

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.08.011

电控可调谐双波段超材料吸波体分析

王连胜^{1a}, 夏冬艳^{1b}, 吕振肃^{1a}, 付全红²

(1. 三亚学院 a. 理工学院; b. 财经学院, 海南 三亚 572022;

2. 西北工业大学 长安校区理学院, 西安 710072)

摘要:为实现超材料吸波体吸收频率的智能调控,采用理论分析与模拟仿真相结合的方法,首先设计了一种双波段超材料吸波体,然后在双波段超材料吸波体中加入电流变液,通过改变电流变液外加电场的强度实现了双波段超材料吸波体吸收频率的智能调控。结果表明:双波段超材料吸波体在 7.403 GHz 和 17.511 GHz 处出现了两个吸收峰,吸收率分别为 99.8% 和 70%;随着电流变液外加电场强度的增加,吸波体的吸收频率逐渐往低频发生移动,吸收频率调节率高达 55%,由此提出了一种智能调控的双波段超材料吸波体。

关键词:超材料吸波体;双波段;电流变液;调谐

中图分类号: TB34

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)08-076-07

Analysis on electrically controlled tunable dual-band metamaterials absorber

WANG Liansheng^{1a}, XIA Dongyan^{1b}, LÜ Zhensu^{1a}, FU Quanhong²

(1a. Science and Engineering Department; 1b. Finance and Economics Department,

Sanya College, Sanya, Hainan 572022, China;

2. Applied Physics Department, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to realize the absorption frequency controlling of metamaterials absorber intelligently, a dual-band metamaterials absorber is designed in this paper firstly, and then the electrorheological fluid is loaded in the dual-band metamaterials absorber, and the absorption frequency of dual-band metamaterials absorber is tunable by changing the electric field strength applied on electrorheological fluid. The results show that the designed metamaterials absorber has two absorption peaks at 7.403 GHz and 17.511 GHz, and the absorption rate is 99.8% and 70% respectively. With the increase of electric field strength, the absorption frequency gradually moves towards lower frequency, and the absorption frequency regulation rate is up to 55%. Therefore, we propose the concept of dual-band intelligent metamaterials absorber.

Key words: metamaterials absorber; dual-band; electrorheological fluids; tunable

完美吸波体广泛应用于微型测辐射热仪、光探测器、频谱成像以及实现隐身斗篷等领域^[1-3]。近年来利用超材料实现对电磁波的高吸收受到广泛关注^[4]。2008年, Landy等^[5]首先提出了基于电磁超材料的完美吸波体概念,利用开口环、短截线和分隔层构成的电磁谐振器对入射电磁波的电磁分量产生耦合,使入射到超材料表面的特定频率电磁波既不产生反射,也不产生透射,实现完美吸收。Diem等^[6]从理论和实验上展示了宽角度太赫兹波段吸波体。Liu等^[7]利用空间分布吸收能力不同的单元结构实现了红外波

收稿日期: 2014-03-25

基金项目: 海南省自然科学基金资助项目(610234)

作者简介: 王连胜(1982-), 男, 三亚学院理工学院讲师, 主要从事超材料方面的研究, (E-mail) wslwsls1982@126.com。

段的吸收成像,首次展示了超材料用于高光谱成像的巨大潜力。Hao 等^[8]设计了光波段的吸波体,实验实现了 88% 的吸收。但是上述电磁超材料吸波体的吸收频率固定,难以适应实际复杂的电磁环境,因而限制了其实际应用。与这些传统的电磁超材料吸波体不同,智能超材料吸波体^[9-10]则可以通过改变其结构单元的电容或电感值,从而使其拥有主动可调变的电磁波吸波性能。因此研究实时动态调节超材料吸波体的吸收频率具有重要意义。

电流变液(electrorheological fluids,ERF)通常是由高介电常数的固体颗粒分散在低介电常数的绝缘油中组成的悬浮液体。未加外电场时,固体颗粒均匀地分散在液体中,ERF 呈液态,通常为牛顿流体;施加外电场后,颗粒迅速在电极间聚集形成与电场方向相平行的链状或柱状结构,流体就会变成类固体,并且其介电性质也会发生明显的变化^[11-12]。Padilla 等^[13]指出,超材料吸波体结构单元附近的等效介电常数对超材料吸波体的吸收频率有重要影响。随着超材料吸波体结构单元附近等效介电常数的增加,超材料吸波体的吸收频率将会往低频发生移动。本研究首先设计了双波段电磁超材料吸波体,进而研究了加入电流变液的电磁超材料吸波体对电磁波的吸收性能,结果表明:通过对电流变液施加不同强度的电场,电磁超材料吸波体的吸收频率可以在一定范围内调节,实现了智能调控的电磁超材料吸波体。

1 设计原理

电流变液通常是由高介电常数的固体颗粒分散在低介电常数的绝缘油中组成的悬浮液体。假定电流变液中有 N 个边长为 a 的正方体固体颗粒,绝缘油被分解成边长为 a_f 的 N 个正立方体,在外加电场作用下,电流变液的介电常数^[14]为

$$\epsilon = \epsilon_f \frac{\epsilon_p + [\varphi - (1-x)](\epsilon_p - \epsilon_f)}{x\epsilon_p + (1-x)\epsilon_f}, \quad (1)$$

$$x = y/(na). \quad (2)$$

其中: ϵ_f 和 ϵ_p 分别为绝缘油和固体颗粒的介电常数; φ 为电流变液中固体颗粒与绝缘油的体积百分比; y 为电流变液在外加电场作用下形成的单一链中绝缘油的高度; n 为单一链中绝缘颗粒的个数。从式(1)和式(2)可以看出,在外加电场作用下,随着电场强度的增加,电流变液中绝缘颗粒在电极间聚集形成的链状或柱状结构更加明显, x 将逐渐减小,电流变液介电常数 ϵ 将增大^[14]。

基于电谐振环(electric resonant ring,ERR)的电磁超材料吸波体在垂直入射的电磁波作用下,电场分量与金属 ERR 单元产生电偶极子响应,电偶极子的谐振频率 $\omega \propto c/(2L_i \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}})$,其中, c 为真空中的光速; L_i 为对应 ERR 闭合环的边长; ϵ_{eff} 为闭合环附近的等效介电常数。入射电磁波的磁场分量穿越 ERR 单元,在 ERR 单元与金属底板之间产生水平方向的磁谐振,相应地在 ERR 的金属底板上激发反向电流,当电响应激发的等效介电常数 $\epsilon(\omega)$ 和磁响应激发的等效磁导率 $\mu(\omega)$ 接近时,则实现了与自由空间的阻抗匹配,从而实现了入射电磁波的完美吸收。吸收频率与 ERR 单元环边长及 ERR 单元附近介电常数的平方根成反比^[15]。

在电磁超材料吸波体中 ERR 单元保持其几何尺寸不变的情况下,通过在 ERR 单元附近添加电流变液,改变电流变液外加电场的强度可以改变电流变液的介电常数,从而调节电磁超材料吸波体的吸收频率。因此,通过改变电流变液外加电场的强度来调节电磁超材料吸波体的吸收频率是可行的。

2 模型设计

图 1 为本研究设计的双波段电磁超材料吸波体模型示意图。吸波体由 5 层构成,沿 z 轴方向第一层为 FR4 介质(相对介电常数 $\epsilon_r = 4.9$,电损耗角正切 $\tan\delta = 0.02$),厚度为 0.5 mm;第二层为 ERR 单元,如图 2 所示,其中: $a = 4$ mm, $b = 2$ mm, $c = 0.5$ mm, $d = 0.4$ mm, $e = 9.5$ mm,厚度为 0.02 mm,ERR 单元由金属铜(电导率为 5.88×10^7 s/m)组成;第三层为电流变液,厚度为 0.5 mm;第四层为金属铜板,厚度为



图 1 双波段电磁超材料吸波体模型示意图

0.02 mm;第五层为 FR4 介质,厚度为 0.5 mm。ERR 单元与金属铜板作为电流变液外加电场的两极,研究过程中电流变液由介质代替,通过改变介质的介电常数模拟电流变液在外加电场作用下其介电常数的变化,示意图如图 3 所示。采用仿真软件 CST Microwave Studio 对双波段电磁超材料吸波体的吸波性能及不同电场作用下电流变液对双波段电磁超材料吸波体吸收频率的影响进行研究。研究过程中,电磁波沿 z 方向垂直入射, y 方向设置为完美电壁, x 方向设置为完美磁壁。

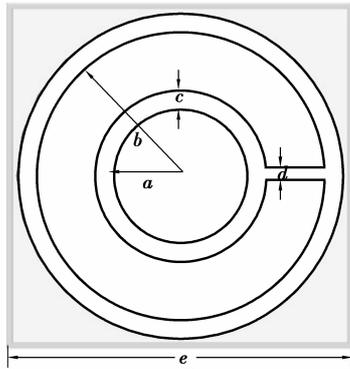


图 2 ERR 单元示意图

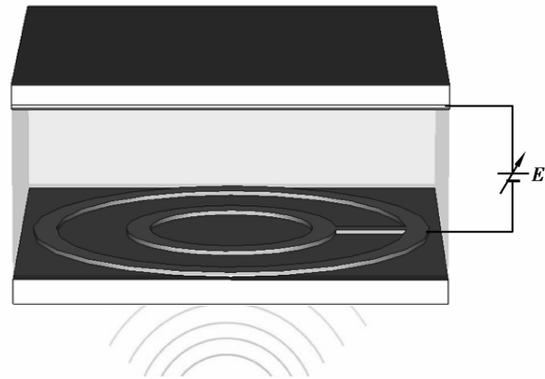


图 3 仿真模型示意图

3 结果与讨论

3.1 未加电流变液情况下吸波体的电磁波吸收特性

对未加电流变液情况下图 1 所示吸波体的吸收率进行分析,由于采用金属底板,简化了设计,透射率 $T(\omega)=0$,则吸收率 $A(\omega)=1-T(\omega)-R(\omega)=1-R(\omega)$,其中 $R(\omega)$ 为反射率,结果如图 4 所示。

由图 4 可见吸波体在 7.403 GHz 和 17.511 GHz 处出现了两个吸收峰,吸收率分别为 99.8% 和 70%,其中吸收峰 2 的吸收率较小。为了分析上述吸收峰出现的原因,对吸波体在 7.403 GHz 和 17.511 GHz 处的表面电流分布进行监控,结果如图 5 所示,图 5(a) 和 (b) 对应吸收峰 1, (c) 和 (d) 对应吸收峰 2。从图中可以看出,表面电流主要分布在 ERR 单元金属壁的左右两侧,表面电流分布表明入射电磁波的电场分量作用于金属壁,产生了电偶极子响应,在外电场的驱动下,电荷沿垂直方向谐振,电偶极子的谐振频率 $\omega \propto c/2L \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ [15],其中, c 为真空中的光速, L 为对应闭合环金属壁的边长, ϵ_{eff} 为对应金属环附近的等效介电常数。入射电磁波的磁场分量穿越 ERR 单元,在金属铜板激发反向电流。当电响应激发的等效介电常数 $\epsilon(\omega)$ 和磁响应激发的等效磁导率 $\mu(\omega)$ 接近时,则可实现与自由空间的阻抗匹配,从而实现入射电磁波的完美吸收 [13]。上述电偶极子谐振频率 $\omega \propto c/2L \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$,表明电偶极子的谐振频率与金属环的边长成反比,因此吸收峰 1 对应于外环,吸收峰 2 对应于内环。由图 5(a) 和 (c) 可见,内环的电偶极子谐振强度与外环相比较小,因此吸收峰 2 的吸收率比吸收峰 1 的吸收率小;另外,电偶极子的谐振频率与金属环附近介质的等效介电常数成反比,改变其大小将可以实现超材料吸波体吸收频率的智能调控。

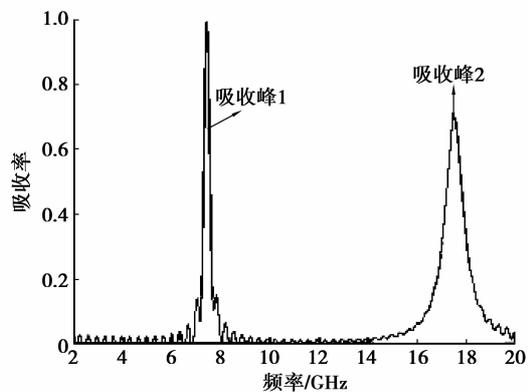


图 4 吸收率曲线

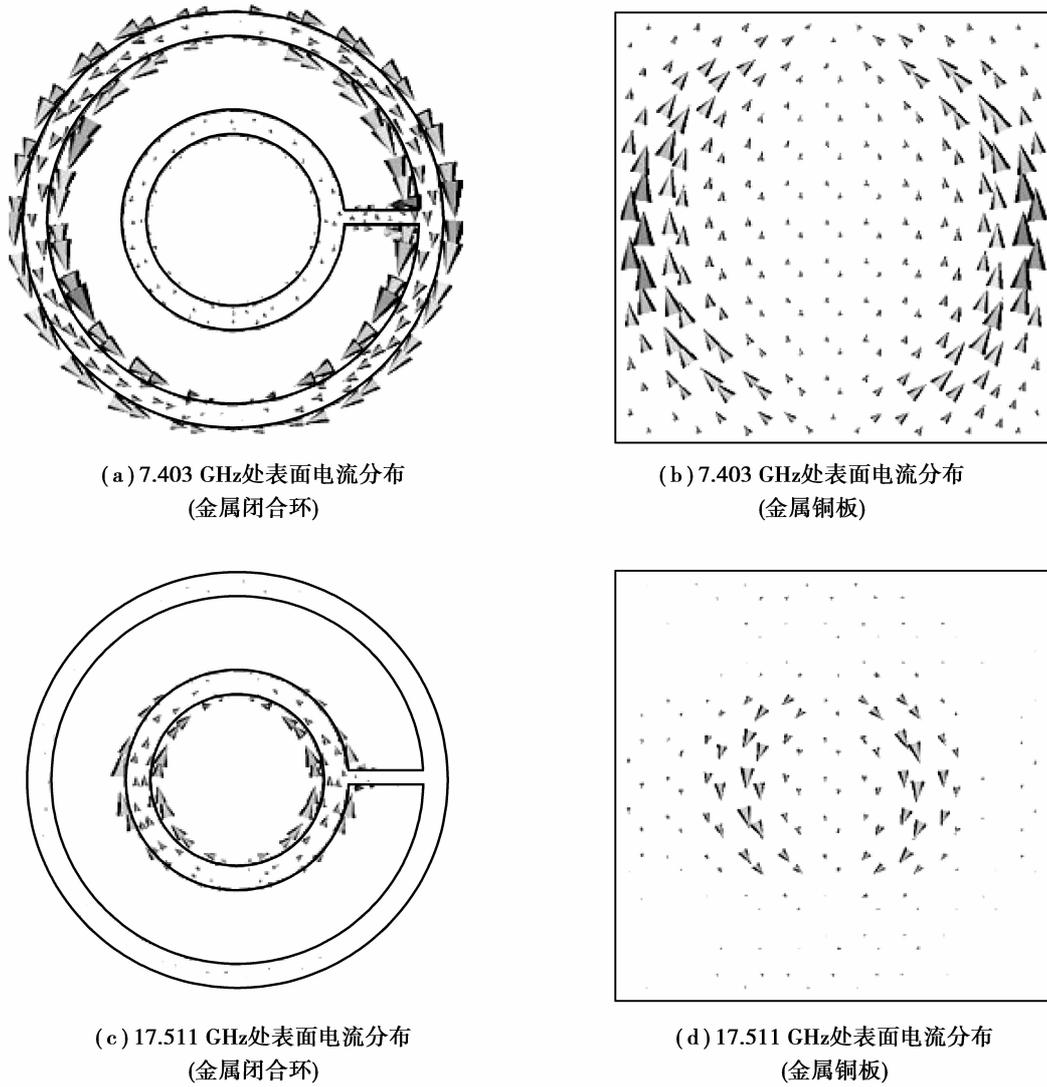


图 5 表面电流分布

3.2 不同强度外加电场作用下的电流变液对超材料吸波体吸收特性的影响

根据温维佳等人对体积比为 0.2 和 0.05 的 KNbO_3 -硅油和 SrTiO_3 -硅油电流变液的介电常数随外加电场强度变化规律的研究结果^[14](如图 6 和图 7 所示),选择体积比为 0.2 的 KNbO_3 -硅油和 SrTiO_3 -硅油电流变液对图 3 所示吸波体的吸收率进行研究。

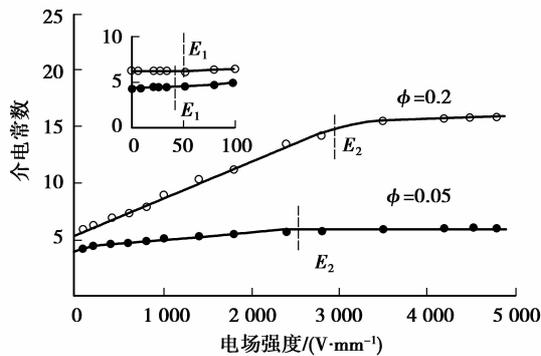


图 6 KNbO_3 -硅油电流变液的介电常数随外加电场强度的变化关系

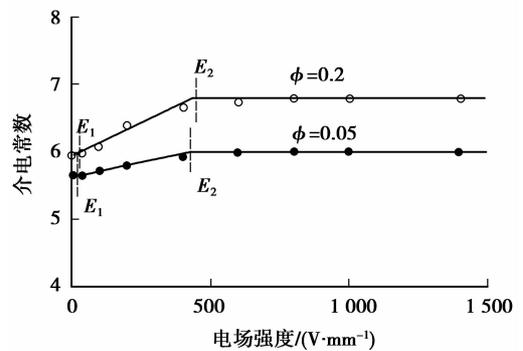


图 7 SrTiO_3 -硅油电流变液的介电常数随外加电场强度的变化关系

当电流变液为体积比为 0.2 的 KNbO_3 -硅油时,不同电流变液外加电场强度下吸波体的吸收率如图 8 所示;吸波体的吸收频率随电流变液外加电场强度变化关系如图 9 所示。由图 9 可见吸波体的吸收频率随着电流变液外加电场强度的增加逐渐低频发生移动,调节率高达 55%。分析原因主要是:入射电磁波的电场分量与金属壁产生了电偶极子响应,电偶极子的谐振频率 $\omega \propto c/2L\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ 。随着电流变液外加电场强度的增加, ϵ_{eff} 逐步增大,故吸波体的吸收频率逐步往低频发生移动。

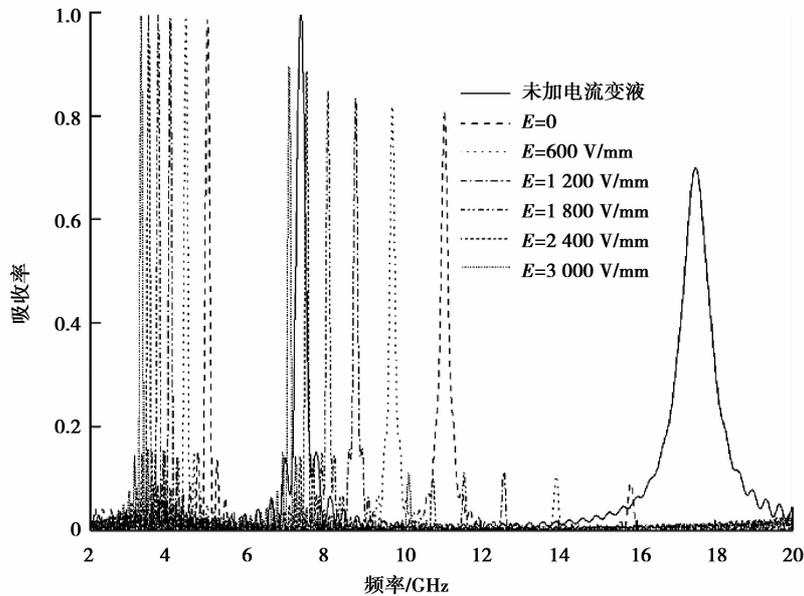


图 8 置于体积比为 0.2 的 KNbO_3 -硅油电流变液中的吸波体在不同电场强度下的吸收率曲线

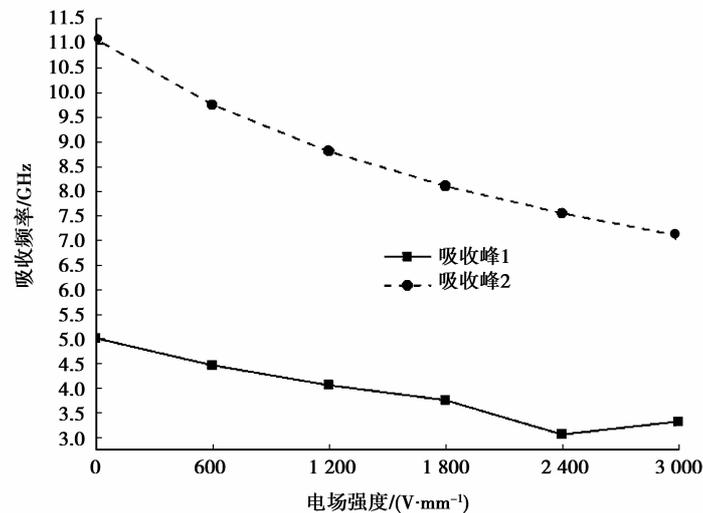


图 9 吸收频率随外加电场强度的变化关系

当电流变液为体积比为 0.2 的 SrTiO_3 -硅油时,不同电流变液外加电场强度下吸波体的吸收率如图 10 所示;吸波体的吸收频率随电流变液外加电场强度变化关系如图 11 所示。由图 11 可见随着电流变液外加电场强度的增加,吸波体的吸收频率也是逐步往低频发生移动,调节率为 40%。由图 9 和图 11 可见,不同电流变液对超材料吸波体的吸收频率调节率不同,通过改良电流变液可以实现更高的调节率,实现超材料吸波体吸收频率的大范围调控。

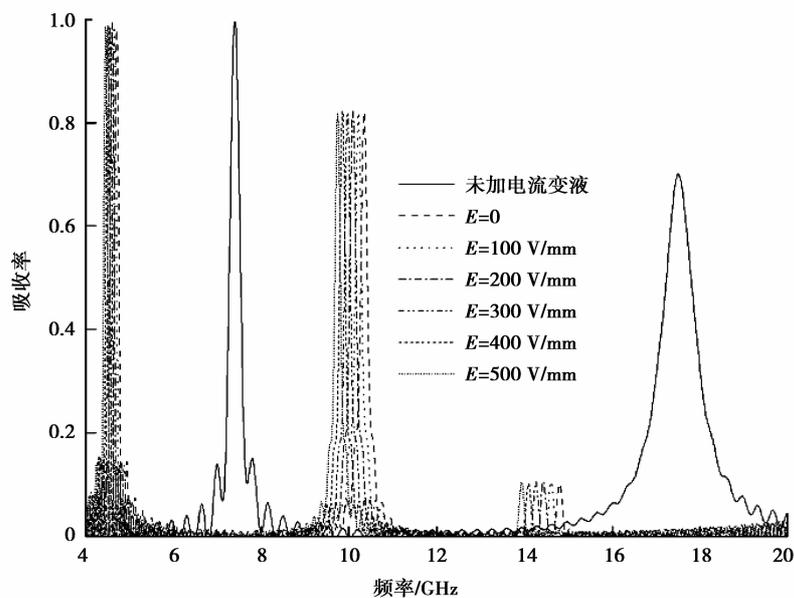


图 10 置于体积比为 0.2 的 SrTiO_3 -硅油电流变液中吸波体在不同电场强度下的吸收率曲线

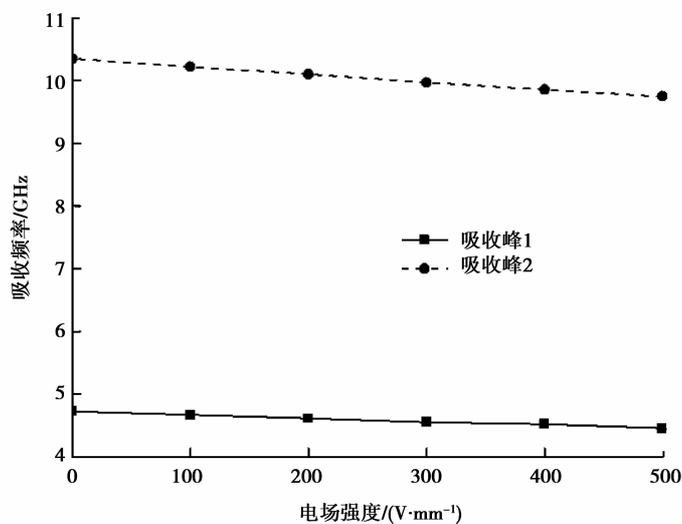


图 11 吸收频率随外加电场强度的变化关系

4 结 论

本研究首先设计了一种双波段电磁超材料吸波体,在 7.403 GHz 和 17.511 GHz 处出现了两个吸收峰,吸收率分别为 99.8% 和 70%。在双波段超材料吸波体中加载电流变液,通过改变电流变液的外加电场强度使得吸收频率发生移动,结果表明:随着外加电场强度的增加,超材料吸波体的吸收频率逐渐往低频发生移动,调节率高达 55%,从而提出了一种智能调控的双波段超材料吸波体。通过改良电流变液的性能可以实现更高的调节率。

参考文献:

- [1] Diem M, Koschny T, Soukoutlis C M. Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime [J]. *Physical Review B*, 2009(79):33101.
- [2] Liu N, Mesch M, Weiss T, Hentschel M, et al. Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor [J]. *Nano Letters*, 2010(10):2342-2348.
- [3] Liu X L, Starr T, Starr A F, et al. Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104:207403.
- [4] Hao J M, Yuan Y, Ran L X, et al. Manipulating electromagnetic wave polarizations by anisotropic metamaterials [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(6):063908.
- [5] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100:207402.
- [6] Diem M, Koschny T, Soukoulis C M. Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime [J]. *Physical Review B*, 2009(79):33101.
- [7] Liu N, Mesch M, Weiss T, et al. Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor [J]. *Nano Letters*, 2010, 10:2342-2348.
- [8] Hao J M, Wang J, Liu X L, et al. High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96:251104.
- [9] Gu Chao, Qu Shaobo, Pei Zhibin, et al. Design of a wide-band and quasi-omnidirectional tabulate metamaterial absorber in the terahertz regime [J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2011, 30(4):350-353.
- [10] Liu Z Q, Chang S J, Wang X L, et al. Thermally controlled terahertz metamaterial modulator based on phase transition of VO₂ thin film [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(13):130702.
- [11] Yin J B, Xia X, Xiang L Q, et al. Temperature effect of electrorheological fluids based on polyaniline derived carbonaceous nanotubes [J]. *Smart Material & Structures*, 2011, 20:015002.
- [12] Yin J B, Zhao X P, Xia X, et al. Electrorheological fluids based on nano-fibrous polyaniline [J]. *Polymer*, 2008(49):4413-4419.
- [13] Padilla W J, Taylor A J, Highstrete C, et al. Dynamical electric and magnetic metamaterial response at terahertz frequencies [J]. *Physical Review Letters*, 2006(96):107401.
- [14] Wen W J, Men S Q, Lu K Q. Structure-induced nonlinear dielectric properties in electrorheological fluids [J]. *Physical Review E*, 1997, 55(3):3015-3020.
- [15] Shen X P, Cui T J, Ye J X. Dual band metamaterials absorber in microwave regime [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 5(61):058101.

(编辑 王维朗)