

## 金属开口谐振环结构的太赫兹波吸收特性

李依涵, 张米乐, 崔海林, 何敬锁, 张存林

(太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京市太赫兹波谱与成像重点实验室,  
首都师范大学 物理系, 北京 100048)

**摘要:** 太赫兹调制器、滤波器、吸收器是太赫兹波应用领域的关键器件, 而金属开口谐振环是这些器件的常用结构。通过仿真及实验的手段, 系统地比较了不同亚波长金属开口谐振环结构的太赫兹波吸收特性。设计并制备两种不同形式的亚波长金属谐振环, 利用时域有限差分(FDTD)的模拟方法与光泵浦太赫兹探测(OPTP)的实验方法, 分析了电磁波入射谐振环时, TM 与 TE 模式下的太赫兹透射特性。发现在 TM 模式下, 吸收峰峰值均反比于谐振环的等效电容值与等效电感值。而在 TE 模式下, 由于偶极子振荡长度相同导致了两种谐振环吸收峰峰值相近。此外, 改变外部光激励条件时实验结果表明 TM 模式下, 单开口环比双开口环对光激励更敏感: 泵浦光功率为 5 mW 相比无泵浦光时, 单开口环透射率增加了 80%, 而双开口环透射率仅增加了 43%。

**关键词:** 开口谐振环; 太赫兹; 超材料

**中图分类号:** TN214; O433   **文献标志码:** A   **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1225002

## Terahertz absorbing properties of different metal split-ring resonators

Li Yihan, Zhang Mile, Cui Hailin, He Jingsuo, Zhang Cunlin

(Key Laboratory for Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Terahertz modulator, filters and absorbers are the key parts of terahertz application, while the metal split ring is the common structure of these applications. Comparisons of terahertz absorbing properties, which were caused by different structures of subwavelength metal split ring resonator, were studied by simulation and experiment. Two split ring resonators which had different split gap types were fabricated. By using Finite Difference Time Domain(FDTD) simulation and Optical Pump Terahertz Probe (OPTP) experimental methods, the terahertz transmittance curves of TM mode and TE mode were investigated when the electromagnetic waves were perpendicular to the samples. The analysis found that in TM mode, the frequency of the absorption peak was inversely proportional to the value of the effective inductance and the effective capacitance. But in TE mode, the similar resonance frequency of the two SRRs were caused by the same length of dipole resonance. In addition, when optical excitation power

收稿日期: 2016-04-11; 修订日期: 2016-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(61675138, 61575131)

作者简介: 李依涵(1992-), 女, 硕士生, 主要从事太赫兹调制技术方面的研究。Email: l\_yihan@sina.cn

导师简介: 何敬锁(1971-), 男, 副教授, 博士, 主要从事于太赫兹通信方面的研究。Email: hejingsuo@263.com

changed, the experimental result indicates that one-gap SRR is more sensitive than two-gap SRR in TM mode. As the pump light power up to 5 mW, the resonance frequency transmittance of one-gap SRR raised 80% than the pump light condition at 0 mW. But, two-gap SRR only raised 43% when the light condition changed from 0 mW to 5 mW.

**Key words:** split ring resonator; terahertz wave; metamaterial

## 0 引言

超材料 (Metamaterial) 是一种具有奇异电磁特性、人工设计加工而成的复合材料。该材料一般制备于半导体或者绝缘体基底上, 其上有亚波长尺寸的金属结构单元周期性地排列, 基本金属单元结构为开口谐振环 (Split-Ring Resonators, SRRs)<sup>[1]</sup>。一些特异的物理性质 (如具有负折射率、不对称透射、类双折射、类电磁感应透明等) 的形成与金属开口谐振环的结构、大小、排列均有密切关联。通过调节开口环结构形状、尺寸等因素, 可以灵活地控制在不同的波段, 得到不同的响应特性。还可以通过光控制<sup>[2]</sup>、偏压控制<sup>[3]</sup>、温度控制<sup>[4]</sup>等外部条件, 改变基底载流子浓度、谐振结构的电导率等, 调节 L、C 等效电路参数, 实现对电磁波的调制。近年来, 随着微纳加工技术的发展, 对于超材料的研究从微波波段已延至可见光波段, 吸引了越来越多的研究人员。

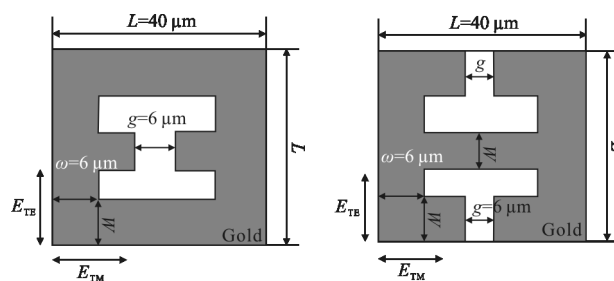
太赫兹波 (Terahertz, THz) 在电磁波波谱中位于红外和微波之间, 频率通常是指在 0.1~10 THz (波长为 30 μm~3 mm 之间) 范围内的电磁波。太赫兹波位置恰好处于宏观经典理论向微观量子理论的过渡区, 也是电子学到光子学的过渡区, 它曾是人类最后一个尚未完全认知和利用的频段<sup>[5]</sup>, 被称为 THz 空隙 (THz gap)。随着有效太赫兹源、太赫兹探测器的发展, 太赫兹技术迅速发展起来, 对太赫兹波器件的需求也越来越大。其中, 基于超材料的太赫兹器件受到了越来越多的重视。该种器件可以灵活地实现对太赫兹波振幅、相位、偏振等方面的控制, 如太赫兹波段的调制器、滤波器、传感器等。

现有参考文献中, 研究单开口谐振环或双开口谐振环不同特性的文章很多<sup>[6-13]</sup>, 如 2012 年, 刘建丰等人研究了基底对亚波长金属双环结构太赫兹透射性质的影响<sup>[7]</sup>; 2014 年, 韩昊等人研究了由开口环和

金属双线组合的太赫兹谐振器<sup>[8]</sup>; 2015 年, Xinwang Liu 等人研究了基于嵌入光敏硅的双开口环的太赫兹开关<sup>[9]</sup>。笔者目的在于对比在 THz 波段内单开口与双开口结构谐振环对吸收峰的影响, 不仅利用时域有限差分法 (FDTD) 模拟了不同的亚波长金属单开口、双开口谐振环的太赫兹透射光谱, 还利用光泵浦太赫兹探测 (Optical Pump Terahertz Probe, OPTP) 实验系统测试了单开口、双开口谐振环结构在 TM 模式 (入射电场分量平行于开口)、TE 模式 (入射电场分量垂直于开口), 有无激励光等条件下的太赫兹透射光谱。

## 1 实验样品与系统

制备的亚波长金属单开口环阵列结构与并列开口环谐振结构如图 1 所示, 图 1(a) 为单开口环阵列结构, 图 1(b) 为双开口环阵列结构。其中, 图中的  $w=6 \mu\text{m}$  为金属线宽,  $g=6 \mu\text{m}$  为缝宽,  $L=40 \mu\text{m}$ 。制作开口环结构的材料是厚度为 200 nm 的金, 衬底材料为高阻硅。



(a) 单开口环结构 (b) 双开口环结构  
(a) Structure of one-gap SRR (b) Structure of two-gap SRR

图 1 样品结构

Fig.1 Structure of samples

测试的实验系统为 OPTP 实验系统, 其中使用的激光器是中心波长为 780 nm、脉宽为 50 fs、单脉冲能量为 1.5 mJ、重复频率为 1 kHz 的水平偏振钛蓝

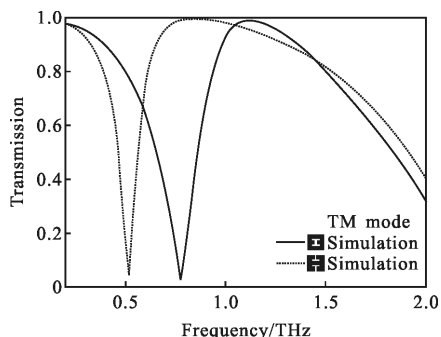
宝石飞秒激光器(Spectra-Physics Hurricane)。为减小环境对实验结果的影响,将实验系统中的 THz 传输部分放置在充满氮气的封闭罩子中,湿度保持在 4% 左右,以减小误差。

## 2 模拟与实验结果分析

### 2.1 单开口环与双开口环数值模拟和实验结果分析

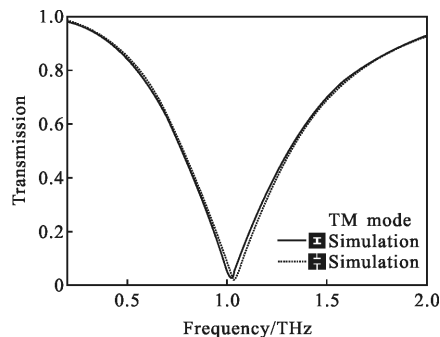
分别利用 FDTD 法模拟和利用 OPTP 系统得到了在 TM 模式和 TE 模式下,两种结构的太赫兹透射谱,如图 2 所示。其中,图 2(a)为 TM 模式下,两样品的模拟透射谱,图 2(b)为 TE 模式下,两样品的模拟透射谱,图 2(c)为 TM 模式下,两样品的实验透射谱,图 2(d)为 TE 模式下,两样品的实验透射谱。观察发现,无论哪种模式下,在 0~2 THz 波段,两样品的模拟光谱都显示存在一个明显的吸收峰,这与实验测得结果相同,模拟波形与实验测得波形也基本保持一致,验证了仿真结果的准确性。在实验结果中,0.5 THz 之前的透射率降低远低于模拟结果,这是实验中基底硅透射率低造成的。另外,由于工艺制造中金属结构尺寸的细微变化和半导体衬底材料参数的差异,导致了模拟吸收峰峰值与实验吸收峰峰值有细微差别,若提高工艺精度可以提高吸收峰峰值的吻合度。

图 2(c)、(d)中,对比两样品在无泵浦光照射情况下的实验结果,可以发现:在 TM 模式下,双开口环的吸收峰峰值频率比单开口环结构的峰值频率低;但 TE 模式下的实验结果并未出现明显偏移。分析其原因是在 TM 模式下,两样品的吸收峰是由于在该模式下构成了 LC 振荡回路所引起的,而在 TE



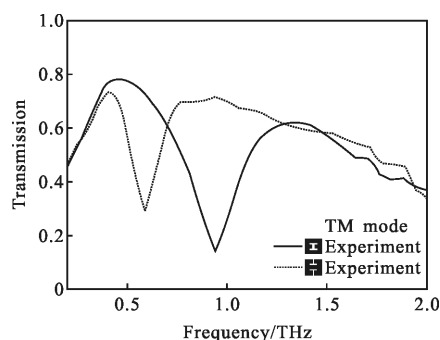
(a) TM 模式下,单开口环与双开口环模拟透射谱

(a) Simulated transmission spectrum between one-gap SRR and two-gap SRR in TM mode



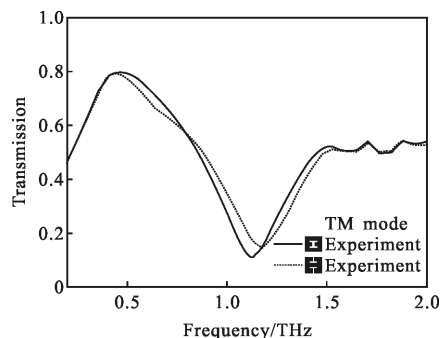
(b) TE 模式下,单开口环与双开口环模拟透射谱

(b) Simulated transmission spectra between one-gap SRR and two-gap SRR in TE mode



(c) TM 模式下,单开口环与双开口环实验透射谱

(c) Experimental transmission spectra between one-gap SRR and two-gap SRR in TM mode



(d) TE 模式下,单开口环与双开口环实验透射谱

(d) Experimental transmission spectra between one-gap SRR and two-gap SRR in TE mode

图 2 无泵浦光下,单开口环与双开口环的太赫兹透射对比谱  
Fig.2 Comparison of transmission spectra between one-gap SRR and two-gap SRR without light

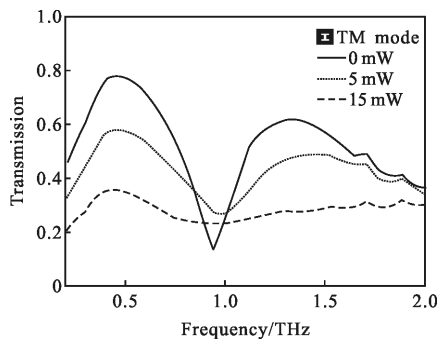
模式下的吸收峰是由金属偶极子振荡引起的。其中,LC 振荡电路模型是指当电磁波垂直入射开口谐振环结构,并且电场分量平行于开口缝时,会构成 LC 振荡回路。由 LC 振荡电路公式可知,  $f \propto \frac{1}{LC}$ , 随着

电容的增加或降低,频率向低频或高频移动。单开口环谐振结构相当于将两个基本开口谐振环以开口处重合连接在一起,两个环相当于电感  $L$ , 裂缝相当于电容  $C$ ; 双开口环结果是将两个基本开口谐振环以长臂处重合的方式连接在一起,环相当于电感  $L$ , 两个裂缝相当于电容  $C$ , 两个电容相当于并联, 则电容值有所增加。所以在  $TM$  模式下, 双开口环相对于单开口环而言, 电容值增加了, 所以其吸收峰频率向低频移动。在  $TE$  模式下, 偶极子振荡的吸收峰频率取决于形成偶极子振荡的长度, 所以具有相同偶极子振荡长度的两开口环结构的吸收峰频率近似。

为了更直观地证明  $TM$  模式下两种结构处于  $LC$  振荡, 在  $TE$  模式下两种结构处于金属偶极子振荡, 利用  $FDTD$  的方法模拟了两样品吸收峰处的表面电流分布(图未列出)。在  $TM$  模式下, 观察两样品横纵臂电流, 可发现形成了回路, 证明此时发生的为  $LC$  振荡。在  $TE$  模式下, 两样品横纵臂电流没有形成完整的回路, 证明此时在纵臂上发生的是金属偶极子振荡。

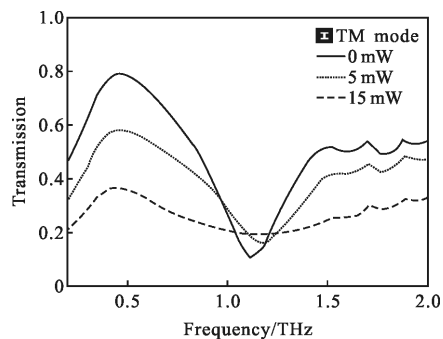
### 2.2 外加光激励条件下单开口环与双开口环的实验结果分析

上文已对比分析了单开口环与双开口环在无泵浦光条件下,  $TM$  模式与  $TE$  模式下太赫兹透射光谱中出现的吸收峰。在应用开口谐振环的实际器件, 如太赫兹调制器时, 大部分是通过改变外部激励条件, 如外加光信号或电信号, 使其对  $THz$  信号的吸收强度发生变化, 从而实现对  $THz$  信号强度的调制。为此, 改变实验中外部光照条件, 对单开口环与双开口环进行测试。图 3 为单开口环与双开口环在 0、5



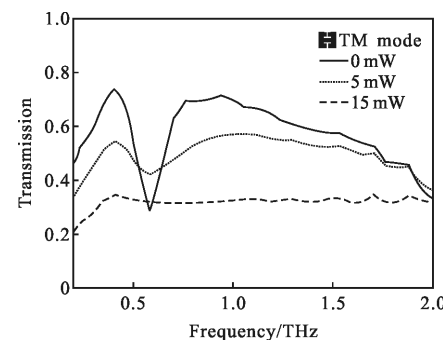
(a)  $TM$  模式下, 单开口环实验测得在泵浦光为 0、5、15 mW 的透射谱图

(a) Experimental transmission spectra of one-gap SRR with 0, 5, 15 mW pump light power in  $TM$  mode



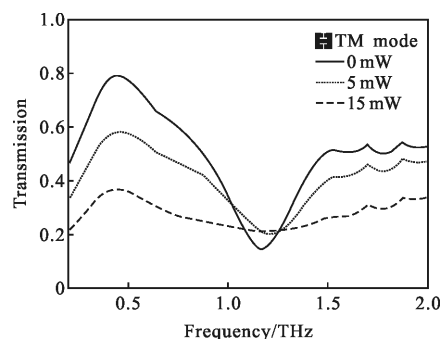
(b)  $TE$  模式下, 单开口环实验测得在泵浦光为 0、5、15 mW 的透射谱图

(b) Experimental transmission spectra of one-gap SRR with 0, 5, 15 mW pump light power in  $TE$  mode



(c)  $TM$  模式下, 双开口环实验测得在泵浦光为 0、5、15 mW 的透射谱图

(c) Experimental transmission spectra of two-gap SRR with 0, 5, 15 mW pump light power in  $TM$  mode



(d)  $TE$  模式下, 双开口环实验测得在泵浦光为 0、5、15 mW 的透射谱图

(d) Experimental transmission spectra of two-gap SRR with 0, 5, 15 mW pump light power in  $TE$  mode

图 3 在不同泵浦光功率下, 两样品实验测得的太赫兹透射谱

Fig.3 Experimental transmission spectra of two samples with different pump light powers

5、15 mW 泵浦光的条件下, 得到的太赫兹透射谱,

图 3(a)为 TM 模式下的单开口环透射谱,图 3(b)为 TE 模式下的单开口环透射谱,图 3(c)为 TM 模式下的双开口环透射谱,图 3(d)为 TE 模式下的双开口环透射谱。

图 3 中可以看出在 TM 模式与 TE 模式下,无论是单开口环还是双开口环均在 500 GHz 附近有很好的调制效果,这是由于基底的作用。当激励光增加时,基底的透射率减低,其总的调制深度约为 55% (图未列出)。但单开口环与双开口环的处于吸收峰峰值的透射率反而有所增加。这是由于在 TM 模式下不加激励作用,开口处载流子浓度比较低,开口处形成断路,构成 LC 振荡回路,对在吸收峰频率的光起到吸收作用;当有外加激励时,开口处的半导体表面产生大量载流子,致使电容失效,谐振作用消失,使太赫兹透过率增大。而 TE 模式下,也与 TM 模式类似,由于光功率太强,致使金属结构未滤波,光功率越大,开口环透射谱越接近基底的透射谱。TM 模式下,在光功率为 5 mW 的条件下,如图 3(b)所示,单开口环位于 0.94 THz 处的吸收峰,相比无泵浦光条件下 0.15 透射率,增加了 80%,提高到了 0.27;如图 3(d)所示,双开口环位于 0.58 THz 处的吸收峰透射率由 0.30 提高到了 0.43,增加了 43%。说明改变光激励条件,单、双开口环吸收峰频率均没有明显变化,但单开口环的透过率对外部光激励更敏感。对于 TM 模式下,两种结构的峰值透过率的影响因素需要进一步调研分析。TE 模式下,二种结构吸收峰幅度下降相近,且频率并未有明显偏移。

### 3 结 论

文中对比了在太赫兹波段内,单开口环与双开口环结构对其吸收峰的影响,分析了在 TM 模式下两种结构吸收峰频率偏移的原因,以及在外加光激励的条件下,两种结构的吸收峰幅度变化与吸收峰偏移情况。通过结果分析,得出在 TM 模式下,两种结构符合 LC 振荡电路模型,吸收峰频率与 L、C 值成反比。当 L、C 值越大,吸收峰值频率越低,反之越高。在改变光激励的条件下,发现了单开口环与双开口环透射率的不同与基底透射率变化相关,随着光功率的增加,单开口环与双开口环透射率均相比无泵浦光时透射率有所提高。另外,在 TM 模式下,单开口环比双开口环对光激励更敏感,无泵浦光相比

泵浦光功率为 5 mW 时,单开口环透射率增加了 80%,而双开口环透射率仅增加了 43%。文中的研究内容,对拓展太赫兹波段器件的应用研究具有一定的指导意义。

### 参 考 文 献 :

- [1] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields [J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1780–1782.
- [2] Zhao X, Fan K, Zhang J, et al. Optically tunable metamaterial perfect absorber on highly flexible substrate[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2015, 231: 74–80.
- [3] Feng L, Zhang X, Liao M, et al. High speed electrically-controlled terahertz modulator [J]. *Superlattices & Microstructures*, 2015, 79: 72–78.
- [4] Gu J, Singh R, Tian Z, et al. Terahertz superconductor metamaterial [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97 (7): 071102.
- [5] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. *Nature Materials*, 2002, 1(1): 26–33.
- [6] Wu A' ni, Li Chengyu, Zhou Qingli, et al. Influence of temperature on resonant properties in terahertz subwavelength metal structures [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1832–1835. (in Chinese)  
武阿妮, 李晨毓, 周庆莉, 等. 温度对太赫兹亚波长金属结构共振特性的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(6): 1832–1835.
- [7] Liu Jianfeng, Zhou Qingli, Shi Yulei, et al. The effect of substrate on terahertz transmission properties through metal subwavelength dual-ring structure [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(4): 048101. (in Chinese)  
刘建丰, 周庆莉, 施宇蕾, 等. 基底对亚波长金属双环结构太赫兹透射性质的影响 [J]. *物理学报*, 2012, 61(4): 048101.
- [8] Han Hao, Wu Dongwei, Liu Jianjun, et al. A terahertz metamaterial analog of electromagnetically induced transparency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 240–245. (in Chinese)  
韩昊, 武东伟, 刘建军, 等. 一种太赫兹类电磁诱导透明超材料谐振器[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 240–245.
- [9] Su X, Ouyang C, Xu N, et al. Broadband terahertz transparency in a switchable metasurface[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 1–8.
- [10] Liu J, Zhou Q, Shi Y, et al. Study of dipole arrays at

- terahertz frequencies [J]. *Optics Communications*, 2013, 291(6): 26–30.
- [11] Zhang Jianfa, Yuan Xiaodong, Qin Shiqiao. Tunable terahertz and optical metamaterials [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 349–364. (in Chinese)  
张检发, 袁晓东, 秦石乔. 可调太赫兹与光学超材料[J]. 中国光学, 2014, 7(3): 349–364.
- [12] Li Qi, Hu Jiaqi, Yang Yongfa. 2D reconstructed-image restoration of terahertz Gabor in-line digital holography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2188–2195. (in Chinese)  
李琦, 胡佳琦, 杨永发. 太赫兹 Gabor 同轴数字全息二维再现像复原[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(8): 2188–2195.
- [13] Cui Hailin, Jiao Lei, Li Lijuan, et al. Theoretical investigations of THz subwavelength metamaterials polarization insensitive modulators [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3849–3853. (in Chinese)  
崔海林, 焦磊, 李丽娟, 等. 基于太赫兹亚波长超材料的偏振不敏感调制器的理论研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(11): 3849–3853.