

〈太赫兹技术〉

基于超材料的太赫兹分波器的研究

张雪雯, 潘武, 沈涛, 李焱

(重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065)

摘要: 本文提出了一种基于超材料的太赫兹分波器, 其结构单元由上下两层“一”字型金属线以及中间的石英介质构成。此分波器工作在太赫兹通信窗口, 将中心频率为 0.225 THz 和 0.300 THz 的两束太赫兹波分离, 其隔离度分别为 34 dB、47 dB, 插入损耗分别为 0.19 dB、0.04 dB, 分波器的群延迟稳定。另外, 也对分波器的等效参数以及结构参数变化进行了仿真分析。结果表明, 所设计的太赫兹分波器具有插入损耗小、隔离度大、群延迟稳定等特点, 且性能指标受参数变化的影响较小, 在太赫兹通信系统中具有较好的应用前景。

关键词: 太赫兹; 分波器; 超材料

中图分类号: TN304.12 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2021)06-532-05

Research on Terahertz Band Demultiplexer Based on Metamaterials

ZHANG Xuewen, PAN Wu, SHEN Tao, LI Yi

(College of Photoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: This paper proposes a terahertz demultiplexer based on metamaterials; its unit cell is composed of two layers of "one" shaped metal wires and a quartz substrate in the middle. The terahertz demultiplexer works in the terahertz communication window and demultiplexes two beams of terahertz waves with center frequencies of 0.225 THz and 0.300 THz. The isolation of the terahertz demultiplexer is 34 dB and 47 dB, and its insertion loss is 0.19 dB and 0.04 dB, respectively. The group delay of the demultiplexer was relatively stable. Finally, the influence of the effective and structural parameters of the demultiplexer on its performance are discussed. This terahertz demultiplexer has low insertion loss, large isolation, and stable group delay, and its performance is less affected by parameter changes. It has significant application prospects in practical terahertz communication systems.

Key words: terahertz, demultiplexer, metamaterial

0 引言

太赫兹通信因其具有频谱资源带宽宽、传输时延低、通信容量大等优势而备受关注, 是未来 6G 移动通信系统极具前景的宽带通信技术^[1-2]。为了有效地提高太赫兹带宽利用率, 增大容量, 灵活组网, 在太赫兹通信系统中开展波分复用技术的研究具有必要性和现实意义^[3]。合波器(复用器, Multiplexer)和分波器(解复用器, Demultiplexer)是波分复用系统的重

要器件^[4]。在太赫兹频段内, 目前复用及解复用器件的研究还很少, 并且主要集中在基于光子晶体的太赫兹分波器的研究^[5]。

2015年, Li Jiusheng^[6]提出了一种基于光子晶体的四通道分波器, 最后输出了 0.585 THz、0.537 THz、0.560 THz 和 0.524 THz 四种波长的太赫兹波, 其插入损耗分别为 0.127 dB、0.285 dB、0.313 dB 和 0.399 dB, 信道的隔离度分别为 12 dB、11 dB、13 dB 和 22 dB, 此分波器只有一个信道的隔离度

收稿日期: 2020-06-09; 修订日期: 2020-10-22.

作者简介: 张雪雯(1996-), 女, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 现主要从事太赫兹超材料分波器研究。E-mail: zzw0115@163.com。

通信作者: 潘武(1966-), 男, 四川大英人, 教授, 现主要从事太赫兹技术、超介质材料研究。E-mail: panwu@cqupt.edu.cn。

基金项目: 重庆邮电大学新方向培育计划项目(A2014-116)。

大于 20 dB。2016 年, Li Shaopeng^[7]提出了光子晶体太赫兹波分复用器, 该器件在 1.07~1.16 THz 的频率范围内有 3 个传输峰, 分别为 1.09 THz、1.12 THz 和 1.13 THz, 其插入损耗分别为 1.92 dB、0.96 dB 以及 1.93 dB, 此分波器有两个通道的插入损耗都大于 1.5 dB。近几年基于光子晶体的太赫兹分波器的隔离度大多都在 15 dB 左右, 在实际通信系统中, 分波器的隔离度要求最小应大于 22 dB, 并且要求插入损耗小于 1.5 dB^[8], 所以太赫兹分波器的隔离度有待提高并且插入损耗有待减小。光子晶体加工困难、价格昂贵, 不利于大批量的生产和应用^[9], 而超材料相对于光子晶体来说, 更易于加工。本文主要研究基于超材料的太赫兹分波器, 为太赫兹波分复用器件的研究提供一个新的方向。

1 超材料分波器

超材料的单元结构是亚波长尺寸, 即可看成均匀介质。均匀分层介质中的介电层可以用传输线模型进行建模^[10]。如图 1 所示, 超材料与自由空间构成传输线网络。从太赫兹波入射方向看, 传输线网络的输入阻抗为超材料, 特征阻抗为自由空间。

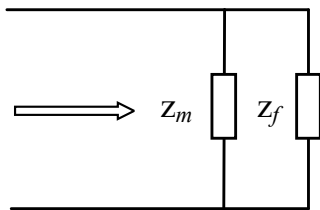


图 1 超材料等效传输线模型

Fig.1 Metamaterial equivalent transmission line model

对于 TM 波而言, 反射系数 r 与透射系数 t 可表示为:

$$r = \frac{Z_m - Z_f}{Z_m + Z_f} \quad (1)$$

$$t = \frac{2Z_m}{Z_m + Z_f} \quad (2)$$

式中: Z_m 为超材料阻抗; Z_f 为自由空间阻抗。(1)式中, 当 $Z_m = Z_f$ 时, 即自由空间阻抗与材料的阻抗匹配时, 反射波达到最小值^[11]。(2)式中, 当 $Z_m = 0$ 时, $t = 0$ 。超材料的等效阻抗与自由空间阻抗进行归一化表示为:

$$Z_e = Z_m / Z_f = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3)$$

若阻抗匹配, 则超材料归一化阻抗的实部为 1, 虚部为 0^[12]。(3)式中 ϵ 为等效介电常数, μ 为等效磁导率。若用等效电路相关参数来表示超材料的等效阻抗,

则超材料表面等效阻抗:

$$Z_s = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (4)$$

谐振频率则为:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

式中: L 、 C 分别为等效电感和等效电容, 当超材料表面金属层的尺寸发生变化时, 等效电感和电容会相应地变化, 从而等效阻抗发生变化。由于超材料的等效参数取决于单元结构, 想要改变超材料的性质, 则需要对单元结构进行调整。

利用超材料实现分波功能, 需要将两种频率的太赫兹波在空间上分开, 以达到分波的目的。图 2(b) 为超材料分波器的示意图, 当 f_1 和 f_2 两种频率的太赫兹波在 xoz 面内同时入射到超材料表面时, 假设 f_1 反射, 接收反射波 f_1 的端口为 port 1; f_2 透射, 接收透射波 f_2 的端口为 Port 2。以 Port 1 为例, 超材料分波器的隔离度与插入损耗的计算式为:

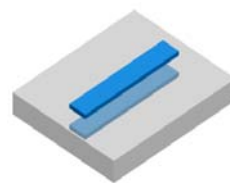
$$ISO = 10 \times \log\left(\frac{P_{in1}}{P_{out2}}\right), \quad IL = 10 \times \log\left(\frac{P_{in1}}{P_{out1}}\right) \quad (6)$$

$$S_{11} = 10 \times \log\left(\frac{P_{out1}}{P_{in1}}\right), \quad S_{21} = 10 \times \log\left(\frac{P_{out2}}{P_{in1}}\right) \quad (7)$$

式中: P_{in1} 与 P_{out1} 分别为 Port1 的输入功率与接收端 Port 1 的输出功率, P_{out2} 为 f_1 泄漏到 Port 2 的功率, 隔离度和插入损耗可表示为:

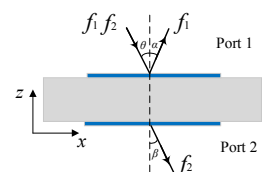
$$ISO = |S_{21}|, \quad IL = |S_{11}| \quad (8)$$

图 2(a)为超材料分波器单元结构图。图 2(b)为超材料太赫兹分波器 xoz 截面图。(c)为超材料太赫兹分波器的单元结构尺寸示意图。上层金属图案与下层金属图案一致, 都为“一”字型金属, 长 $l = 458 \mu\text{m}$, 宽 $w = 16 \mu\text{m}$, 顶层和底层的金属材料是金(电导率: $4.56 \times 10^7 \text{ S/m}$), 介质层是石英(相对介电常数: 3.75), 厚度为 $d = 50 \mu\text{m}$, 超材料单元周期 $P = 600 \mu\text{m}$ 。图 2(d)为超材料阵列的结构示意图, 太赫兹波入射在 xoz 面内。



(a) 三维图

(a) Perspective view



(b) 分波示意图

(b) Schematic diagram of demultiplexing

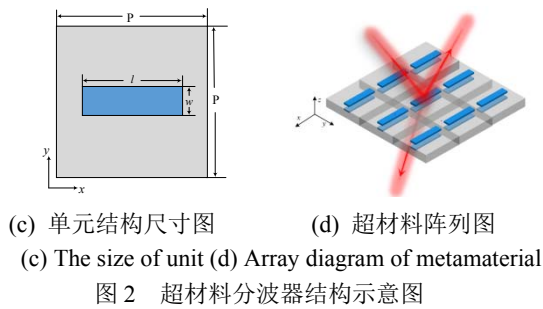


图2 超材料分波器结构示意图
Fig.2 Schematic diagram of metamaterial

2 仿真与分析

利用 CST 软件对此结构进行仿真，入射太赫兹波为 TM 模式，法线方向为 z ，太赫兹波入射方向与 z 轴的夹角 θ 为 10° ，反射角为 α ，透射角为 β ，如图 2(b) 所示。图 3 为分波器的 S 参数曲线仿真结果：在 f_1 ($0.222 \sim 0.228$ THz) 范围内，分波器的隔离度均大于 22 dB，在 0.225 THz 处的隔离度最大为 34 dB，插入损耗为 0.19 dB。在 f_2 ($0.291 \sim 0.312$ THz) 范围内，分波器的隔离度均大于 22 dB，在 0.300 THz 处的隔离度最大为 47 dB，插入损耗为 0.04 dB。此分波器对于上述两个频段范围内的隔离效果都较好，并且插入损耗较小，利于通信信号的有效传输。

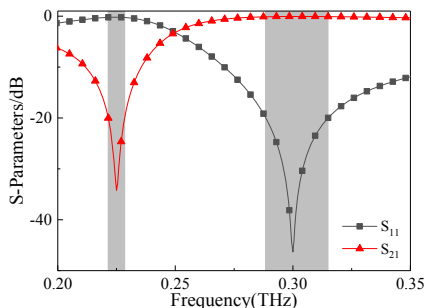


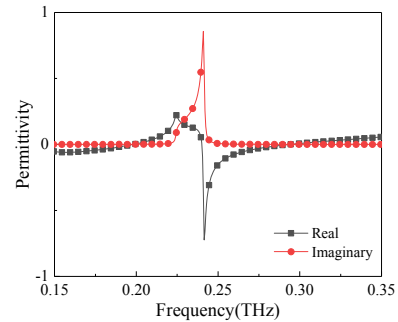
图3 分波器 S 参数曲线仿真结果图
Fig. 3 S-parameters curves of demultiplexer

为了探究超材料的谐振特性，将得到的 S 参数进行参数反演，超材料的等效参数如图 4 所示，其中(a)(b)(c)分别为等效介电常数、等效磁导率以及等效阻抗。

图 4(a)中在频率 0.220~0.250 THz 范围内发生了电谐振^[13]。相同频段内，(b)并无谐振现象，因此在 0.225 THz 处发生的谐振是由电谐振引起的。在 0.300 THz 处，并无任何谐振存在，介电常数和磁导率虚部均为 0，并且实部相等，即 $\epsilon = \mu$ ，可得 $Z_e = 1$ ，在 0.300 THz 的阻抗实部为 1 虚部为 0，满足阻抗匹配条件，此时反射波达到最小。

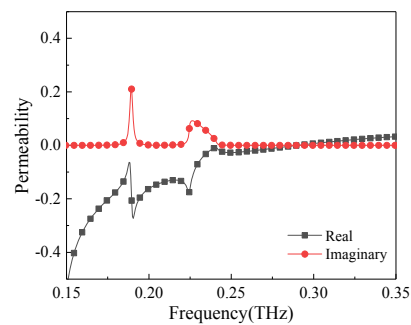
群延迟表征不同频率信号产生的时间延迟，采用固定相位近似的方法，利用相移对角频率求导^[14]，若是通带内群延迟的差异过大则会引起信号失真^[15]，因此，

通带内群延迟差异越小越好，理想状态下，群延迟为一个固定的常数。



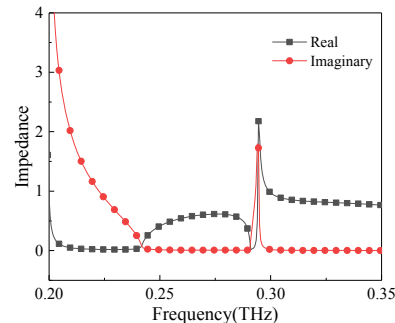
(a) 超材料等效介电常数

(a) Effective permittivity of metamaterials



(b) 超材料等效磁导率

(b) Effective permeability of metamaterials



(c) 超材料等效阻抗

(c) Effective impedance of metamaterials

图4 超材料等效参数

Fig.4 Effective parameters of metamaterials

针对群延迟现象，分别仿真计算了上述两个端口所在的工作频率范围内的群延迟，图 5(a)为 Port 1 的群延迟仿真结果。在 Port 1 处，群延迟平均值为 6.74 ps，群延迟最大差值为 0.44 ps。(b)则为 Port 2 群延迟仿真结果，在 Port 2 处，群延迟随着频率的增高而缓慢递减，平均值为 3.61 ps，群延迟差值的最大值为 1.84 ps。未来 6 G 的通信延迟估计为 0.1 ms^[16]，而从上述两个端口的群延迟数据可以看出，在 f_1 与 f_2 的工作频率范围内，太赫兹分波器的群延迟差值小，较为稳定。

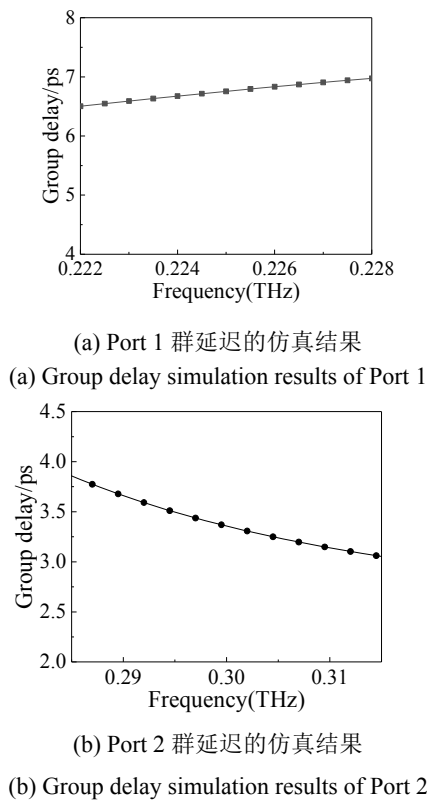


图 5 分波器工作频段内群延迟

Fig.5 Group delay simulation results of working frequency

3 结构参数对分波器性能的影响

为了探究太赫兹分波器的相关尺寸参数的变化对太赫兹分波器的性能的影响, 在其他条件保持不变的情况下, 分别改变双层金属长度 l 、金属线宽 w 、石英介质厚度 d 以及双层金属条的相对位置 t 并在 CST 中仿真。

图 6 为结构尺寸对分波器性能的影响。图(a)(b)(c) 分别表示金属条长度 l 、宽度 w 、以及介质厚度 d 参数的变化对 S 参数曲线的影响。双层金属短截线结构^[17] 的等效电感主要由短截线的自感决定, 数值表示为 $L = \mu l(d/w)$, 等效电容主要由层间电容决定, 数值表示为 $C = \epsilon w l/d$ 。上文中提到了谐振频点与等效电容、电感有关, 根据上述表达式, 即可推导相关参数变化与谐振频点的关系。透射曲线的频移只与 l 有关, 并且与 l 成反比^[18], 所以透射曲线红移。另外, 从上图也可以看出, 宽度变化对于反射曲线更为敏感, 随着宽度增加, 反射曲线蓝移。并且反射曲线的变化与介质厚度成反比, 厚度越大, 反射曲线红移。为了探究上下金属条不对准对超材料性能的影响, 图(d)为上下金属条在 xoz 面内向 y 轴方向平移的相对距离后的 S 参数曲线, 发现金属条不对准对于透射和反射曲线几乎无影响。

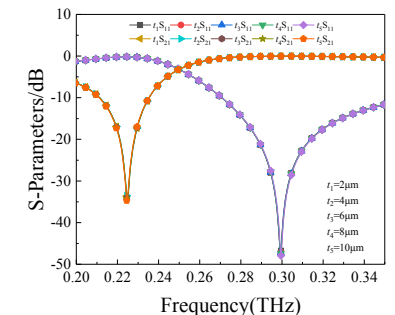
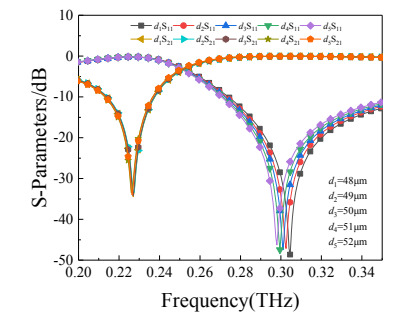
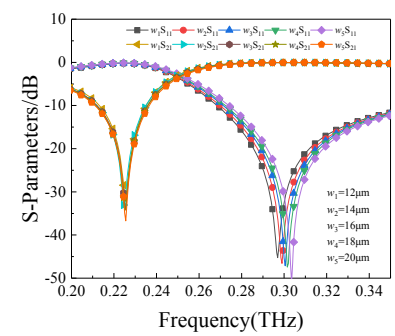
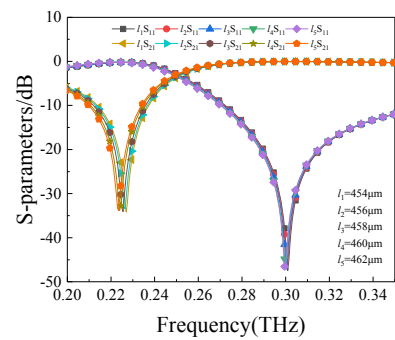


图 6 结构尺寸的改变对分波器性能的影响

Fig.6 Influences of structural changes on performance

4 结论

本文首先讨论了现有太赫兹分波器的待改进的方面,提出了基于超材料的太赫兹分波器。该分波器工作在太赫兹大气窗口附近,在两个工作频率范围的中心频率处,其隔离度分别为 34 dB 和 47 dB,插入损耗分别为 0.19 dB 和 0.04 dB。通过 S 参数反演的方法得到了超材料分波器的等效参数。随后计算了太赫兹超材料分波器的群延迟,可以看到两个端口的群延迟均变化较小,保证了信号的不失真传输。最后讨论了结构参数对分波器性能的影响。结构参数的变化仅会使两个端口的工作频段产生微小频移,对插入损耗和隔离度均没有明显影响,因此本文提出的太赫兹超材料分波器有望能应用于未来的太赫兹通信系统中。

参考文献:

- [1] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 963-987.
ZHAO Yajun, YU Guanghui, XU Hanqing. 6G mobile communication network: vision, challenges and key technologies[J]. *Science in China: Information Science*, 2019, 49(8): 963-987.
- [2] 陈亮, 余少华. 6G 移动通信发展趋势初探[J]. 光通信研究, 2019, 45(4): 1-2.
XU Liang, YU Shaohua. Preliminary study on the development trend of 6G mobile communication[J]. *Optical Communication Research*, 2019, 45(4): 1-2.
- [3] 莫秋燕, 吴家隐. 波分复用系统的研究综述[J]. 信息通信, 2019(7): 191-192.
MO Qiuyan, WU Jiayin. Review of research on wavelength division multiplexing system[J]. *Information and Communication*, 2019(7): 191-192.
- [4] 孟宪浩. 密集波分复用系统中合波器/分波器的测试[J]. 电气化铁道, 2002(1): 41-42.
MENG Xianhao. Test of multiplexer/demultiplexer in dense wavelength division multiplexing system[J]. *Electrified Railway*, 2002(1): 41-42.
- [5] Yata M, Fujita M, Nagatsuma T. Photonic-crystal diplexers for terahertz-wave applications[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7835-7849.
- [6] LI Jiusheng, HAN L, LE Z. Compact four-channel terahertz demultiplexer based on directional coupling photonic crystal[J]. *Optics Communications*, 2015, 350: 248-251.
- [7] LI S, LIU H, SUN Q, et al. Multi-channel terahertz wavelength division demultiplexer with defects-coupled photonic crystal wave guide[J]. *Journal of Modern Optics*, 2016, 63(10): 955-960.
- [8] Telecommunication Standardization Sector of ITU. Series G: Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks: ITU-T G695 [S]. 2018.
- [9] 丁涛, 刘占芳, 宋恺. 三维光子晶体的制备[J]. 化学进展, 2008, 20(9): 1283-1293.
DING Tao, LIU Zhanfang, SONG Kai. Fabrication of three-dimensional photonic crystals[J]. *Chemical Progress*, 2008, 20(9): 1283-1293.
- [10] ZHANG L, ZHANG S, LIU Y, et al. Broadband tunable frequency selective surface for steerable antenna applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2016, 64(12): 5496-5500.
- [11] Osipov A V. Minimum reflection properties of planar impedance-matched boundaries[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2014, 62(11): 5666-5670.
- [12] Lim J H, LIU T, Kim S S. Numerical analysis of complex impedance and microwave absorption of metamaterials composed of split cut wires on grounded dielectric substrate[J]. *Applied Physics A*, 2014, 117(3): 1401-1407.
- [13] XIONG X, SUN W H, BAO Y J, et al. Switching the electric and magnetic responses in a metamaterial[J]. *Physical Review B*, 2009, 80(20): 2665-2668.
- [14] Stojanović D B, Radovanović J, Milanović V. Influence of the geometry of terahertz chiral metamaterial on transmission group delays[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, 48(4): 272.
- [15] 白胜元, 顾培夫, 刘旭, 等. 波分复用薄膜干涉窄带滤光片的设计[J]. 光学仪器, 2001(Z1): 114-119.
BAI Shengyuan, GU Peifu, LIU Xu, et al. Design of WDM thin-film interference narrowband filter[J]. *Optical Device*, 2001(Z1): 114-119.
- [16] Piran M J, Suh D Y. Learning-driven wireless communications, towards 6G[C]//2019 International Conference on Computing, Electronics & Communications Engineering(ICCECE), 2019: 219-224.
- [17] Wakatsuchi H, Paul J, Greedy S, et al. Cut-wire metamaterial design based on simplified equivalent circuit models[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2012, 60(8): 3670-3678.
- [18] MIN L, HUANG L. Perspective on resonances of metamaterials[J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19022.