

# 树叶状红外频段完美吸收器的仿真设计\*

苏斌 龚伯仪 赵晓鹏<sup>†</sup>

(西北工业大学理学院, 西安 710129)

(2011年9月15日收到; 2011年12月21日收到修改稿)

设计了一种由树叶状金属薄膜 - 介质层 - 金属薄膜构成的低剖面完美吸收器模型. 通过对金属介电性能采用 Drude 定理, 仿真发现调节结构参数可在红外通讯频段几乎达到完美吸收 (吸收率为 99.5%), 并且在某些特定的结构参数下可以同时实现双频段的完美吸收 (其吸收率分别达到 99.67% 和 97.13%), 这在某种意义上拓宽了吸收频段, 对红外吸收器的设计与应用极为有利. 最后探索了叶颈宽度变化对双频吸收峰位置的影响, 以便对双峰吸收进行调频操作. 这种红外频段的超材料吸收器具有结构简单、吸收效率极高、工作频段宽等优点.

**关键词:** 树叶模型, 双频, 红外, 吸收器

**PACS:** 42.25.Bs, 78.20.-e

## 1 引言

描述电磁媒质的两个最基本的物理量是介电常数  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$ . 前苏联理论物理学家 Veselago 于 1967 年首先提出了左手材料的概念, 将介电常数  $\epsilon < 0$  和磁导率  $\mu < 0$  的材料定义为左手材料<sup>[1,2]</sup>. Pendry 在 1996 年和 1999 年分别设计出了周期性金属杆结构和周期性金属开口谐振环结构, 从而实现了负介电常数和负的磁导率<sup>[3,4]</sup>. 根据有效媒质理论<sup>[5]</sup>, 2001 年 Shelby 等将两种结构组合起来, 通过结构设计使介电常数和磁导率的负值出现在同一频段, 首次实现了左手材料超材料<sup>[6]</sup>. 后来研究者又设计了开口六边形谐振环<sup>[7]</sup>、 $\Omega$  型结构<sup>[8]</sup>、H 型结构<sup>[9]</sup>、短杆对<sup>[10]</sup> 以及其他类型<sup>[11,12]</sup> 的左手超材料. 这些人工左手结构是靠谐振实现负介电常数和负磁导率, 因此在谐振频率附近会出现很大的损耗, 而这些损耗是可以利用的. 据此 Landy 等<sup>[13]</sup> 研制出一种超材料完美吸收器 (perfect metamaterial absorber, PMA), 通过合理的设计及参数选择, 对于入射到超材料中的电磁波可以确保既不反射也不透射, 达到电磁波完全吸收.

这种超材料吸收器吸收效率高、结构简单、体积小, 可用于电磁波的收集、探测和加热装置. 很多课题组已经在微波段吸收器<sup>[14]</sup> 方面做了研究, 此后 Tao 等<sup>[15]</sup> 利用相同的思想研究设计了一种 THz 频段的吸收超材料, Avitour 等<sup>[16]</sup> 根据阻抗匹配的原理制备了基于负折射率的红外波段的超材料吸收器.

本文基于构成树枝状左手材料<sup>[17-19]</sup> 的基本单元树叶型左手超材料结构<sup>[20]</sup>, 将其一面的树叶结构换成金属薄膜, 实现对不同频段电磁波有吸收效果的树叶状吸收器<sup>[21]</sup>. 我们课题组已经在微波段设计仿真了树叶状和树枝状完美吸收器<sup>[22,23]</sup> 并得到实验论证. 这里采用 CST 电磁仿真软件模拟了在特定结构参数下的树叶型吸收器对红外频段电磁波的吸收特性, 可将吸收频率提高至重要的红外频段 200 THz 附近, 并且适当地调节结构参数, 可出现双频吸收效应.

## 2 仿真设计

数值仿真中设置的材料为: 介质基板是  $\epsilon = 2.25$  的二氧化硅玻璃, 树叶型结构和背面涂层均

\* 国家自然科学基金 (批准号: 50872113, 50936002, 11174234) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

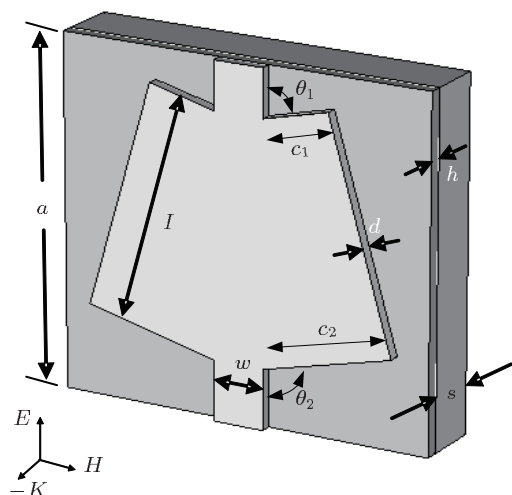


图1 树叶状吸收器单元模型和电磁波的极化方式

为金属 Ag, 其介电性能在远红外频段满足 Drude 模型, 其色散特性参数为等离子频率  $\omega_{pl} = 1.37 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$ , 碰撞频率  $\omega_{col} = 1.35 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ [24]. 结构模型如图 1 所示, 这里主要调节的结构参数有单元尺寸  $a$ , 金属树叶厚度  $d$ , 介质基板厚度  $h$ , 背面金属膜层厚度  $s$ , 叶颈宽度  $w$ , 树叶长度  $l$ , 叶颈与叶片的夹角  $\theta_1, \theta_2$ , 上下叶宽分别为  $c_1, c_2$ . 仿真采用了高频三维电磁场 CST 仿真软件, 平面波垂直入射, 为了模仿周期解构, 我们采用电边界、磁边界对吸收器的单元结构进行了模拟仿真, 计算其透射反射参数和吸收率. 定义反射率  $R = |S_{11}|^2$ , 透射率  $T = |S_{21}|^2$ , 因此吸收率可表示为  $A = 1 - R - T = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$ .

200 THz 电磁波对应波长为 1500 nm, 它是红

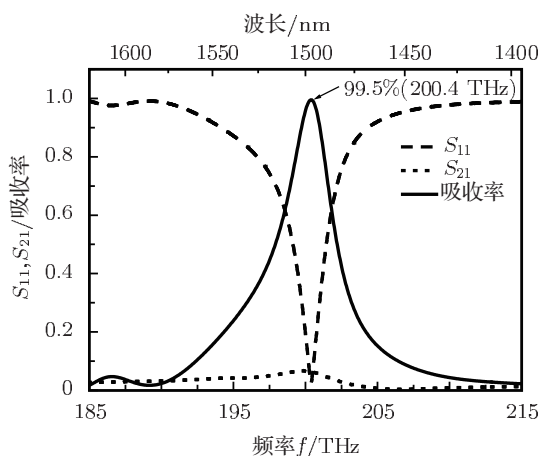


图2 200 THz 下的红外吸收谱

外区域一个非常重要的频段, 是光纤通信的重要窗口之一. 为此, 我们调节单元的各个结构参数, 使吸收的频段恰好工作在该频率附近. 当单元结构几何参数为  $a = 300 \text{ nm}$ , 叶颈宽度  $w = 35 \text{ nm}$ , 树叶厚度  $d = 6 \text{ nm}$ , 树叶的长度  $l = 200 \text{ nm}$ , 基板厚度  $h = 21.125 \text{ nm}$ , 背面涂层  $s = 60 \text{ nm}$ , 叶颈与叶片的夹角分别为  $\theta_1 = 75^\circ, \theta_2 = 115^\circ$ , 上下叶宽  $c_1 = 45.57 \text{ nm}, c_2 = 90.22 \text{ nm}$ , 仿真得到在  $f = 200.4 \text{ THz}$  处吸收率达到 99.5% (如图 2), 基本实现完全吸收.

### 3 红外双频吸收

调节结构参数, 我们发现吸收频段在一定条件下吸收峰会从单个演化成为两个 [25,26]. 当单元尺寸设定为  $a = 320 \text{ nm}$ , 叶颈宽度  $w = 65 \text{ nm}$ , 树叶厚度  $d = 12 \text{ nm}$ , 树叶的长度  $l = 213.33 \text{ nm}$ , 介质基板厚度  $h = 25 \text{ nm}$ , 背面涂层  $s = 60 \text{ nm}$ , 叶颈与叶片的夹角分别为  $\theta_1 = 75^\circ, \theta_2 = 115^\circ$ , 上下叶宽  $c_1 = 47.12 \text{ nm}, c_2 = 104.28 \text{ nm}$ , 将会同时产生两个吸收的频段, 通过对其进行细致的调节后, 可以保证两个吸收峰同时具有较高的吸收效果. 如图 3, 在  $f = 232.48 \text{ THz}$  下吸收率达到 99.67%, 在  $f = 240.32 \text{ THz}$  下吸收率达到 97.13%, 并且双峰之间的低吸收带的最小吸收率也超过了 40%. 我们通过仿真对比了上下结构对称和不对称时的树叶状吸收器的吸收曲线 (如图 4, 其中对称结构变化的参数分别为  $\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ, c_1 = c_2 = 74.17 \text{ nm}$ , 其他参数保持不变), 发现对称结构只具有在  $f = 233.02 \text{ THz}$  处单频点的吸收 (其吸收率为 72.5%), 从而论证了

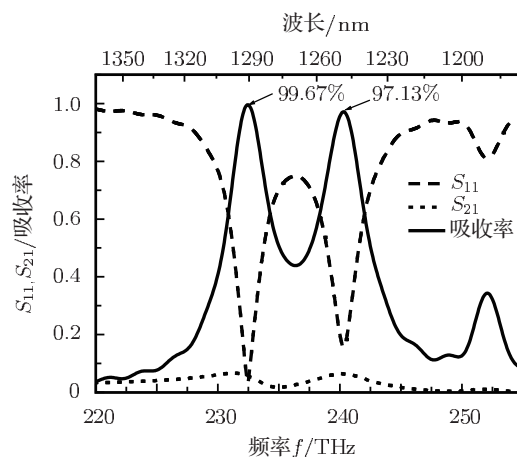


图3 红外双频吸收模型的 S 参数及吸收率

在特定的参数下产生双频吸收是由于树叶上下结构的非对称性使得它在高频电磁波下谐振与特定波长的电磁波产生耦合的结果.

我们分别在频率 232.48 THz, 240.32 THz 以及其他频率处进行了表面电流的监控, 发现在两个吸收峰附近表面电流的强度明显较其他频率处的强 (未列出图), 说明此处的损耗特别大. 如图 5 所示, 我们列出 240.32 THz 处的电流分布图, 通过监控可以看到, 红外波垂直入射的条件下, 金属树叶上的电流与主杆上的电流方向相反, 电荷在树叶与主杆的交界处交替积累, 形成了电偶极子共振; 同时背面的金属涂层表面电流的方向与正面树叶上的电流方向相反, 构成一个电流回路, 形成磁谐振.

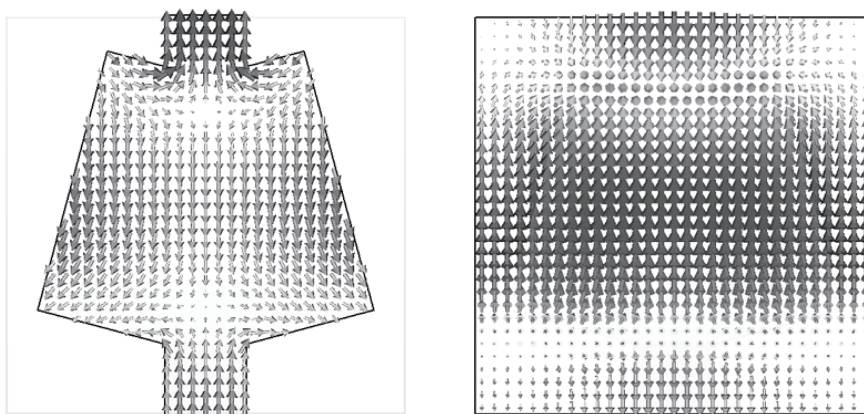


图 5  $f = 240.32$  THz 吸收峰频率处模型正反面的电流分布

根据有关吸收的理论 [27], 改变结构的对称性, 调节至某个频率点时, 使得介电常数和磁导率相等, 这个时候反射系数  $r = -(z - 1/z) \sin(nkl)te^{ikl}/2$  为 0, 而透射系数  $t = [\cos(nkl) - i(z + 1/z) \sin(nkl)/2]^{-1}$ , 式中,  $n$  为折射率,  $z$  为复阻抗,  $l$  为介质基板的厚度, 介电常数和磁导率相等时, 结构也达到了与空气的阻抗相匹配, 此时透射、反射均为 0, 达到完美吸收. 我们采用背面涂有金属薄膜的三层结构减小透过率, 通过反复的设计树叶超材料吸收器的各项参数, 最终同时实现在两个频段的完美吸收.

计算机仿真提取  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  参量得到其透射曲线和反射曲线, 根据散射参量法 [28,29] 反演得到阻抗  $Z$  随频率的变化曲线. 在 232.52 THz 与 240.51 THz 时与空气阻抗 1 相等, 即此时结构阻抗与空气阻抗匹配 (如图 6 所示), 和产生吸收的两

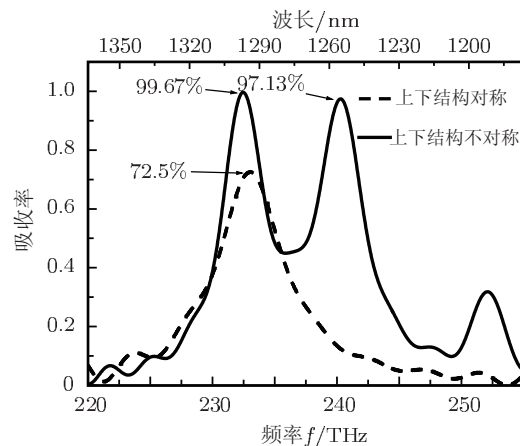


图 4 特定参数下上下结构对称与不对称吸收模型的吸收率

个频率段完全一致, 进一步说明双频吸收峰处反射为零.

此外我们在一定的范围内研究了叶颈宽度  $w$  对双峰吸收的影响 (如图 7 所示), 发现随着  $w$  的缓

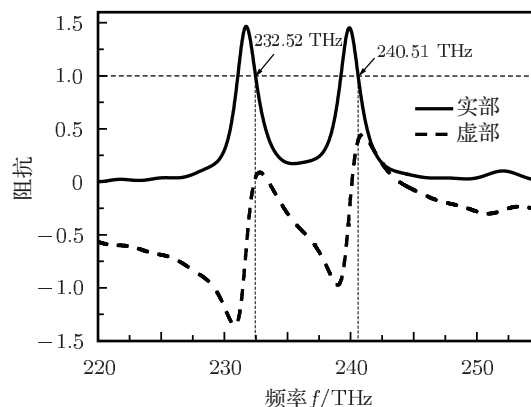


图 6 阻抗特性曲线

慢增加, 双吸收峰同时产生了蓝移, 并且基本保持了较好的吸收效果. 于是用叶颈宽度  $w$  来对双峰吸收的频段进行微调, 已达到预期的工作频段.

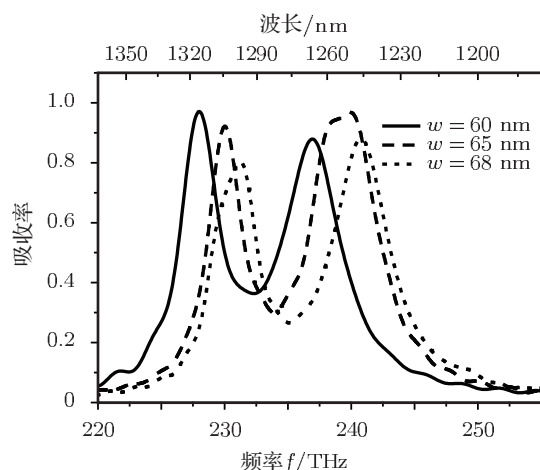


图7 叶颈宽度对双频吸收的影响

## 4 结论

本文提出了一种红外频段的金属树叶 - 介

质基板 - 金属薄膜三层结构超材料吸收器, 采用金属 Drude 模型, 实现了 200 THz 附近的完美吸收 (99.5%), 并且在满足特定参数的条件下由单一较窄频段的吸收演化为双频段的吸收 (99.67% 和 97.13%), 有效地拓宽了吸收频段. 对比仿真上下对称结构后发现特定参数下非对称树叶结构的电磁谐振是引起双频吸收的原因, 树叶吸收器颈部的电场、磁场方向与叶面上的电场、磁场方向相反, 因此在颈叶相连的部分就会有大量的电荷聚集在一起, 产生电谐振. 而树叶结构与背面的金属层形成的环形电流则产生了磁谐振. 提取出  $S$  参量反演得到阻抗随频率变化曲线, 在两个吸收峰处的阻抗值和空气阻抗完美匹配, 验证了产生双频吸收附近反射为零, 因为超材料在谐振频率附近都具有较大的金属欧姆损耗以及介电损耗, 因此可使电磁波几乎达到完全吸收. 最后, 我们探索了叶颈宽度变化对双频吸收峰位置的影响. 这种红外频段的超材料吸收器具有结构简单、吸收效率极高、工作频段宽等优点, 在通讯领域以及红外探测方面具有潜在的应用价值.

- [1] Veselago V G 1967 *Usp. Fiz. Nauk* **92** 517
- [2] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [3] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 25
- [4] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. MTT* **47** 2075
- [5] Smith D R, Pendry J B 2006 *J. Opt. Soc. Am. B* **23** 391
- [6] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [7] Zhao Q, Zhao X P, Kang L, Zhang F L, Liu Y H, Luo C R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2206 (in Chinese) [赵乾, 赵晓鹏, 康雷, 张富利, 刘亚红, 罗春荣 2004 物理学报 **53** 2206]
- [8] Huangfu J T, Ran L, Chen H, Zhang X, Chen K, Grzegorzcyk T M, Kong J A 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1357
- [9] Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5883 (in Chinese) [刘亚红, 罗春荣, 赵晓鹏 2007 物理学报 **56** 5883]
- [10] Zhou J F, Economon E N, Koschny T, Soukoulis C M 2006 *Opt. Lett.* **31** 3620
- [11] Xu F, Bai Y, Qiao L J, Zhao H J, Zhou J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1653
- [12] Yang Y M, Wang J F, Xia S, Bai P, Li Z, Wang J, Xu Z, Qu S B 2011 *Chin. Phys. B* **20** 014101
- [13] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [14] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z 2011 *Chin. Phys. B* **20** 037801
- [15] Tao H, Landy N I, Bingham C M, Zhang X, Averitt R D, Padilla W J 2008 *Opt. Express* **16** 7181
- [16] Avitzour Y, Urzhumov Y A, Shvets G 2009 *Phys. Rev. B* **79** 045131
- [17] Zhou X, Fu Q H, Zhao J, Yang Y, Zhao X P 2006 *Opt. Express* **14** 7188
- [18] Liu B Q, Zhao X P, Zhu W R, Luo W, Cheng X C 2008 *Adv. Funct. Mater.* **18** 3523
- [19] Liu H, Zhao X P, Yang Y, Li Q W, Lü J 2008 *Adv. Mater.* **20** 2050
- [20] Zhu W R, Zhao X P, Gong B Y 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 093504
- [21] Zhu W R, Zhao X P, Gong B Y, Liu L H, Su B 2011 *Appl. Phys. A* **102** 147
- [22] Zhang Y P, Zhao X P, Bao S, Luo C R 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6070 (in Chinese) [张燕萍, 赵晓鹏, 保石, 罗春荣 2010 物理学报 **59** 6070]
- [23] Bao S, Luo C R, Zhang Y P, Zhao X P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3187 (in Chinese) [保石, 罗春荣, 张燕萍, 赵晓鹏 2010 物理学报 **59** 3187]
- [24] Dolling G, Enkrich C, Wegener M, Soukoulis C M, Linden S 2006 *Opt. Lett.* **31** 1800
- [25] Tang S W, Zhu W R, Zhao X P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3220 (in Chinese) [汤世伟, 朱卫仁, 赵晓鹏 2009 物理学报 **58** 3220]
- [26] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Liu J, Gu W 2011 *Chin. Phys. B* **20** 017801
- [27] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, Jokerst N, Smith D R, Padilla W J 2009 *Phys. Rev. B* **79** 125104
- [28] Smith D R, Schultz S 2002 *Phys. Rev. B* **65** 195104
- [29] Chen X D, Grzegorzcyk T M, Wu B I, Pacheco J, Kong J A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 016608

# Numerical simulation of leaf-shaped metamaterial absorber at infrared frequency\*

Su Bin Gong Bo-Yi Zhao Xiao-Peng<sup>†</sup>

(School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

(Received 15 September 2011; revised manuscript received 21 December 2011)

## Abstract

We present a perfect metamaterial absorber composed of metallic leaf-shaped cells, dielectric substrate and metallic film. Based on the metallic Drude principle, this structure can realize an perfect absorptivity of 99.5% at the infrared communication frequencies with appropriate geometric parameters. Moreover, this structure can simultaneously achieve perfect absorptions at two infrared frequencies with the maximal magnitudes of 99.67% and 97.13% respectively, which effectively broadens the bandwidth of absorptivity, thereby benefiting the design and the application of absorber at the infrared frequencies. Afterward, the effects of the neck width on the position of the double absorptivity peak are investigated, and expected to be used in frequency modulation. The model proposed in this paper has a series of advantages such as simple structure, high absorptivity and broad operating bandwidth.

**Keywords:** leaf-shaped model, double frequencies, infrared frequency, absorber

**PACS:** 42.25.Bs, 78.20.-e

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50872113, 50936002, 11174234).

<sup>†</sup> E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn