

基于表面等离激元超表面结构的电磁波吸收器

陈雪然, 杨树

(北京邮电大学理学院, 北京 100876)

摘要: 不断发展的光学侦察能力对光学伪装技术提出了新的要求, 具有高吸收、超薄和易于配置的宽带超吸收器可以有效满足这一需求, 通过设计超吸收器的结构和参数, 可在目标波段达到伪装隐身的目的。本文构建了具有周期性圆顶的 Ti/Ge/Ti 三层纳米结构超吸收器, 并使用时域有限差分法进行仿真模拟, 结果显示该吸收器在 8.4~12.3 微米波长范围内的平均吸收率达到 96.51%, 通过对该吸收器的吸收特性进行分析, 形成了可用于指导具有优异宽带吸收效果的超吸收器设计的方法。

关键词: 光学; FDTD 模拟; 超表面; 超吸收器

中图分类号: O436.2

Electromagnetic wave absorber based on surface plasmon polariton metasurface

Chen Xueran, Yang Shu

(School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract: Optics detection ability is constantly developing, which puts forward new requirements for optical camouflage technology. To meet this demand, a wideband super absorber with high absorption, ultra-thin and easy configuration is needed. By designing the structure and parameters of the super absorber, the camouflage stealth effect can be achieved in the target band. In this paper, a super absorber with periodic cylinder of Ti/Ge/Ti three-layer nanostructure was constructed, and simulation was conducted using FDTD method. The results show that the average absorption of the absorber achieves 96.51% from 8.4 to 12.3 microns. Through the analysis of the characteristics of the absorber, a method has been developed to guide the design of superabsorbers with excellent broadband absorption effects.

Key words: Optics; FDTD simulation; Metasurface; Superabsorber

0 引言

现代战争中, 目标被发现即意味着被摧毁。换言之, 各类军事目标没有良好的伪装效果将难以生存。战争中最基本且频繁使用的侦察手段为光学成像侦察, 即利用光学成像设备对目标进行成像和识别。而且近年来使用的高、超光谱成像技术具有更强的光学侦察能力。因此, 发展先进的光学伪装技术来隐藏保护军事目标具有重要的意义^[1], 其基本原理是减少目标与背景在可见光、热红外波段的散射或辐射性的差别, 以降低目标的可探测性。

近年来, 一系列关于超薄的人造二维材料, 也就是超表面(Metasurface)的研究方兴未艾。超表面是由一系列亚波长人工微结构按照一定的排列方式构建而成的薄平面阵列, 其对电磁波波前有着前所未有的控制能力, 通过广义斯内尔定律将超表面的概念引入到光波的材料科学和物理科学中, 可以自由地控制波前相位、偏振以及振幅来进行光波调控, 并带来了众多

作者简介: 陈雪然 (1999-), 女, 主要研究方向: 基于金属超表面结构的电磁波吸收器

通信联系人: 杨树, 男, 硕导, 主要研究方向: 纳米光学. E-mail: syang@bupt.edu.cn

新的应用。在所有的超表面中，基于金属-介质-金属(Metal-Insulator-Metal, MIM)夹层结构的表面等离激元超表面显得尤为特殊^[2]，其基本单元通常是上下两层具有光学厚度的金属薄膜之间夹着一层亚波长厚度的介质组成的三明治结构，将这种亚波长尺度的基本单元按照一定的周期排列成阵列的形式，通过调节结构的参数可以灵活地设置超表面的工作频率。此外，夹层结构的超表面的实现只需要单一的光刻步骤，就有可能完全控制反射光的振幅、相位和偏振，这使得它在提高光电器件的效率、能量收集以及光学传感等方面有着诸多潜在的价值。

1 电磁超表面的相关理论

1.1 电磁超表面

电磁超材料（亦称新型人工电磁媒质、特异媒质等）是将具有特定几何形状的亚波长尺度单元按照周期性或非周期性排布的人工结构^[3]。可通过设计单元参数和单元的排列方式来定制其等效媒质属性，突破了传统材料在原子或分子层面难以调控的限制，能构造出传统材料与现有技术不能或很难实现的超常媒质参数（例如负介电常数、负磁导率、负折射率及零折射率等）以及这些参数的任意非均匀分布，从而实现对电磁场和电磁波的自由控制，带来全新的物理现象，例如负折射、完美成像、完美隐身、超分辨透镜、渐变折射率平板透镜、广义斯涅耳定律所控制的超常反射与透射等。但是超材料的应用受到设备尺寸、金属结构损耗和复杂结构制造等挑战的阻碍，幸运的是，电磁超表面成功地解决了这些问题。

超表面相当于是二维超薄的超材料，由界面上超薄膜中的离散亚波长结构形成，它在亚波长尺度允许波前控制和极化控制，展现出各种特别的电磁响应能力。精心设计的平面超表面已经实现了各种引人入胜的器件和众多应用，包括基于广义斯涅耳定律的异常光束弯曲、表面波耦合器、偏振控制、全息图、平面透镜、可调谐器件和轨道角动量的产生等。与大多数超材料相比，超表面占据更少的物理空间，因此也更适合在芯片上应用，并且更容易被制造生产。因此，研究超表面结构对光场的调控具有重要的理论意义和应用前景。

1.2 超表面电磁吸波技术

电磁吸波是指通过使用高损耗材料或者强谐振结构，将特定频段内的入射波的能量转化为欧姆热或其他形式的能量耗散或吸收掉，从而抑制入射波的反射和透射。电磁吸波技术不仅可以为雷达隐身技术、电磁兼容提供解决方案，也可以用来抑制电磁辐射污染，此外，在能量收集、传感和探测等诸多方面也有广阔的应用前景。

传统的电磁吸波材料如碳纳米管和铁氧体等可以实现高效吸收，但是它们存在带宽窄、体积大或者造价昂贵等问题，难以大规模推广使用。超材料和超表面的出现一定程度上为上述问题提供了一种新的解决方案。与传统的吸波技术相比，基于超表面的吸收体具备体积小、结构精简、吸收效率高等优点，并可以实现对电磁波的灵活调控，成为电磁吸波技术新兴的重要研究方向。

目前最常见的超表面吸收体是由“金属-介质-金属”三层构造的“三明治”型结构。表层金

75 属通过图案设计提供电谐振，底层添加金属来防止电磁波透过，底层金属板与表层金属图案耦合形成磁谐振，可以通过调节结构参数灵活地设置超表面的工作频率，但这种基于强谐振理论的吸收体结构只能实现窄带吸波，并且超薄平面结构对于极化模式和入射角度都十分敏感，难以保持良好的稳定性。

1.3 表面等离激元及激发

80 表面等离激元 (Surface Plasmon Polariton, SPP) 是由外界电磁场与金属表面区域的自由电子相互作用形成的沿金属与介质交界面传播的电子疏密波^[4]，是沿着金属-介质界面传播的局域元激发，介质中的电磁场会与金属中的电子的集体振荡发生相互耦合而激发表面等离激元。金属中正离子固定在晶格上并且不能移动，而自由电子可以自由移动，近似为自由电子气，因此金属可以被认为是一种特殊的等离子体。这种电子之间存在库伦相互作用，在这种长程势的作用下会导致系统电子密度分布不均匀。在外加电磁场的作用下，金属表面存在相干作用的自由电子会发生集体振荡，电子的集体振荡使得金属中激发出等离激元并赋予其独特的光学性质。但是电磁波在金属中衰减得很快，这意味着等离激元只存在于金属纳米结构的表面，因而被称为表面等离激元。

90 表面等离激元显现出独特的电磁特性：沿着分界面导行的表面等离激元波可以将电磁能量束缚在很小的亚波长范围内进行传播；而在垂直于分界面的方向，电磁能量呈指数型衰减。一般来说，超表面结构中根据金属表面等离子体共振形式的不同，可分为传播型表面等离激元(propagating surface plasmon, PSP)和局域表面等离激元 (localized surface plasmon, LSP)。传播型表面等离激元通常存在于接近激发波长尺度的超表面结构中，主要是在金属-介质界面传播，例如沉积在玻璃上的金属薄膜之间存在波长数量级的介电间隙时，会在沿着金属-电介质界面上产生传播型表面等离激元，传播型表面等离激元的场会呈指数形式衰减。而对于局域表面等离激元而言，局域等离子体是由比入射波长小得多的纳米粒子与光发生相互作用产生的，无法进行传播。

1.4 仿真计算方法

100 电磁仿真的核心在于数值计算方法，主要分为标量法和矢量法两种。其中，标量法是将光场视为标量，在此基础上近似求解麦克斯韦方程组，该方法适用于待求解目标特征尺寸远大于光波长。矢量法则是在选定的边界条件下，严格求解麦克斯韦方程组，从而得到整个空间的电磁场分布特征，该方法适用于求解各种微纳结构的电磁场分布。近年来，用于求解光波长的数值理论方法有：时域有限差分法、有限元法、严格耦合波方程法、平面波展开法等。

105 目前，最常用且易于理解的电磁场计算方法源自于 1966 年 Yee 发明的时域有限差分法 (Finite Difference Time Domain, FDTD)。该方法是在时空域上对麦克斯韦方程进行差分化处理，其求解负担比有限元法或矩阵法小一个数量级。它的核心是将三维几何结构分解为 Yee 单元格，其基本原理是基于网格的有限差分域数值建模方法，将偏微分形式的麦克斯韦方程组进行离散化处理，以循环迭代计算的形式，在给定的时间步长计算出电场，然后在下一时间步长计算出磁场，重复此过程，即可在空间域和时间域上得到电磁场的变化特征，

110 其优点是可以直接模拟电磁场的分布以及具有较高的计算精度。

本文采用的数值研究方法为时域有限差分法。对于采用时域有限差分法求解目标结构的
空间电磁场分布来说，主要仿真参数的设置需要考虑以下几个问题：

115 (1) 网格精度。FDTD 的特点决定了其在计算过程中，网格划分越小，FDTD 具有越
高的计算精度，因此也要求计算机具有更高的计算能力与之匹配。网格划分越小，计算的时
间越长，需要的存储空间也越大。因此，网格的划分需要根据自己结构的特点选择合适的精
度。

(2) 解是否稳定。在 FDTD 计算中，空间步长一般为参考波长的十二分之一。另外，
为了保证仿真结果的稳定性，时间和空间步长的选取原则需要满足以下条件：

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{n} \cdot c_0}$$

120 其中， n 表示空间维数， c_0 表示真空中光速。

(3) 边界条件。FDTD 中边界条件有很多种，比如周期性边界 (Periodic Boundary)，
完美匹配层 (PML Boundary)，对称边界 (Symmetric Boundary)，反对称边界 (Anti-symmetric
Boundary)，金属边界 (Metal Boundary) 以及布洛赫边界 (Bloch Boundary)。边界的选取
也是根据自身的结构特点和需要计算的内容有关，选择合适的边界条件，能快速准确的计算
125 出仿真结果。

2 超表面吸收器的基本原理

130 在超表面吸收器中，阻抗匹配和干涉理论是实现完美吸收物理机制的一般理论。阻抗匹
配理论是通过设计超表面结构的有效介电常数和磁导率来调节吸收器的电磁共振，从而实现
超表面吸收器与自由空间的阻抗匹配；干涉理论是基于在金属镜面反射的多重波发生的干涉
效应。

2.1 阻抗匹配

135 超表面吸收器通常被设计为 MIM 夹层结构，顶层是一系列周期性的金属阵列，这些金
属阵列和金属基底之间通过介质层来支撑。超表面吸收器的结构和周期一般小于工作波长，
因此超表面吸收器整体上可被视为一种有效的同质材料。在深亚波长尺度，超表面吸收器
的平均电磁响应可以通过等效介电常数和磁导率来描述，超表面吸收器的介电常数和磁导率分
别为 $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r(\omega)$ 和 $\mu = \mu_0 \mu_r(\omega)$ ， ε_0 和 μ_0 分别为自由空间的介电常数和磁导率，而 $\varepsilon_r(\omega)$ 和
 $\mu_r(\omega)$ 分别为媒质的相对介电常数和磁导率。由于存在底部金属镜面反射层，工作波段的透
射几乎为零，值得关注的是超表面吸收器的反射。根据菲涅尔公式，超表面吸收器的反射率
为^[5]：

$$140 \quad R_{TE} = |r_{TE}|^2 = \left| \frac{\mu_r \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\mu_r \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right|^2$$

$$R_{TM} = |r_{TM}|^2 = \left| \frac{\varepsilon_r \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\varepsilon_r \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right|^2$$

其中 TE 和 TM 分别表示横电波和横磁波， θ 表示入射角，超表面吸收器的有效折射率

为 $n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$ 。垂直入射时, $\theta = 0^\circ$, 则公式可化为:

$$R(w) = \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2 = \left| \frac{\sqrt{\mu_r} - \sqrt{\varepsilon_r}}{\sqrt{\mu_r} + \sqrt{\varepsilon_r}} \right|^2$$

145 超表面吸收器的阻抗 $Z = \sqrt{\mu/\varepsilon}$, 自由空间的阻抗 $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ 。又因为透射为零, 吸收率可表示为:

$$A(w) = 1 - R(w) = 1 - \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2 = 1 - \left| \frac{\sqrt{\mu_r} - \sqrt{\varepsilon_r}}{\sqrt{\mu_r} + \sqrt{\varepsilon_r}} \right|^2$$

150 从以上公式可看出阻抗匹配 $Z = Z_0$ 或 $\mu_r = \varepsilon_r$ 是实现完美吸收的关键条件。此外, 从公式还可看出对于实现阻抗匹配来说, 电谐振和磁谐振缺一不可, 对于仅具有单一谐振的超表面吸收器来说, 与自由空间的阻抗将会强烈失配。

超表面吸收器的阻抗同样可以用吸收率和反射率来描述, 当超表面吸收结构与自由空间达到阻抗匹配时, 在匹配点处可以最大化对光的吸收, 超表面吸收器的阻抗可表示为:

$$Z = \sqrt{\frac{(1 + R(w))^2 - T(w)^2}{(1 - R(w))^2 - T(w)^2}} = \frac{1 + R(w)}{1 - R(w)}$$

155 这就意味着在某些自由空间与超表面吸收结构达到阻抗匹配的频率点处超表面吸收器表现出优异的吸收性能。

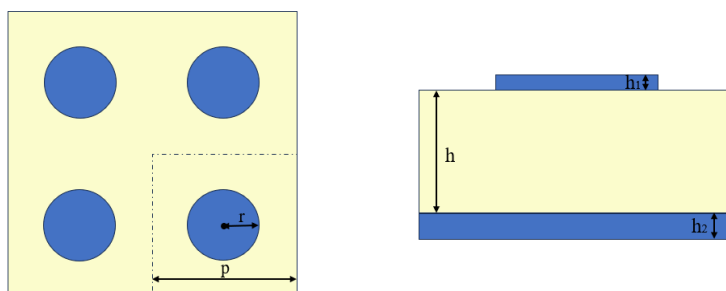
2.2 干涉理论

160 一般而言, 超表面吸收器的磁谐振来源于上下金属层之间的反平行电流, 这种情况下超表面吸收器可等效为一个耦合系统^[6]。当入射光穿透上金属层时, 下层金属充当一个镜面的作用, 能反射部分入射电磁波; 同样上层也会充当一个局部的反射镜, 这样上下金属镜面反射的多重波会发生干涉效应。入射电磁波被部分反射到空气中, 透射波会在介质层中传播直到到达下层金属。对于下层金属来说, 由于透射为零, 到达下层金属的光将会全部反射回来。当光又经历一次在介质层中的传播相延迟, 会再次在上层金属边缘发生反射和透射, 总的反射为多重波反射的叠加。因此可以通过干涉理论来解释超表面吸收器的吸收性质。

3 模型仿真与结果分析

3.1 模型参数与仿真

165 如图 1 所示, 本文构建了具有周期性圆顶的 Ti/Ge/Ti 三层 MIM 夹层结构吸收器, 在此结构中, 结构周期为 p , 顶部金属的边圆片半径为 r , 厚度为 h_1 , 底部 Ti 层的厚度为 h_2 , 中间层 Ge 的厚度为 h 。



170 图 1 具有周期性圆顶的 Ti/Ge/Ti 吸收器结构示意图

当平面波从该结构上方入射时，底部金属层充当一面镜子，反射在下方金属-介质界面处激发的表面等离子激元。上下金属-介质界面之间的表面等离子体激元的相消干涉在介电腔中产生谐振模式，从而导致电磁波被捕获和吸收。介质层的厚度远小于辐射波长，这使得介电腔中的表面等离子体激元能够有效耦合；但是，如果电介质厚度太小，就会发生大量反射。
175 底部金属层的厚度远大于集肤深度，这用来阻止传输，降低透射。由于顶部金属层形状的对称性，该吸收器对入射波极化不敏感。

3.2 仿真结果与分析

通过调节模型的周期 p 、顶部金属圆片的厚度 h_1 、半径 r 和中间绝缘层厚度 h ，发现
180 $p=1300\text{nm}$ 、 $h_1=20\text{nm}$ 、 $r=300\text{nm}$ 、 $h=550\text{nm}$ 、 $h_2=120\text{nm}$ 时，其吸收光谱如图 2 所示，可以实现 $8.4\sim 12.3\mu\text{m}$ 波长范围的宽带吸收，平均吸收率约为 96.51%； $8.0\sim 13.2\mu\text{m}$ 波长范围的平均吸收率约为 92.46%； $7.0\sim 14\mu\text{m}$ 波长范围的平均吸收率约为 82.04%。

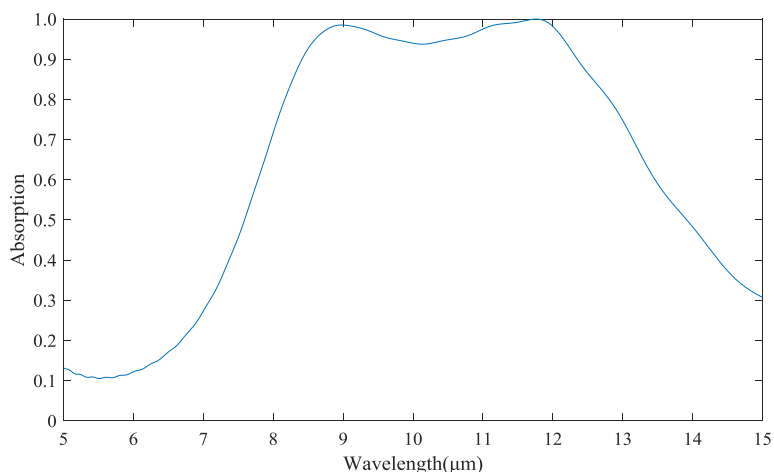


图 2 $p=1300\text{nm}$ 、 $h_1=20\text{nm}$ 、 $r=300\text{nm}$ 、 $h=550\text{nm}$ 、 $h_2=120\text{nm}$ 参数下，Ti/Ge/Ti 吸收器的吸收光谱

根据图 3 不同参数下的 Ti/Ge/Ti 吸收器的吸收光谱，发现不同顶部金属圆片的半径主要通过调节局域表面等离子共振，影响右侧吸收峰的位置；中间层介质厚度则主要影响了 FP
185 谐振腔的共振效果，随着 h 的增大，吸收峰会随着红移。

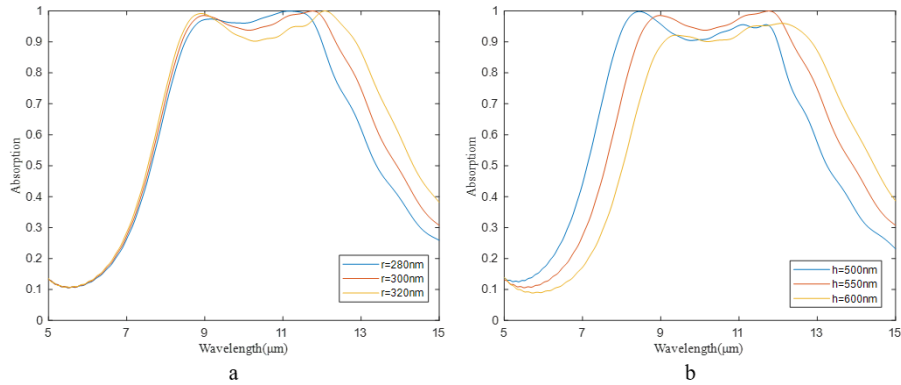


图3 a 金属圆片半径 r 分别为 280nm、300nm、320nm 时, Ti/Ge/Ti 吸收器的吸收光谱
b 中间层厚度 h 分别为 500nm、550nm、600nm 时, Ti/Ge/Ti 吸收器的吸收光谱

190 4 结论

本文构建了具有周期性圆顶的 Ti/Ge/Ti 三层纳米夹层结构吸收器,通过结构设计和参数调节,借助表面等离子激元和谐振腔实现了长红外波段范围的宽带吸收,8.4~12.3 μm 波长范围的平均吸收率约为 96.51%; 8.0~13.2 μm 波长范围的平均吸收率约为 92.46%; 7.0~14 μm 波长范围的平均吸收率约为 82.04%。本文的研究结果建立了通用和系统的策略,用于指导具有优异宽带吸收的超材料吸收器的设计,为光学伪装和隐身提供的新的可能性。

[参考文献] (References)

- [1] 刘志明. 植物叶片仿生伪装材料研究[D]. 国防科学技术大学, 2009.
- [2] Ding F, Yang Y, Deshpande R, et al. A review of gap-surface plasmon metasurfaces: fundamentals and applications[J]. Nanophotonics, 2018, 7(6):1129-1156
- [3] 崔铁军, 吴浩天, 刘硕. 信息超材料研究进展[J]. 物理学报, 2020,69:175-187.
- [4] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. Nature, 2003,424(6950):824-830.
- [5] Landy N, Sajuyigbe S, Mock J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100:207402
- [6] Chen H. Interference theory of metamaterial perfect absorbers[J]. Optics Express, 2012, 20:7165-7172