁边的地图是相对局域电流或电场幅度.从图 3 和图 4 可以很明显看到当

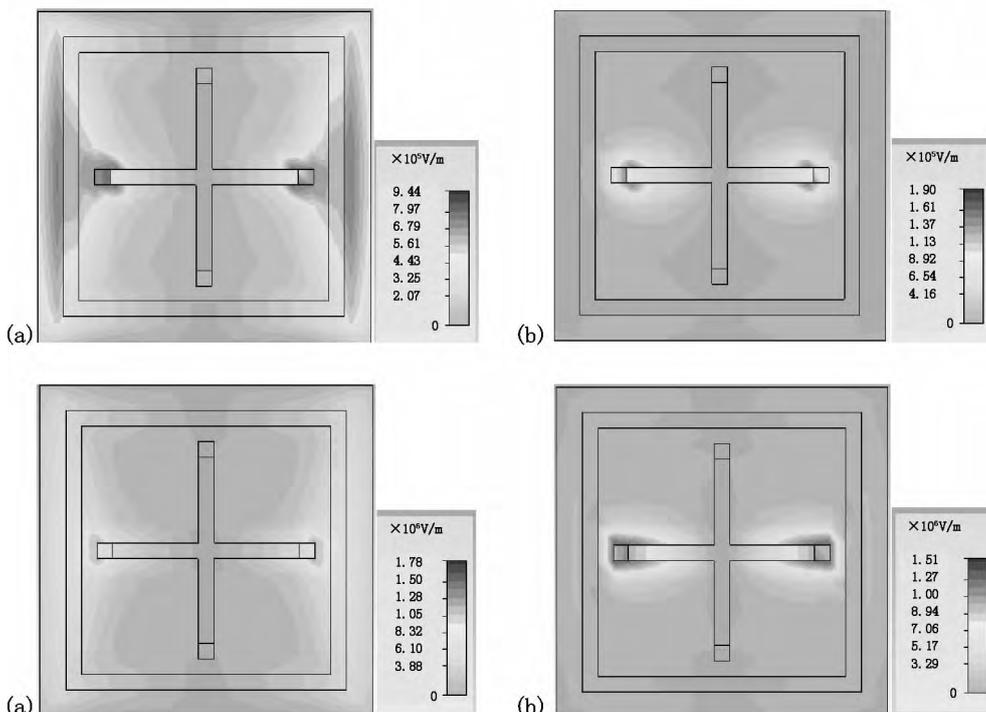
VO₂薄膜桥呈现绝缘相时,入射的 THz 电磁波场激发在极化方向回路的表面电流,导致闭合方环和十字叉结构间隙周围电荷积累,产生谐振.而当 VO₂薄膜桥呈金属相时,十字叉和方形闭合环之间的间隙

变小,表面积累电荷强度发生改变,所以谐振频率产生漂移.另外根据表面电流和电场分布,也很好的证实低频谐振是由闭合的方形环产生,而高频谐振由十字叉结构产生,且都属于偶极子谐振.



(a) ~ (b) VO₂为绝缘相时分别在频率 $f=0.656$ THz 和 $f=1.456$ THz;
(c) ~ (d) VO₂为金属相时分别在频率 $f=0.636$ THz 和 $f=1.356$ THz.

图3 谐振频率处的表面电流分布图



(a) ~ (b) VO₂为绝缘相时分别在频率 $f=0.656$ THz 和 $f=1.456$ THz;
(c) ~ (d) VO₂为金属相时分别在频率 $f=0.636$ THz 和 $f=1.356$ THz.

图4 谐振频率处的电场强度分布图

最后,为了更进一步说明 VO₂薄膜桥调制特性,模拟在不同电导率情况下复合异向介质的透射曲线(见图 5).从图 5 中很容易看到,逐渐改变电导率情况下,谐振频率也逐渐发生改变.这是由闭合方形环和十字叉之间电容耦合改变带来的结果,而电容耦

合的改变又是有十字叉有效结构长度发生改变导致的.因而,通过使用能产生相变的 VO₂,很容易在不改变异向介质尺寸大小的情况下达到一种主动调制的效果.当然要达到更好的调制幅度和深度需要对结构参数进行优化.

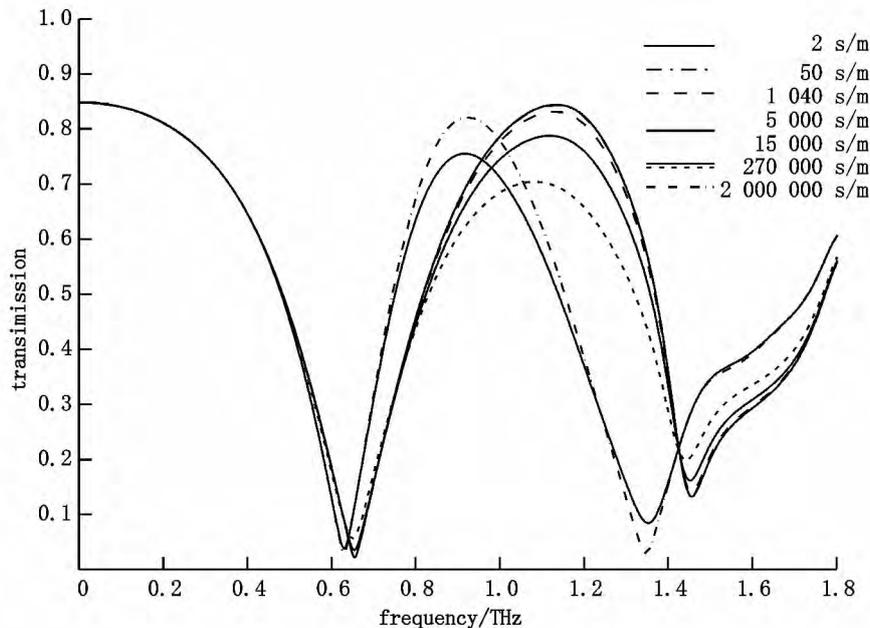


图 5 模拟 VO₂的不同电导率下的透射曲线图

3 结论

本文阐述了一种新颖的复合结构异向介质,利用 VO₂相变特性,通过模拟结果说明达到调制的效果.当 VO₂从绝缘相到金属相变化时,对于低频,频率从 0.656 THz 左移到 0.636 THz;而对于高频频率 1.456 THz 移到 1.356 THz.而且模拟 VO₂的不同电导率下的透射曲线进一步说明复合结构之间耦合电容改变从而导致谐振频率发生改变.这种基于 VO₂相变基础上达到调制效应的新颖复合结构异向介质,对于 THz 波段无偏振的吸收器和滤波器有潜在的应用.

4 参考文献

- [1] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Sov Phys Usp, 1968, 10(4): 509-514.
- [2] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. Phys Rev Lett 2000, 84(18): 4184-4187.
- [3] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. Science, 2001, 292(5514): 77-79.
- [4] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. Phys Rev Lett 2000, 85(18): 3966-3969.
- [5] Fang N, Lee H, Sun Cheng, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens [J]. Science, 2005, 308(5721): 534-537.
- [7] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. Science, 2006, 314(5801): 977-980.
- [8] Chen Houtong, Padilla W J, Zide J M O, et al. Active terahertz metamaterial devices [J]. Nature, 2006, 444(11): 597-600.
- [9] Busch S F, Schumann S, Jansen C, et al. Optically gated tunable terahertz filters [J]. Appl Phys Lett, 2012, 100(26): 261109-26121112.
- [10] Nemeč H, Duvillaret L, Garet F, et al. Thermally tunable filter for terahertz range based on a one-dimensional photonic crystal with a defect [J]. J Appl Phys, 2004, 96(8): 4072-4075.
- [11] Driscoll T, Andreev G O, Basov D N, et al. Tuned permeability in terahertz split-ring resonators for devices and sensor [J]. Appl Phys Lett 2007, 91(6): 62511-62514.
- [12] Chen Houtong, Padilla W J, Cich M J, et al. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator [J]. Nat Photonics 2009, 3(2): 148-151.
- [13] Chen Houtong, O'Hara J F, Azad A K, et al. Experimental

- demonstration of frequency-agile terahertz metamaterials [J]. *Nat Photonics* 2008 2(4): 295-298.
- [14] Cavalleri A ,Toth C S ,Siders C W ,et al. Femtosecond structural dynamics in VO₂ during an ultrafast solid-solid phase transition [J]. *Phys Rev Lett* ,2001 ,87 (23) : 237401-237404.
- [15] Driscoll T ,Palit S ,Qazilbash M M ,et al. Dynamic tuning of an infrared hybrid-metamaterial resonance using vanadium dioxide [J]. *Appl Phys Lett* ,2008 ,93 (2) : 24101-24104.
- [16] Matthew J D ,Koray A ,Imogen M P ,et al. Frequency tunable near-infrared metamaterials based on VO₂ phase transition [J]. *Opt Expr* 2006 ,17(20) : 18330-18339.
- [17] Wen Qiye ,Zhang Huaiwu ,Yang Qinghui ,et al. A tunable hybrid metamaterial absorber based on vanadium oxide films [J]. *J Phys D: Appl Phys* ,2012 ,45 (23) : 235106-235111.
- [18] Wen Qiye ,Zhang Huaiwu ,Yang Qinghui ,et al. Terahertz metamaterials with VO₂ cut-wires for thermal tunability [J]. *Appl Phys Lett* 2010 97(2) : 21111-21113.
- [19] Hood P J ,Denatale J F. Millimeter-wave dielectric properties of epitaxial vanadium dioxide thin films [J]. *J Appl Phys* ,1991 ,70(1) : 376-381.
- [20] 郭荣新 ,袁继昌. 多蜂窝 MISO 通信系统中干扰消除策略研究 [J]. *江西师范大学学报:自然科学版* 2013 ,37 (1) : 37-41.
- [21] 杨鼎成. 单天线双层毫微微网络的下行中断性能研究 [J]. *江西师范大学学报:自然科学版* ,2013 ,37(6) : 557-560.

The Tunable Hybrid Meta-Material Based on Vanadium Oxide Phase Transition

YU Ping ,XIONG Kuang-wei

(School of Basic Sciences ,East China Jiaotong University ,Nanchang Jiangxi 330013 ,China)

Abstract: A tunable hybrid metamaterial in THz band has been designed and simulated. The resonance frequencies shift of this hybrid structure is obtained by actively varying the effective length of electrically resonant cross. This was realized by using Vanadium dioxide (VO₂) film bridges that can be triggered the insulator-metal phase transition at the four tops of the cross structure. Simulation results present that dual band resonances come from the individual structure. So this hybrid metamaterial based on VO₂ phase transition shows some advantages such as tunability ,frequency agility ,easily fabrication and polarization independency in THz band.

Key words: compound unusual transmitter; dioxide vanadium; the band tunable

(责任编辑: 冉小晓)

(上接第 50 页)

Numerical Solution of Fractional Fredholm Integral Equation of the Second Kind Based on the Rationalized Haar Wavelet

ZHANG Qian ,HAN Hui-li* ,ZHANG Pan-pan

(School of Mathematics and Computer Science ,Ningxia University ,Yinchuan Ningxia 750021 ,China)

Abstract: The rationalized Haar functions are used to solve the solution of fractional order Fredholm integral equation of the second kind. The integral equation can be reduced to a system of algebraic equations by using rationalized Haar wavelet and collection method. Finally ,the numerical solution of fractional integral equation with exact solution and the numerical solutions using Haar wavelet are compared by error analysis and numerical examples. The result shows that the algorithm has high accuracy.

Key words: rationalized Haar wavelet; fractional order; Fredholm integral equation of the second kind; collocation method

(责任编辑: 曾剑锋)