

# 太赫兹频段高折射率超材料的设计和特性研究

高喜 张燕

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

**摘要** 设计了太赫兹频段的高折射率超材料,该结构是通过在介质板的两侧对称的蚀刻“双开口环”型金属贴片而构成.研究表明:当电磁波垂直入射的情况下,谐振频率(0.52 THz)附近的折射率高达 200,且在 0.51 THz 到 2 THz 频段范围内,折射率均大于 70.该超材料具有结构简单、便于加工,宽带等优点,在太赫兹波通信、成像等方面有广阔的应用前景.

**关键词** 太赫兹;超材料;高折射率

**中图分类号** TN04

**文献标识码** A

## 0 引言

人工电磁超材料是一种结构单元尺寸远远小于工作波长的人工周期性结构,具有天然材料所不具备的超常物理性能.通过改变单元结构的形状、几何参数及排列方式,可以获得任意等效介电常数和磁导率,从而达到任意控制电磁波的目的<sup>[1-4]</sup>.早期的超材料类型主要有负折射率超材料、近零折射率超材料、人工磁导体等.近年来,随着研究的不断深入,高折射率超材料已经引起了研究人员的广泛关注.通常,高折射率材料对成像系统的分辨率具有重要影响<sup>[5]</sup>,利用高折射率材料可以明显增大显微镜的数值孔径,从而提高显微镜的分辨率.同时,高折射率材料产生的慢光效应可以提高延迟线<sup>[6]</sup>的存储容量和干涉仪的光谱灵敏度<sup>[7]</sup>.

通过合理的设计单元结构和调节结构的几何尺寸,可以显著提高超材料的有效介电常数和有效磁导率,从而进一步提高材料的折射率.J. T. Shen 等人在 2005 年首次分析了获得高折射率超材料所需要的条件,同时设计了亚波长金属贴片阵列.通过提高相邻贴片的耦合电容,能够显著提高等效介电常数,从而使超材料呈现出高折射率特性<sup>[8]</sup>.2009 年,J. Shin 等人设计了一种三维高折射率超材料<sup>[9]</sup>,它主要是通过增加相对介电常数,来提高折射率,折射率的最大值达到了 4.2.然而,所提出的超材料具有复杂的该结构,难以获得实际应用.2011 年,M. Choi 等人以“工”字型单元结构构建超材料,在 THz 频段实现了超高折射率<sup>[10]</sup>.利用邻近工字型臂之间的强电偶极子谐振的特性,大幅度提高了等效介电常数,从而实现了等效折射率的显著提高.在 0.5 THz 附近,折射率峰值达到 28.2015 年,Tan S 等人提出了“Z”字型的各向异性结构<sup>[11]</sup>,其折射率的峰值为 14.36.最近,Leena Singh 提出了一种双层“田”字型超材料结构,通过双层金属之间电磁耦合,在 1.93 THz 处实现了 83.4 的超高折射率<sup>[12]</sup>.

本文设计了一种由金属-电介质-金属构成的夹层结构.通过减少单元之间的间隙和电介质层的厚度,可以有效增加超材料的电容效应,从而显著提高了超材料的等效介电常数;另一方面,通过压缩金属贴片的厚度,有效降低感应表面电流所包围的面积,这极大程度地降低了金属中的抗磁响应,从而显著提高了超材料的等效磁导率.由于同时提高了超材料的等效介电常数和等效磁导率,最终使得超材料的折射率得到了大幅度提高.通过 CST 仿真结果表明,在 0.51 THz 至 2 THz 的频率范围内,超材料的折射率大于 70,且 0.52 THz 的谐振频率附近,折射率达到 200.

收稿日期:2019-03-01

基金项目:国家自然科学基金项目(61761010;61461016)资助

通讯作者:高喜,男,汉族,博士,教授,研究方向:电磁场与微波技术,E-mail:411725404@qq.com.

## 1 高折射率超材料单元的设计

图1为所提出的高折射率超材料单元结构示意图,通过将两个双开口环型的金属贴片对称的印制在电介质板的两侧形成.该结构中,介质板为聚酰亚胺,其相对介电常数为 $\epsilon_r = 3.5 + 9.45 \times 10^{-3}i$ ,厚度为 $d = 2.5 \mu\text{m}$ .双开口环型金属贴片的材料为铝(如图1中的深灰色部分),其电导率为 $3.56 \times 10^7 \text{ s/m}$ .结构单元的其他结构参数为:方形环的外边长 $a = 59 \mu\text{m}$ ,沿着 $y$ 方向的金属环的宽度 $W_1 = 3 \mu\text{m}$ ,沿着 $x$ 方向的金属环的宽 $W_3 = 2 \mu\text{m}$ ,中间金属臂的宽度 $W_2 = 5 \mu\text{m}$ ,开口环开口尺寸 $W_4 = 1 \mu\text{m}$ ,沿 $x$ 和 $y$ 方向的周期相同,为 $L = 60 \mu\text{m}$ .

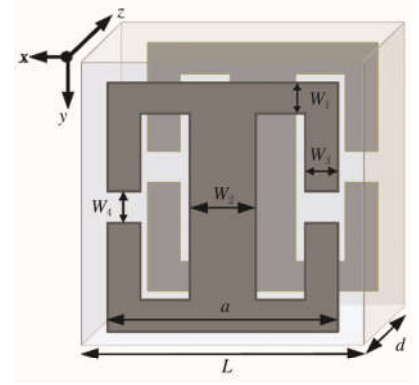


图1 高折射率超材料单元结构示意图

## 2 仿真结果及特性分析

为了验证所提出的结构具有高折射率特性,采用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 2016 的频域求解器,对其进行电磁仿真分析.在仿真中,通过将 $x$ 和 $y$ 方向边界条件设定为 unit cell,用以模拟周期结构; $z$ 方向为电磁波的传输方向.假定电磁波垂直入射到单元结构表面上,对结构的 $S$ 参数进行仿真计算.由于超材料结构单元的几何尺寸远小于工作波长,因此可将其等效为均匀介质,即可以利用等效媒质理论对超材料的电磁特性进行分析.为了能够有效分析超材料的等效折射率,采用文献<sup>[13]</sup>提出的反演方法对超材料的等效电磁参数进行反演计算,即

$$n = \frac{1}{kd} \cos^{-1} \left[ \frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right], \quad (1)$$

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (2)$$

式中 $n$ 为超材料的折射率, $z$ 为超材料的特性阻抗, $S_{11}$ 为反射系数, $S_{21}$ 为透射系数, $k$ 为入射波在自由空间中的波数, $d$ 为超材料的等效厚度.折射率 $n$ 和特性阻抗 $z$ 与介电常数 $\epsilon$ 和磁导率 $\mu$ 之间的关系可以表示为

$$\epsilon = \frac{n}{z}, \quad (3)$$

$$\mu = nz. \quad (4)$$

图2(a)为仿真得到的反射系数 $S_{11}$ 和透射系数 $S_{21}$ 曲线.从图2(a)中可以看出,反射系数 $S_{11}$ 曲线在0.52 THz处出现谐振峰值,其峰值为0.97,而透射系数 $S_{21}$ 曲线在0.96 THz处出现一个谐振峰,该谐振峰的峰值为0.96.2(b)显示超材料的折射率曲线,由图可知,折射率峰值出现在0.52 THz处,为200,且在0.51到2 THz的频率范围内,最小折射率超过70.为了分析超材料实现高折射率的物理机理,本文进一步仿真了超材料的等效介电常数和等效磁导率,结果如图2(c)-(d)所示.从图2(c)可以看出,结构在0.52 THz处产生了谐振,因此在该频点附近出现了超高的等效介电常数,最大值达到约4000,而从图2(d)进一步看出,在0.52 THz出的磁导率约为4.5,由 $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ 可知在0.52 THz处的折射率近似等于200,与图2(a)显示的结果是基本一致的.分析图2(c)和图2(d)可知,当频率高于0.52 THz(即0.51-2 THz频率范围内)时,尽管等效介电常数急剧下降(从图2(a)可知),但是等效磁导率提高了不少,如在1.0-1.5 THz范围内,等效磁导率整体高于15,这使得超材料在宽频带范围内具有高的折射率.因此同时提高超材料的等效介电常数和等效磁导率是设计高折射率超材料一种有效方法.此外,从品质因数(FOM)角度分析了超材料的损耗.根据参考文献<sup>[14,15]</sup>,FOM表示为

$$FOM = \text{Re}(n) / \text{Im}(n). \quad (5)$$

当FOM大于10时,说明超材料具有低损耗特性.将图2(b)中的折射率的实部和虚部代入方程(5)得到

FOM 随频率的变化关系,如图 3 所示.图中显示,在 0.51 THz 到 2 THz 的频率范围内,FOM 均大于 10,说明所提出的超材料在该频段具备低损耗特性.

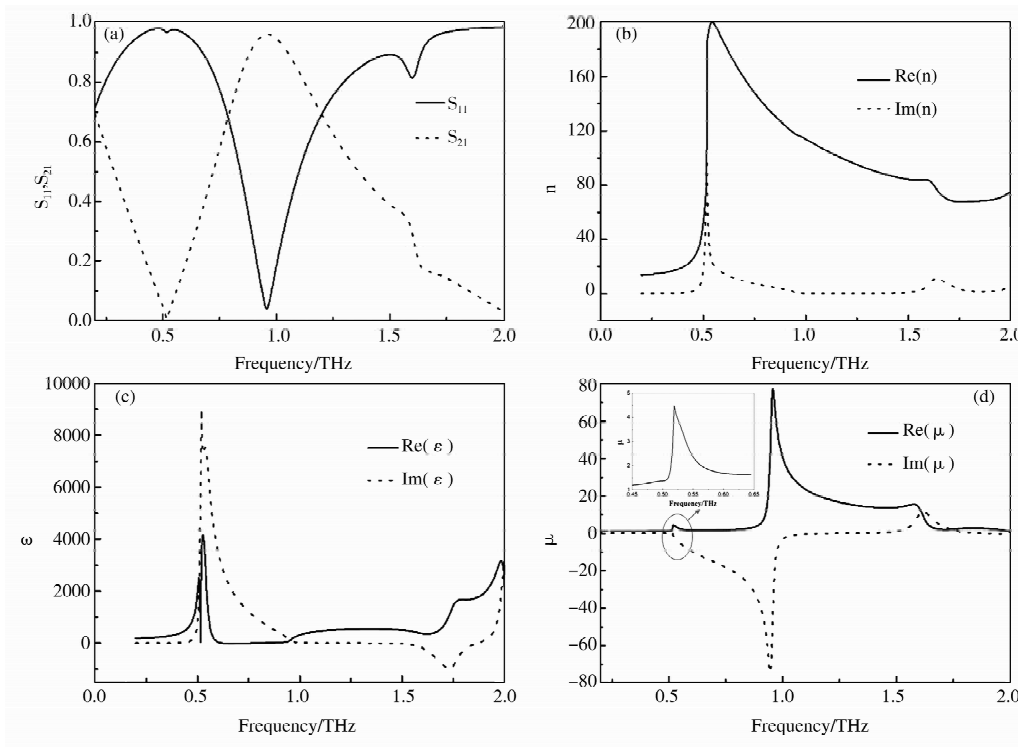


图 2 (a) 超材料结构的反射系数  $S_{11}$  和透射系数  $S_{21}$ ; (b) 折射率  $n$  (c) 介电常数  $\epsilon$  (d) 磁导率  $\mu$

### 3 物理机理分析

为了进一步研究高折射率的产生机理,观察了在等效介电常数和磁导率峰值处的电流分布,即在  $f = 0.52$  THz 和  $f = 0.95$  THz 处,超材料中上下金属表面上的表面电流分布,仿真结果如图 4 所示.图 4(a) 和 4(b) 为 0.52 THz 处,上、下层金属表面的表面电流,通过观察,发现上、下金属层的表面电流具有相同的方向,说明此时对应电谐振,这将有效提高超材料在该频率附近的等效介电常数;而图 4(c) 和 4(d) 为 0.95 THz 处,上、下金属层的表面电流,可以看出,上、下金属层的表面电流方向相反,此时,上、下金属层的表面电流将与介质层中的位移电流共同形成环路电流,从而产生磁谐振.此次谐振所产生的磁矩和外加激励磁场的方向相同,形成顺磁效应,从而有效提高了磁导率.基于此,超材料在所研究的频段内的等效折射率得到了有效提高.

此外,对比了单层金属结构和双层结构在各项性能上的异同.图 5 为单层和双层金属结构的等效介电常数、等效磁导率和折射率,仿真结果如图 5(a)-(c) 所示.从图 5(a) 可以看出,在 0.8-2 THz 的频率范围内,双层金属结构比单层金属结构的介电常数高很多.从图 5(b) 中显示的结果看出,在 0.51-2 THz 的频率范围内,双层结构的等效磁导率高于单层结构的等效磁导率,尤其在 0.95 THz 处,双层结构的磁导率达到峰值,接近 80.由图 4(c)-(d) 中的表面电流分布可知,双层结构在该频点产生了磁谐振,且形成顺磁效应,这是导致双层结构比单层结构的等效磁效率高的根本原因.由于双层结构在 0.51-2 THz 频段内的等效介电常数和等效磁导率比单层结构的等效介电常数和等效磁导率高,这使得双层结构在该频段的等效折射率明显高于单层结构,如图 5(c) 所示.因此,采用双层结构是提高超材料等效折射率最有效的方法之一.

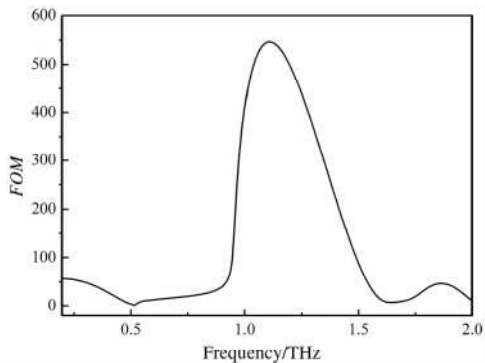


图 3 FOM 随频率的变化关系

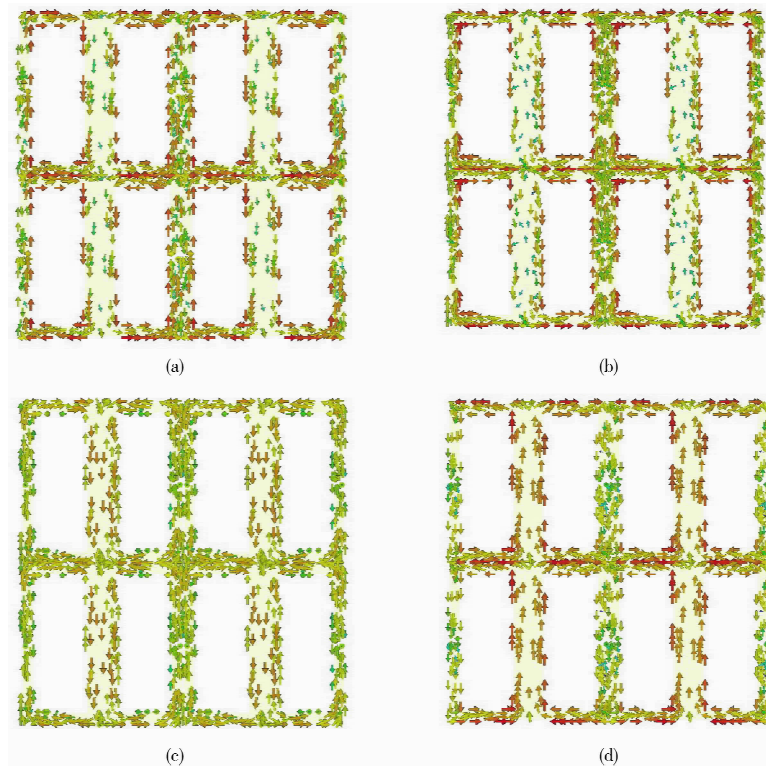


图4  $f = 0.52\text{THz}$  处,(a) 上层金属及(b) 下层金属上的表面电流分布;  
(c) 和(d) 分别对应  $f = 0.95\text{THz}$  处,上、下两层金属的表面电流分布

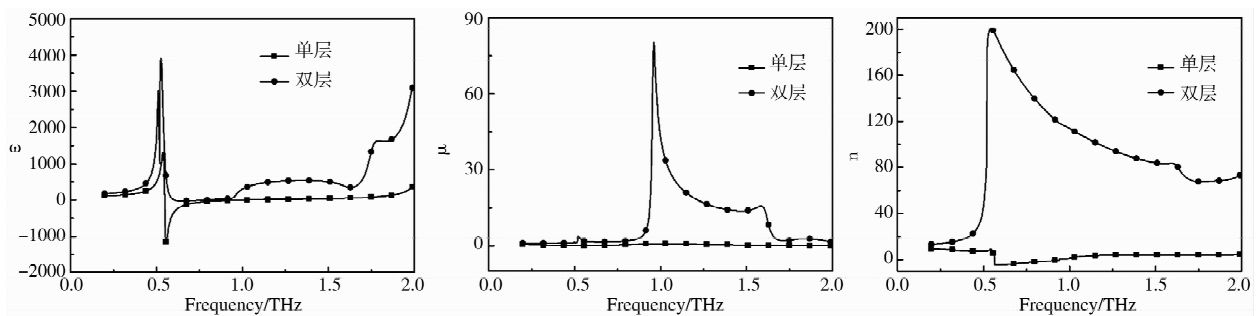


图5 单层和双层金属时太赫兹超材料的 (a) 等效介电常数 (b) 等效磁导率 (c) 折射率

## 4 结论

设计了一种基于“双开口环”型的高折射率超材料结构,利用 CST 电磁仿真软件对超材料的等效折射率进行了模拟仿真. 研究表明,在 0.51-2 THz 频段内,超材料的折射率均大于 70,且在 0.52 THz 处,折射率达到峰值 200. 同时,通过观察特殊频点(电谐振和磁谐振对应的频点)的表面电流分布,深入分析了超材料产生高折射率的物理机理. 该高折射率超材料具有损耗低、频带宽等优点,在太赫兹波通信、成像等方面有广阔的应用前景.

## 参 考 文 献

- [1] Smith D R, Kroll N. Negative refractive index in left-handed materials[J]. Phys Rev Lett, 2000, 85(14): 2933-2936.
- [2] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Phys Rev Lett, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [3] Enoch S, Tayeb, Sabouroux P, et al. A metamaterial for directive emission[J]. Phys Rev Lett, 2002, 89(21): 213902.
- [4] Choi M, Lee S H, Kim Y, et al. A terahertz metamaterial with unnaturally high refractive index[J]. Nature, 2011, 470(7334): 369-373.

- [5] Xiao S,Drachev V P,Kildishev A V,et al. Loss-free and active optical negative-index metamaterials[J]. Nature,2010,466(7307): 735-738.
- [6] Aristeidis K,Lidorikis E,Mihai I,et al. Surface-plasmon-assisted guiding of broadband slow and subwavelength light in air[J]. Phys Rev Lett,2005,95(6):063901.
- [7] Shi Z,Boyd R W,Camacho R M,et al. Slow-light fourier transform interferometer[J]. Phys Rev Lett,2007,99(24): 240801.
- [8] Shen J T,Catrysse P B,Fan S. Mechanism for designing metallic metamaterials with a high index of refraction[J]. Phys Rev Lett,2005, 94(19):197401.
- [9] Jonghwa Shin,Jung-Tsung Shen,Shanhui Fan. Three-dimensional metamaterials with an ultra-high effective refractive index over broad bandwidth[J]. Physical review letters,2009,102(9):093903.
- [10] Choi M,Lee S H,Kim Y,et al. A terahertz metamaterial with unnaturally high refractive index[J]. Nature,2011,470(7334):369-373.
- [11] Tan S,Yan F,Singh L,et al. Terahertz metasurfaces with a high refractive index enhanced by the strong nearest neighbor coupling[J]. Optics Express,2015,23(22):29222.
- [12] Singh L,Singh,Ranjan,et al. Ultra-high terahertz index in deep subwavelength coupled bi-layer free-standing flexible metamaterials[J]. Journal of Applied Physics,2017,121(23):2075-2081.
- [13] Chen X,Grzegorzczak T M,Wu B I,et al. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials[J]. Phys Rev E,2004,70(1):016608.
- [14] Valentine J,Zhang S,Zentgraf T,et al. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index[J]. Nature,2008, 455(7211):376-379.
- [15] Chen Yuanyuan,Huang Shanhong,Yan Xiaona,et al. Electromagnetic tunneling through conjugated single-negative metamaterial pairs, and double-positive layer with high-magnetic fields[J]. Chin Opt Lett,2014,12(10):101601-101605.

# Design and Characteristics of High Refractive Index Metamaterials in Terahertz

GAO Xi ZHANG Yan

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

**Abstract** We proposed a high refractive index metamaterial that is formed by symmetrically etching a "double split ring" typed metal patch on both sides of a dielectric plate. The simulation results show that, for normally incident electromagnetic wave, the refractive index in the frequency range from 0.51-2 THz is greater than 70 and the refractive index up to 200 at 0.52 THz. The metamaterial has the advantages of simple structure and wideband, which makes the proposed metamaterial have broad application prospects in terahertz wave communication and imaging.

**Key words** terahertz; metamaterial; high refractive index