

基于类电磁诱导透明效应的太赫兹折射率传感器

李化月 刘建军 韩张华 洪 治

(中国计量学院太赫兹技术与应用研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要 利用时域有限差分法对由闭合方环(SCL)和开口谐振环(SRR)组合构成的平面太赫兹谐振器实现的类电磁诱导透明(EIT)效应及其折射率传感器进行了仿真分析。结果表明,该类 EIT 谐振峰对周围环境介质折射率变化具有很高的灵敏度,且其 FOM(Figure of merit)值达到 4.06,优于独立 SCL 或 SRR 结构传感器的 0.09 和 2.48。利用激光诱导技术与化学镀铜技术在聚酰亚胺薄膜上加工了谐振器样品,并对其进行了透射性能测试,测试结果与仿真计算基本一致。

关键词 传感器;太赫兹谐振器;电磁诱导透明;折射率传感

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0223003

Terahertz Metamaterial Analog of Electromagnetically Induced Transparency for a Refractive-Index-Based Sensor

Li Huayue Liu Jianjun Han Zhanghua Hong Zhi

(Centre for Terahertz Research, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract The analogue of electromagnetically induced transparency (EIT) is achieved in a planar terahertz resonator consisting of a square closed loop (SCL) and a split ring resonator (SRR). Finite difference time domain simulations are carried out to analyze the EIT-like effect and its potential applications as a refractive-index-based sensor. Results show that the EIT-like resonance exhibits high refractive-index sensitivity and a high figure of merit (FOM) of 4.06, higher than that for SCL (0.09) or SRR (2.48) resonators. The refractive index and dielectric loss of the substrate, which influence the sensing performance of the SCL/SRR resonator, are studied, too. A device of the SCL/SRR resonator is fabricated by using laser-induced and chemical non-electrolytic plating with copper on polyimide film. Test results coincide with simulations.

Key words sensors; terahertz resonator; electromagnetically induced transparency; refractive index sensing

OCIS codes 300.6495; 230.5750; 160.5320; 280.4788

1 引 言

超材料凭借其独特的电磁特性,广泛应用于各种功能器件,如生物化学传感器^[1]、谐振器^[2-3]、波导调制器^[4]和滤波器^[5]等。相比自然材料,超材料最大的优势是可以随意调整器件结构,实现某些独特的电磁特性。电磁诱导透明(EIT)效应就是其中典型的一种。EIT是指原子系统中在不透明区域中产生尖锐的透射窗的现象^[6]。近年来,多种不同频段的超材料被证明也可以实现类 EIT 效应^[7-11]。

引人注目的是,这种类 EIT 效应所具有的低损耗和对周围介质折射率敏感的特性,使其可能应用于慢光和折射率传感中。Chiam 等^[12]利用两个相近谐振频率的环结构构成的太赫兹谐振器实现了类 EIT 效应,并对其慢光特性进行了分析。但目前以太赫兹波段将具有高 Q 值的类 EIT 谐振器应用于折射率传感器方面的研究还少有报道。

利用时域有限差分法对由闭合方环(SCL)和开口谐振环(SRR)组合构成的平面太赫兹谐振器实现

收稿日期: 2013-07-26; 收到修改稿日期: 2013-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(60977066,61377108)

作者简介: 李化月(1987—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹器件方面的研究。E-mail: huayueli1987@163.com

导师简介: 洪 治(1964—),男,博士,研究员,主要从事太赫兹技术方面的研究。E-mail: hongzhi@cjlu.edu.cn

(通信联系人)

的类 EIT 效应进行了仿真分析和实验验证,并对其作为折射率传感器的应用进行了研究。结果表明, SCL/SRR 谐振器具有很高的折射率灵敏度和 FOM (figure of merit) 值,可以应用于生物和化学检测领域。

2 谐振器设计与类 EIT 效应分析

图 1(a) 为谐振器结构单元示意图,由内部的开口谐振环和外部的闭合方环两部分构成,两部分中

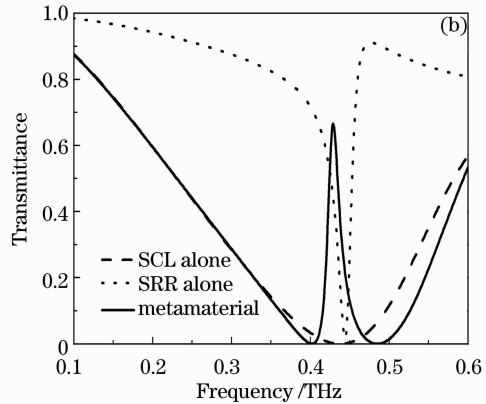
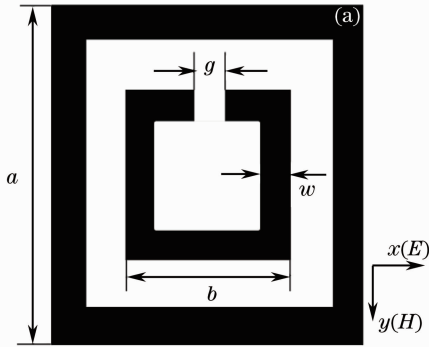


图 1 (a) 谐振单元结构示意图; (b) 单独闭合方环、开口环和组合结构透射率仿真谱

Fig. 1 (a) Schematic of the SCL/SRR unit cell; (b) simulated transmittance spectra of the SCL alone, the SRR alone, and the SCL/SRR structure

利用时域有限差分法 (CST 全波仿真软件) 对谐振器透射谱进行了仿真。仿真中, 结构单元尺寸参数分别为: $a = 160 \mu\text{m}$, $b = 74 \mu\text{m}$, $g = 8 \mu\text{m}$, $w = 10 \mu\text{m}$, $p = 200 \mu\text{m}$ 。基底材料厚度为 $50 \mu\text{m}$, 介电常数设置为 2.9。金属铜厚度为 $3 \mu\text{m}$, 电导率为 $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。电磁波传播方向垂直于结构平面, x 方向和 y 方向分别设置为电边界和磁边界条件。仿真结果如图 1(b) 所示, 三条曲线分别对应独立 SCL 结构、独立 SRR 结构和 SCL/SRR 组合结构的透射率谱。其中单独 SCL 结构和单独 SRR 结构都在 0.44 THz 处具有向下的谐振峰, 但两个谐振峰线宽差别很大。单独 SCL 结构的 Q 值 (Q 值定义为谐振峰中心频率与 3 dB 带宽的比值) 为 1.2, 单独 SRR 结构的 Q 值比单独 SCL 结构 Q 值高一个数量级, 为 16.0。实际上, 为了在由明模式和暗模式结构组合构成的超材料中实现明显的类 EIT 效应, 保证两部分谐振峰的频率相同, 且 Q 值相差很大是至关重要的。其中单独 SRR 结构时, 0.44 THz 处的谐振峰为 LC 谐振, 此频率处 SRR 金属结构表面为环形电流分布, 没有形成明显的直流电偶极矩, 表明 SRR 结构与入射电磁波谐振很弱, 被称为暗模

心对齐。参数 a 、 b 分别为两个环的边长, g 为开口的宽度, w 为金属线宽。整个单元以周期 p 在 x 、 y 方向排列。电磁波传播方向垂直于结构平面, 电场偏振方向平行于开口所在边 (平行偏振) 时, 调整结构尺寸使两部分最低模式的谐振频率相同。根据两者能否直接被外部电磁场激发, 开口谐振环和闭合方环分别为暗模式和明模式, 两种模式之间强烈的相互作用可以产生类 EIT 效应。

式^[11]。单独 SCL 结构时, 金属结构相对于电场方向对称, 可以与外部电场产生较强的谐振, 类似于一条金属线的电偶谐振^[13]。SCL/SRR 组合结构中, 两组成部分之间产生强烈的电磁作用, 在宽的不透明区域内产生了一个尖锐的透射峰。根据量子理论, 两种模式不同的激发路径之间的量子干涉效应, 使明模式中的能量传递给暗模式, 改变了暗模式的激发路径, 产生了尖锐的透明窗^[9, 12], 这就是 SCL/SRR 结构类 EIT 现象的产生机理, 且其谐振峰的 Q 值为 24.5, 较独立 SCL 和 SRR 有了很大的提高。

谐振峰强度和 Q 值对谐振器在折射率传感中的应用有重要影响, 而大部分基底材料在太赫兹波段都有损耗。为此, 对基底材料损耗对 SCL/SRR 结构谐振峰强度和 Q 值的影响进行了仿真分析, 如图 2(a)、(b) 所示。其中, 基底材料的损耗以损耗角正切 (介电常数虚部与实部的比值) 来表示, 材料介电常数实部设置为 2.9。由图 2 可知, 基底损耗对谐振峰强度和 Q 值影响很大, 基底损耗越大, 谐振峰强度越弱, Q 值越低。因此, 选择损耗小的基底材料对谐振器性能非常重要。

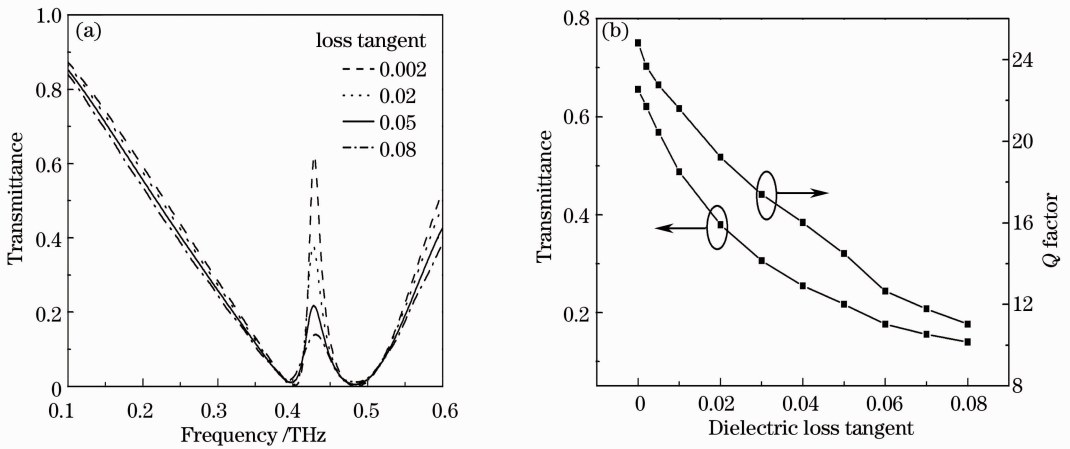


图 2 (a)基底损耗对器件谐振特性的影响；(b)谐振峰强度与 Q 值随基底介电损耗的变化

Fig. 2 (a) Influence of dielectric loss of the substrate on resonant properties; (b) dependences of resonant strength and Q-factors of the sharp resonance on dielectric loss of the substrate

3 折射率传感器仿真

SCL/SRR 谐振器中,明模式和暗模式之间强烈的电磁相互作用,使 SCL 与 SRR 结构之间聚集了高强度的电磁能量,且类 EIT 谐振峰 Q 值很高,其电磁特性类似于纳米腔。谐振峰频率位置随器件周围环境折射率变化而移动,该谐振器可以用作折射率传感器^[14-15]。

分别对三种结构的折射率传感性能进行了仿真。仿真中,假定所涂覆待测物厚度为 3 μm,折射

率为 1.0~4.0,仿真结果如图 3(a)所示。随着待测物折射率 n 的增大,类 EIT 谐振峰表现出明显的红移。图 3(b)为谐振峰频率移动与待测物折射率变化之间的关系曲线,两者呈明显的线性关系,表明该结构可以用作折射率传感器。计算得到 SCL/SRR、SRR、SCL 三种结构谐振峰折射率灵敏度分别为 46.9、48.3、34.2 GHz/RIU (RIU 为单位折射率)。因此,SCL/SRR 谐振器与暗模式 SRR 灵敏度相近,明显高于明模式 SCL 灵敏度。

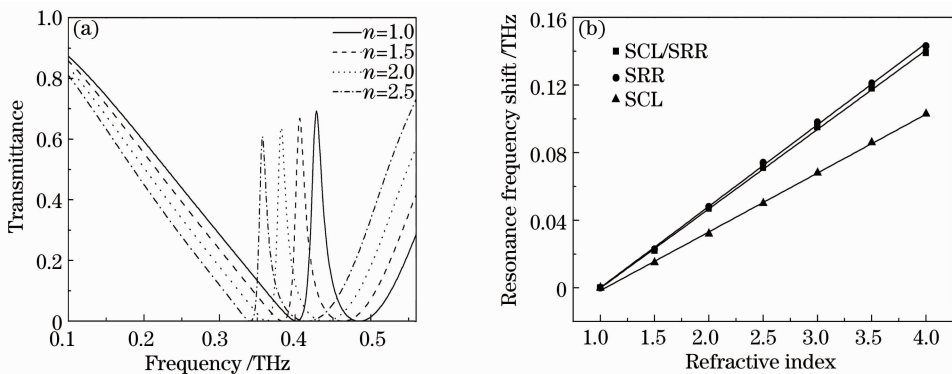


图 3 (a)折射率传感器透射率谱；(b)谐振频率变化与待测物折射率关系

Fig. 3 (a) Transmittance spectra of the refractive-index-based sensor; (b) resonance frequency shift under different refractive indices of analyte

此外,FOM 值^[15-18]是常用的评价传感器性能的参数,其定义为待测物单位折射率变化引起的谐振峰波长的变化与谐振峰 3 dB 带宽的比值。FOM 值比灵敏度多考虑了谐振峰线宽的因素。灵敏度相同,谐振峰 3 dB 带宽越小,其 FOM 值越高,表示其性能越优良。计算得到 SCL/SRR、SRR、SCL 结构 FOM 值分别为 4.06、2.48、0.09。结果表明,采用

SCL/SRR 结构的折射率传感器明显优于 SRR 结构传感器。

折射率传感应用中,基底材料折射率大小对传感器性能也有很大影响。对 SCL/SRR 结构分别以聚合物、石英和硅材料作基底时的传感性能进行了仿真对比,基底材料折射率设置为聚合物为 1.5,石英为 2.0,硅为 3.4。图 4 为三种基底材料的谐振器折射率灵敏

度曲线。计算得到,三种基底材料的折射率传感器灵敏度分别为 55.9、36.6、13.2 GHz/RIU。即基底折射率越高,谐振器折射率灵敏度越低。这是因为基底折射率越高,其在总的电容效应中所占的比重越大。这样,传感器表面涂覆待测物所引起谐振峰的频率移动越小,即传感器灵敏度越低^[3,19]。因此,介电常数较低的聚合物材料更适合作为高灵敏度折射率传

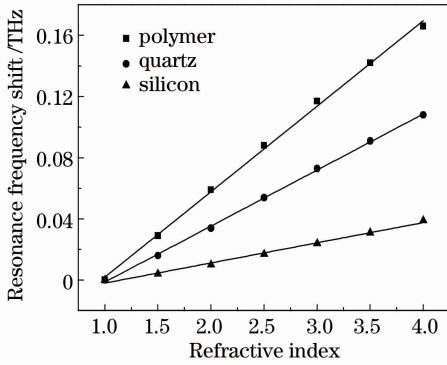


图4 聚合物、石英及高阻硅基底时谐振频率变化与待测物折射率关系

Fig. 4 Dependence of the EIT-like resonance shift on the refractive index for polymer, quartz and silicon

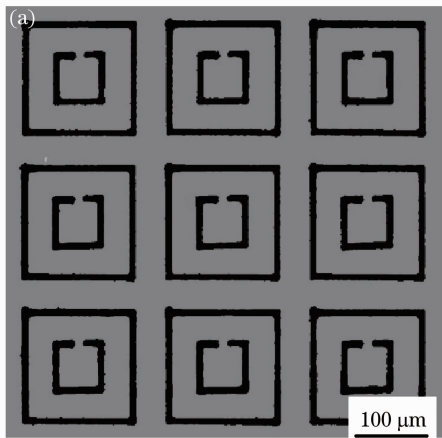


图5 (a)谐振器显微镜照片; (b)谐振器透射率谱实验测量结果与仿真对比

Fig. 5 (a) Optical micrograph of the fabricated resonator; (b) comparison between measured and simulated transmittance spectra of the SCL/SRR resonator

图5(b)为谐振器样品透射率谱实验测量结果与仿真结果对比,其中仿真中PI介电常数设为 $2.9+0.2i$ 。相比之前的无损基底仿真,样品类EIT谐振峰强度明显降低,Q值变小。实验测量与仿真结果基本相符,其中存在的一些小的偏差可能是由于金属及基底材料实际参数与仿真设置之间存在偏差和样品尺寸偏差引起的。

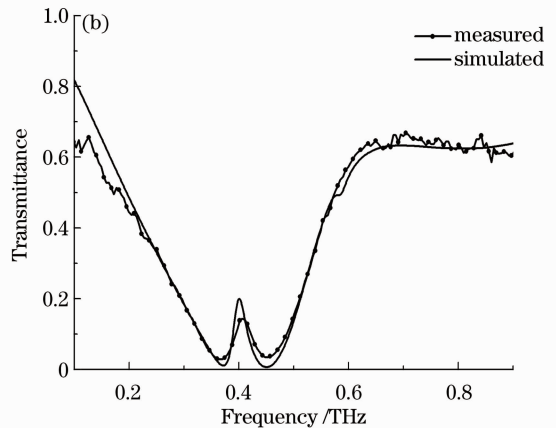
目前超材料应用于折射率传感器方面的报道多

传感器基底。

4 谐振器实验结果与生化传感应用分析

为了实验验证 SCL/SRR 谐振器的 EIT 效应,利用激光诱导与化学镀铜技术在 $50\ \mu\text{m}$ 厚的聚酰亚胺(PI)薄膜上制备了谐振器样品。该制备工艺具有流程简单、制作灵活等优点,详细加工步骤见文献[20–21]。PI 因为具有柔软性和在太赫兹波段介电常数较小的优点,常被用作太赫兹超材料基底和介电材料^[22]。所制备样品整体尺寸为 $1\ \text{cm}\times 1\ \text{cm}$,图5(a)为样品显微镜照片。经 Dektek150 型台阶仪测量,样品铜线厚度(包括银层)为 $3\ \mu\text{m}$ 。

利用太赫兹时域光谱系统 (THz-TDS) 对样品进行了透射性能测试。太赫兹波入射方向垂直于样品平面,电场偏振方向平行于开口所在边。测试过程中,样品处于干燥氮气环境中,相对湿度低于 1%,降低了空气中水蒸气对测试结果的干扰。环境温度为室温。相同条件下无样品的透射谱作为参考信号。为了提高频谱分辨率从而实现高 Q 的类 EIT 谐振峰测量,TDS 的时域采样窗口时间超过 100 ps,对应频域分辨率优于 10 GHz。



为验证性实验研究,如文献[2–3],用纳米硅球或光刻胶等作为实验应用对象,而在生物化学传感方面的应用性实验研究鲜有报道。主要原因有两个,一是传感器灵敏度及 FOM 还不够高。本文 SCL/SRR 结构传感器折射率灵敏度和 FOM 值分别为 46.9、4.06 GHz/RIU,文献[3]中硅、聚酯薄膜基底传感器灵敏度分别为 10.8、61.5 GHz/RIU。文献[14,16–17]中传感器的 FOM 值分别为 2.86、2.4、

4. 68 GHz/RIU。后续还需要通过选择介电常数和损耗更小的材料作基底,进一步提高其传感性能。二是实验室常用的 THz-TDS 系统频谱分辨率较低,一般为 10 GHz 左右,要达到 1 GHz 的分辨率已经非常困难^[23],但仍然不足以开展生化样品的定量测量。高分辨率光谱测量可采用返波振荡器(BWO)的太赫兹谱分析系统,其频谱分辨率优于 5 MHz。但由于 BWO 输出功率在频谱扫描时的快速变化,必须采用实时双路比较法^[24]进行测量实验。因此,提高传感器件性能,并针对不同的传感应用研究对象,设计合理的实验体系,搭建基于 BWO 的实时双路比较法检测系统,实现传感器在生化传感方面的应用将成为后续工作的重点。

5 结 论

对一个由闭合方环和开口谐振环组合构成的太赫兹谐振器实现的类 EIT 效应及其折射率传感器进行了仿真分析。结果表明,该类 EIT 谐振峰对周围环境介质折射率变化具有很高的灵敏度,且其 FOM 值达到 4.06,优于独立 SCL 或 SRR 结构传感器的 0.09 和 2.48。分析了 SCL/SRR 谐振器基底材料折射率和损耗对传感性能的影响,结果表明选择低折射率和低损耗基底材料有利于提高传感器性能。实验制作了谐振器样品,并对其进行了太赫兹时域透射谱测试,验证了其具有类 EIT 效应,为其应用于生物化学等检测提供了一定的参考。

参 考 文 献

- Xu Xinlong, Bo Peng, Li Dehui, *et al.*. Flexible visible-infrared metamaterials and their applications in highly sensitive chemical and biological sensing [J]. *Nano Lett*, 2011, 11(8): 3232–3238.
- T Driscoll, G O Andreev, D N Basov, *et al.*. Tuned permeability in terahertz split-ring resonators for devices and sensors [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 91(6): 062511.
- Chen Yongyao, Ibraheem A I Al-Naib, Gu Jianqiang, *et al.*. Membrane metamaterial resonators with a sharp resonance: a comprehensive study towards practical terahertz filters and sensors [J]. *AIP Advances*, 2012, 2(2): 022109.
- X Piao, S Yu, N Park. Control of Fano asymmetry in plasmon induced transparency and its application to plasmonic waveguide modulator [J]. *Opt Express*, 2012, 20(17): 18994–18999.
- Liang Lanju, Yao Jianquan, Yan Xin. Ultrabroad terahertz bandpass filter based on a multiple-layered metamaterial with flexible substrates [J]. *Chin Phys Lett*, 2012, 29(9): 094209.
- M Fleischhauer, A Imamoglu, Jonathan P Marangos. Electromagnetically induced transparency: optics in coherent media [J]. *Rev Mod Phys*, 2005, 77(2): 633–673.
- P Tassin, Zhang Lei, Th Koschny, *et al.*. Low-loss metamaterials based on classical electromagnetically induced

- transparency[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, 102(5): 053901.
- P Tassin, Zhang Lei, T Koschny, *et al.*. Planar designs for electromagnetically induced transparency in metamaterials [J]. *Opt Express*, 2009, 17(7): 5595–5605.
- Dong Zhenggao, Liu Hui, Cao Jingxiao, *et al.*. Enhanced sensing performance by the plasmonic analog of electromagnetically induced transparency in active metamaterials [J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 97(11): 114101.
- R Singh, C Rockstuhl, F Lederer, *et al.*. Coupling between a dark and a bright eigenmode in a terahertz metamaterial [J]. *Phys Rev B*, 2009, 79(8): 085111.
- Chen Lin, Gao Chunmei, Xu Jiaming, *et al.*. Observation of electromagnetically induced transparency-like transmission in terahertz asymmetric waveguide-cavities systems [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(9): 1379–1381.
- S Y Chiam, R Singh, C Rockstuhl, *et al.*. Analogue of electromagnetically induced transparency in a terahertz metamaterial [J]. *Phys Rev B*, 2009, 80(15): 153103.
- T Koschny, M Kafesaki, E N Economou, *et al.*. Effective medium theory of left-handed materials [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 93(10): 107402.
- Wang Junqiao, Fan Chunzhen, He Jinna, *et al.*. Double Fano resonances due to interplay of electric and magnetic plasmon modes in planar plasmonic structure with high sensing sensitivity [J]. *Opt Express*, 2013, 21(2): 2236–2244.
- Chai-Yun Chen, Leng-Wai Un, Nyan-Hwa Tai, *et al.*. Asymmetric coupling between subradiant and superradiant plasmonic resonances and its enhanced sensing performance [J]. *Opt Express*, 2009, 17(17): 15372–15380.
- L J Sherry, S H Chang, G C Schatz, *et al.*. Localized surface plasmon resonance spectroscopy of single silver nanocubes [J]. *Nano Lett*, 2005, 5(10): 2034–2038.
- S Raza, G Toscano, A-P Jauho, *et al.*. Refractive-index sensing with ultra-thin plasmonic nanotubes [J]. *Plasmonics*, 2013, 8(2): 193–199.
- Jian Ye, Pol Van Dorpe. Improvement of figure of merit for gold nanobar array plasmonic sensors [J]. *Plasmonics*, 2011, 6(4): 665–671.
- J F O'Hara, R Singh, I Brener, *et al.*. Thin-film sensing with planar terahertz metamaterials: sensitivity and limitations [J]. *Opt Express*, 2008, 16(3): 1786–1795.
- Wang Wentao, Liu Jianjun, Li Xiangjun, *et al.*. Direct fabrication of terahertz polarizer and filter by laser induced and non-electrolytic plating with copper [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1231002.
王文涛, 刘建军, 李向军, 等. 激光诱导和化学镀铜制备太赫兹线栅偏振器和滤波器[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1231002.
- Wang Wentao, Liu Jianjun, Hong Zhi. Terahertz multiband terahertz filter based on three nested closed rings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0323001.
王文涛, 刘建军, 洪治. 基于三个方形封闭谐振环的多频带太赫兹滤波器[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0323001.
- Hu Tao, A C Strikwerda, K Fan, *et al.*. Terahertz metamaterials on free-standing highly-flexible polyimide substrates [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2008, 41(23): 232004.
- S Sree Harsha, D Grischkowsky. Terahertz (far-infrared) characterization of tris(hydroxymethyl) aminomethane using high-resolution waveguide THz-TDS [J]. *J Phys Chem A*, 2010, 114(10): 3489–3494.
- Wang Wei, Shi Weibo, Ma Wuxi, *et al.*. Study on the concentration measurement of glucose solution with terahertz two-path transmission method [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2010, 31(6): 567–570.
汪伟, 施卫博, 马无锡, 等. 太赫兹波双路比较法葡萄糖溶液浓度测量研究[J]. *计量学报*, 2010, 31(6): 567–570.