

基于频率选择表面的双层改进型互补结构太赫兹带通滤波器研究*

兰峰^{1)†} 高喜²⁾ 亓丽梅³⁾

1)(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

2)(桂林电子科技大学信息与通信学院, 桂林 541004)

3)(曲阜师范大学物理工程学院, 曲阜 273165)

(2013年12月4日收到; 2014年1月10日收到修改稿)

通过仿真计算和实验研究了一种基于频率选择表面的双层改进型互补结构太赫兹带通滤波器. 对四裂缝互补型电感电容式谐振单元结构进行了改进, 可以在提高滤波性能的同时增加单晶石英介质衬底的厚度. 利用电磁仿真技术设计并加工了中心频率为0.28 THz的带通滤波器, 并利用太赫兹时域光谱仪测试了在0.1—0.6 THz范围内此滤波器的传输频谱特性, 实验结果与仿真结果基本一致. 结果表明, 利用双层改进型互补结构可以设计出对于入射角度不敏感、带外抑制佳、边带陡峭度大、能有效抑制寄生谐振的宽带太赫兹带通滤波器, 并降低了加工难度.

关键词: 频率选择表面, 改进型互补结构, 太赫兹带通滤波器, 传输特性

PACS: 42.60.Da, 78.67.Pt, 84.30.Vn, 41.20.Jb

DOI: 10.7498/aps.63.104209

1 引言

近年来随着太赫兹源和太赫兹探测技术的发展, 对太赫兹检测器件的应用需求日益增加. 电磁装置正从大于或等于波长尺度向亚波长尺度发展, 传统的电磁材料及其制备的传输功能器件难以满足太赫兹检测器件的要求, 而人工电磁材料可以突破自然界已有材料的介电常数和磁导率变化自由度的限制, 在调控电磁波方面展现出巨大的应用潜力^[1-5]. 频率选择表面(FSS)是人工电磁材料领域中的研究热点之一. 随着波长的进一步缩短, 传统波导型滤波器难以满足太赫兹频段的实际需求. FSS的每个周期单元相当于一个无源谐振器, 这些无源谐振器在介质层上按一定方式周期性地排列在一起, 构成了能够对电磁波进行空间滤波的滤波器. 利用FSS空间滤波特性探索和开发太赫兹频段

的带通滤波器具有重要的价值, 在太赫兹成像、光谱学、分子传感器、安防检查、药品检测等领域有广泛的应用^[6-9].

各种形式的FSS谐振单元(如金属孔、谐振线栅、开口谐振环(SRR)、互补型电感电容(CELC)等)都可以作为太赫兹滤波器的谐振结构^[10-13]. 被广泛作为左手材料的SRR和双裂缝电感电容具有高度各向异性电磁谐振和表面等离子体阻带的结构特点. 文献^[14]研究发现, 基于CELC的超材料结构满足巴比涅原理^[15], 可以作为构建高性能太赫兹带通滤波器的谐振单元. 在此基础上, Mingzhi等^[16]设计了一种中心频率为0.25 THz的双层方形四裂缝CELC二阶带通滤波器, 插入损耗为2.5 dB. 该滤波器采用厚度为165 μm 的单晶石英晶体作为介质基底, 并对基底表面采用Ti/Pt/Au合金进行金属处化理, 在0.1—0.7 THz具有二阶带通特性, 在0.41 THz出现

* 国家自然科学基金(批准号: 11075032)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2011AA010204)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lanf_uestc@aliyun.com

一个法布里-珀罗谐振峰. 采用多层级联 FSS 结构可以使谐振频率曲线实现平顶和陡截止^[17], 但考虑到加工难度和制造成本, 本文选择金属-电介质-金属结构即双层 FSS 结构滤波器. 介质材料的电参数和厚度及入射角度对多层 FSS 结构频率响应特性的影响很大^[18]. FSS 的介质衬底厚度与谐振频率大致呈线性关系, 频率越高, 厚度越薄, 这将对太赫兹带通滤波器的加工带来很大的困难^[19]. 通过层间电磁场衰减模的近距离耦合可对介质的几何参数和物理参数或谐振单元结构参数进行调整, 从而改变谐振单元结构的频率响应特性^[20]. 本文对四裂缝圆形 CELC 谐振单元进行改进, 设计出了介质厚度更大、中心频率更高、带宽更宽并能在较宽频带内消除寄生谐振的太赫兹带通滤波器.

2 改进型 CELC 带通滤波器的仿真设计

对于四相旋转对称的四裂缝 CELC 式 FSS 结构, 其频率响应特性不随入射波极化方式的变化而改变^[21]. 本文采用 HFSS 有限元三维电磁仿真软件对横电场 (TE) 极化方式的平面波入射情况下滤波器频率响应特性进行了模拟计算. 考虑到太赫兹频段下的低损耗特性, 介质基底选择硬度较高的 Z 切单晶石英晶体. 谐振频率增高时, 基底会被减薄, 石英晶体将变得非常脆弱, 这给加工带来很大的困难. 然而增加基底的厚度又将影响 FSS 层间的耦合度, 进而带来不利的谐振响应和传输特性. 为了在增加基底厚度的同时提高 FSS 层间电磁耦合效率, 在四裂缝 CELC 单元结构中心引入一个圆形的电容性小孔, 如图 1 所示. 建模时通过对一个 FSS 周期单元设置周期边界条件和用 Floquet 端口代替 FSS 阵列可极大地减少计算量和内存的

消耗. 图 1(c) 所示为具有 9×9 个谐振单元的改进型 CELC 滤波器双层结构示意图. 介质基底两侧的 FSS 层具有相同的谐振单元结构. 石英晶体基底的介电常数和损耗正切分别为^[16]4.41 和 0.0004. 为了降低加工成本, 选择铝作为基底表面的金属谐振结构材料, 厚度为 200 nm.

滤波器谐振单元的结构参数如图 1(a), (b) 所示, 其中, $G = 10 \mu\text{m}$, $W = 20 \mu\text{m}$, $B_1 = 97 \mu\text{m}$, $B_2 = B_1 - W = 77 \mu\text{m}$, $B_3 = 40 \mu\text{m}$, $A = 213 \mu\text{m}$, 介质基底厚度 $D = 170 \mu\text{m}$. 图 1(a), (b) 中灰色部分是金属铝覆层, 白色部分是石英基底. 实际加工的滤波器样品是周期为 A 的 69×69 的阵列结构. 滤波器谐振单元中心引入的圆形孔径将改变 CELC 谐振单元表面的感性电流和电场分布. 图 2 所示为谐振状态时 CELC 谐振单元和改进型 CELC 谐振单元在金属-介质交界面处的表面电流 J_{surf} 和电场 E 的分布, 图中箭头表示表面电流的方向和相对幅值大小, H 为磁场, k 为波矢. 对于这两种结构而言, 入射的太赫兹 TE 将引起表面感性金属中的电流流动, 并在孔径中累积. 两个谐振单元中的表面电流都是在上下两个半圆形的金属片上形成环路, 流动方向均是沿着金属的外圆弧边缘, 通过外圆弧开口处到内圆的金属加载, 再到另一端的金属加载并从外圆弧开口流出. 不同的是, 由于改进型 CELC 谐振单元在中心处存在内圆环, 使其表面电流的流动距离缩短, 从而使得四个加载壁端的表面电流耦合增强. 同时, 由于中心圆孔增加了缝隙的面积, 使得上下层间 FSS 的层间电磁耦合增强, 从而提高了入射波的透过率. CELC 谐振单元中的电场分布与入射电场方向一致, 呈线形分布. 改进型 CELC 谐振单元中的电场分布受到中心圆孔的影响, 呈圆环形分布.

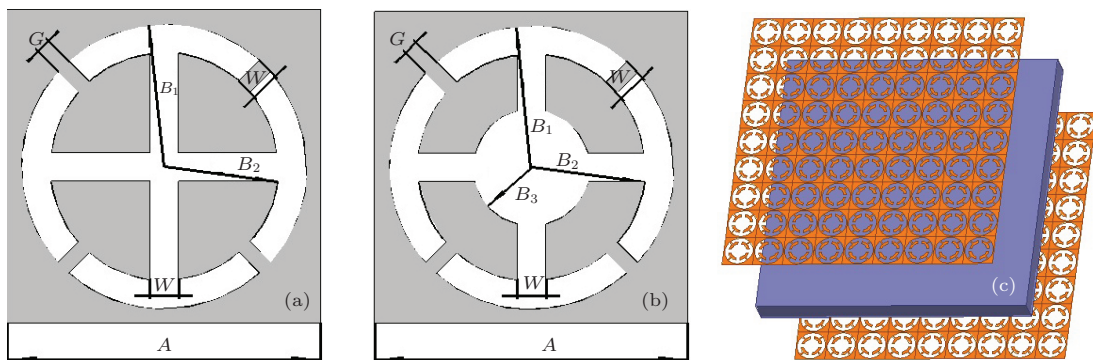


图 1 CELC 谐振单元、改进型 CELC 谐振单元及改进型 CELC 滤波器双层结构的结构示意图 (a) CELC 谐振单元; (b) 改进型 CELC 谐振单元; (c) 改进型 CELC 滤波器双层结构

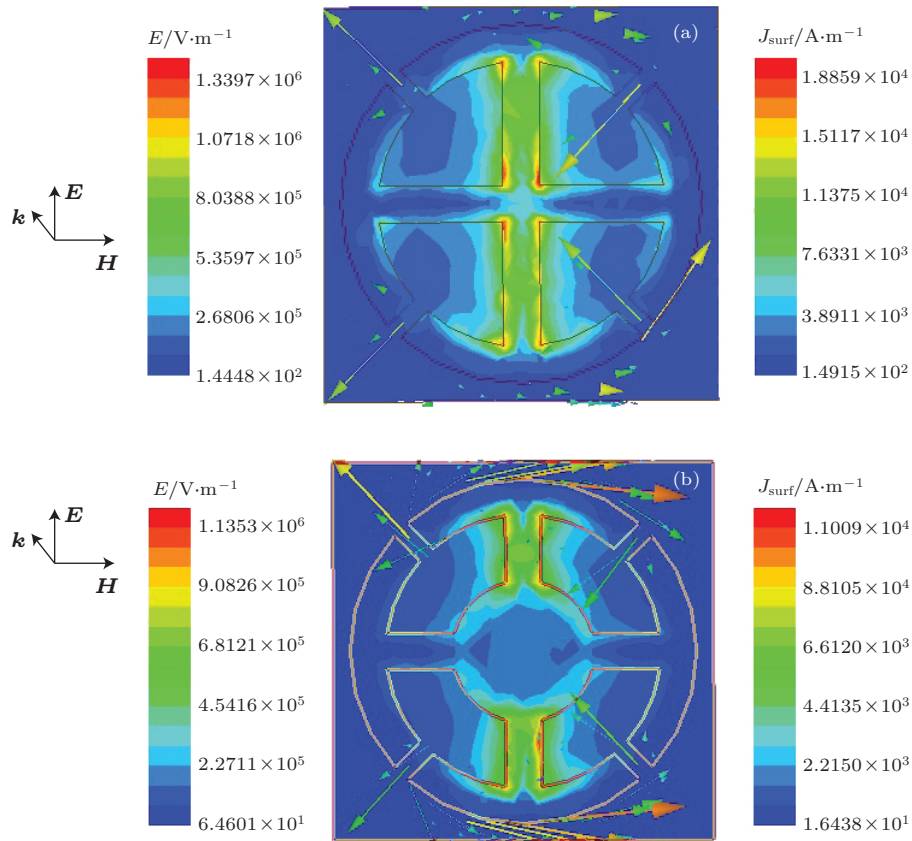


图2 (网刊彩色) 谐振状态时, CELC 谐振单元和改进型 CELC 谐振单元在金属-介质交界面处的表面电流和电场分布 (a) CELC; (b) 改进型 CELC

模拟计算发现, 在相同谐振结构几何参数下若要提高谐振频率, 则需减小介质基底的厚度. 实际加工发现, 当最小尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的石英晶体基底减薄到 $150 \text{ }\mu\text{m}$ 时, 其机械强度大幅减弱, 形变系数增加, 这对微加工处理十分不利. 增加介质基底的厚度有可能会引起一些寄生谐振(如法布里-珀罗谐振), 从而导致滤波性能降低. 图3所示为模拟得到的 CELC 谐振单元、CELC 谐振单元的 1 : 1.11 缩比模型和改进型 CELC 谐振单元的传输散射系数 S_{21} 曲线. 模拟发现: 改进型 CELC 结构的谐振频率为 0.28 THz , 3 dB 带宽为 75.1 GHz ; CELC 结构的谐振频率为 0.255 THz , 3 dB 带宽为 60.5 GHz ; CELC 结构的 1 : 1.11 缩比模型的谐振频率为 0.28 THz , 3 dB 带宽为 66.4 GHz . 这三种结构的带内平均损耗都在 2.6 dB 左右, 改进型 CELC 结构的 3 dB 相对带宽最宽. 当基底厚度都为 $170 \text{ }\mu\text{m}$ 时, 改进型 CELC 结构的谐振频率比 CELC 结构的谐振频率高 25 GHz . 将 CELC 结构参数按 1 : 1.11 缩小后可将谐振频率提高到 0.28 THz , 但其厚度变为 $153 \text{ }\mu\text{m}$, 使得滤波器的机械强度变差, 加工难度增加. 从图3可以看出, 改进型 CELC 结

构可以在比 CELC 结构基底厚度更厚的基础上获得更好的滤波性能.

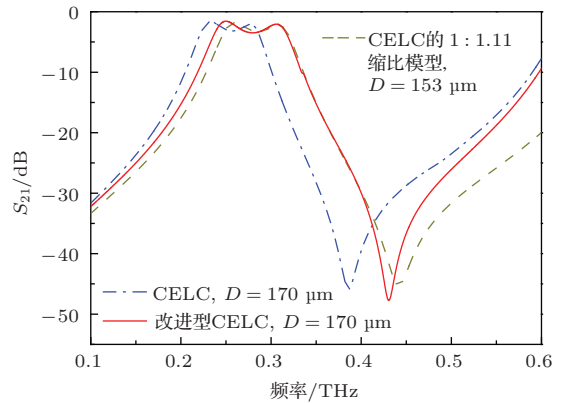


图3 CELC 结构和改进型 CELC 结构的频率响应特性

理想状态下平面波以垂直入射方式投射在 FSS 周期结构上, 假定入射波与周期表面法线方向夹角为入射角 θ , 则此时 θ 为 0° , 当发生谐振时, 可以获得最大的透射率. 在实际应用中, 希望入射波以一定角度入射时能够获得与垂直入射时同样的效果. 图4给出了当 TE 极化的平面波入射角 $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 时改进型 CELC 带

通滤波器的传输频谱曲线. 模拟计算发现对于不同的入射角, 只有当 θ 超过 30° 时传输曲线才有明显的改变. 这说明改进型 CELC 式 FSS 结构具有良好的入射角稳定性, 有利于满足实际工程应用需求.

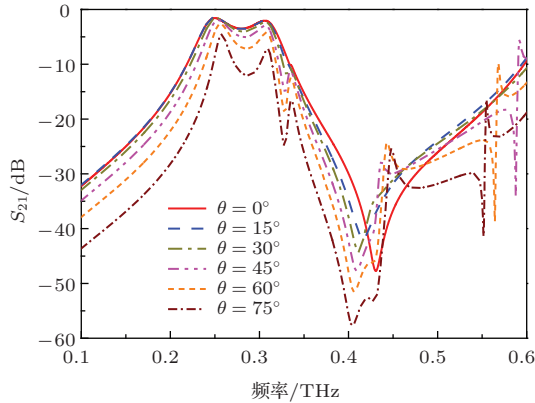


图4 当TE极化的平面波以不同角度入射时,改进型 CELC 带通滤波器的传输频谱曲线

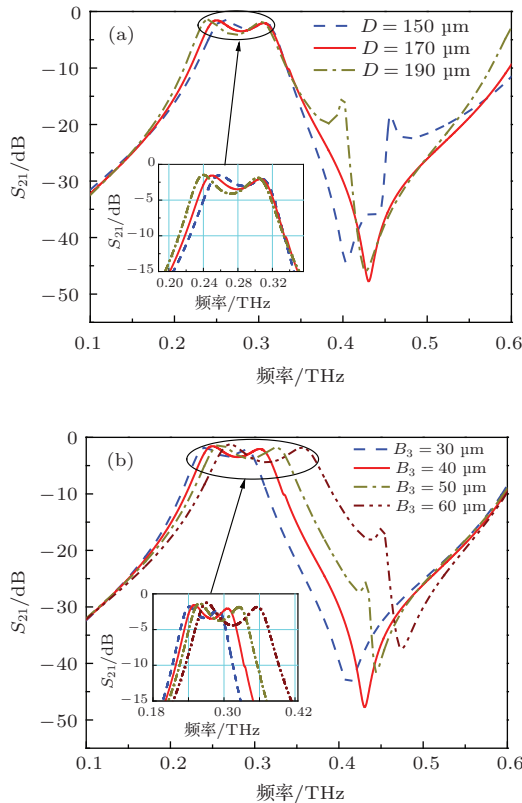


图5 结构参数不同时,改进型 CELC 带通滤波器的传输曲线 (a) 介质层厚度不同; (b) 内圆孔径不同

改进型 CELC 带通滤波器的特性 (如谐振频率、通频带带宽、带内平坦度等) 可以通过调整谐振单元结构参数来控制. 图5所示为不同基底厚度和内圆孔半径的改进型 CELC 带通滤波器的传输频谱曲线. 从图5(a)可以看出, 此滤波器的谐振频率和带内平坦度随着基底厚度的增加而减小, 而3 dB

带宽随着基底厚度的增加而增大. 由图5(b)可知, 此滤波器的谐振频率和3 dB带宽均随着内圆孔半径的增大而显著增加, 因此可以消除由于基底厚度增加而带来的谐振频率降低问题. 增大改进型 CELC 谐振单元的内孔半径等效于增加十字形缝隙宽度, 等效减小电长度, 从而使得谐振频率升高, 3 dB带宽增加. FSS 谐振单元结构的形状和厚度可以等效为并联型 RLC 谐振电路, 基底厚度和内圆孔径的变化将造成 Chebyshev 带通滤波器的电容值和电感值改变, 可能会带来插入损耗的增加和寄生谐振的出现.

综合考虑插入损耗、带宽和加工难度, 本文选取基底厚度为 $170\ \mu\text{m}$, 内圆孔半径为 $40\ \mu\text{m}$. 模拟结果发现此滤波器的3 dB通带范围为 $0.24\text{--}0.315\ \text{THz}$, 中心频率为 $0.28\ \text{THz}$, 两个传输峰值点分别在 0.25 和 $0.306\ \text{THz}$, 带内平均插入损耗约为 $2\ \text{dB}$, 带内波纹约为 $1\ \text{dB}$, 并且 $0.6\ \text{THz}$ 内未出现二阶通带.

3 改进型 CELC 带通滤波器的加工和测试

改进型 CELC 式 FSS 周期结构尺寸在微米量级, 最小尺寸只有几个微米, 精度要求控制在 $1\ \mu\text{m}$ 范围内, 本文采用标准的微纳光刻制造技术进行加工. 其中主要过程是首先通过光刻胶完成基片第一面的接触式光刻显影. 然后用电子束蒸散方式对基片第一面镀上 $200\ \text{nm}$ 的金属铝膜. 为了保护基片表面的金属图形在基片减薄过程中不被刮花, 我们对工艺进行了改进, 即利用等离子体增强化学气相沉积技术在基片第一面覆上一层与基底材料相同的 SiO_2 薄膜, 厚度为 $2000\ \text{\AA}$, 再完成基片的减薄过程, 从而有效地提高了成品率. 对基片第二面完成光刻和金属蒸散后, 利用等离子体刻蚀去掉第一面上的 SiO_2 保护膜.

利用英国 TeraView 公司生产的 TPS spectra 3000 型太赫兹光谱仪测试滤波器的传输频谱曲线. 此太赫兹光谱仪在 $0.06\text{--}4\ \text{THz}$ 谱域内具有很好的频谱分辨率和动态范围. 具体的测试过程如下: 首先一束线极化的太赫兹脉冲通过聚乙烯透镜聚焦到与滤波器厚度大小一致的石英晶体裸片上, 之后太赫兹脉冲被基片后面的透镜聚束到光导天线接收器中. 保存测试得到的传输频率响应特性数据, 将其作为滤波器性能测试的参考数据. 接着对滤波

器样品进行上述测试过程. 对多次测试数据取平均后得到石英晶体裸片和滤波器样品的太赫兹时域数据 $f(t)$ 和 $s(t)$. 最后对太赫兹时域数据做傅里叶变换, 根据

$$T(\omega) = t(\omega) e^{i\phi(\omega)} = S(\omega)/F(\omega) \quad (1)$$

可得到滤波器的透射系数. 这里 $T(\omega)$ 为透射系数, ω 为频率, $t(\omega)$ 和 $\phi(\omega)$ 分别为透射系数的振幅和相位, $S(\omega)$ 和 $F(\omega)$ 分别为对石英晶体裸片和滤波器样品的时域数据做傅里叶变换得到的频域数据. 图 6(a) 给出了本文加工的滤波器的实物照片, 滤波器通过热敏胶粘贴在中空的有机玻璃基座上. 图 6(b) 为滤波器的显微镜照片, 与图 1(a) 和 (b) 不同, 灰色部分是石英晶体基底, 白色部分是金属铝覆层. 图 6(c) 给出了测试得到的本文加工的滤波器的传输频谱, 可以看出实验结果与模拟结果具有很好的一致性. 此滤波器的 3 dB 带宽范围为 0.239—0.314 THz, 中心频率为 0.281 THz, 均比模拟结果偏移了 1 GHz, 这主要是由于结构误差造成的. 此滤波器的损耗约为 2.6 dB, 这主要是由于表面金属铝膜的导电率较低和介质基底的高频损耗造成的. 在测试频带范围内, 没有明显的寄生谐振峰和二阶通带出现, 带外抑制超过 40 dB.

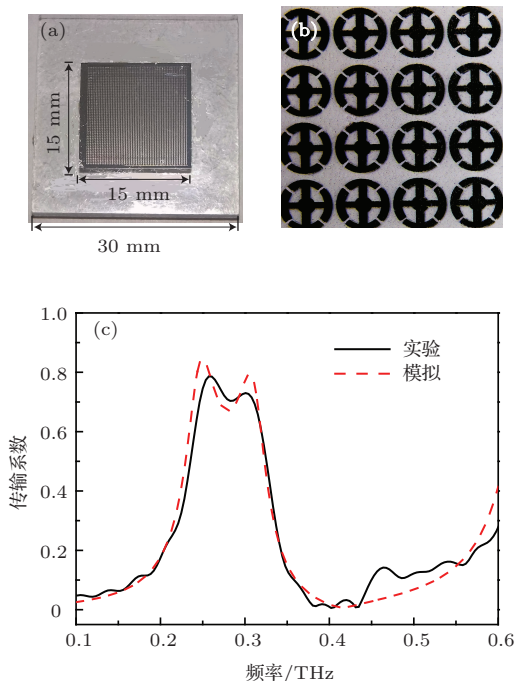


图 6 本文加工的滤波器实物照片、显微镜照片及其传输频谱. 基底厚度 $D = 170 \mu\text{m}$, 谐振单元结构参数为 $G = 10 \mu\text{m}$, $W = 20 \mu\text{m}$, $B_1 = 97 \mu\text{m}$, $B_2 = 77 \mu\text{m}$, $B_3 = 40 \mu\text{m}$, $A = 213 \mu\text{m}$. (a) 实物照片; (b) 显微镜照片; (c) 传输频谱

上述测试结果表明, 在现有的材料和工艺水平基础上, 能够实现对太赫兹周期谐振结构滤波器件的制作, 并达到较为理想的性能. 若进一步改善工艺 (如提高基片减薄的精度、增加基片的光洁度和平面度), 并采取将镀膜材料改为电导率更高、抗氧化性更好的 Ti/Pt/Au 合金等措施, 还可以进一步提高器件的性能和稳定性.

4 结 论

本文对传统的圆形四裂缝 CELC 结构进行了改进, 并提出了一种改进型互补结构 FSS 谐振单元. 改进型谐振结构具有良好的入射角度稳定性, 在 $\pm 30^\circ$ 范围内具有稳定的频率响应特性, 这有利于满足实际应用需求. 在相同谐振频率下, 改进型谐振结构比传统的圆形 CELC 结构厚度更厚, 能够降低加工难度和提高器件强度, 同时工作带宽更宽. 通过仿真优化, 设计了中心频率为 0.28 THz 的太赫兹带通滤波器, 并通过太赫兹光谱仪对滤波器进行了传输频谱测试. 实验结果与模拟结果具有很好的一致性. 改进型四裂缝 CELC 带通滤波器具有易加工、成本低、损耗小、带外抑制度高、带宽宽、能有效抑制寄生谐振等优点.

参考文献

- [1] De Lucia F C 2002 *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.* **3** 1579
- [2] Siegel P H 2004 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **52** 2438
- [3] Yeh T, Genovesi S, Monorchio A, Prati E, Costa F, Huang T, Yen T 2012 *Opt. Express* **20** 7580
- [4] Chen H M, Meng Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014202 (in Chinese) [陈鹤鸣, 孟晴 2011 物理学报 **60** 014202]
- [5] Christian D, Peter H B 2007 *Conference on Lasers and Electro-Optics* Baltimore, USA, May 6–11, 2007 p1
- [6] Yong M, Khalid'S C S A, James P G, David R S C 2010 *IEEE Photonics Society Winter Topicals Meeting Series* Majorca, Spain, January 11–13, 2010 p50
- [7] Dobroiu A, Otani C, Kawase K 2006 *Meas. Sci. Technol.* **17** R161
- [8] Kemp M C, Taday P F, Cole B E, Cluff J A, Fitzgerald A J, Tribe W R 2003 *Proc. SPIE* **5070** 44
- [9] Varittha S, Niru K N, John L V 2013 *Proceedings of the 2012 IEEE National Aerospace and Electronics Conference* Dayton, USA, July 25–27, 2012 p38
- [10] So J K, Seo M A, Kim D S, Kim J H, Chang S S, Son J, Park G S 2008 *33rd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and the 16th International Conference on Terahertz Electronics* Pasadena, USA, September 15–19, 2008, p1

- [11] Meng K, Wang Y H, Chen L W, Zhang Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3198 (in Chinese) [孟阔, 王艳花, 陈龙旺, 张岩 2008 物理学报 **57** 3198]
- [12] Winnewisser C, Lewen F, Weinzierl J, Helm H 1998 *IEEE Sixth International Conference on Terahertz Electronics Proceedings Terahertz Electronics Proceedings* Leeds, UK, September 3–4, 1998 p196
- [13] Hansen V, Gemuend H P, Kreysa E 2005 *Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics* New York, USA, September 19–23, 2005 p209
- [14] Chen H T, O'Hara J F, Taylor A J, Averitt R D, Highstrete C, Lee M, Padilla W J 2007 *Opt. Express* **15** 1084
- [15] Born M, Wolf E 1999 *Principles of Optics* (7th ed.) (Cambridge: Cambridge University Press) pp821–823
- [16] Lu M Z, Li W Z, Elliott R B 2011 *Opt. Lett.* **36** 1071
- [17] Vardaxoglou J C 1997 *Frequency Selective Surfaces: Analysis and Design* (New York: John Wiley) pp1–9
- [18] Ben A M A 2000 *Frequency Selective Surface—Theory and Design* (New York: Wiley-Interscience Publication) pp21–27
- [19] Subash V, Yanhan Z, Ayrton B, Mohammad S 2012 *IEEE Trans. THz Technol.* **2** 441
- [20] Wu Z, Wu Z B 2005 *Acta Electron. Sin.* **33** 517 (in Chinese) [武哲, 武振波 2005 电子学报 **33** 517]
- [21] Deng H Q, Huang J, Li G 2012 *J. Microwaves* **28** (S1) 139 (in Chinese) [邓鹤栖, 黄建, 李光 2012 微波学报 **28** (S1) 139]

Terahertz bandpass filter using double-layer reformative complementary frequency selective surface structures*

Lan Feng^{1)†} Gao Xi²⁾ Qi Li-Mei³⁾

1) (School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)

2) (School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

3) (College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

(Received 4 December 2013; revised manuscript received 10 January 2014)

Abstract

The simulation and experimental study of a bandpass frequency selective surface filter in terahertz (THz) range using double-layer modified complementary structures are conducted in this paper. The modified four-split complementary electric inductive capacitive (CELC) structure is introduced as the resonant cell of the filter. The primary design objective is to improve the filtering performances of double-layer complementary metamaterial structures built on intensified thickening quartz substrate. The bandpass filter centered at 0.28 THz is simulated, fabricated and measured. Experimental results from 0.1 to 0.6 THz measured by THz time-domain spectroscopy are in excellent agreement with simulation. The reformative CELC bandpass filter has the advantages of a low cost, low loss, steepness of skirts, out-of-band rejection, and etalon resonance rejection.

Keywords: frequency selective surfaces, reformative complementary metamaterial structures, terahertz bandpass filter, transmission characteristics

PACS: 42.60.Da, 78.67.Pt, 84.30.Vn, 41.20.Jb

DOI: 10.7498/aps.63.104209

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11075032) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA010204).

† Corresponding author. E-mail: lanf_uestc@aliyun.com