文章编号:1001-5078(2014)06-0664-04

・太赫兹技术・

基于谐振环的太赫兹吸波体等效电路研究

周 龙,张文涛,胡放荣,熊显名

(桂林电子科技大学电子工程与自动化学院,广西桂林 541004)

摘 要:以常规开口环谐振器(Split ring resonator, SRR)结构的"超材料"太赫兹吸波体为例, 首先用 CST Microwave Studio 软件对吸波体的吸波特性进行仿真。然后,根据横电(TE)模和 横磁(TM)模入射时表面电流分布情况,分别建立了超材料太赫兹吸波体对两种入射模式的 等效电路模型。最后,从理论上对等效电路模型进行了验证,并利用等效电路模型研究了吸波 体结构参数对其吸收峰位置的影响规律。提出的等效电路模型对于"超材料"太赫兹吸波体 的结构设计与性能分析具有十分重要的指导和参考价值。

关键词:太赫兹;超材料;吸波体;开口环谐振器;等效电路

中图分类号:TN247 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2014.06.016

Study on equivalent circuit model of terahertz absorber based on split ring resonator(SRR)

ZHOU Long, ZHANG Wen-tao, HU Fang-rong, XIONG Xian-ming

(College of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541024, China)

Abstract: The absorption performance of the metamaterial absorber based on common split ring resonator (SRR) is firstly simulated using the CST microwave studio software. Then, according to the surface current distribution, the equivalent circuit models of the metamaterial absorber for the incidences of transverse electric (TE) wave and transverse magnetic (TM) wave are set up. Finally, the equivalent circuit models are theoretically verified. At the same time, by using the equivalent circuit models, the influence of geometric parameters on the change of absorption peak position is discussed. The proposed equivalent circuit models are very important for the structure design and performance analysis of the metamaterial terahertz absorber.

Key words: terahertz; metamaterial; absorber; split ring resonator (SRR); equivalent circuit

1 引 言

"超材料"(Metamaterial)是采用微细加工技术 制作而成的,具有天然材料所不具备的超常物理性 质的人工复合结构或复合材料。微波频段的超材料 早在十年前就已经出现^[1],由于其优异的电磁行 为,基于超材料的微波吸波体^[2-4]是进行电磁隐 身^[5-6]的重要功能器件。

在太赫兹领域,基于超材料的太赫兹吸波体不仅 能够大大提高热效应太赫兹探测器的灵敏度,而且能 够进行太赫兹雷达的隐身。另外,"超材料"太赫兹 吸波体具有超薄的特点,克服了传统吸波体四分之一 工作波长的限制,而且吸收效率提高。因此,"超材料"太赫兹吸波体近年来成了国际同行研究的热点课题之一。2008年美国波士顿大学Hu Tao等人采用表面微加工方法研制出了第一个太赫兹超材料窄带吸波体。随后,极化不敏感^[7]、宽入射角^[8],多频^[9]、宽带^[10]太赫兹超材料吸波体也被研制出来。

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61265005)、广西信息科 学实验中心重大项目(No. 20130101)和桂林电子科技大学创新团队 项目资助。

作者简介:周 龙(1989 -),男,在读硕士,主要从事太赫兹超材 料及其应用研究。E-mail:895711451@qq.com

收稿日期:2013-10-06

在太赫兹超材料吸波体的理论研究方面,目前 主要有阻抗匹配理论^[2]、传输线理论^[11]和多次反射 干涉理论^[12]。传输线理论的关键是建立合理的等 效电路模型来分析谐振吸收峰位置随频率的变化。 现有文献在建立吸波体等效电路模型^[13-14]时都没 有考虑入射太赫兹波的偏振方向,这种理论模型对 于偏振敏感的太赫兹吸波体是不能适用的。针对基 于开口环谐振器结构的太赫兹吸波体,在考虑太赫 兹波偏振方向和分析表面电流的基础上,分别建立 了吸波体对横电(TE)模和横磁(TM)模的等效电路 模型,并研究了吸波体结构参数对吸收峰位置的影 响规律。

2 吸波体结构设计与仿真

吸波体单元结构如图1(a)所示,单元边长L= 100µm,各单元从上到下依次为金属开口环谐振器 (Split ring resonator, SRR), 中间介质(聚酰亚胺: polyimide)层以及金属(Au)基底。其中,金属(Au)电导 率 $\sigma = 4 \times 10^7$ s/m,厚度为0.1 µm;聚酰亚胺的相对 介电常数为 1.8,损耗角正切 tan $\delta = 0.025$,厚度为 H_{\circ} 开口环谐振器的开口宽度为D,线宽为W,半径 为R(圆心点到线宽中心点的距离)。吸波体的吸收 率计算公式为 $A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$,其中 S_{11} 和 S_{21} 分别表示反射系数和透射系数。由于金属基底的厚 度远大于太赫兹波在金属表面的趋肤深度,电磁波不 能透过吸波体,故 $S_{21} = 0$,吸收率简写为A = 1 -| S₁₁|²。根据仿真数据代入公式计算得到的吸收率 A 随频率变化曲线如图1(b)所示。由图可知,吸波体 对横磁(TM)模的吸收峰位置为1.27 THz,而对横电 (TE)模的吸收峰位置为1.85 THz。



3 吸波体等效电路模型

表面电荷在入射波电场的作用下发生移动产生 表面电流,横磁(TM)模入射所产生的表面电流如 图 2(a)、(b)所示,横电(TE)模产生的表面电流如 图 3(a)、(b)所示。通过观察谐振器和金属基底的 表面电流分布情况可知,两种模式入射时吸波体的 谐振模式是不同的,因此,我们对两种情况分别建立 等效电路模型。

首先分析横磁(TM)模入射的情况,由于横磁(TM)模的电场 E 平行于谐振环开口处上下两个极板,在此模式下谐振器开口没有起到一个电容的作用,不能被等效为一个电容,由横磁(TM)模产生的谐振环(见图 2(a))及金属基底(图 2(b))的表面电流分布情况可以看出,谐振环上下两个部分的电流是相对独立的,谐振环没有单独形成谐振回路,但是整个吸波体结构却发生了谐振,产生谐振所需的电容源于谐振器与金属基底之间的等效电路(D图 2(c))。其中, L_1 、 L_2 、分别为谐振器上、下两个部分的等效电感, C_1 、 C_2 是谐振器上、下两个部分分别与金属基底形成的等效电容。





a) 谐振环表面由流

图3 横电(TE)模入射表面电流的分布情况及其对应的等效电路 同理,分析如图3(a)、(b)所示横电(TE)模式 对应的表面电流,谐振器左右两个部分与金属基底 形成两个相对独立的LC振荡电路,由此得到横电 (TE)模入射的等效电路(图3(c))。其中,L₃、L₄为 谐振器左、右两个部分的等效电感,C₃、C₄为谐振器 左、右两部分别与金属基底形成的等效电容。同时

(b) 金属基底表面电流

(c) 等效电路

由于电场 E 垂直于谐振环开口处上下两个平行极板,谐振器开口应等效为电容,即 C_5 。尽管左、右两个部分的等效电路结构不同,但是其谐振频率始终保持一致,得到横电(TE)模对应的吸波体谐振频率:

 $f_{TE} = f_3 = f_4 = 1/2\pi \sqrt{L_3C_3} = 1/2\pi \sqrt{L_4C'_4}$ (2) 其中, $C'_4 = \frac{C_4C_5}{C_4 + C_5}$,由于谐振器与金属基底的相 对面积远大于谐振器开口的相对面积,所以 $C_4 \gg C_5$, $C'_4 = \frac{C_4C_5}{C_4 + C_5} \approx C_5$,横电(TE)模谐振频率可进一 步化简为:

 $f_{TE} = f_3 = f_4 = 1/2\pi \sqrt{L_3 C_3} = 1/2\pi \sqrt{L_4 C_5}$ (3) 4 等效电路模型的验证

现在根据等效电路模型来研究吸波体结构几何 参数 *D*、*R*、*W*、*H*变化对其吸收峰位置的影响规律。 当谐振器开口 *D*发生变化时,根据前文的分析,横 磁(TM)模入射的等效电路不存在谐振器开口的等

效电容,所以不影响其谐振频率。当横电(TE)模入 射, D 增加, 等效电容 C5 减小, 谐振频率 fre 增加(见 式(3)),如图4(a)。当R增加,谐振器与金属基底 的相对面积增加,等效电容 C1、C2、C3、增加,同时等 效电感L1、L2、L3、L4也随R的增加而增加,所以横磁 (TM)模谐振频率 f_{TM} 和横电(TE)模谐振频率 f_{TE} 都 减小(见式(1)和式(3)),如图4(b)。当W增加, 谐振器与金属基底的相对面积增加,等效电容 C_1 、 C2、C3、增加,同时,谐振器开口的相对面积也增加, 等效电容 C_5 增加,所以横磁(TM)模谐振频率 f_{TM} 和 横电(TE)模谐振频率 frr 都随 W 的增加而减小(见 式(1)和式(3)),如图4(c)。当H增加,谐振器与 金属基底之间距离增加,等效电容 C1、C2 减小,横磁 (TM)模谐振频率 f_{TM} 增加(见式(1))。横电(TE) 模入射,式(3)中只有等效电容 C,发生变化,谐振 频率几乎不会改变,只是由于介质层厚度增加使其 吸收率增加,如图4(d),以上分析结果总结如表1 所示。

表1 结构参数(D,R,W,H)对 TM 和 TE 模谐振频率的影响

	ТМ					TE					
	L_1	C_1	L_2	C_2	f_{TM}	L_3	<i>C</i> ₃	L_4	C_4	C ₅	$f_{TE}(f_4)$
D增加	不变	不变	不变	不变	不变	不变	不变	不变	忽略	减小	增加
R增加	增加	增加	增加	增加	减小	增加	增加	增加	忽略	不变	减小
W增加	忽略	增加	忽略	增加	减小	忽略	增加	忽略	忽略	增加	减小
H增加	不变	减小	不变	减小	增加	不变	减小	不变	忽略	不变	不变



图 4(a) ~ (d) 所示的结果与以上理论推导完 全一致,说明利用此等效电路模型分析吸波体结构 参数对其吸收峰位置的影响规律是完全正确的。

5 总 结

本文通过分析横电(TE)模和横磁(TM)模入射

时太赫兹超材料吸波体表面电流的分布情况,分别 建立了两种入射情况下吸波体的等效电路模型,并 利用 CST 微波分析软件对等效电路模型进行了验 证。利用等效电路模型研究了当吸波体结构参数对 谐振吸收峰位置的影响规律。这种等效电路模型, 为太赫兹吸波体的结构设计和性能研究提供了重要 参考。

参考文献:

- D R Smith, W J Padilla, D C Vier, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity
 Phy. Rev. Lett, 2000, 84(18):4184-4187.
- N I Landy, S Sajuyigbe, J J Mock, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. Phy. Rev. Lett, 2008, 100 (20): 207402 207405.
- [3] Weiren Zhu, Xiaopeng Zhao. Metamaterial absorber with random dendritic cells [J]. Eur. Phys. J. Appl. Phys, 2010,50(2):21101-21104.
- [4] Gu Chao, Qu ShaoBo, Pei ZhiBin, et al. Planar metamate-

rial absorber based on lumped elements [J]. Chin. Phys. Lett. ,2010,27(11):117802 - 117804.

- [5] J B Pendry, D Schurig. Controlling electromagnetic field[J]. Science, 2006,312(5781):1780 1782.
- [6] D Schurig, J J Mock, B JJustice . Metamaterical electromagnetic cloak microwave frequencies [J]. Science, 2006, 314(5801):977-980.
- [7] N I Landy, C M Bingham, T Tyler, et al. Design, theory, and measurement of a polarization-insensitive absorber for terahertz imaging [J]. Phys. Rev. B 2009, 79 (12): 123104 – 123108.
- Y Q Xu, P H Zhou, H B Zhang, et al. A wide-angle planar metamaterial absorber based on split ring resonator coupling
 [J]. J. Appl. Phys. ,2011,110(4):44102-44107.
- [9] Wu Xiang, Pei ZhiBin, Qu ShaoBo. Design and experimental verification of band-pass frequency selective surface based on metamaterial effective medium theory[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(5):

469 - 474.

- [10] G D Wang, M H Liu, X W Hu. Broadband and ultra-thin terahertz metamaterial absorber based on multi-circular patches [J]. Eur Phy Jour B, 2013, 86 (7): 30879 - 30885.
- [11] Q Y Wen, Y S Xie, H W Zhang, et al. Transmission line model and fields analysis of metamaterial absorber in the terahertz band [J]. Opt. Express, 2009, 17 (20): 256-265.
- [12] H T Chen. Interference theory of metamaterial perfect absorbers[J]. Opt. Express, 2012, 20 (7):7165 - 7172.
- [13] M P Hokmabadi, D S Wilbert, P Kung. Design and analysis of perfect terahertz metamaterial absorber by a novel dynamic circuit model [J]. Opt. Express, 2013, 21 (14): 16455 - 16465.
- [14] YU Qian Ye, Yi Jin, Sailing He. Omnidirectional, polarization-insensitive and broadband thin absorber in the terahertz regime [J]. Opt Physics, 2010, 27(3):498-504.