

文章编号: 1672-8785(2017)11-0001-04

一种波长可调的近红外波段完美吸收体

李娟 孙剑 傅頔 王爽 冯玉涛

(中国科学院西安光学精密机械研究所中国科学院光谱成像技术重点实验室, 西安 710119)

摘要: 一般将电磁波完美吸收体简称为完美吸收体, 它可用于很多行业。用有限时域差分法研究了一种可以在近红外波段工作的完美吸收体。模拟结果表明, 这种完美吸收体可以实现 98% 的单峰 1400 nm 左右宽谱吸收, 或者可以实现 90% 以上的 1320 nm 和 1640 nm 波长的双峰吸收效率。通过调节共振腔结构的大小可以调节吸收波长和吸收宽度。电磁波完美吸收体是一种背靠背双共振腔模式的完美吸收体, 有非常广泛的应用前景。

关键词: 完美吸收体; 共振腔; 时域有限差分

中图分类号: O43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.11.001

A Perfect Wavelength Tunable Absorber in NIR Band

LI Juan, SUN Jian, FU Di, WANG Shuang, FENG Yu-tao

(Key Laboratory of Spectral Imaging Technology of Chinese Academy of Sciences,
Xi'an Institute of Optics Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: Perfect electromagnetic wave absorber is generally called perfect absorber for short. It can be used in many industries. A perfect absorber which can operate in Near Infrared (NIR) band is studied by finite-different time domain method. The simulation result shows that this perfect absorber can achieve 98% absorbance for a single peak at the wavelength of 1400 nm or more than 90% absorbance for two peaks at the wavelengths of 1320 nm and 1640 nm. The absorption wavelength and absorption width can be tuned by adjusting the resonance cavity structure of the absorber. The perfect electromagnetic wave absorber is a perfect absorber with a back-to-back resonance cavity, which has a very wide application prospect.

Key words: perfect absorber; resonance cavity; finite-different time-domain

0 引言

几千年前人类就知道金属能够反射光线, 并用金属铜制作镜子。尤其是在平面结构中, 金属在一定的波段能够反射接近百分之百的电磁波。然而, 当亚波长尺寸的微纳结构应用到金属中以后, 情况发生了巨大的变化。由于金属微纳结构

的存在, 电磁波会在金属表面激发等离子体, 表面等离子体 (Surface Plasmons, SPs) 的波矢远远大于空间中电磁波的波矢, 金属结构中的局域场会几倍甚至几千倍增强, 导致金属对电磁波的吸收率增加。人们利用这一特点制成了完美吸收体^[1-6]。这种材料既不反射电磁波, 也不会有电磁

收稿日期: 2017-08-23

基金项目: 国家自然科学基金 (41005019), “西部青年学者”人才基金 (XAB 2016A07)

作者简介: 李娟 (1989-), 女, 硕士, 助理研究员, 从事光谱成像定标、精细光谱探测技术及相关数据处理研究。

E-mail: lijuan201120549@126.com

波从其中穿过去,称为电磁超材料或者超材料完美吸收器。完美吸收体在很多方面有极其广泛的应用,比如说可以应用于太阳能电池材料^[7]、微测热辐射计^[8]、高分辨率探测器^[9,10]和海水淡化设备^[11]等。

随着微纳加工技术的日新月异和超材料的制作难度减小,人们能在材料表面上只做一层平面超材料(超表面),以实现和超材料相似的功能,这对完美吸收体这个原理同样适用。波段不同的完美吸收器件,其应用不尽相同。用超表面制成的完美吸收体在原理上可通过调节单位结构的大小来调节等离子体的共振波长,实现完美吸收波段的调节。这一点已经被很多研究结果论证^[12]。典型超材料的完美吸收体通常由三层结构组成:最上层是由具有一个或多个电磁响应模式金属微结构单元形成的二维周期阵列,中间层是一层介质平板,最底层一般是一层完整金属板。这种结构使入射的电磁波与超材料相互作用,最终导致入射波的吸收^[13]。比如 Na Liu^[14]的纳米 Au 圆盘以一定的周期性结构沉积在 MgF₂ 和 Au 平板结构上,形成一种等离子体传感器。Koray Aydin^[4]等人在利用超薄金属等离子体结构制成的偏振敏感吸收器上使用了这种结构,在实现完美吸收的同时使入射光的偏振具有选择性。Keng-Te Lin^[15]等人独辟蹊径用连续的金膜沉积在具有一定周期结构的硅衬底上,利用这种结构的吸收特性实现了一种新型的探测器,但他们对这种结构的吸收原理以及表面等离子体的激发模式没做进一步的研究,只是阐述了一种实验结果。因此,有必要对这一结构的物理原理以及电磁波吸收的方式进行更深入的研究。

本文利用时域有限差分(finite-different time-domain, FDTD)法对这种硅—振腔结构进行研究,通过改变入射光的波长、器件的尺寸大小等一系列参数,对其内部的吸收机理进行分析。这种结构的吸收可以存在于上下两层表面:金—空气表面和金—硅表面。两种表面的吸收特性各不相同,在一定的波长下可以相互耦合,形成

增强吸收。利用这一吸收特性,通过有效调节器件的参数可以调节吸收波长以及吸收强度等。

1 计算模型

我们所采用的计算模型如图 1 所示。用一片抛光的硅片,一面镀上 Al 作为反射层,另一面刻蚀成周期为 p 的微纳立方结构。其边长为 w ,深度为 h ;入射光垂直入射。在计算过程中,采用周期性边界条件,通过改变边长 w 来研究微立方结构的吸收特性。为了使本文研究的器件没有偏振选择性,采用边长完全相同的结构。设置对光源归一化的反射和透射监视器,吸收能量的大小可以描述为

$$A = 1 - T - R \quad (1)$$

式中, A 、 T 、 R 分别代表器件的吸收、穿透和反射。我们研究的波长大致在 1200~1800 nm 范围内。在这个波段,硅的介电常数虚部接近 $10e^{-9}$,因此硅的吸收可以忽略不计。 A 完全来源于 Au 和 Al 的吸收,论文中所引用的材料参数来源于文献 [17]。

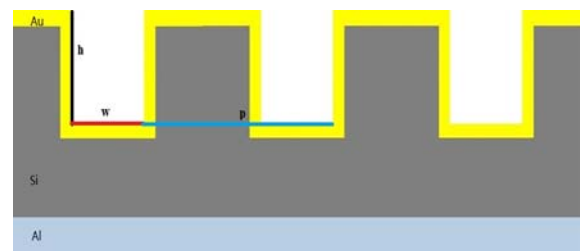


图 1 模拟的结构示意图 (Au 层为 30~100 nm, Si 层为 500 nm, Al 层为 100 nm)

2 讨论和分析

光学吸收特性如图 2 所示。图 2(a)、2(b)、2(c) 分别对应的金膜厚度为 30 nm、50 nm、100 nm。从图 2(a) 中可以看出,随着单晶胞宽度 w 的增大,吸收峰呈现了三种不同的吸收特性。第一种与晶胞宽度无关,是只和周期 p 有关的水平模式,波长在 1320 nm 左右;第二种随着晶胞宽度的增大,吸收逐渐红移;第三种是三条剧烈蓝移的吸收带。

经过分析, 我们认为, 因为这种结构中存在三种共振模式, 从而表现出三种不同的吸收特性。金和空气接触, 形成一面开口的立方结构, 当光入射到这种结构表面时, 会在其中产生法布里—珀罗共振 (Fabry-Perot, F-P 共振), 而且会在这种周期结构表面产生表面等离子体激元 (Surface Plasmon Polariton, SPP)。表面等离子体是一种电子集体震荡的电磁波, 会以一定的速度向前传播, 每个波长的电磁波都可以和表面结构耦合, 产生等离子体, 但只有固定波长的和周期满足一定条件时才可以产生表面等离子体共振, 其关系可描述为

$$\frac{2\pi}{P} = k_0 \sqrt{(\varepsilon_m \cdot \varepsilon_e) / (\varepsilon_m + \varepsilon_e)} \quad (2)$$

式中, k_0 是入射波的波矢, p 是周期, ε_m 和 ε_e 是材料和外界环境的介电常数。这就是前面提到的第一种只和周期有关的吸收特性, 一般称为布拉格 SPP。

当布拉格 SPP 在传播过程中遇到图 1 中所示的立方体腔时就会传入其中, 在金和空气表

面形成表面等离子体的共振腔震荡。当 w 增大时, 这种共振腔震荡的波长随之增加。这种共振称为共振腔等离子体。这就是为什么图 2(a) 中的共振腔等离子体只发生在布拉格 SPP 的波长之上的缘故。

前两种共振模式在共振的同时都可以通过薄薄的金属层将电磁波传播到金层的另一面, 也就是金—硅界面。在这一层界面上形成类似于金—空气界面的共振模式。不过其等离子体波矢比空气中的波矢大了很多。这是因为硅本身的折射率远远大于空气。为了进一步证明这个结论, 我们通过增加厚度的方式模拟了三个不同厚度金膜的吸收图。图 2(b) 和图 2(c) 的金膜的厚度分别为 50 nm 和 100 nm。可以看到, 当厚度增加到 50 nm 时, 三条蓝移的吸收线变得非常暗淡。当厚度达到 100 nm 时, 三条蓝移的吸收线完全消失了, 说明这三条吸收线来自于金和硅接触的那一面。这三条吸收线自左向右分别对应硅共振腔里的三阶、二阶、一阶共振腔 SPP 模式。

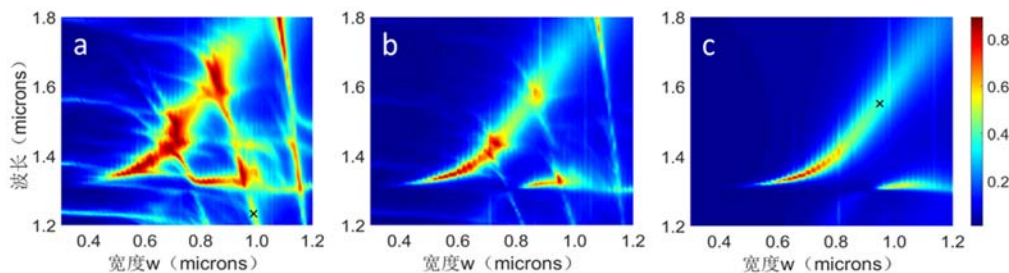


图 2 单胞宽度和波长的关系

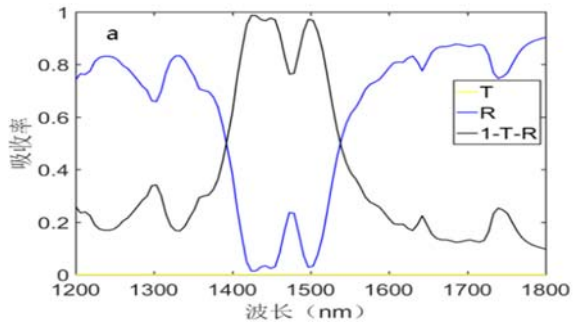
从图 2(a) 中可以得出, 在这种微结构中, 可以利用其光学特性选取我们所需波长的完美吸收体。例如可以选择在 w 为 700 nm 附近形成宽光谱超高吸收, 或者在 w 为 900 nm 附近实现双峰吸收。

吸收率随波长变化的关系如图 3 所示。图中, T 代表对光源归一化的穿透的电磁波强度; R 代表对光源归一化的反射强度, $1 - T - R$ 是对光源归一化的吸收强度。图 3(a) 是图 2(a) 中 $w=700$ nm 的吸收谱。图 3(b) 是图 2(a) 中 $w=850$ nm 的

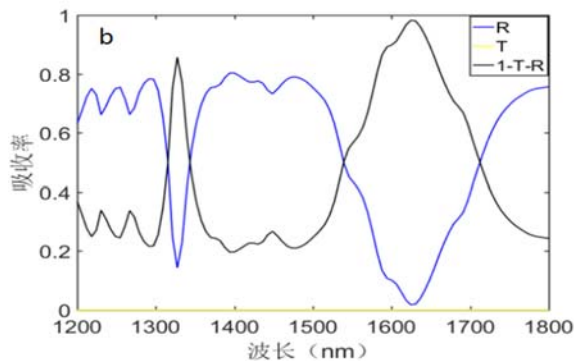
吸收谱。可以看到, 图 3(a) 中最高吸收率达到了 0.987, 吸收谱的半高宽为 1400~1550 nm。图 3(b) 中, 1320 nm 和 1640 nm 附近的吸收率分别为 0.83 和 0.985, 基本实现了完全吸收。

本文对电场模的分布也进行了研究。图 4 是上下两个腔的电场图。图 4(a) 为图 2(a) 中交叉点位置尺寸结构的电场图, 其中, $w=1000$ nm, 入射波长为 1200 nm。图 4(b) 为图 2(c) 中交叉点位置的结构电场强度图, $w=900$ nm, 波长为 1560 nm。由该图可以明显看出, 图 4(a) 是金—

硅共振腔的电场图, 吸收主要集中在侧壁上。图 4(b) 展示的是金—空气共振腔的电场图, 吸收主要集中在腔口附近, 其原因是空气腔中的表面等离子体波长正是我们所设计的腔尺寸大小 ($1 \mu\text{m}$) 量级, 而在硅腔中的 SPP 波长大概在 $300\sim 400 \text{ nm}$ 左右, 所以形成在金属和硅界面传播的等离子共振模式。

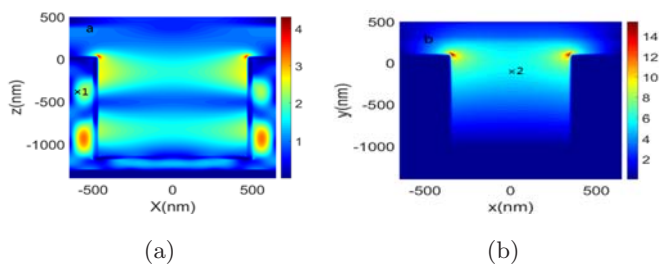


(a)



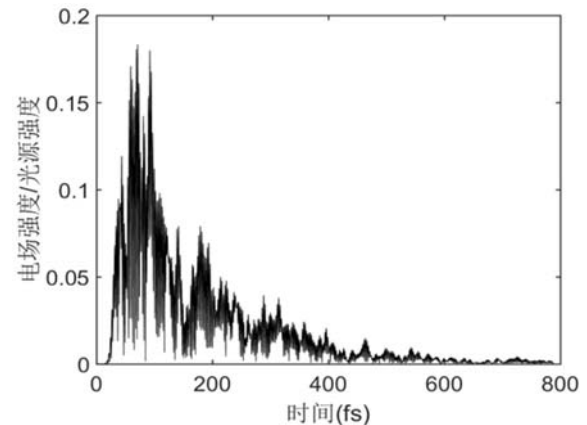
(b)

图 3 吸收率随波长的变化

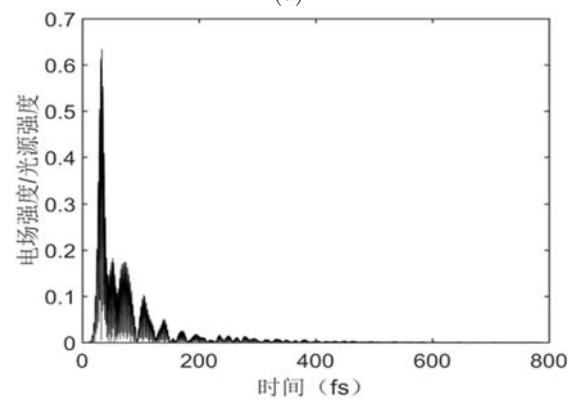
图 4 单晶胞截面的 x - z 平面电场强度图

用脉冲信号入射, 用时间监视器对上下两个腔内共振的电场进行监测, 空气共振腔和硅共振腔的电场共振时间分别如图 5 所示。图 5(a) 为背面的金—硅共振腔, 对应于图 4 的 X_1 点, 图 5(b) 为正面的金—空气共振腔, 对应于图 4

的 X_2 点。可以发现, 在这种双共振腔结构中, 共振非常强烈, 尤其是硅共振腔的共振时间达到了 800 fs 。这主要是因为 Al 反射层和 Au 层的作用, 强烈的共振必然导致金属对电磁波的反复吸收, 这也进一步解释了吸收率高的原因。



(a)



(b)

图 5 两个共振腔里形成的等离子体共振时间图解

3 结论

研究了一种镀有金薄膜的硅腔结构的完美吸收体的光学特性, 深入阐述了其内部表面等离子体的共振机理。发现在这种结构中存在三种吸收模式: 布拉格 SPP、金—空气共振腔 SP 共振、金—硅共振腔 SP 共振。这三种共振之间的相互耦合可以实现单峰宽谱吸收, 吸收率可以达到 0.987 , 或者实现双峰吸收, 吸收率为 0.83 和 0.985 。同时, 可以通过调节单位原胞的尺寸实现我们需要的目标吸收波长。值得一提的是,

(下转第 10 页)