

文章编号: 2095-4980(2015)05-0696-04

基于超材料结构的高 Q 太赫兹滤波器

张力力^{1,2}, 张晓渝^{1*}, 徐 锋², 秦 华¹

(1. 中科院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 中科院纳米器件与应用重点实验室 纳米器件与材料研究部, 江苏 苏州 215125;
2. 南京理工大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 在半导体微纳工艺基础上研究了基于镜像非对称结构超材料太赫兹(THz)滤波器的性能。通过时域有限差分理论, 模拟分析了滤波器工作频率下太赫兹电场强度和电流密度在微结构的分布, 并阐述了微结构太赫兹波电磁共振的机理。基于太赫兹滤波器电磁损耗机制和微纳加工工艺条件, 设计并优化器件开口环结构, 使相邻开口环中产生电磁场的干涉相消, 减少太赫兹辐射损耗, 提高品质因子 Q 值。采用太赫兹时域光谱(THz-TDS)系统测试了滤波器的太赫兹透射特性, 实验结果表明, 在工作频率 0.923 THz 下, 镜像非对称结构的平面太赫兹滤波器品质因子达到 12.5。同时, 研究了太赫兹电场方向对滤波器性能的影响。高 Q 太赫兹滤波器的研制为制备高速太赫兹电调制器等太赫兹器件提供了重要的实验依据。

关键词: 太赫兹滤波器; 镜像非对称结构; 双层胶剥离法

中图分类号: TN713

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201505.0696

Metamaterial structure based high quality terahertz filter

ZHANG Lili^{1,2}, ZHANG Xiaoyu^{1*}, XU Feng², QIN Hua¹

(1. Nano Device and Material Department, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou Jiangsu 215125, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

Abstract: Terahertz(THz) filters with mirrored asymmetric metamaterial structure have been studied based on the micro-nanofabrication technology. According to the finite difference time domain theory, the electric field and current density distribution of the microstructure are simulated and analyzed. The mechanisms of THz electromagnetic resonance of THz filter and physical mechanism of THz radiation loss are also described. The asymmetric split ring of micro-structures is designed and optimized in order to reduce the radiation loss and improve the Q value of the quality factor. The performance of the THz filter is characterized in the THz Time Domain Spectroscopic(THz-TDS) system. It is found that the quality factor of the filters with mirrored asymmetric metamaterial reaches up to 12.5 at the frequency of 0.923 THz. At the same time, the dependence of the direction of THz electric-field E on the performance of THz filter is studied as well. The study of the THz filter provides an important experimental basis for the development of THz devices, such as electrically tunable THz modulator.

Key words: terahertz filters; mirrored asymmetric structure; double-layered photoresist for lift-off

超材料(Metamaterial)是具有人工设计结构并呈现出自然材料所不具备的新颖物理性质的复合材料, 如负折射率、隐身、超聚焦等^[1-5]。Metamaterial 通常由亚波长结构的金属共振单元和电介质组成, 其独特的电磁特性主要来源于共振结构单元。当电磁波垂直入射 Metamaterial 结构时, 在每一个单元结构表面的金属内部形成了感应电磁场, 金属线部分就相当于一个电感 L , 金属线开口处等效成一个电容 C , 组成了 LC 谐振电路^[6-7]。当低频电磁波入射表面时, 将激发大范围的电子移动, 使得电子吸收部分能量, 且沿缝隙的感应电流很小, 此时透射系数比较高。随着入射波频率的不断升高, 这种电子移动的范围将逐渐减小, 沿缝隙流动的电流在不断增加, 当入射电磁波的频率达到一定值时, 狭缝两侧的电子刚好在入射波电场矢量的驱动下来回移动, 在缝隙周围形成较大的感应电流, 而狭缝处电场强度达到最大, 电磁波透射率达到最小。

收稿日期: 2014-11-13; 修回日期: 2014-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61107093; 51271093); 江苏省杰出青年基金资助项目(BK20140035)

*通信作者: 张晓渝 email:xyzhang2010@sinano.ac.cn

平面超材料结构太赫兹滤波器通常品质因子(Quality Factor, Q) Q 较低, 一般不超过 10, 其主要原因是太赫兹波段的金属损耗和电磁辐射损耗^[8-10]。在 2 种损耗中, 由于金属电导率很高而欧姆损耗较小, 因此, 平面型滤波器中主导损耗的机制是电磁辐射损耗。图 1(a)是基于有限元方法模拟普通四环结构感应电流示意图。当 THz 波垂直入射滤波器表面并激发金属环感应电流时, 4 个金属环中感应电流是同相的, 谐振时太赫兹波形成强电磁辐射模式的 LC 谐振, 导致 Q 值下降。图 1(b)为模拟镜像非对称四环阵列结构的感应电流示意图, 单元结构中 4 个开口共振环呈镜像结构, 开口中心与环中心水平距离为 δ 。镜像四环非对称结构由于相邻环中激发的感应电流呈异相, 可以形成一个忽略偶极矩的亚辐射 LC 谐振模式, 很好地抑制了太赫兹波的辐射损耗, 有效提高器件 Q 值。Al-Naib 等人在镜像四环结构滤波器中也做出了研究, 在 0.7 THz 的频率下发生共振, 实验中滤波器品质因子能达到 24^[10], 但是这种结构引起的共振插入损耗很高。本文设计了补偿开口环镜像非对称结构作为太赫兹滤波器基本单元, 电磁谐振时更有利于开口狭缝处高太赫兹电场强度的形成, 提高 Q 值, 同时减小器件插入损耗。平面高 Q 滤波器的研制可以为制备吸波器件以及平面型高速电调制器等太赫兹器件提供重要的参考^[11-12]。

1 样品制备和实验测试

滤波器是基于半导体微纳加工技术采用双层胶剥离工艺制备而成。基片为 1 cm×1 cm 高阻硅片裂片。双层胶工艺采用 AZ5214 和 LOR10A 2 种光刻胶, 首先在高阻硅上涂覆六甲基二硅胺(HMDS)粘附剂, 以增强光刻胶与硅片的粘附性。接着分别涂覆 LOR10A 和 AZ5214, 曝光显影后对应滤波器结构的光刻胶被去除, 采用电子束蒸镀制备约 250 nm Ni/Au 金属层(粘附层 Ni 为 50 nm, 金属层 Au 为 200 nm), 将样品在丙酮溶液中浸泡进行剥离工艺, 最后将样品在 3038 显影液中浸泡去除 LOR10A 光刻胶, 剥离后得到的器件显微照片如图 1(d)和图 1(e)所示。实验结果表明, 采用双层胶剥离工艺要比采用单一 AZ5214 光刻胶剥离制备的金属开口环结构具有更光滑和更陡直的边缘。太赫兹透射谱样品采用 ADVANTEST 公司的太赫兹时域光谱(Terahertz Time Domain Spectroscopy, THz-TDS)系统 TAS7500SP, 本实验太赫兹测试频段为 0.2 THz~1.6 THz。滤波器工作频率可以由器件微结构尺寸和介质材料共同决定, 文中样品微结构参数 $p=220\text{ }\mu\text{m}$, $w=3\text{ }\mu\text{m}$, $g=3\text{ }\mu\text{m}$, $x=20\text{ }\mu\text{m}$, $\delta=4.5\text{ }\mu\text{m}$ 是根据时域有限差分模拟和现有微纳加工实验条件综合考虑取得的。微结构参数中变量为 y , 在其他参数固定情况下调节该参数能灵敏调整器件工作频率。

2 实验结果与讨论

图 2 为基于时域有限差分模拟不同参数 y 时样品的太赫兹透射率。可以看到, 随着 y 的改变, 即开口环纵向长度的改变, 滤波器工作频率能在很大范围内进行调整, 由此可以有效地设计滤波器件工作频率。其次, 随着 y 的增加, 器件工作频率向低频移动, 这主要是金属线长度的增加, 引起开口环等效电路中电感量部分的升高, 从而导致器件工作频率降低。

图 3 为 $y=20\text{ }\mu\text{m}$ 样品在谐振频率处模拟开口环电流密度的分布图。可以清楚地看到, 镜像四环非对称结构相邻两开口环中电流方向反相, 与图 1(b)普通四环结构中同相感应电流不同。普通四环结构中, 同相感应电流会引

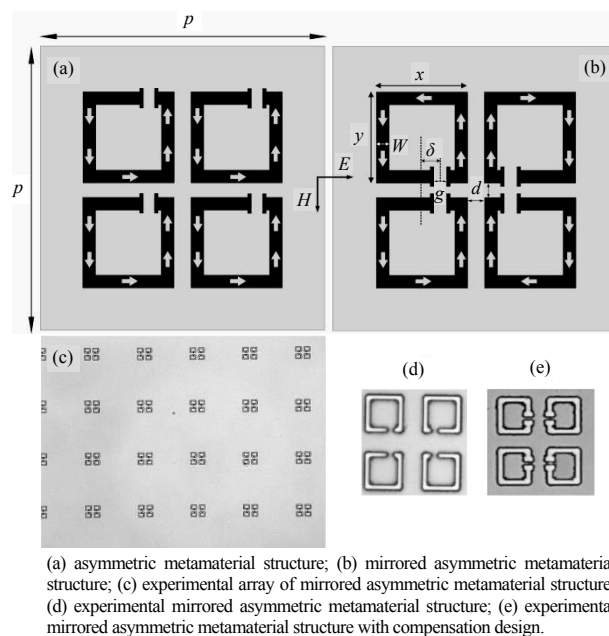


Fig.1 Schematic diagram of planar metamaterial

图 1 平面超材料结构示意图

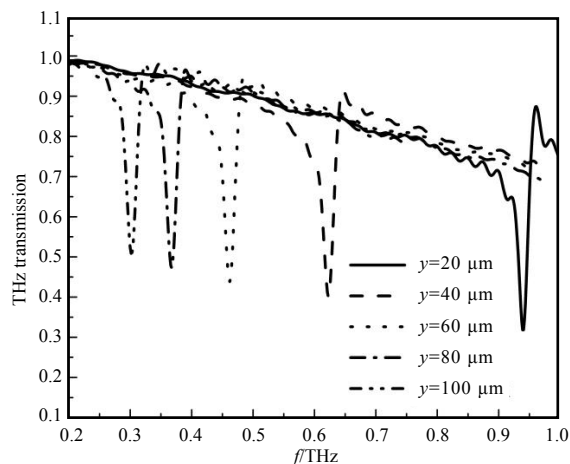


Fig.2 Simulated transmission spectra for the mirrored asymmetric metamaterials of different y -parameters

图 2 样品不同尺寸参数 y 的太赫兹透射谱模拟曲线

起辐射场的相长干涉从而诱发超辐射 LC 共振模式(高辐射)。而感应电流方向异相将导致镜像四环非对称结构产生辐射场的相消干涉,从而形成可忽略偶极矩相互作用的亚辐射 LC 共振模式(低辐射)。在这种亚辐射 LC 共振模式结构中,谐振时大部分电磁能量被储存在微结构中产生高 Q 共振。这也是镜像四环非对称结构相比于普通四环结构应用于高 Q 滤波器的优势。

图4是采用TDS系统测试不同 y 值样品太赫兹波透射率,太赫兹电场 E 垂直开口环狭缝。实验模拟和结果统计于表1中。可以看到,滤波器共振频率 f_r 实验值虽略小于模拟值,但二者基本是吻合的。然而,滤波器品质因子 $Q=f_r/\Delta f$ 实验值远小于模拟值,设计补偿结构开口环滤波器 Q 值最大为样品 $y=20\text{ }\mu\text{m}$ 的12.5,比未设计补偿结构开口环滤波器(图1(d)结构) $Q=8.6$ 增加约50%。对滤波器低 Q 值做进一步实验和理论的分析,模拟结果表明,滤波器插入损耗约-3 dB,即该类型的平面结构太赫兹滤波器电磁损耗约为50%,目前TDS测试滤波器的实际损耗为65%,因此,滤波器低 Q 值不仅来源于器件本身的电磁损耗,还来自TDS测试系统和器件微纳加工方面的因素。在TDS测试方面,测试系统频率分辨率最高为3.8 GHz,该频率分辨率对带宽约为21 GHz的谐振峰无法很好描绘,因此TDS测试系统导致测得的器件 Q 值较低。微纳工艺方面,金属剥离后狭缝直角通常呈现不同程度的圆角,甚至是尺寸的缩减,这将减小器件电磁谐振时狭缝处形成太赫兹电场强度的幅值,从而引起LC谐振强度的减弱,插入损耗变高, Q 值下降。此外,太赫兹电场与开口环狭缝方向如果不严格垂直,同样将减小开口环狭缝处太赫兹电场强度的大小,从而降低器件 Q 值。

当太赫兹波入射电场与滤波器开口环狭缝存在夹角 θ 时,太赫兹电场在水平和垂直狭缝2个方向产生分量,这将直接影响器件滤波性能。图5为THz-TDS测试系统中在与太赫兹波入射垂直平面内转动样品,测试角度 θ 从 0° ~ 90° 变化的透射率曲线。可以看到,随着太赫兹电场 E 与狭缝偏离垂直角度越大,滤波器共振频率下的透射率逐步升高,如图5内插图所示。在此过程中电磁共振逐渐减弱,器件 Q 值也慢慢降低,当 $\theta=90^\circ$ 时,滤波结构的共振现象消失,在观察频段内呈现高通特性。随着 θ 角度的增加,太赫兹电场 E 在垂直狭缝方向的分量减少,谐振时垂直狭缝太赫兹电场强度分量 E 变小,转动将引起电容等效间距 d 变小,电容两端电压 $U=Ed$ 减小,由于转动时电荷量不变,等效电容 $C=Q/U$ 增大。同时认为由于狭缝中太赫兹电场强度 E 随着 θ 的增大而变小,狭缝中存储的最大太赫兹电场能变小,更多的太赫兹波将透射过去,共振强度减小。另外还发现微结构转动时LC谐振电路的共振频率未发生变化,虽然微结构等效电容 C 增大,但很可能参与谐振金属线的等效长度变小,因此谐振频率并无变化。

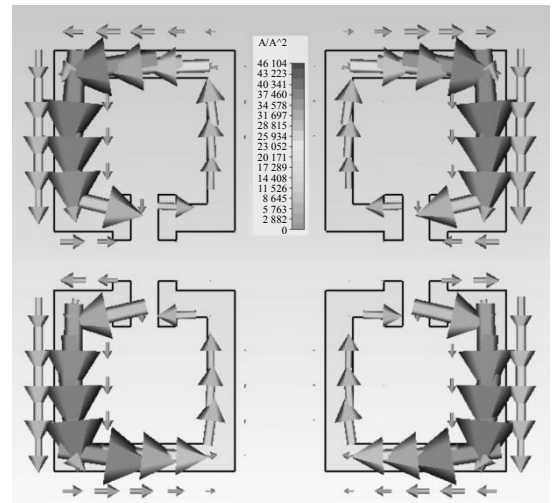


Fig.3 Current distribution of the filter at resonance frequency
图3 滤波器谐振时开口环中电流密度分布

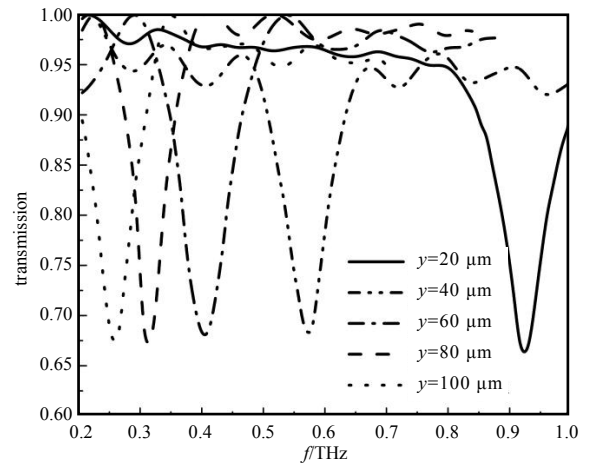


Fig.4 Experimental transmission spectra for the mirrored asymmetric metamaterials of different y -parameters
图4 不同 y 尺寸结构滤波器TDS测试的透射谱

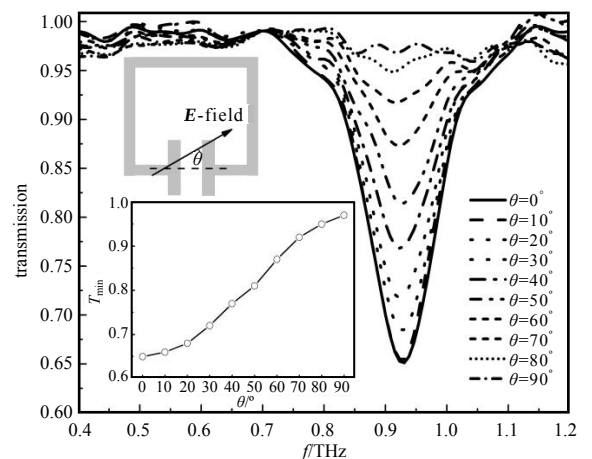


Fig.5 Experimental transmission spectra for the mirrored asymmetric metamaterials of different rotational angles (Insert:relationship between valley value of transmittance and angle θ).

图5 旋转样品 $y=20\text{ }\mu\text{m}$ 时的太赫兹透射谱,插图为透射率谷值随 θ 的关系

表 1 不同尺寸 y 滤波器性能
Table1 Filter performance of different y -parameters

$y/\mu\text{m}$	f_t/THz		Q		insertion loss/dB
	simulated values	experimental values	simulated values	experimental values	
20	0.939	0.923	44.7	12.50	-3.00
40	0.623	0.578	27.1	12.10	-3.25
60	0.462	0.404	22.0	4.60	-3.59
80	0.367	0.320	18.8	5.70	-3.97
100	0.301	0.259	16.8	3.45	-4.97

3 结论

在时域有限差分理论和半导体微纳工艺基础上研究了基于镜像非对称结构超材料太赫兹滤波器的性能。滤波器器件工作频率与模拟结果很好地吻合，但滤波器 Q 值只有 12.5，远低于模拟值。分析认为，滤波器低 Q 值主要是由于 TDS 测试系统频率分辨率较低导致，更高频率分辨率系统可以获得更准确的测试。其次，微纳工艺中金属结构制备不完整性以及太赫兹电场方向与开口环狭缝不垂直同样影响电磁谐振时狭缝处形成的太赫兹电场强度，引起 LC 谐振强度的减弱和品质因子的下降。

参考文献：

- [1] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. Science, 2001, 292(5514): 77-79.
- [2] Valentine Jason, ZHANG Shuang, Zentgraf Thomas, et al. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index[J]. Nature, 2008, 455(7211): 376-379.
- [3] ZHANG S, Park Y S, LI J, et al. Negative refractive index in chiral metamaterials[J]. Physical Review Letters, 2009, 102(2): 023901.
- [4] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. Physical Review Letters, 2000, 85(18): 3966.
- [5] 崔博华, 王成, 郑英彬. 太赫兹 MEMS 滤波器性能影响因素[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(2): 319-322. (CUI Bohua, WANG Cheng, ZHENG Yingbin. Influencing factors on performance of terahertz MEMS filter[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(2): 319-322.)
- [6] Holden A J, Robbins D J. Low frequency plasmons in thin-wire structures[J]. Journal of Physics Condensed Matter, 1998, 10(22): 4785-4809.
- [7] YANG Y, HUANG R, CONG L, et al. Modulating the fundamental inductive-capacitive resonance in asymmetric double-split ring terahertz metamaterials[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(12): 121114-121114-3.
- [8] Lee J, Seo M, Park D, et al. Shape resonance omni-directional terahertz filters with near-unity transmittance[J]. Optics Express, 2006, 14(3): 1253-1259.
- [9] Libon I H, Baumgärtner S, Hempel M, et al. An optically controllable terahertz filter[J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(20): 2821-2823.
- [10] Al-Naib I, Singh R, Rockstuhl C, et al. Excitation of a high- Q subradiant resonance mode in mirrored single-gap asymmetric split ring resonator terahertz metamaterials[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(7): 071108-071108-4.
- [11] ZHANG X, TAN R, ZHENG Z X, et al. Terahertz filters based on frequency selective surfaces for high-speed terahertz switch[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(1): 014504-014504-4.
- [12] CHEN H T, Padilla W J, Zide J M O, et al. Active terahertz metamaterial devices[J]. Nature, 2006, 444(7119): 597-600.

作者简介：



张力力(1989-), 男, 江苏省溧阳市人, 在读硕士研究生, 从事非晶合金以及太赫兹器件研究. email: llzhang2012@sinano.ac.cn.

张晓渝(1978-), 男, 江苏省常州市人, 博士, 副研究员, 从事半导体太赫兹器件的调控研究.

秦 华(1972-), 男, 江苏省常州市人, 博士, 研究员, 从事半导体微纳器件与太赫兹器件研究.

徐 锋(1978-), 男, 江苏省南通市人, 博士, 教授, 从事磁性薄膜电磁耦合机理及微波特性的研究.