

太赫兹电波矢对金属共振环透射率的影响

颜子瑜 姜 雪 周庆莉 张存林

(首都师范大学物理系 北京市太赫兹波谱与成像重点实验室 省部共建太赫兹光电子重点实验室, 北京 100048)

摘要 金属共振环结构(Split ring resonator)是近年来新兴的一种微型阵列结构,它所表现出来的共振吸收和透射效应引起了人们极大的关注。它的形状主要有圆形和方形两种,并且环上都带有狭缝。这种微结构可视为周期排列的金属丝,在时变电场和磁场的作用下会产生明显的电磁响应。采用太赫兹时域光谱系统,通过改变入射太赫兹电波矢与样品平面的角度,研究结构透射和吸收情况的变化。发现电波矢的改变会造成不同的偶极振荡模式,从而影响吸收位置,导致透射能量发生频移,并对此现象进行了理论解释。而金属共振环结构的固有频率只与结构的尺寸有关,不受传播模式的影响。为太赫兹相关器件的制备提供了参考。

关键词 太赫兹; 金属共振环; 电响应; 磁响应

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS200929s1.0258

Terahertz Electric Response For Split Ring Resonator

Yan Ziyu Jiang Xue Zhang Cunlin Zhou Qingli

(Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 10048, China)

Abstract In recent years, split ring resonator (SRR) is a new micro-structure of the array. The resonance transmission and absorption effect of the split ring aroused a great deal of concern. It's mainly the two kinds, one is square, the other is round, and all of them with a ring slit. This micro-structure can be seen as the wires array, it will produce the clear electromagnetic response under the time-varying electric and magnetic fields. Utilizing terahertz time domain spectroscopy system, the research by changing angles of terahertz electric wave vector with split of split ring, found that different modes of dipole oscillating are made by changing electric wave vector, and its absorption is also affected. However, natural frequency of SRR is decided by lattice size, independent of transmission mode. Infections to resonance properties of SRR by terahertz electric wave vectors are discussed in this letter. It can be a reference for researching terahertz devices.

Key words terahertz; split ring resonance (SRR); electric response; magnetic response

1 引 言

近年来,周期性金属亚波长阵列结构的超强透过现象受到了广泛的关注,理论和实验上都证明了这种现象。这一现象被解释为由电磁波引发金属表面自由电子起伏和振荡而形成的表面等离子体波(Surface plasmon wave, SPW)与入射电磁波的相互耦合。随着对周期性金属阵列的深入研究,开始出现一些经过人工特殊设计的材料,它们通常由金属和半导体组成,常见的是以砷化镓或硅为基底,上

面以光刻的方法制作周期性金属亚波长阵列。其中,金属共振环结构(split ring resonator)是近年来新兴的一种微型阵列结构,它所表现出来的共振吸收和透射效应引起了人们极大的关注。它的形状主要有圆形和方形两种,并且环上都带有狭缝。这种微结构可视为周期排列的金属丝。根据 J. B. Pendry^[1]的研究理论可知,这种金属丝在时变电场和磁场的作用下会产生明显的电磁响应。

在共振环结构中,每个金属环都可视为一个 LC

基金项目: 国家 973 计划(2007CB310408)资助课题。

作者简介: 颜子瑜(1984—),女,硕士研究生,主要从事太赫兹光谱检测方面的研究。E-mail: amableyu@yahoo.com.cn

导师简介: 张存林(1961—),男,博士,教授,主要从事太赫兹及红外光谱与成像方面的研究。

E-mail: Cunlin_Zhang@mail.cnu.edu.cn(通信联系人)

电路。当它受到时变电场作用时,LC 回路会发生振荡。其振荡频率只与金属环的尺寸有关。2005 年, J. Zhou等^[2~5]对 LC 共振环进行了理论计算,发现当入射频率满足共振频率时,共振环会吸收电磁波的能量,而造成 LC 共振吸收现象。

金属环内部的正负电荷可视为偶极子。当电磁波入射到共振环表面时,时变电场会使偶极子定向排列并发生振荡。振荡的偶极子周围会产生特定频率的电磁波。当它与入射波频率一致时会发生共振,出现偶极共振吸收的现象。然而,金属共振环结构属于各向异性材料,即狭缝的方向决定了电磁波在材料内的传播模式。所以当狭缝的方向改变时,耦合进入材料的电磁波传播模式也随之改变,使电偶极子振荡模式发生改变,产生的吸收频率也就不同。

金属共振环结构表现出来的共振吸收和透射效应虽然很值得关注,但是对于这些现象的研究还不成熟,理论解释也未达成共识。本文利用太赫兹时域光谱技术研究了太赫兹电波矢对金属共振环透射率的影响,通过研究双环结构金属共振环在太赫兹频段的传输特性,为太赫兹波器件的制备提供了有效的理论和实验依据,具有广泛的应用前景,如太赫兹滤波器^[6~8]

2 实验及数据处理

本实验采用的是太赫兹时域光谱透射系统(图 1)。此系统使用的飞秒激光器产生的飞秒激光脉冲中心波长为 800 nm,重复频率为 82 MHz,脉宽为 100 fs,输出功率为 1067 mW。本文利用这个装置探测到的有效谱宽是 0.2~2.5 THz,频谱分辨率 50 GHz,信噪比 600。考虑到样品对太赫兹辐射的吸收,把样品放置在能量较高的离轴抛物面镜 PM2 焦点处(焦斑直径约为 1.1 mm)。实验时为了降低空气中水分对太赫兹波的吸收,在光路虚线框内充入氮气,使得探测时环境的湿度低于 4%,实验温度是 21 ℃。产生太赫兹波后,抽运光路中还残存着部分飞秒激光。它与太赫兹波共同照射到样品上,因此可以作为激发基底中载流子的激励光。其功率为 23 mW,偏振方向与太赫兹脉冲相同^[9]。

实验样品采用高阻砷化镓做基底,金属材料为铜。加工过程如下:首先根据样品图形制作掩模版,并通过光刻法将图形刻到砷化镓晶片上。然后通过蒸镀的方法使晶片表面黏附一层金属阵列。最后将光刻胶剥落,进行后期处理。

样品结构如图 2 所示。砷化镓晶片的厚度为

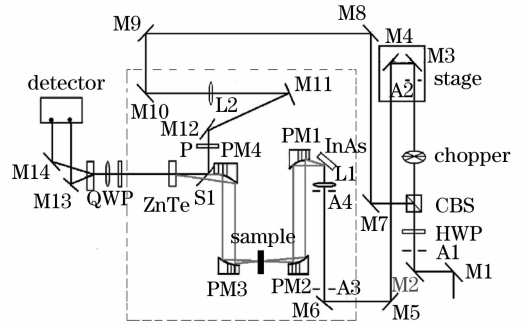


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup
625 μm,常温下载流子浓度为 1.84×10⁷ cm⁻³。铜环的厚度为 0.5 μm。样品的狭缝宽度、内外环间隔、金属线宽、外环线长及晶格常数分别为 2 μm, 3 μm,6 μm,36 μm 和 50 μm。

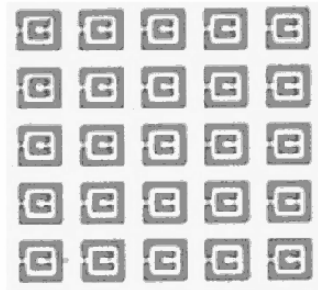


图 2 样品的电子显微图

Fig. 2 Micrograph of SRs with GaAs substrate and copper layer

太赫兹时域光谱系统可以获取太赫兹入射和透射电场的时域数据,然后通过快速傅里叶变换得到相应的频域数据,利用下式

$$T(\nu) = \frac{P_t(\nu)}{P_r(\nu)}, \tag{1}$$

即可得到样品的透射率 $T(\nu)$ 。(1)式 ν 是入射脉冲频率, $P_r(\nu)$ 是太赫兹波透过砷化镓晶片后的电场能量, $P_t(\nu)$ 是太赫兹波透过样品后的电场能量。吸收率可利用公式

$$A(\nu) = \lg \left[\frac{P_r(\nu)}{P_t(\nu)} \right], \tag{2}$$

得到。根据相位的变化,利用下式可以求得样品的折射率:

$$n(\omega) = \phi(\omega) \frac{c}{\omega d} + 1. \tag{3}$$

3 双环结构金属共振环的太赫兹透过特性

样品基底采用高阻砷化镓晶片,其折射率在太

赫兹波段基本保持在 4.17, 透过率约为 70% 左右。在太赫兹有效频段内砷化镓晶片没有明显的吸收和透射现象, 所以对共振环结构没有显著的影响。

空气中传播的太赫兹波电场为水平偏振, 磁场为竖直偏振。正入射时, 金属共振环内会发生明显的介电响应现象。共振环属于各向异性材料。狭缝与入射电场偏振的位置关系会直接影响共振环的吸收峰位。图 3 显示了双环结构的太赫兹透射和吸收情况。实验温度为 21.2℃, 湿度为 3.6%。狭缝方向与入射太赫兹电场偏振平行时透射谱中出现了两个透射峰: 0.556 THz 和 1.259 THz; 同时还出现了两个吸收带: 0.614 THz 和 1.668 THz。狭缝方向与入射太赫兹电场偏振垂直时出现了三个透射峰: 0.556 THz, 1.435 THz 和 1.580 THz; 而吸收带为 0.790 THz, 1.522 THz 和 1.668 THz。

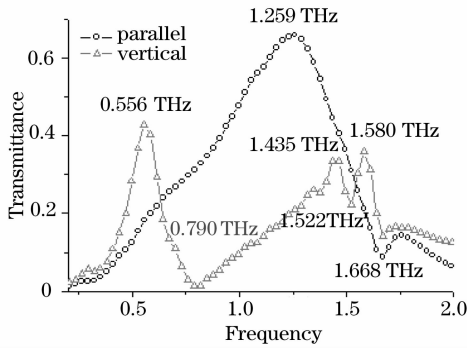


图 3 狭缝方向对双环结构的影响

Fig. 3 Influence of the split direction on the double-split ring structure

对比两种传播模式下的透射变化, 0.556 THz 处的透射峰强度有所改变, 但位置没有发生变化, 说明此透射峰的频率只与金属环的结构尺寸等固有参量有关, 而与太赫兹波的传输模式无关; 其他位置的透射峰与狭缝位置有关, 不同的太赫兹波传输模式会产生不同的电耦合及磁耦合作用, 导致透射特性发生变化。双环结构的吸收特性可以总结为: 1.668 THz 处的吸收峰是金属环的固有频率吸收 (即 LC 振荡吸收), 不受太赫兹波传输模式的影响; 而 0.790 THz 附近的吸收现象是由偶极振荡造成的, 它与耦合波的传输模式相关。

由于系统产生的太赫兹脉冲是线性偏振, 所以当狭缝方向与太赫兹电场偏振平行时只能耦合水平方向的电波矢。此时沿竖直轴旋转样品, 则样品面内的耦合电波矢分量会发生变化, 导致电响应结果相应改变。于是分别研究了狭缝垂直放置与水平放置两种情况下的电响应变化: 即以样品中心的竖直方向为轴

旋转样品, 见图 4 所示。

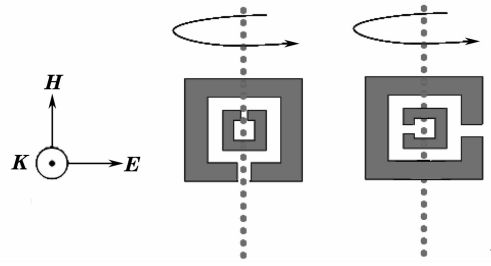


图 4 沿竖直方向旋转样品的示意图

Fig. 4 Schematic diagram of changing angles of terahertz electric wave vector

实验结果见图 5 和图 6。狭缝垂直放置时只能耦合竖直方向上的磁波矢。沿竖直方向旋转样品只能改变水平方向上的电波矢分量, 因此狭缝垂直放置时透射特性没有发生明显变化。反之, 狭缝水平放置时可以耦合水平方向上的电波矢。旋转过程中样品面内的电波矢分量逐渐减小, 导致 1.668 THz 处的固有频率吸收有减小的趋势, 而 0.614 THz 处的吸收衰减得更迅速。另外, 透射谱还反映了能量频移的现象, 即 1.756 THz 处的透射能量逐渐降低, 而 1.259 THz 附近的透射能量逐渐增加。这说明共振环结构具有使透射能量频移的性质。具体原因如下: 把金属环结构看作电容与电感串联的 LC 电路, 如果改变入射太赫兹电波矢在样品面内的分量, 相当于改变电路的激励电源。随着旋转角度的增加, 太赫兹电波矢在样品面内的分量相应减小, 因此电路激励电源的有效值也减小, 导致电路中电流的有效值降低。电感和电容都是储能元件。当电流有效值减小时, 电感会释放出储存的磁能抑制电流的减小。这部分磁能随即转化为电能储存在电容中。因而电容中的电能比原来有所增加。当激励电源的频率小于电路的谐振频率 ω_0 时, 电路呈电容性, 电路的性质主要由电容决定; 当激励电源的频率

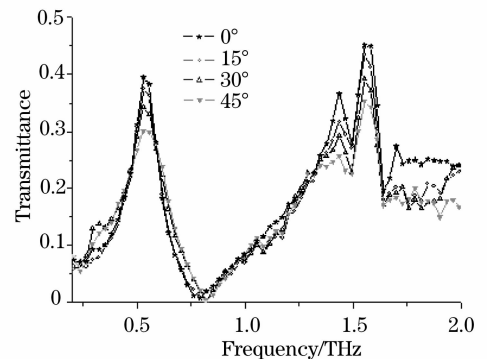


图 5 狭缝垂直放置时不同旋转角度对应的透射谱

Fig. 5 Transmission with different angle when split is vertical

大于 ω_0 时, 电路呈电感性, 电路的性质主要由电感决定。双环结构的谐振频率为 1.668 THz, 对应于图中透射率突然降低的位置。高频位置(频率大于 1.668 THz)对应的 LC 电路呈电感性, 电感释放了部分磁能使其能量下降, 因而高频处的透射峰值相应减小。低频位置(频率小于 1.668 THz)对应的 LC 电路呈电容性, 由于电感释放的磁能转换为电能储存到电容中, 所以低频处的透射峰值相应增加。所以透射谱中出现了能量频移的现象。在能量转换的过程中, 电阻也会消耗部分能量, 但电路总体满足能量守恒。

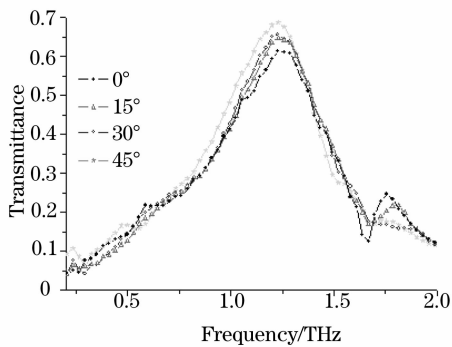


图 6 狭缝水平放置时不同旋转角度对应的透射谱
Fig. 6 Transmission with different angle when split
is horizontal

4 结 论

本实验采用太赫兹时域光谱系统, 研究了双环结构金属共振环的太赫兹透射和吸收特性。改变狭缝的放置方向会造成不同的电磁波传输模式。太赫

兹波正入射时, 金属环内的偶极子发生定向排列并产生振荡。狭缝竖直放置时, 偶极振荡产生的吸收频率为 0.790 THz。实验得到 LC 振荡的固有频率大小为 1.668 THz。它不受太赫兹波传播模式的影响。沿竖直轴旋转样品时, 样品面内的电波矢分量减小, 透射峰有向低频移动的趋势, 并且出现了能量频移的现象。这一研究为太赫兹相关器件的制备提供了参考。

参 考 文 献

- 1 J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures[J]. *Phys. Rev. Let.*, 1996, **76**(25): 4773~4776
- 2 W. J. Padilla, A. J. Taylor, C. Highstrete *et al.*. Dynamical electric and magnetic metamaterial response at terahertz frequencies[J]. *Phys. Rev. Let.*, 2006, **96**(10):107401
- 3 J. Zhou, Th. Koschny, M. Kafesaki *et al.*. Saturation of the magnetic response of split-ring resonators at optical frequencies [J]. *Phys. Rev. Let.*, 2005, **95**(22): 223902
- 4 T. J. Yen, W. J. Padilla, N. Fang *et al.*. Terahertz magnetic response from artificial materials [M]. *Science*, 2004, **303**(5663): 1494~1496
- 5 J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins *et al.*. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. *IEEE, J. Microw. Theory. Technol.*, 1999, **47**(1): 2075~2084
- 6 Y. Xiang, X. Dai, S. Wen. Omnidirectional gaps of one-dimensional photonic crystals containing indefinite metamaterials [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(9): 2033~2039
- 7 A. A. Zharov, I. V. Shadrivov, Y. S. Kivshar. Suppression of left-handed properties in disordered metamaterials[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(11): 113906
- 8 M. Gil, J. Bonache, J. Selga *et al.*. Broadband resonant-type metamaterial transmission Lines [J]. *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, 2007, **17**(2): 97~99
- 9 Weili Cui, Zhenwei Zhang, Guozhong Zhao *et al.*. Transmission properties of terahertz radiation through a single sub-wavelength circular hole in the metal foil[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(s1): 74~76