

文章编号: 2095-4980(2020)06-974-05

基于电偶极共振的极化独立宽带吸收超材料

陈 晨, 田丽华

(中国电子科技集团第三十八研究所 博微太赫兹信息科技有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘 要: 基于电偶极共振设计了一种工作在 W 波段、对极化不敏感的宽带吸收超材料。宽带吸波超材料基于不同尺寸铜箔排列构成的周期阵列, 在结构上高度对称。通过时域有限差分算法, 对超材料在 W 波段的吸收性能进行仿真, 通过电场和电荷分布探讨了导致共振吸收的物理机制。最后, 利用印制电路板工艺加工实现了设计的超材料结构, 并给出关于吸收性能的仿真与实验结果的对比。实验结果表明, 超材料在 W 波段平均吸收率达到 84.7%, 与仿真结果接近。

关键词: 超材料; 完美吸收; 极化

中图分类号: TN04; O441

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019307

Polarization-insensitive broadband metamaterial absorber based on electric dipole resonance

CHEN Chen, TIAN Lihua

(Brainware Terahertz Information Technology Co.,Ltd, The No. 38 Institute, CETC, Hefei Anhui 230088, China)

Abstract: Based on electric dipole resonance, a polarization-insensitive broadband metamaterial absorber in W-band is designed. The broadband metamaterial with highly symmetric structure, is composed of the periodic arrays of copper with different sizes. Absorption performance of metamaterial in W band is simulated by Finite Difference Time Domain(FDTD) method, and the physical mechanism of resonance absorption is discussed through electric field and charge distribution. The metamaterial is implemented by Printed Circuit Board(PCB), and the experimental results of absorption are compared with simulation. Experimental results show that the average absorption rate of the metamaterial in W band reaches 84.7%, which is close to the simulation results.

Keywords: metamaterial; perfect absorption; polarization

超材料是人工制造的、由基本结构单元“超原子”(meta-atoms)以一定形式排列组成的复合材料^[1]。与自然界的天然材料不同, 超材料的电磁性质不受材料自身性质的限制, 而是基于其结构单元与电磁波的相互作用。超材料自提出以来就得到广泛的关注和研究, 不仅因为其表现出如负折射^[2-4]等奇异的电磁现象, 更因为通过调整结构单元的几何形状和尺寸, 能够灵活调制超材料对电磁波的响应, 从而在相应频段实现丰富的电磁特性, 如调制振幅、相位、极化、等效折射率等^[1-2,5-6]。

完美吸收超材料^[7]作为超材料中的一个重要分类, 可以在一个或者多个波段, 以接近 100%的效率吸收入射的电磁波, 降低反射波的强度。自从 2008 年由 Landy 等提出最早完美吸收超材料^[8]以来, 已经在多个波段出现大量的报道^[7], 完美吸收超材料在传感、成像、光伏等领域中均有应用^[9]。在各种类型的吸收超材料中, 对极化不敏感的宽带吸收超材料最有实用价值, 也一直是研究热点, 目前的研究已经覆盖了从微波到太赫兹波段^[10-13]。然而能够完整覆盖 W 波段的宽带吸收超材料却罕见报道, 考虑到 W 波段在通信、成像等领域的发展前景^[14-15], 一种能够完整覆盖 W 波段, 并且对极化不敏感的宽带吸收超材料具备可观的应用前景。

本文设计了一种由 4 种不同尺寸铜箔周期排列构成的, 具有 C_4 对称性的超材料结构。对其在 W 波段的吸收性能展开研究, 包括入射波的极化以及入射角度对阵列的吸收影响。此外通过对其电场分布以及电荷密度展开分析, 揭示了谐振吸收的机制。

收稿日期: 2019-08-21; 修回日期: 2019-09-30

作者简介: 陈 晨(1991-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为太赫兹超材料设计。email:c01c@qq.com

1 设计与建模

本文提出的吸波超材料结构如图 1 所示，黑框内表示构成超材料的周期结构单元。此结构单元底层为完整的铜箔，铜箔厚度为 0.02 mm，电导率为 $\sigma=5.8\times 10^8$ S/m。中间层为介质层 FR4，介电常数 $\varepsilon=4.45\times(1+0.04i)$ ，其中 i 为虚数单位，其虚部表示介电损耗，FR4 的厚度 $h=0.18$ mm。顶层结构是由不同尺寸的铜箔以特定形式排列而成的周期阵列，铜箔厚度同样为 0.02 mm。其中 $A1\sim A3$ 的形状均为正方形， B 表示边长分别为 $B1$ 和 $B2$ 的矩形铜箔，各矩形铜箔具体的尺寸列在表 1 中。顶层周期阵列在 X 和 Y 方向的周期长度均为 $L=2.8$ mm，因此阵列的结构单元在 XY 面内是一个边长为 L 的正方形。其中 $A1$ 位于正方形的几何中心， $A2$ 的几何中心则与正方形的 4 个顶点重合， $A3$ 位于正方形各边的中点；而矩形 B 则位于 $A1$ 和 $A2$ 连线的中点上。基于这种排布形式，此超材料同时具备周期性和 C_4 对称性，这种结构上的高度对称通常造成超材料的电磁响应对极化不敏感。

本文对此超材料吸收特性的仿真基于时域有限差分算法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)，在仿真中 X 和 Y 方向的边界条件均为周期边界条件。入射光源为正向入射的平面波，默认的极化方向平行于 X 轴。因为超材料底层为完整铜箔，能完全阻止入射波的透过，超材料在 W 波段的吸收率 A 为：

$$A=1-R=1-S_{11} \tag{1}$$

式中： R 为反射率； S_{11} 表示反射波功率。 S_{11} 可通过仿真直接获得。按式(1)计算出的吸收率 A 是频率相关的，为了衡量超材料在某一频段内的吸收性能，定义平均吸收率为：

$$\Delta = \frac{\int_{110}^{75} A(f)df}{(F_1 - F_2) \times 1} \times 100\% \tag{2}$$

当 $F_1=110$ GHz, $F_2=75$ GHz 时，根据式(2)可计算出超材料在 W 波段的平均吸收率。

2 结果与讨论

为了更深入地研究图 1 描述的超材料的吸收特性，很有必要先探究各个矩形铜箔的电磁响应。图 2 绘制了当周期结构单元上表面只存在一种边长 $a=0.8$ mm 的正方形铜箔时，在入射波照射下的反射曲线和吸收曲线。反射曲线在 76.6 GHz 出现一个反射低谷，因而吸收率在相同频率下达到最大，其峰值超过 0.999。说明此周期阵列在 76.6 GHz 实现了完美吸收。

为了理解和揭示这种吸收特性对应的谐振机制，图 3 中绘制了频率为 76.6 GHz 时，周期结构单元顶层和剖面对应的电、磁场分布和电荷密度分布。图 3(b)显示出在共振频率下，正负电荷关于 Y 轴对称分布，并且铜箔在 X 轴两侧的边界上电荷密度最高。这表明铜箔表面的电荷在入射电场的驱动下，沿 X 轴做简谐振动，并在共振频率下形成电偶极共振，图 3(a)中在正方形铜箔左右两侧的边界出现了显著的电场增强，最大增强幅度超过 40 倍，这些区域也恰好是电荷聚集的区域。在 76.6 GHz 的强吸收效应主要由电偶极共振贡献。

为了实现完美吸收，即反射率降至零，需满足阻抗匹配^[7]，仅依赖电偶极共振不足以实现阻抗匹配。另一方面，电荷的定向移动会形成表面电流。图 3(d)显示在金属基底上同样存在表面电流，并且由于正负电荷的取向与正方形铜箔相反，金属基底上存在反平行电流，这组反平行电流组成一个等效回路，激发出垂直于入射波矢的磁通，并且与入射波的磁分量发生耦合从而产生磁共振。图 3(c)显示出在介质中出现了明显的磁场增强，这是典型的磁共振特征。因此电偶极共振和磁共振都对位于 76.6 GHz 的吸收峰有贡献，这也是实现阻抗匹配的必要条件。

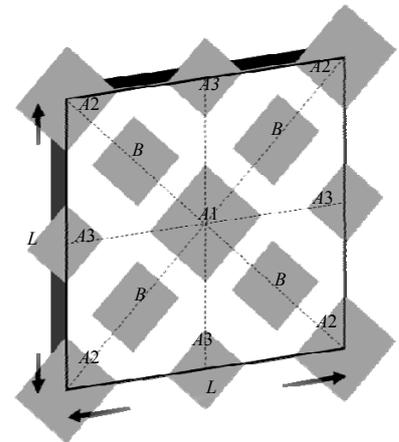


Fig.1 Unit cell of metamaterial absorber
图 1 吸波超材料的结构单元

表 1 各矩形铜箔的边长
Table1 Length of each rectangle copper plate

A1/mm	A2/mm	A3/mm	B1/mm	B2/mm
0.80	0.72	0.54	0.65	0.59

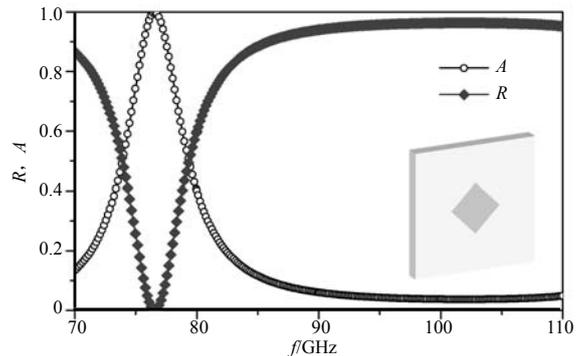


图 2 结构单元中只包含一种正方形铜箔的周期阵列的反射和吸收关系

Fig.2 Reflectance and absorbance of periodic arrays based on unit cell with only single square copper plate

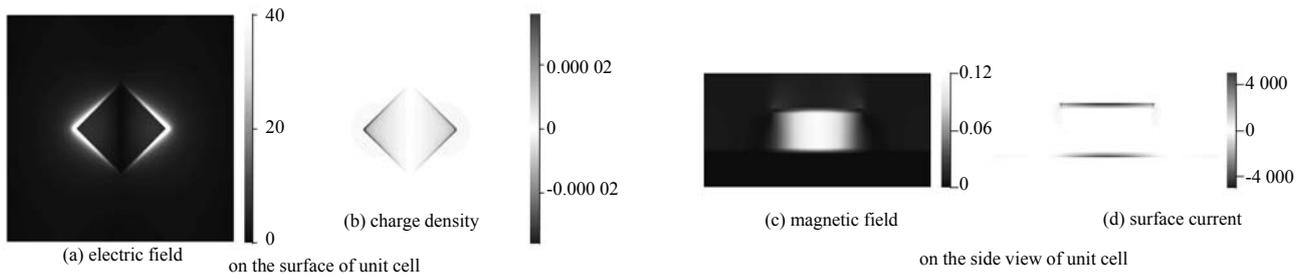


Fig.3 At 76.6 GHz, distribution of electric field and charge density, and distribution of magnetic field and surface current
图 3 在 76.6 GHz 下, 单元上表面的电场分布和电荷密度分布, 以及单元剖面的磁场分布和表面电流分布

超材料区别于常规材料的主要特征在于它们可通过构造特定的几何结构来实现丰富的电磁特性, 因此改变结构的一种或多种几何参量可以调节它们的电磁响应。图 4 显示了改变正方形铜箔的边长, 周期阵列吸收特性的变化情况。图中各边长对应的吸收曲线表明随着边长的减小, 吸收峰相应地向高频端移动。之前提到电偶极共振对吸收峰有贡献, 而电偶极共振要求的共振频率反比于电偶极子长度, 即本结构中的铜箔边长。因此当铜箔边长减小后, 吸收峰的峰位转移到高频端。另一方面, 伴随着吸收峰位置的移动, 峰的形状也发生变化。无论是峰值还是峰宽均随着边长的缩短而降低, 即共振吸收的强度在减弱。这说明在周期长度和介质厚度保持不变的前提下, 为了保证共振吸收的强度, 要求铜箔的占空比 a/L 不能过低。这一要求为构造 W 波段宽频吸波结构提供了机遇。众所周知除了能够实现丰富的电磁特性, 超材料相对于常规材料的一大优势在于它们在结构上更紧凑。根据图 4 提供的信息, 即便铜箔取最大的边长 0.8 mm, 其占空比仍接近 1/4, 各铜箔之间存在较大的间距, 整个周期阵列比较稀疏。如果在各铜箔之间放置尺寸较小的铜箔, 这样既可以提升周期阵列的紧凑程度, 还可以增加临近铜箔之间的耦合作用。因此对于那些小尺寸的铜箔, 虽然独立构成周期阵列时只能实现相对较弱的吸收效果, 但可以被放置在大尺寸铜箔之间实现不同吸收峰的叠加, 拓展吸收曲线的带宽。

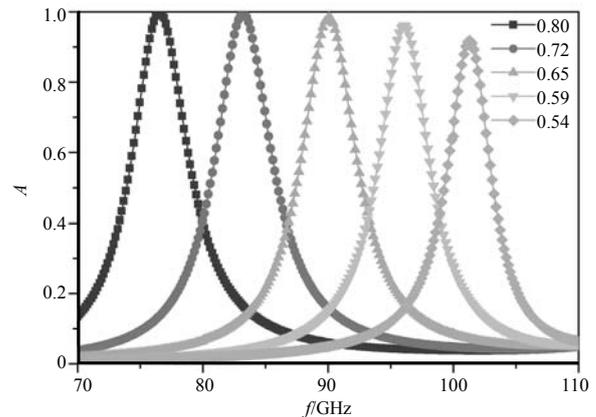


Fig.4 Absorbance of square copper periodic arrays with different lengths
图 4 不同边长的正方形铜箔周期阵列的吸收关系

为了获得最佳的吸波性能, 要求合理安排各种尺寸铜箔的位置。如图 1 所示, 边长最大的 A1 和 A2 互相嵌套, 各自组成了一个周期长度为 L 的二维阵列。A3 由于边长最小, 被放置在相邻 A1 的中点上。而铜箔 B 的位置最为特殊, 它们位于 A1、A2 连线的中点上, 并且其长边取向与 X 轴夹角为 45° 。这种布局在于: 如图 5(a)所示, 入射波的极化方向不论沿 X 轴还是 Y 轴, 总可以沿两条对角线的方向, 分解为 u 和 v 两个分量^[16]:

$$\vec{E}_i = \hat{u}E_u e^{i\varphi} + \hat{v}E_v e^{i\varphi} \quad (3)$$

因此对铜箔 B, 其矩形的长度和宽度对应着两个不同频率位置的吸收峰。虽然图 1 描述的周期阵列包含了 4 种不同大小的铜箔, 却包含 5 个结构边长, 因此能够在 5 个频率位置获得吸收峰。

为了考察提出的超材料在 W 波段的吸收特性, 对其反射率进行仿真, 并根据式(1)计算出吸收率, 结果绘制在图 5(b)中。观察发现吸收曲线在 W 波段内出现了 5 个吸收峰, 其峰值都超过了 0.9。特别是位于 75.9 GHz 和 110.3 GHz 的两个峰值均超过 0.99, 即实现了完美吸收。另一方面, 吸收曲线在 75~110 GHz 之间均位于 0.7 以上, 使超材料在这一频段内保持了较高的吸收性能。根据式(2)计算出超材料在 W 波段内的平均吸收率达到了 85.9%。为了便于讨论, 读取这些吸收峰的峰值频率, 并将这些频率从低到高标记为 $f_1 \sim f_5$ 。通过计算这些频率下超材料表面的电场分布, 可以分析吸收峰对应的谐振机制, 结果绘制在图 6 中。

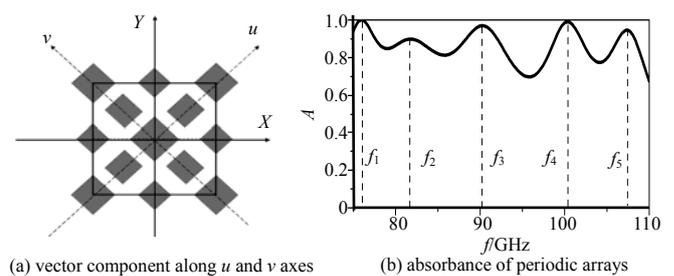


Fig.5 Vector component, and absorbance of periodic arrays including copper plates of four sizes
图 5 矢量分解及包含四种铜箔的周期阵列的吸收关系

对于 f_1, f_2, f_3 , 增强电场主要出现在 A1, A2, A3 这三个方形铜箔的边界上, 并且与图 3(a)类似, 电场是关于 Y 轴对称分布的, 这说明在这三个方形铜箔上分别激发了电偶极共振。 f_3 和 f_4 则较为特殊, 增强电场分别位于矩形 B 的长边和短边, 表明位于 f_3 和 f_4 的谐振吸收源于矩形 B 长短边激发的偶极共振。因此提出的超材料在 W 波段的宽带吸收效果是周期阵列中 5 种长度对应的偶极共振叠加的结果。

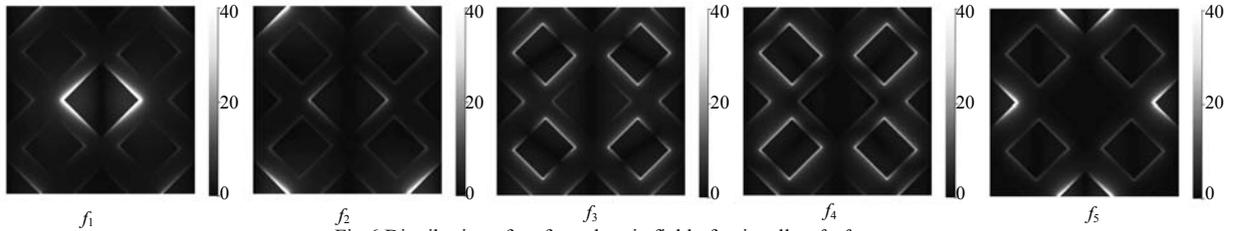


Fig.6 Distribution of surface electric field of unit cell at $f_1 \sim f_5$

图 6 频率 $f_1 \sim f_5$ 下结构单元表面电场分布

图 7(a)反映了改变入射波的极化角度, 对超材料吸收性能的影响, 极化角度 θ 为入射波电矢量与 X 轴的夹角。随着 θ 从 0° 增加到 90° , 对应的吸收曲线几乎重合, 这说明本结构在不同的极化角下始终保持了几乎一致的吸收性能, 其展现的宽带吸收特性不依赖入射波的极化。这一特性是此超材料结构特征的直接体现, 因为如图 1 所示, 提出的超材料同时具有平面周期性和 C_4 对称性。这两种对称性很大程度上削减了结构等效电磁特性的空间自由度, 使得结构对入射波的电磁响应表现为各向同性。

为了考察入射角度对超材料吸收性能的影响, 对不同入射角度下的吸收率展开仿真, 结果绘制在图 7(b)中。可以观察到各吸收峰都随着入射角的增大向低频端移动, 其中 A3 对应的吸收峰对入射角度变化响应最明显。伴随着入射角的增大, 各吸收峰的强度虽然也出现不同程度的降低, 在 20° 以内仍保持了较高的吸收性能。随着入射角增大至 30° , 吸收带宽移出 W 波段, 吸收曲线也出现明显的下降。

为验证设计和仿真结果, 利用印制电路板(PCB)工艺加工实现设计的超材料结构, 样品如图 8(a)所示, 为一片 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的正方形 PCB 板, 铜箔厚度为 0.035 mm , 中间介质为 FR4。利用矢量网络分析仪测量了样品的反射率, 测试方法如图 8(b)所示, 超材料样品平整地固定在衬底上, 发射天线和接收天线面向超材料, 并对称放置在距离超材料足够远的位置, 该距离远大于天线间距, 从而确保满足傍轴近似。

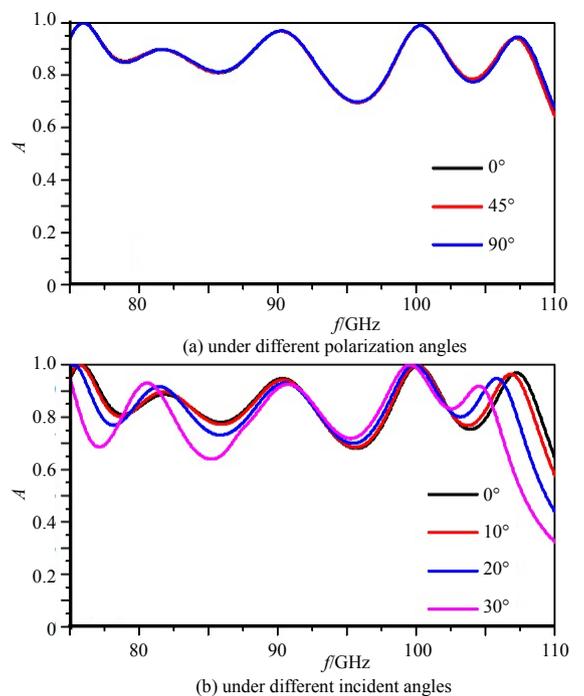


Fig.7 Absorbance under different polarization angles and different incident angles

图 7 不同极化角度和不同入射角度对应的吸收关系

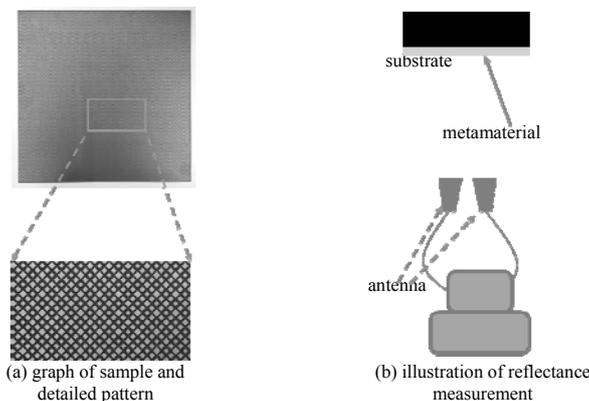
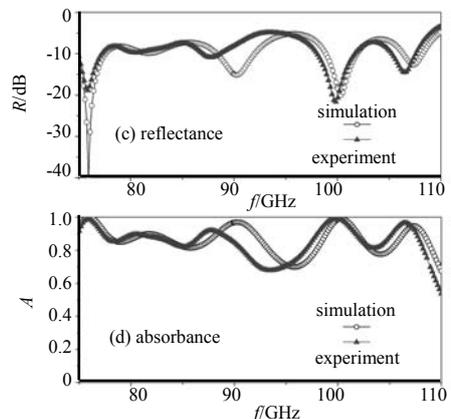


Fig.8 Sample, reflectance measurement, comparison of reflectance and absorbance between experiment and simulation

图 8 样品及局部细节(b)反射率测量示意仿真和实验关于(c)反射率及(d)吸收率的结果对比



毫米波信号源通过发射天线向超材料发射水平极化毫米波,照射到超材料样品表面后,毫米波被超材料反射,被接收天线收集,通过测量反射信号的强度可以确定超材料样品的反射率。图 8(c)和(d)显示了样品反射率和吸收率的测量结果与仿真结果的对比。通过对比可知它们具有相似的曲线形状,因此测量值与仿真结果基本一致,从而验证了设计的有效性。差别在于相对于仿真结果,测量的反射曲线更靠近低频端。这可能源于 PCB 样品中的介质板材的介电常数略大于仿真值,造成了反射曲线的红移。根据反射率的测量结果,计算出的吸收率绘制在图 8(d),实验给出加工的超材料样品在 W 波段的平均吸收率达到 84.7%,同样和仿真结果十分接近。

3 结论

本文设计了一种工作在 W 波段,对极化不敏感的宽带吸收超材料。不同于传统的超材料结构,提出的吸收超材料不要求结构单元的周期长度满足亚波长条件,从而极大地降低了加工难度。此外这种超材料具有超薄的厚度,因而能够适应多样的使用场景。对吸收性能的仿真结果表明,在整个 W 波段该超材料的吸收率均高于 0.7,同时此频段内的平均吸收率也达到了 85.9%。由于结构同时具有平面周期性和 C4 对称性,吸收性能对入射波的极化不敏感,不同的极化角度下都得到几乎一致的吸收曲线。为了验证仿真结果,利用印制电路板工艺加工实现了设计的超材料,并测试了样品的吸收性能。经比较,实验数据符合仿真结果,验证了仿真设计的有效性。

参考文献:

- [1] ZHELUDEV N I. The road ahead for metamaterials[J]. *Science*, 2010,328(5978):582-583.
- [2] SMITH D R,PENDRY J B,WILTSHIRE M C K. Metamaterials and negative refractive index[J]. *Science*, 2004,305(5685):788-792.
- [3] RAMAKRISHNA S A. Physics of negative refractive index materials[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2005,68(2):449-521.
- [4] SHALAEV V M,CAI W,CHETTIAR U K,et al. Negative index of refraction in optical metamaterials[J]. *Optics Letters*, 2005,30(24):3356-3358.
- [5] MOITRA P,YANG Y,ANDERSON Z,et al. Realization of an all-dielectric zero-index optical metamaterial[J]. *Nature Photonics*, 2013,7(10):791-795.
- [6] YU N,CAPASSO F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014,13(2):139-150.
- [7] WATTS C M,LIU X,PADILLA W J. Metamaterial electromagnetic wave absorbers[J]. *Advanced Materials*, 2012,24(23):98-120,181.
- [8] LANDY N I,SAJUJIGBE S,MOCK J J,et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008,100(20):207402-1-4.
- [9] LIU N,MESCH M,WEISS T,et al. Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor[J]. *Nano Letters*, 2010,10(7):2342-2348.
- [10] DING F,CUI Y,GE X,et al. Ultra-broadband microwave metamaterial absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2012,100(10):103506.
- [11] ZHU J,MA Z,SUN W,et al. Ultra-broadband terahertz metamaterial absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2014,102(2):021102.
- [12] KENNEY M,GRANT J,SHAH Y D,et al. Octave-spanning broadband absorption of terahertz light using metasurface fractal-cross absorbers[J]. *ACS Photonics*, 2017,4(10):2604-2612.
- [13] HU D,WANG H,TANG Z,et al. Investigation of a broadband refractory metal metamaterial absorber at terahertz frequencies[J]. *Applied Optics*, 2016,55(19):5257-5262.
- [14] 秦超逸,许育铭,王哈达,等. W 波段高速远距离无线实时通信[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2016,14(6):829-832. (QIN Chaoyi,XU Yuming,WANG Hada. W-band high speed long distance wireless real-time communication[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2016,14(6):829-832.)
- [15] 林富平,潘鸣. W 波段宽带辐射计[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2019,17(2):269-273. (LIN Fuping,PAN Ming. Design of W band broadband radiometer[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2019,17(2):269-273.)
- [16] XU J,LI R,QIN J,et al. Ultra-broadband wide-angle linear polarization converter based on H-shaped metasurface[J]. *Optics Express*, 2018,26(16):20913-20919.