

## 温度对太赫兹亚波长金属结构共振特性的影响

武阿妮<sup>1</sup>, 李晨毓<sup>1</sup>, 周庆莉<sup>1</sup>, 刘建丰<sup>1</sup>, 孙会娟<sup>2,3</sup>, 杨舟<sup>1</sup>, 张存林<sup>1</sup>

(1. 太赫兹光电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; 2. 北京联合大学基础部, 北京 100101; 3. 北京理工大学光电学院, 北京 100081)

**摘要:** 利用太赫兹时域光谱系统研究温度对 GaAs 基底上生长的太赫兹亚波长金属结构的透过率及共振特性的影响。实验发现, 温度从低温 80 K 升高至 380 K, 样品的透过率逐渐降低, 且低频共振频率处有轻微的红移现象。通过研究共振带区域及远离共振带区域的透过率情况, 分析了总体透过率降低的根本原因在于温度升高导致 GaAs 基底的本征载流子浓度升高; 共振凹陷减弱是由于基底载流子的变化致使透过率升高形成的; 红移现象的产生是由于温度升高导致样品折射率增大。此外, 该研究可以为太赫兹范围的功能器件在实际应用和生产制造中提供有意义的参考。

**关键词:** 太赫兹; 温度; 亚波长金属结构

**中图分类号:** TN21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1832-04

## Influence of temperature on resonant properties in terahertz subwavelength metal structures

Wu A'ni<sup>1</sup>, Li Chenyu<sup>1</sup>, Zhou Qingli<sup>1</sup>, Liu Jianfeng<sup>1</sup>, Sun Huijuan<sup>2,3</sup>, Yang Zhou<sup>1</sup>, Zhang Cunlin<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory for Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Department of Basic Course, Beijing Union University, Beijing 100101, China; 3. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** By using terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS), the transmission and resonance properties of terahertz subwavelength metal structures at different temperatures were studied. The transmission of "U"- and "E"-shaped structures decreased gradually with temperature increasing from 80 K to 380 K. Meanwhile, the low resonance frequency showed a slight red-shift. Through the study of temperature-dependent transmission spectra at resonance and non-resonance regions, the phenomenon of transmission decreasing was attributed to the increasing of carrier concentration in GaAs substrate. The weakened resonant strength originated from the resonance quench by temperature-generated carriers in substrate. The red-shift was due to the increase of refractive index. The investigation could provide some meaningful guides in practical application of terahertz functional devices.

**Key words:** terahertz; temperature; subwavelength metal structure

收稿日期: 2014-10-11; 修订日期: 2014-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(10804077); 北京市科技新星; 北京市属高级青年拔尖人才培养计划

作者简介: 武阿妮(1989-), 女, 硕士生, 主要从事太赫兹波谱学方面的研究。Email: wuani1989@163.com

导师简介: 周庆莉(1978-), 女, 副教授, 博士, 主要从事太赫兹波谱学方面的研究。Email: qlzhou@cnu.edu.cn

## 0 引言

太赫兹亚波长金属结构与太赫兹波的相互作用有着广泛的潜在应用价值和多种较为可行的研究手段,太赫兹亚波长金属阵列结构在太赫兹波段表现出多种有趣的光学性质<sup>[1-3]</sup>。前人对于亚波长金属结构进行过很多的研究,并用这些结构与太赫兹波的相互作用实现了多种模式的电磁振荡,利用这些不同模式的电磁振荡实现了对太赫兹偏振态的改变、以及对太赫兹透射率的控制。利用这些性质可以制作出多种太赫兹范围的功能器件<sup>[4-5]</sup>:例如,太赫兹滤波器、太赫兹偏振器件、太赫兹天线等。笔者所在的研究小组对太赫兹波段几种亚波长金属结构对太赫兹透射性质的影响也有一定的研究<sup>[6-8]</sup>。随着太赫兹功能器件的研究发展,实际应用中环境的影响因素就越来越得到重视。温度会对太赫兹亚波长金属结构的透过率产生一定的影响。文中主要是在太赫兹时域光谱(THz-TDS)系统下研究亚波长金属阵列结构<sup>[8]</sup>:亚波长“U”型结构、亚波长“E”型结构在不同温度下的透过率变化情况以及其物理来源,希望为其在低、高温环境中的实际应用提供有意义的参考。

## 1 实验及结果

实验所用系统为 THz-TDS 系统和样品低温系统。实验样品如图 1 插图(左上)所示,单胞内金的劈裂环结构(SRR 结构)<sup>[9]</sup>形状类似“U”形,其横向尺寸

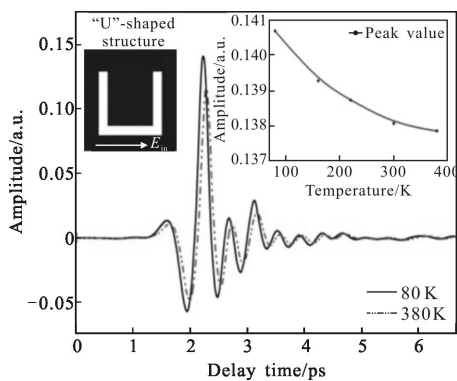


图1 “U”型结构样品的示意图以及样品在不同温度下的太赫兹波和太赫兹波峰值

Fig.1 Schematic diagram of “U”-shaped structure and THz wave, peak value of THz wave at different temperatures

为  $36 \mu\text{m}$ ,纵向尺寸也为  $36 \mu\text{m}$ ,两侧臂等长,线宽为  $6 \mu\text{m}$ ,晶格常数为  $60 \mu\text{m}$ ,基底为半绝缘的 GaAs,称为“U”型结构样品。图 2 插图(左上)所示的金属结构形如大写字母“E”逆时针旋转  $90^\circ$ 的情况,故称之为“E”型结构,其横向、纵向尺寸与“U”型结构一样均为  $36 \mu\text{m}$ ,线宽  $6 \mu\text{m}$ ,垂直方向三臂等长。样品置于低温系统中,温度范围为  $80\sim 380 \text{ K}$ 。

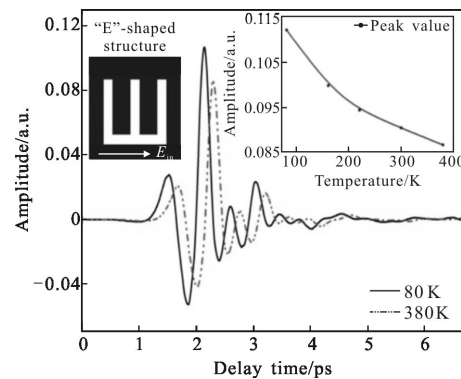


图2 “E”型结构样品的示意图以及样品在不同温度下的太赫兹波和太赫兹波峰值

Fig.2 Schematic diagram of “E”-shaped structure and THz wave, peak value of THz wave at different temperatures

由图1和图2可以明显地看出在 THz-TDS 系统中“U”型结构和“E”型结构样品的太赫兹波强度受温度的影响均比较明显。当样品温度由  $80 \text{ K}$  升至  $380 \text{ K}$ ,太赫兹波的峰值降低且时间延迟增大。右侧插图可以明显地看出随温度升高,两个样品的太赫兹波峰值均有明显的降低,且降低曲线为非线性的。笔者将太赫兹波峰值降低的主要原因归结为两个,一是温度升高导致 GaAs 基底的本征载流子浓度升高,使得太赫兹波的透过率下降;二是由于载流子浓度的变化导致亚波长结构在劈裂处基底的电导率发生变化,从而影响其共振特性。但后者的作用使其共振减弱,透过率增大。所以,在这里主要是前者 GaAs 基底材料温度依赖的载流子浓度的影响占主导地位。另外,随着温度升高,样品折射率增大<sup>[6]</sup>,表现为太赫兹峰处时间延迟后移。

太赫兹时域波形所反映的是样品对所有频率的平均效应,为了更好地探究温度对亚波长金属阵列结构的影响,进一步研究了不同温度下,GaAs 基底上生长的“U”型结构样品和“E”型结构样品透过谱的情况。

图 3 为“U”型结构样品在不同温度下的太赫兹透过率情况。可以看出:当太赫兹波偏振方向如图 3 中左下插图所示时,样品的透过谱有两个共振吸收带,分别位于 0.6 THz 和 1.5 THz 左右。随着温度升高,“U”型结构样品的透过率不断降低。图中由 LC 振荡<sup>[10-12]</sup>产生的低频共振带右侧有轻微的重叠,且共振凹陷在不断减弱。笔者认为,轻微重叠是由于温度升高,折射率增大,导致共振吸收带有微小的红移。凹陷减弱是由于温度升高,载流子的变化导致基底的特性转变,致使共振强度减弱。电偶极振荡形成的高频共振带的特性主要取决于结构的几何尺寸,这与远离共振区域类似。例如在 1 THz 附近透过率降低单纯是由于温度升高,基底的载流子浓度增加导致透过率降低。

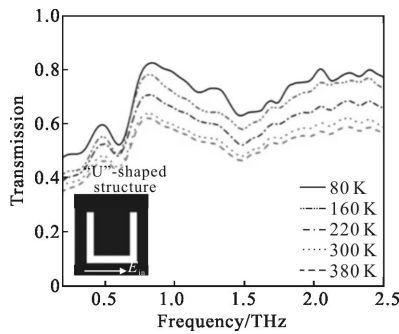


图 3 “U”型结构样品在不同温度下的太赫兹透过谱

Fig.3 Spectral transmission of “U”-shaped structure at different temperatures

图 4 为“E”型结构样品在不同温度下的太赫兹透过率情况。其透过谱与“U”型结构的透射谱线基本一致,仍然只有两个共振带分别位于 0.6 THz 和 1.5 THz 左右,并且在 0.6 THz 处共振吸收比较强。根

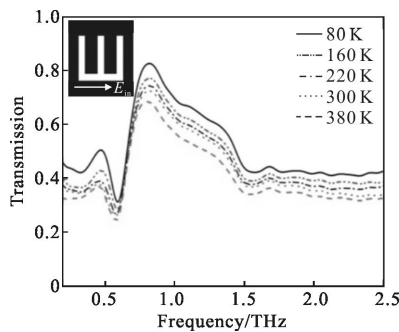


图 4 “E”型样品在不同温度下的太赫兹透过谱

Fig.4 Spectral transmission of “E”-shaped structure at different temperatures

据模拟发现,低频共振带由两侧臂中形成的环形振荡电流产生,高频共振带由底边的电偶极振荡产生,中间等长臂不参与这两种共振。将样品温度从 80 K 升至 380 K,“E”型结构样品的透过率也不断降低。“E”型结构样品在低频共振区域的红移现象更加明显。笔者认为这是由于温度升高,分子密度降低与分子极化率升高产生了竞争效果,最终是极化率升高起主导作用致使样品折射率变大,产生红移现象<sup>[13]</sup>。

为了进一步分析样品在两个共振吸收带和远离共振吸收区域的透过率差异情况,选取了两个样品在 0.6 THz、1.5 THz 和 1 THz 处的透过率情况进行比较(见图 5)。可以发现,在任何温度下都是 0.6 THz 处的透过率最低。但在不同频率处,随着温度升高两种样品的透过率降低情况是不一样的,“U”型结构样品透过率降低的速率比“E”型结构样品的更快,这说明温度对前者透过率的影响更大。图 5(a)中样品在 0.6 THz 处透过率的降低速率比较慢,是由于在低频共振带处的共振减弱导致透过率增加起到了抑制作用。在实际应用中,人们可以根据具体的使用需要来选择具有合适温度依赖关系的功能性器件。

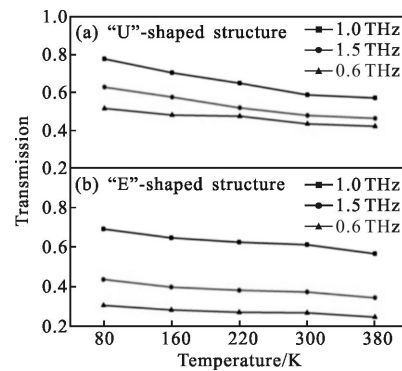


图 5 “U”型和“E”型结构样品在特定频率处的透过率情况

Fig.5 Transmission at particular frequencies for “U” and “E” shaped structures

为了进一步验证随温度变化基底对样品透过率变化的贡献情况,给出了不同温度下 GaAs 基片的透过率情况。

由图 6 可以看出:GaAs 基片在室温下的透过谱中并无特征吸收,且与“U”型结构在 1 THz 处的透过率差别不大。插图所示 GaAs 基片在 1 THz 处透过率随温度变化的具体情况,说明温度升高基底的透过率降低,进一步验证了之前的结论,亚波长金属结构样

品在非共振区域透过率降低的主要原因是基底载流子浓度增加,而在共振区域透过率降低则是由基底的折射率变大及载流子浓度的增加与微结构共同作用的结果。

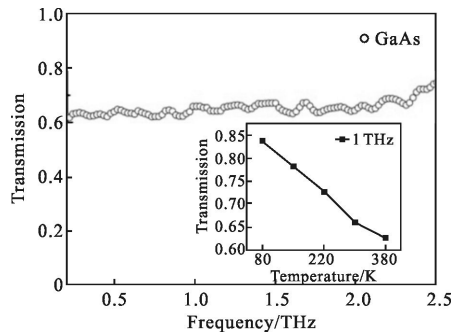


图6 室温(300 K)下 GaAs 基片的透过率

Fig.6 Spectral transmission of GaAs substrate at 300 K(RT)

## 2 结论

文中主要在 THz-TDS 系统下研究了温度对太赫兹亚波长金属结构透过率及共振特性的影响, GaAs 基底材料温度依赖的载流子浓度是最重要的影响因素。两种结构样品的透过率均表现为随温度升高而降低的趋势。其原因归结为温度升高基底载流子浓度增加, 导致透过率降低及共振减弱的竞争效果。另外,“U”型结构样品和“E”型结构样品透过率的共振带的位置随温度升高有红移现象, 这是由于温度导致样品折射率的变化。相同温度、相同频率下“U”型结构样品的透过率要高于“E”型结构样品, 前者的透过率随温度变化较大。

## 3 应用与展望

太赫兹科学技术是近二十年新兴的一个前沿领域,正处在迅速发展阶段,针对太赫兹波段设计提出的功能器件的应用正在进行。新型的、功能丰富的、高效的太赫兹功能器件不断在开发,这是太赫兹科学技术从科研领域迈向实际应用必不可少的一步。文中通过研究温度对太赫兹亚波长金属结构透过性能的影响,可以为太赫兹范围的功能器件在实际应

用和生产制造中提供有意义的参考;并且在优化器件性能等方面具有重要的实用价值。

## 参考文献:

- [1] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. *Nature Materials*, 2002, 1(1): 26-33.
- [2] Dolling G, Wegener M, Soukoulis C M, et al. Negative-index metamaterial at 780 nm wavelength[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(1): 53-55.
- [3] Padilla W J, Aronsson M T, Highstrete C, et al. Electrically resonant terahertz metamaterials: Theoretical and experimental investigations[J]. *Physical Review B*, 2007, 75(4): 041102.
- [4] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index [J]. *Science*, 2004, 305(5685): 788-792.
- [5] Soukoulis C M, Linden S, Wegener M. Negative refractive index at optical wavelengths [J]. *Science*, 2007, 315(5808): 47-49.
- [6] Zhou Q, Shi Y, Wang A, et al. Ultrafast optical modulation of terahertz metamaterials [J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(12): 125102.
- [7] Liu J, Zhou Q, Shi Y, et al. Study of L-shaped resonators at terahertz frequencies [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(24): 241911.
- [8] Liu J, Zhou Q, Shi Y, et al. Study of dipole arrays at terahertz frequencies[J]. *Optics Communications*, 2013, 291: 26-30.
- [9] Yen T J, Padilla W J, Fang N, et al. Terahertz magnetic response from artificial materials [J]. *Science*, 2004, 303(5663): 1494-1496.
- [10] Chen H T. Interference theory of metamaterial perfect absorbers[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7165-7172.
- [11] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, et al. Active terahertz metamaterial devices[J]. *Nature*, 2006, 444(7119): 597-600.
- [12] Chen H T, Padilla W J, Cich M J, et al. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(3): 148-151.
- [13] Blakemore J S. Solid State Physics[M]. 2nd ed. Philadelphia: W.B.Saunders Company, 1973.