

文章编号: 2095-4980(2019)02-0205-04

基于导电聚合物的太赫兹频率选择表面

都 妍, 武亚君, 张 元, 霍熠炜

(上海无线电设备研究所 电磁散射重点实验室, 上海 200438)

摘 要: 导电聚合物材料聚 3,4-乙撑二氧噻吩(PEDOT): 聚 4-苯乙烯磺酸盐(PSS)是一种在太赫兹波段很有潜力的多功能材料。为了验证其代替金属应用于太赫兹超材料(MMs)中的可能性, 设计了一个基于二甲亚砷(DMSO)掺杂 PEDOT:PSS 的太赫兹频率选择表面(FSS), 并通过 CST Microwave Studio 软件模拟了该 FSS 在太赫兹波段的性能。研究结果表明, 该 FSS 在谐振频率下可实现强带阻, 调制深度可达 50 dB。

关键词: 导电聚合物; 太赫兹; 超材料; 频率选择表面

中图分类号: TN36

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201902.0205

Terahertz Frequency Selective Surface based on DMSO-doped PEDOT:PSS films

DU Yan, WU Yajun, ZHANG Yuan, HUO Yiwei

(Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory, Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200438, China)

Abstract: Poly 3,4-Ethylene Dioxythi Ophene:Poly 4-Styrene Sulfonate(PEDOT:PSS) is a promising candidate for Terahertz(THz) multifunctional materials. In order to verify the possibility of PEDOT:PSS replacing metals in terahertz Metamaterials(MMs), a terahertz Frequency Selective Surface(FSS) based on Dimethyl Sulphoxide(DMSO)-doped PEDOT:PSS films is designed and simulated by Computer Simulation Technology(CST) Microwave Studio software. Strong band rejection with a modulation depth of 50 dB can be achieved at resonant frequencies.

Keywords: conducting polymers; Terahertz; Metamaterials; Frequency Selective Surface

电磁超材料(MMs)是一种人造复合材料, 其各向异性和相关电磁特性是通过单元网络内亚波长结构的设计和取向来设定和改变。许多电磁效应和相关器件在 MMs 理论证实和采用之前都被认为不可能出现, 例如负折射率、完美成像透镜和隐身衣等。同时, 电磁 MMs 的响应范围可以通过亚波长谐振结构的设计从可见光波段延伸至近红外和太赫兹波段。在太赫兹领域, 平面 MMs 也已经应用在具有不同功能的重要有源和无源器件当中, 例如太赫兹完美吸收器^[1]、太赫兹滤波器^[2]、太赫兹频率选择表面(FSS)^[3]等。这些 MMs 通常采用金属材料(Au, Ag, Cu 等)作为亚波长结构。对于大多数基于 MMs 的应用来说, 材料损耗和带宽是评估器件性能的关键参数, 材料的谐振性质会严重影响这些器件的实际应用。而金属材料往往会带来较大的损耗、较复杂的加工工艺和较高的加工成本^[4-5]。为了解决这一问题, 设计一种损耗低、易加工的新材料来代替金属作为太赫兹波段 MMs。导电聚合物材料聚 3,4-乙撑二氧噻吩(PEDOT): 聚 4-苯乙烯磺酸盐(PSS)因其具有良好导电性、薄膜稳定性、薄膜透明性和能够在水溶液中加工的特性而受到广泛关注, 与其他导电聚合物相比具有更广阔的应用前景^[6-8]。PEDOT:PSS 已经被用作抗静电涂层和空穴注入层应用于有机发光二极管(Organic Light-Emitting Diode, OLED)和太阳能电池中^[9-10]。不仅如此, 最新的研究结果表明, 二甲亚砷(DMSO)掺杂 PEDOT:PSS 薄膜在太赫兹波段也具备很高的电导率、良好的稳定性和优异的薄膜透明性, 不仅可以作为太赫兹波段高性能的透明电极材料, 还可以作为太赫兹抗反射涂层材料和滤波材料, 是一种非常有潜力的太赫兹波段多功能材料, 有可能代替金属应用于太赫兹 MMs 领域中^[11]。为了验证 DMSO 掺杂 PEDOT:PSS 薄膜在太赫兹 MMs 中应用的可能性, 本文结合 DMSO 掺杂 PEDOT:PSS 薄膜在太赫兹波段的介电性能, 设计了一个太赫兹 FSS, 并通过 CST Microwave Studio 软件模拟了其在太赫兹波段的性能。

收稿日期: 2017-11-13; 修回日期: 2017-12-28

基金项目: 上海市科学技术委员会优秀技术带头人计划资助项目(16XD1423300); 民机专项科研资助项目(MJ-2017-F-11)

1 器件结构设计

设计了一种无金属材料、结构简单的太赫兹 FSS。该 FSS 可以通过在高阻硅表面刻蚀十字交叉型凹槽的周期性阵列来实现, 刻蚀后的高阻硅结构单元如图 1(a)所示。在带有凹槽结构的高阻硅片上制作一层厚度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的 DMSO 掺杂的 PEDOT:PSS 薄膜, 整体单元结构如图 1(b)所示。

FSS 周期性单元结构的几何尺寸也在图 1 中标出, 凹槽长度为 L , 凹槽宽度为 W , 凹槽深度为 D , 高阻硅的厚度为 h_r , DMSO 掺杂 PEDOT:PSS 薄膜的厚度为 h_s , FSS 单元周期为 P 。凹槽的几何尺寸决定 FSS 的响应频率, 凹槽的宽度控制共振频率响应的形状和 Q 因数。为了使 FSS 在太赫兹频率范围内获得窄带吸收, 应同时调整和优化 FSS 凹槽的各个几何参数。经过优化, 将 FSS 结构单元的几何参数取值确定为, $L=156\ \mu\text{m}$, $W=80\ \mu\text{m}$, $D=10\ \mu\text{m}$, $P=200\ \mu\text{m}$, $h_r=50\ \mu\text{m}$, $h_s=0.1\ \mu\text{m}$ 。

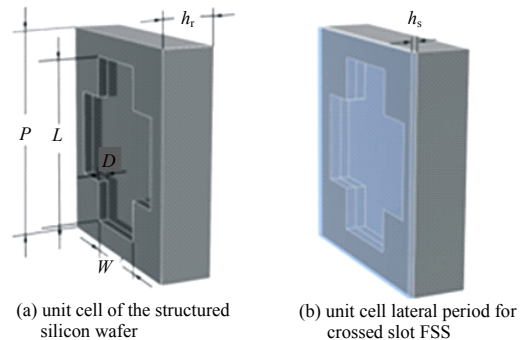


Fig.1 Schematic of the THz FSS

图 1 太赫兹 FSS 结构示意图

2 结果与讨论

本文设计的 FSS 单元周期结构无限阵列的模拟, 是通过 CST Microwave Studio 软件中的全 Floquet 模式模拟 FSS 中的每个单元来实现的, 设置周期性边界条件, 通过频域求解器对该结构单元进行模拟。其中, 高阻硅的参数在材料库里直接选择, DMSO 掺杂 PEDOT:PSS 薄膜的介电参数^[12]如表 1 所示。

表 1 不同浓度 DMSO 掺杂 PEDOT:PSS 薄膜的介电参数
Table 1 Dielectric parameters of DMSO-doped-PEDOT:PSS films

doped concentration	$(\omega_p/2\pi)/\text{THz}$	$(\omega_c/2\pi)/\text{THz}$	ϵ_∞	c_1
pristine	22.9	0.94	284	-0.86
5 vol% DMSO	26.4	0.67	579	-0.79
8 vol% DMSO	32.4	1.63	711	-0.31
12 vol% DMSO	53.2	1.78	573	-0.70
15 vol% DMSO	66.9	1.77	321	-0.60

在入射波垂直于 FSS 平面时, 对基于掺杂 5 vol% DMSO, 12 vol% DMSO 和 15 vol% DMSO-PEDOT:PSS 薄膜的太赫兹十字交叉型 FSS 分别进行模拟, TE 模式平面波从 $Z_{\min}$ 端口出射的频率响应结果分别如图 2 所示。从图中可以看到, 该结构 FSS 的共振频率在 0.5 THz 附近, 并且具有较高掺杂浓度的 PEDOT:PSS 薄膜在共振频率处的幅值最大。其中, 基于 15 vol% DMSO 掺杂 PEDOT:PSS 薄膜的 FSS 调制深度接近 45 dB。设计的太赫兹 FSS 为中心对称结构, 因此其在入射角度 θ 为 0 时的频率响应特性应该与入射平面波偏振无关, 即 TE 波和 TM 波的频率响应特性应没有差别。为此, 模拟了 FSS 对 TE 和 TM 模式入射平面波的频率响应, 如图 3 所示。从图中可以看出, 该 FSS 对入射平面波的偏振不敏感。

之前的模拟是在入射波垂直于 FSS 平面, 即入射角度 $\theta=0$ 的情况下进行的。入射角度也会影响器件的共振特性, 为了探究入射角度对 FSS 共振特性的影响, 分别模拟了辐射角度为 30° , 45° 和 60° 时, 基于 15 vol% DMSO 掺杂 PEDOT:PSS 薄膜的 FSS 共振频率特性, 如图 4 所示。从图中可以看出, 虽然入射角度的改变对共振频率没有影响, 但却极大地影响到了共振频率响应的形状, 随着入射角度的增加, 对平面波的抑制作用明显减弱, 调制深度逐渐降低。

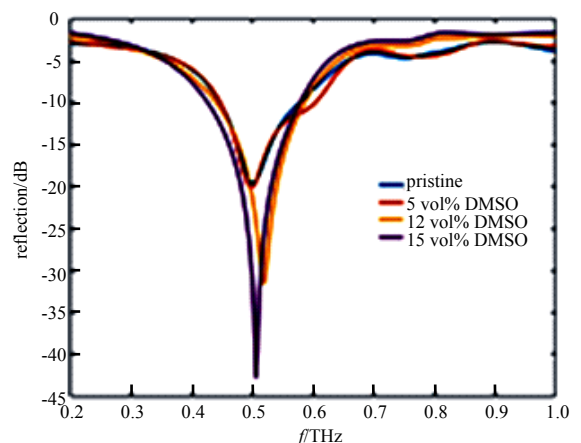


Fig.2 Reflection spectra of the crossed slot FSS with PEDOT:PSS thin films doped with different concentration of DMSO

图 2 基于不同掺杂浓度 PEDOT:PSS 的十字交叉型 FSS 在太赫兹波段的频率响应

调整该 FSS 结构单元的几何参数取值, 改变十字交叉型凹槽的宽度 W , 其他几何参数不变。模拟垂直入射情况下, 当 $W=70\text{ }\mu\text{m}$ 和 $W=90\text{ }\mu\text{m}$ 时, 基于 15 vol% DMSO 掺杂 PEDOT:PSS 薄膜的 FSS 在太赫兹波段的共振频率特性, 并与 $W=80\text{ }\mu\text{m}$ 时的共振频率响应比较, 见图 5。从图中可以看出, 凹槽宽度的改变会极大影响共振频率响应的形状, 宽度为 $80\text{ }\mu\text{m}$ 时的调制深度最大, 此时约为宽度的最佳取值。在此基础上增大或减小宽度都会降低该 FSS 的调制深度。

调整该 FSS 结构单元的几何参数取值, 改变十字交叉型凹槽的长度 L , 其他几何参数不变。模拟垂直入射情况下, 当 $L=136\text{ }\mu\text{m}$, $L=176\text{ }\mu\text{m}$ 和 $L=196\text{ }\mu\text{m}$ 时, 基于 15 vol% DMSO 掺杂 PEDOT:PSS 薄膜的 FSS 在太赫兹波段的共振频率特性, 并与 $L=156\text{ }\mu\text{m}$ 时的共振频率响应比较, 如图 6 所示, 图中插图为 $L=156\text{ }\mu\text{m}$, $L=176\text{ }\mu\text{m}$ 和 $L=196\text{ }\mu\text{m}$ 时共振频率响应的局部放大图。从图中可以看出, 凹槽长度的改变几乎不影响共振峰的位置, 只改变共振强度。当长度从 $136\text{ }\mu\text{m}$ 增加至 $176\text{ }\mu\text{m}$ 时, 调制深度从 26 dB 增加至 50 dB; 但当长度继续增加至 $196\text{ }\mu\text{m}$ 时, 调制深度略微下降。由此可知, $L=176\text{ }\mu\text{m}$ 约为长度的最佳取值。

超材料通常是由电介质基底上的亚波长图案组成, 在过去的研究中, 这些图案往往是用传统微加工技术(光刻、微接触印刷等)加工高导电性金属(Au, Al, Cu 等)或石墨烯制作, 然而这些加工技术加工时间较慢, 其他快速加工方法, 如离子束溅射刻蚀法精确度不高, 不能达到小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的分辨力^[13-14]。使用 DMSO 掺杂 PEDOT:PSS 的优点在于其涂层简单, 成本较低, 容易成膜, 并且可以通过改变掺杂量来控制介电性质。此外, PEDOT:PSS 薄膜也可以在基底上成膜之后进行激光加工, 激光加工可以在大面积上进行快速且高分辨力的图案化处理^[15]。由于这些因素, 设计的基于 DMSO 掺杂 PEDOT:PSS 的超材料器件在制作工艺上更为简单, 更符合实用化器件的要求。

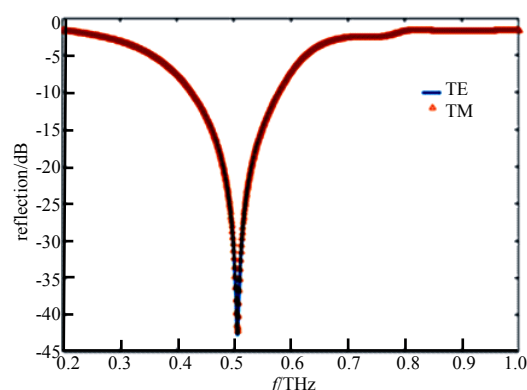


Fig.3 Reflection spectra for the TE and TM polarization of the incident wave

图 3 入射波为 TE 和 TM 模式下的共振频率响应

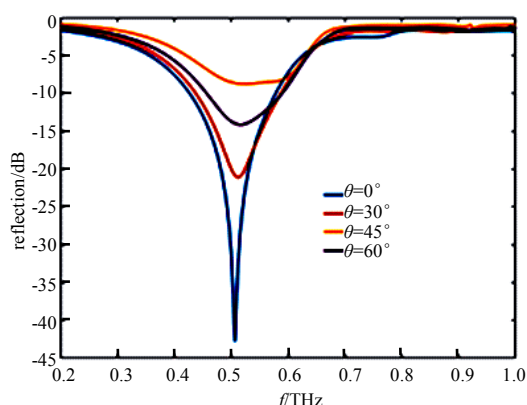


Fig.4 Reflection spectra of the crossed slot FSS with 15 vol% DMSO-doped-PEDOT:PSS thin films at different incident angles

图 4 不同入射角度下, 基于 15 vol% DMSO 掺杂 PEDOT:PSS 薄膜的 FSS 共振频率特性

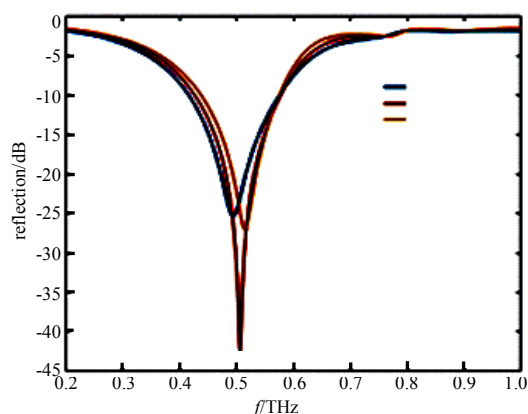


Fig.5 Reflection spectra of the crossed slot FSS with 15 vol% DMSO-doped-PEDOT:PSS thin films with different slot widths

图 5 不同十字交叉型凹槽的宽度下, 基于 15 vol% DMSO 掺杂 PEDOT:PSS 薄膜的 FSS 共振频率特性

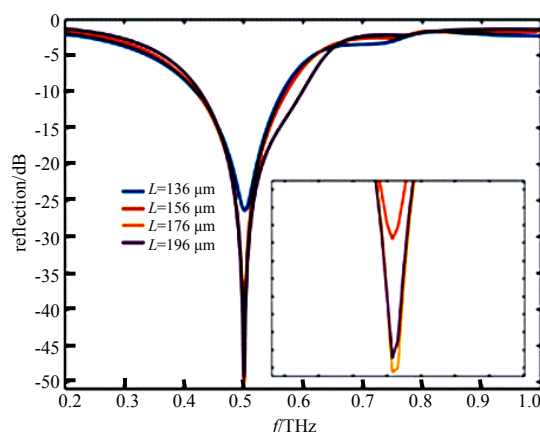


Fig.6 Reflection spectra of the crossed slot FSS with 15 vol% DMSO-doped-PEDOT:PSS thin films with different slot lengths

图 6 不同十字交叉型凹槽的长度下, 基于 15 vol% DMSO 掺杂 PEDOT:PSS 薄膜的 FSS 共振频率特性

3 结论

PEDOT:PSS 是太赫兹超材料领域一种有潜力的功能材料。本文根据 DMSO 掺杂 PEDOT:PSS 薄膜太赫兹波段的介电参数,基于 DMSO 掺杂 PEDOT:PSS 薄膜和高阻硅设计了一个太赫兹十字交叉凹槽型 FSS,并用 CST Microwave Studio 软件对其在太赫兹波段的共振频率响应特性进行了模拟;该 FSS 的共振频率响应与入射平面波偏振无关,周期性单元结构几何尺寸的改变会影响共振频率响应情况,使用 15 vol% DMSO 掺杂 PEDOT:PSS 薄膜的 FSS 调制深度可达 50 dB;改变入射光的入射角度,发现垂直 FSS 平面入射情况下,调制深度最大,随着入射角度的增加,调制深度逐渐减小。

参考文献:

- [1] HE X J, YAN S T, MA Q X, et al. Broadband and polarization-insensitive terahertz absorber based on multilayer metamaterials[J]. Optics Communications, 2015(340):44–49.
- [2] WOO J M, KIM D S, KIM D J, et al. Terahertz filter integrated with a subwavelength structured antireflection coating[J]. AIP Advances, 2015,5(12):127238.
- [3] KIM D, WOO J M, Kim H W, et al. Quad-band THz frequency selective surface based on a split ring resonator loaded with multiple slots[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2015,29(18):7.
- [4] CHIANG Y J, YEN T J. A composite-metamaterial-based terahertz-wave polarization rotator with an ultrathin thickness, an excellent conversion ratio and enhanced transmission[J]. Applied Physics Letters, 2013,102(1):011129.
- [5] NATHANIEL K G, JANE E H, DIBAKAR R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. Science, 2013,340(6138):1304–1307.
- [6] OUYANG J, CHU C W, CHEN F C, et al. High-Conductivity Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):Poly(styrene sulfonate) film and its application in polymer optoelectronic devices[J]. Advanced Functional Materials, 2005,15(2):203–208.
- [7] VOSGUERITCHIAN M, LIPOMI D J, BAO Z. Highly conductive and transparent PEDOT:PSS films with a fluorosurfactant for stretchable and flexible transparent electrodes[J]. Advanced Functional Materials, 2012,22(2):421–428.
- [8] HEYWANG G, JONAS F. Poly(alkylenedioxythiophene)s—new very stable conducting polymers[J]. Advanced Materials, 2010,4(2):116–118.
- [9] WU X, LIU J, HE G. A highly conductive PEDOT:PSS film with the dipping treatment by hydroiodic acid as anode for organic light emitting diode[J]. Organic Electronics, 2015(22):160–165.
- [10] SUN K, LI P, XIA Y, et al. Transparent conductive oxide-free perovskite solar cells with PEDOT:PSS as transparent electrode[J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2015,7(28):15314.
- [11] DU Y, TIAN H, CUI X J, et al. Super terahertz transparent electrodes[J]. Optics Express, 2016,24(6):6359–6366.
- [12] DU Y, CUI X, LI L, et al. Dielectric properties of DMSO-Doped-PEDOT:PSS at THz frequencies[J]. Physica Status Solidi, 2017,10.1002/pssb.201700547.
- [13] SCHAEFER M, ESSER A, RUHTENBERG M Schulz, et al. Investigation of the influence of laser radiation on material properties of transparent conductive layers[C]// Organic Light Emitting Materials & Devices XVI. San Diego, California, United States: International Society for Optics and Photonics, 2012:8476:84760Z.
- [14] 全文浩, 刘北云, 杨炎翰, 等. 基于石墨烯材料的太赫兹波探测器研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(4):588–594. (TONG Wenhao, LIU Beiyun, YANG Yanhan, et al. Research progress of graphene based terahertz wave detectors[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(4):588–594.)
- [15] SCHAUBROECK D, SMET J D, WILLEMS W, et al. Surface analysis of the selective excimer laser patterning of a thin PEDOT:PSS film on flexible polymer films[J]. Applied Surface Science, 2016(376):151–160.

作者简介:



都 妍(1990–), 女, 黑龙江省大庆市人, 博士, 主要研究方向为太赫兹新材料与器件、太赫兹雷达技术.email:geng2yan@126.com.

霍熠炜(1990–), 男, 太原市人, 工程师, 主要研究方向为目标与环境特性、太赫兹目标 RCS 等技术.

武亚君(1983–), 女, 沈阳市人, 研究员, 主要研究方向为目标与环境特性、太赫兹目标 RCS 等技术.

张 元(1979–), 男, 安徽省马鞍山市人, 研究员, 主要研究方向为目标与环境近场复合散射测试、海环境模拟测试和近场动态角闪烁获取等技术.