

# 柔性可弯曲人工超构材料太赫兹波超吸收研究

潘晓航<sup>1,2</sup>, 许昊<sup>2\*</sup>, 俞伟伟<sup>2</sup>, 沈宏<sup>2</sup>, 郝加明<sup>2</sup>, 孙艳<sup>2</sup>, 沈悦<sup>1</sup>, 孟祥建<sup>2</sup>, 戴宁<sup>2</sup>

(1. 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

**摘要:**近年来,由亚波长人工微结构单元组成的超构材料,因其具有自然材料所不具备的奇特物理性质,吸引了人们的广泛关注.其中最有趣的应用之一就是利用亚波长人工微结构增强对电磁波的吸收.设计并实现了一种人工超构材料柔性可弯曲的高性能太赫兹吸收器.为了实现最优的结构设计,分别对器件的结构周期、金属条宽度、介质层厚度和材料光学性质等关键结构及材料参数进行了系统优化.实验结果显示在频率 3 THz 附近器件峰值吸收率高达 99%,与数值模拟结果相吻合.

**关键词:**人工微结构;超吸收;太赫兹;柔性

**中图分类号:**TN214 **文献标识码:**A

## Flexible metasurface-based Terahertz super-absorber

PAN Xiao-Hang<sup>1,2</sup>, XU Hao<sup>2\*</sup>, YU Wei-Wei<sup>2</sup>, SHEN Hong<sup>2</sup>, HAO Jia-Ming<sup>2</sup>,  
SUN Yan<sup>2</sup>, SHEN Yue<sup>1</sup>, MENG Xiang-Jian<sup>2</sup>, DAI Ning<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** In recent years, Metamaterials, artificial electromagnetic materials that are constructed by sub-wavelength units, have demonstrated unusual abilities to manipulate electromagnetic waves and promised many potential applications. One of the most intriguing applications of metamaterials is to function as high performance absorbing medium. In this work, a new type of plasmonic flexible metasurface-based super-absorber for Terahertz waves is designed, fabricated and characterized. Dependences of absorption on the optical properties of component materials and geometric parameters are optimized by full-wave numerical simulations, and then confirmed by experiments. Experimental results show that an absorption peak value of 99% is obtained at the frequency of 3 THz, which are in good agreement with numerical simulations.

**Key words:** artificial electromagnetic materials, super-absorber, terahertz wave, flexible

**PACS:** 78.68.+m, 42.15.Eq, 85.50.-n

## 引言

太赫兹波通常是指频率范围为 0.1 ~ 10 THz 的电磁波.因其具有一系列有别于其它波段独特的物理性质<sup>[1]</sup>,如相比于无线电、微波、太赫兹频段更宽所能携带的信息更大;可穿透非金属及非极性物质;

其能量与生物大分子本征振动、转动能级等相对应,因此在通信<sup>[2]</sup>、安防检测<sup>[3]</sup>、生物<sup>[4-5]</sup>、化学<sup>[6]</sup>、医学<sup>[7]</sup>等众多领域有重要的应用前景.不过与微波及红外、可见光相比,传统的电子学和光子学器件受限于各自工作机制在太赫兹波段已很难甚至不再适用<sup>[8-9]</sup>.研究工作于该频段的各类器件、发展相关技

收稿日期:2018-06-05,修回日期:2018-12-05

Received date: 2018-06-05, revised date: 2018-12-05

基金项目:国家自然科学基金项目(61471345);上海市“科技创新行动计划”(14PJ1409500)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61471345); Shanghai Science and Technology Committee (14PJ1409500)

作者简介(Biography):潘晓航(1991-),女,河南汝州人,硕士研究生,超构材料微结构增强吸收. E-mail: xhpan@shu.edu.cn

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: haoxu@mail.sitp.ac.cn

术方法是现今国际前沿研究热点. 其中如何简单高效地减小太赫兹波反射、增强吸收等更是当前急待解决的基础问题<sup>[10-11]</sup>.

近年来, 由亚波长人工微结构单元组成的超构材料, 因其具有自然材料所不具备的奇特物理性质, 在众多科技领域引起了人们的广泛关注<sup>[12-15]</sup>. 通过设计对电磁场具有特殊响应的人工微结构, 并对结构的几何参数进行调节, 几乎可以实现任意等效的介电常数和磁导率, 从而实现对电磁波的调控<sup>[16]</sup>. 超构材料的这种特性使其能够在不同的器件中扮演重要的角色, 其中一个重要的应用就是超吸收器件<sup>[17-19]</sup>. 超构材料的出现为太赫兹器件的发展提供了机遇, 基于超构材料的太赫兹传感、探测、和吸收等器件已陆续出现<sup>[20-22]</sup>. 超构材料在太赫兹技术的发展中有巨大的发展潜力<sup>[23]</sup>.

基于超构材料理念, 设计并制备了太赫兹波段柔性可弯曲高性能吸收器件. 采用金属微结构-介质层-金属薄膜三层结构体系, 其中顶层为铝金属条状结构, 中间介质层材料为聚偏氟乙烯二元聚合物(P(VDF-TrFE)), 底层为 100nm 厚的铝薄膜. P(VDF-TrFE)是一种有机的铁电材料, 具有铁电性、压电性、热释电性等特性, 可用于制备铁电存储器、压电传感器、热释电探测器等<sup>[24-25]</sup>. 通过对金属条状结构周期、金属条宽度、介质层厚度和材料光学性质等关键结构及材料参数进行系统优化, 获得最优的超吸收结构参数并总结出参数变化对吸收峰的影响规律. 实验结果显示, 我们制备的超吸收样品在太赫兹波段峰值吸收率超过 99%, 与数值模拟结果完美吻合.

## 1 实验设计

### 1.1 数值计算仿真

如图 1(a)所示, 太赫兹超吸收器件由三层结构组成, 其中, 顶层为铝金属条状结构, 金属条的宽度为  $w$ , 厚度为  $t_3$ , 周期为  $p$ ; 底层是厚度为  $t_1$  的铝薄膜; 中间为绝缘介质层, 其厚度和介电常数分别用  $t_2$  和  $\epsilon$  表示. 本文中数值计算所用的工具为 Lumerical, Inc. 公司基于时域有限差分方法开发的全波数值仿真软件 FDTD Solutions. 数值模拟计算所用的金属为铝在太赫兹波段的损耗模型, 其电导率  $6d = 10^6$  S/m, 聚偏氟乙烯二元聚合物 P(VDF-TrFE) 薄膜为介质层材料, 介电常数  $\epsilon = 2.2$ <sup>[26]</sup>. 因设计的结构单元具有亚波长特性, 因此体系无高阶衍射, 则器件的吸收率(A)可利用公式  $A = 1 - T - R$  来进行计算,  $T$

和  $R$  分别表示透射率和反射率. 这里, 底层金属的厚度  $t_1$  通常设为 100 nm, 该厚度远大于太赫兹波的趋肤深度, 因此器件透射率为 0, 器件的吸收率可简单地利用公式  $A = 1 - R$  求得. 本文对上述一系列参数进行模拟优化, 分析改变不同参数对吸收峰峰位和强度的调制并总结其变化规律, 并设计合适的结构实现在特定频率  $R$  为 0, 即在该频率处实现全吸收.

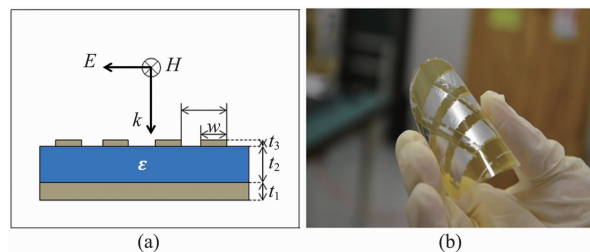


图 1 金属微结构-介质层-金属薄膜三层超吸收器件 (a) 几何结构示意图, (b) 实验制备的柔性样品图

Fig. 1 Terahertz super-absorber (a) Schematic of the metal-dielectric-metal (MIM) Terahertz super-absorber, (b) Photograph of a flexible experimental sample

### 1.2 主要仪器设备及耗材原料

配比为 70/30 的聚偏氟乙烯二元聚合物 P(VDF-TrFE) 溶液; 去离子超纯水 (简称  $H_2O$ , Millipore: 18 M $\Omega$  提纯); 丙酮, 无水乙醇等试剂为分析纯; 聚酰亚胺溶液; 电子束蒸发设备 (铝颗粒, High Vacuum E-beam evaporation system, Kurt J. Lesker); 尼康光学显微镜; 太赫兹时域光谱仪 (TAS7400TS, ADVANTEST).

### 1.3 超吸收器样品制备流程

单面抛光硅片 (3 inch) 作为衬底. 经过丙酮、酒精、去离子水的顺序超声清洗各三次, 并用氮气吹干. 将聚酰亚胺溶液旋涂在硅衬底上, 置于烘箱中退火, 分别在 80、120、150、250  $^{\circ}C$  的温度下退火 1 小时. 利用电子束蒸发镀膜仪在聚酰亚胺薄膜上镀 100 nm 以上的铝 (Al) 薄膜. 随后将配好的 P(VDF-TrFE) 溶液旋涂到铝薄膜上, 共旋涂 25 层, 得到厚度约为 2.6  $\mu m$  的 P(VDF-TrFE) 薄膜. 每旋涂一层后将样品放置于 110  $^{\circ}C$  的烘箱中退火 10 min, 全部旋涂结束后将样品放入 135  $^{\circ}C$  的烘箱中退火 4 小时, 来提高介质层薄膜的结晶性能. 用紫外光刻的方法将周期分别为 40  $\mu m$ 、45  $\mu m$ 、50  $\mu m$  且宽度为 30  $\mu m$  的金属条状结构图案转移到 P(VDF-TrFE) 薄膜上. 将光刻后的样品放入电子束蒸发设备中蒸镀 50 nm 的铝薄膜, 最后放入乙醇溶液中浸泡 2 h 去胶. 因为介质层为有机薄膜, 所

以不能放入常用的丙酮溶液中剥离,否则会溶解介质层.剥离后得到不同周期的金属条状结构样品.最后将样品从 Si 衬底上揭下来,得到柔性的超吸收器件,如图 1(b)所示.

## 2 结果与讨论

### 2.1 超吸收结构的优化

金属条状结构是具有偏振选择性的,仿真模拟中入射光为垂直入射的横磁模式(TM model),即磁场方向垂直于入射面,当入射角发生变化时,磁场方向保持不变.本文设计了一个目标吸收频率为 3.0 THz 的超吸收结构.图 2 是对不同的结构参数和材料介电常数优化模拟得到的一系列吸收光谱,其中样品的透射率均为 0,不考虑高阶散射的影响.当固定吸收结构的参数为  $w = 30 \mu\text{m}$ ,  $\varepsilon = 2.2$ ,  $t_1 = 100 \text{ nm}$ ,  $t_2 = 2.6 \mu\text{m}$ ,  $t_3 = 50 \text{ nm}$ ,仅改变微结构的周期  $p$ ,随着  $p$  的增大,图 2(a)中光谱的吸收峰峰位向高频方向发生微小移动,强度先增大后减小,当  $p = 50 \mu\text{m}$  时达到最大值,而  $p = 35 \mu\text{m}$  时峰位更加偏向于低频,这是由于金属条之间距离较近产生相互作用引起的.当固定吸收结构的参数为  $p = 50 \mu\text{m}$ ,  $w = 30 \mu\text{m}$ ,  $\varepsilon = 2.2$ ,  $t_1 = 100 \text{ nm}$ ,  $t_3 = 50 \text{ nm}$ ,仅改变介质层的厚度  $t_2$ ,随着  $t_2$  的增大,图 2(b)中吸收峰的峰位向低频发生微小偏移,强度先增大后减小,当  $t_2 = 2.6 \mu\text{m}$  时吸收强度达到最大.当固定吸收结构的参数为  $p = 50 \mu\text{m}$ ,  $\varepsilon = 2.2$ ,  $t_1 = 100 \text{ nm}$ ,  $t_2 = 2.6 \mu\text{m}$ ,  $t_3 = 50 \text{ nm}$ ,仅改变金属条的宽度  $w$ ,随着金属条宽度的增加,图 2(c)中吸收峰的峰位明显的向低频移动,吸收峰的强度整体变化较小,当  $w = 30 \mu\text{m}$  时吸收强度达到最大值.当固定吸收结构的参数为  $p = 50 \mu\text{m}$ ,  $w = 30 \mu\text{m}$ ,  $t_1 = 100 \text{ nm}$ ,  $t_2 = 2.6 \mu\text{m}$ ,  $t_3 = 50 \text{ nm}$ ,仅改变介质层材料时,即改变介电常数  $\varepsilon$ ,随着介电常数  $\varepsilon$  的增大,图 2(d)中吸收峰的峰位明显的向低频移动,吸收峰的强度整体变化较小,当  $\varepsilon = 2.2$  时吸收强度达到最大值.综上所述,在金属条状超吸收结构的设计过程中,金属条的宽度和介质层材料的介电常数主要影响吸收峰的峰位,介质层的厚度和金属条状结构的周期主要影响吸收峰的强度.要实现吸收峰向高频移动,可以减小金属条的宽度或选择具有较小介电常数的介质层材料,同时要考虑介质层的厚度对吸收峰峰位和强度的影响.当确定吸收峰峰位后可通过调节金属条状结构的周期和介质层的厚度对结构进行优化,实现在目标频率处的完美吸收.通过调节器件结构的几何参数和选

择合适的材料可以实现对任意电磁波频率的完美吸收.

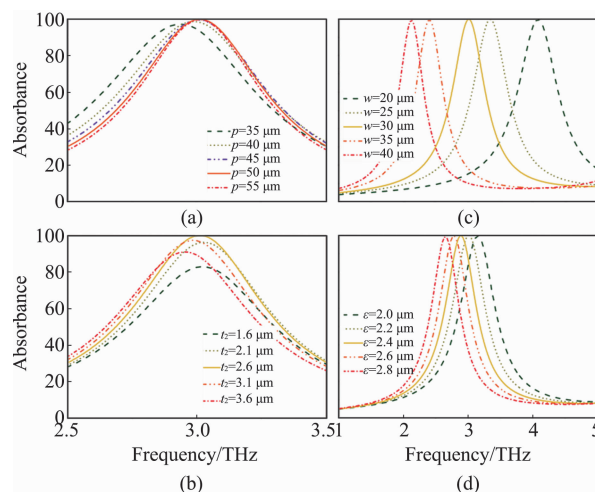


图 2 数值仿真得到的不同结构几何参数和介质层材料的吸收光谱。(a)金属条  $w = 30 \mu\text{m}$ , 介质层厚度  $t_2 = 2.6 \mu\text{m}$ , 介电常数  $\varepsilon = 2.2$ , 改变金属条状结构的周期  $p = 35\text{--}55 \mu\text{m}$ ; (b)金属条状结构周期  $p = 50 \mu\text{m}$ , 金属条  $w = 30 \mu\text{m}$ , 介电常数  $\varepsilon = 2.2$ , 改变介质层的厚度  $t_2 = 1.6\text{--}3.6 \mu\text{m}$ ; (c)金属条状结构周期  $p = 50 \mu\text{m}$ , 介质层厚度  $t_2 = 2.6 \mu\text{m}$ , 介电常数  $\varepsilon = 2.2$ , 改变金属条的宽度  $w = 20\text{--}40 \mu\text{m}$ ; (d)金属条状结构周期  $p = 50 \mu\text{m}$ , 金属条  $w = 30 \mu\text{m}$ , 介质层厚度  $t_2 = 2.6 \mu\text{m}$ , 改变介质层材料的介电常数  $\varepsilon = 2.0\text{--}2.8$

Fig. 2 Simulation results with different parameters. (a) Absorbance spectra of the samples with width of metal strip  $w = 30 \mu\text{m}$ , thickness of spacer  $t_2 = 2.6 \mu\text{m}$ , permittivity of spacer  $\varepsilon = 2.2$  and variable period of metal strip  $p$  from  $35 \mu\text{m}$  to  $55 \mu\text{m}$ . (b) Absorbance spectra of the samples with period of metal strip  $p = 50 \mu\text{m}$ , width of metal strip  $w = 30 \mu\text{m}$ , permittivity of spacer  $\varepsilon = 2.2$  and variable thickness of spacer  $t_2$  from  $1.6 \mu\text{m}$  to  $3.6 \mu\text{m}$ . (c) Absorbance spectra of the samples with period of metal strip  $p = 50 \mu\text{m}$ , thickness of spacer  $t_2 = 2.6 \mu\text{m}$ , permittivity of spacer  $\varepsilon = 2.2$  and variable width of metal strip  $w$  from  $20 \mu\text{m}$  to  $40 \mu\text{m}$ . (d) Absorbance spectra of the samples with period of metal strip  $p = 50 \mu\text{m}$ , width of metal strip  $w = 30 \mu\text{m}$  and variable permittivity of spacer  $\varepsilon$  from 2 to 2.8

### 2.2 电磁场分布

通过上文可知当超吸收结构参数为  $p = 50 \mu\text{m}$ ,  $w = 30 \mu\text{m}$ ,  $t_3 = 50 \text{ nm}$ ,  $t_2 = 2.6 \mu\text{m}$ ,  $\varepsilon = 2.2$  时,在  $f = 3.0 \text{ THz}$  频率处有最大吸收.图 3(a)为上述结构参数在太赫兹波段的吸收光谱.为了探究吸收峰产生的原因,我们对吸收峰的场分布进行研究.图 3(b)为  $f = 3.0 \text{ THz}$  处的电场强度分布图,可以看出,在金属条的两侧与底层金属薄膜之间有较强的电场分布,这是由于金属条两侧与底层金属之间的偶极子共振引起.图 3(c)为  $f = 3.0 \text{ THz}$  处的磁场强度分布图,可以看出,在金属条的中部与底层金属薄膜之

间存在强的磁场共振. 吸收效应主要是由受激发的局域电场和磁场共振引起的.

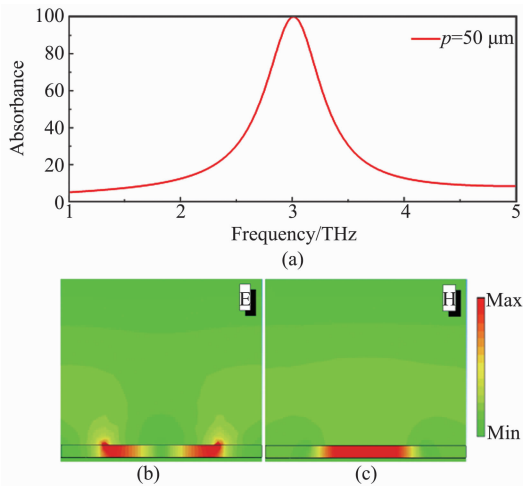


图3 (a)金属-介质-金属三层超吸收结构在太赫兹频率的吸收光谱;(b)在  $f = 3.0$  THz 处超吸收结构中的电场强度分布;(c)为在  $f = 3.0$  THz 处超吸收结构中的磁场强度分布. TM 偏振的电磁波垂直于样品入射  
Fig. 3 (a) Simulated absorbance spectra for the MIM absorber. Both, (b) Electric field distributions and (c) Magnetic field distributions at  $f = 3.0$  THz

### 2.3 实验验证

根据上文设计的超吸收结构,按照 1.3 中所述实验流程,实验上利用聚偏氟乙烯二元聚合 P (VDF-TrFE) 薄膜作为介质层,制备了一组不同周期的金属条状结构超吸收样品,其周期分别为  $p = 40, 45, 50 \mu\text{m}$ ,如图 4 右侧为实验样品对应的显微光学图片.其中暗黄色为上表面的铝条状光栅,可以看出  $50 \text{ nm}$  厚的铝薄膜均匀连续,金属条边界清晰,周期完整.利用太赫兹时域光谱仪对制备的不同周期微结构的样品进行光谱表征并与数值模拟的结果进行比较.太赫兹时域光谱仪的光源为 TM 偏振光,光谱测试分辨率为  $7.6 \text{ GHz}$ ,入射角为  $10$  度.图 4 左侧两列分别为实验测得的光谱及仿真模拟的光谱.实验制备的三个样品在  $f = 3.05 \text{ THz}$  附近均有较高的吸收,峰值均大于  $94\%$ ,当  $p = 50 \mu\text{m}$  时,吸收峰强度达到  $99\%$ .随着样品周期的增大,吸收峰的峰位向高频方向发生了微小移动.模拟计算的结果与实验结果有相同的峰位变化规律.两者吸收峰的峰位有所偏差,这种偏差可能是由于实验测试的入射角度、实验中介质层材料的厚度和实验误差所导致的.

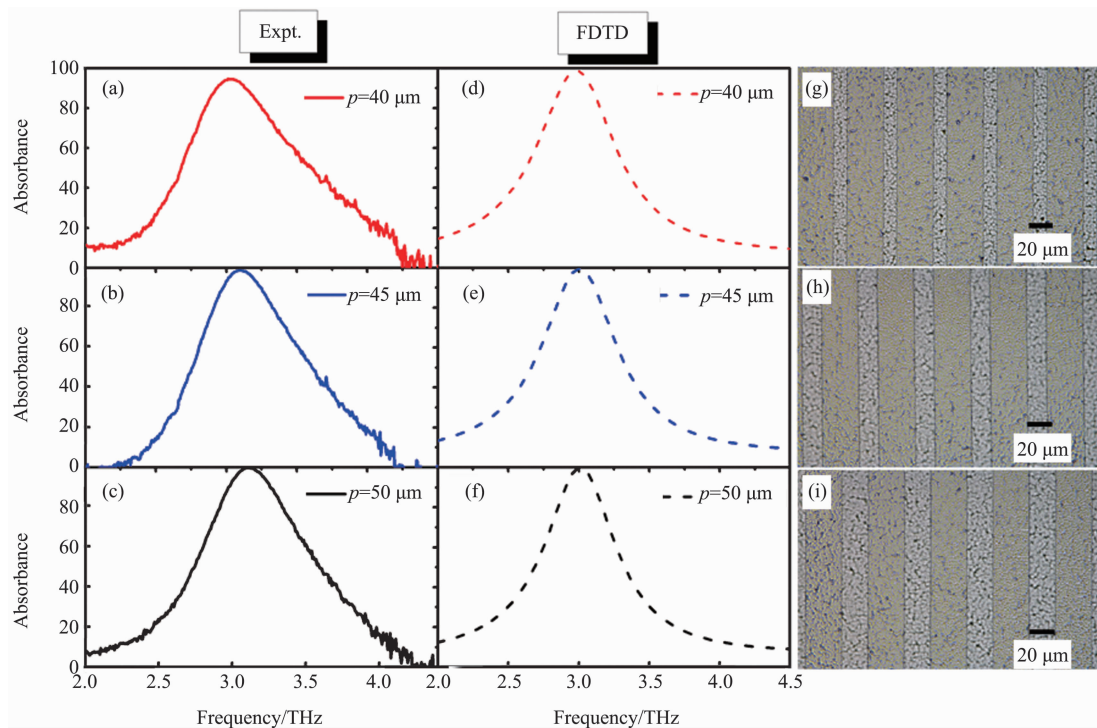


图 4 实验和模拟得到的吸收光谱和微结构的显微图像. (a), (b), (c) 为实验测得的金属条状结构周期  $p = 40, 45, 50 \mu\text{m}$  的吸收光谱图;(d), (e), (f) 为数值模拟得到的金属条状结构周期  $p = 40, 45, 50 \mu\text{m}$  的吸收光谱图, (g), (h), (i) 为三个样品的显微图像

Fig. 4 Measured and simulated absorbance spectra for the samples with different period  $p$ . Experimental result for (a)  $p = 40 \mu\text{m}$ , (b)  $p = 45 \mu\text{m}$  and (c)  $p = 50 \mu\text{m}$ . Numerical result for (d)  $p = 40 \mu\text{m}$ , (e)  $p = 45 \mu\text{m}$  and (f)  $p = 50 \mu\text{m}$ . Microscopic images for sample with (g)  $p = 40 \mu\text{m}$ , (h)  $p = 45 \mu\text{m}$  and (i)  $p = 50 \mu\text{m}$

### 3 总结

报道了一种柔性可弯曲高性能太赫兹超吸收器件,并通过实验进行验证.超吸收器件所采用结构为金属微结构-介质层-金属薄膜层三层结构,文中以金属条状结构作为金属微结构层进行研究.通过改变超吸收结构的几何参数和介质层材料,实现对吸收峰的峰位和强度的调控.微结构周期和介质层厚度主要影响吸收峰的强度,金属条的宽度和介质层材料的介电常数主要影响吸收峰峰位.可根据目标共振峰与设计得到的共振峰进行对比,通过调节吸收器的几何结构参数或选择合适的介质层材料实现超吸收结构设计.在实验上制备了一组具有不同周期的金属条状结构柔性吸收器件,实验上达到 99% 的吸收,与模拟结果一致.同时也从理论上分析了产生这种超高吸收的物理起因.将铁电薄膜与超吸收器件相结合有望在太赫兹光电探测上得到进一步发展.

### References

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(2): 97–105.
- [2] Kleine-Ostmann T, Nagatsuma T. A Review on Terahertz Communications Research[J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2011, **32**(2): 143–171.
- [3] Anonymous. Terahertz Physics, Devices and Systems X: Advanced Applications in Industry and Defense[C]. Baltimore: Proceedings of the SPIE, 2016.
- [4] Fischer B M, Walther M, Jepsen P U. Far-infrared vibrational modes of DNA components studied by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2002, **47**(21): 3807–3814.
- [5] Woodward R M, Cole B E, Wallace V P, et al. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2002, **47**(21): 3853–3863.
- [6] Smye S W, Chamberlain J M, Fitzgerald A J, et al. The interaction between Terahertz radiation and biological tissue [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2001, **46**(9): R101–R112.
- [7] Siegel P H. Terahertz technology in biology and medicine [J]. *Ieee Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2004, **52**(10): 2438–2447.
- [8] CAO Jun-Cheng, Research progress of terahertz sources and detectors[J]. *Journal of Functional Materials and Devices* (曹俊诚. 太赫兹辐射源与探测器研究进展. *功能材料与器件学报*), 2003(02): 111–117.
- [9] ZHAO Guo-Zhong. Progress on terahertz science and technology[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology* (赵国忠. 太赫兹科学技术研究的新进展. *国外电子测量技术*), 2014, **33**(02): 1–6.
- [10] Ye Yu-Quan, Jin Yi, He Sai-lin. Omnidirectional, polarization-insensitive and broadband thin absorber in the terahertz regime[J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 2010, **27**(3): 498–504.
- [11] Diem M, Koschny T, Soukoulis C M. Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime[J]. *Physical Review B*, 2009, **79**(3): 033101.
- [12] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. *Physical Review Letters*, 1996, **76**(25): 4773–4776.
- [13] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. *Physical Review Letters*, 2000, **84**(18): 4184–4187.
- [14] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index [J]. *Science*, 2004, **305**(5685): 788–792.
- [15] Schedin F, Geim A K, Morozov S V, et al. Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene[J]. *Nature Materials*, 2007, **6**(9): 652–655.
- [16] Szabo Z, Park G-H, Hedge R, et al. A Unique Extraction of Metamaterial Parameters Based on Kramers-Kronig Relationship[J]. *Ieee Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, **58**(10): 2646–2653.
- [17] Tao H, Landy N I, Bingham C M, et al. A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(10): 7181–7188.
- [18] Liu X, Starr T, Starr A F, et al. Infrared Spatial and Frequency Selective Metamaterial with Near-Unity Absorbance [J]. *Physical Review Letters*, 2010, **104**(20): 207403.
- [19] Hao J, Zhou L, Qiu M. Nearly total absorption of light and heat generation by plasmonic metamaterials [J]. *Physical Review B*, 2011, **83**(16).
- [20] Xu X, Peng B, Li D, et al. Flexible Visible-Infrared Metamaterials and Their Applications in Highly Sensitive Chemical and Biological Sensing[J]. *Nano Letters*, 2011, **11**(8): 3232–3238.
- [21] Singh R, Cao W, Al-Naib I, et al. Ultrasensitive terahertz sensing with high-Q Fano resonances in metasurfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **105**(17): 5.
- [22] Zhu J, Ma Z, Sun W, et al. Ultra-broadband terahertz metamaterial absorber [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **105**(2): 021102.
- [23] LIU Yi, PENG Xiao-yu, WANG Zuo-bin, et al. Terahertz-wave Absorber Based on Metamaterial [J]. *Infrared Technology* (刘毅, 彭晓昱, 王作斌等, 基于超材料的太赫兹波吸波材料. *红外技术*), 2015, **37**(09): 756–763.
- [24] Neese B, Chu B, Lu S-G, et al. Large electrocaloric effect in ferroelectric polymers near room temperature [J]. *Science*, 2008, **321**(5890): 821–823.
- [25] Lang S B, Muensit S. Review of some lesser-known applications of piezoelectric and pyroelectric polymers [J]. *Applied Physics a-Materials Science & Processing*, 2006, **85**(2): 125–134.
- [26] Bai M, Poulsen M, Sorokin A V, et al. Infrared spectroscopic ellipsometry study of vinylidene fluoride (70%) -trifluoroethylene (30%) copolymer Langmuir-Blodgett films [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, **94**(1): 195–200.