

铝基平面超构材料可见-近红外光超吸收研究

卢玥¹, 许昊², 李晓温², 彭芳², 孙艳^{2*}, 王丁^{1*}, 郝加明²

(1. 上海理工大学材料科学与工程学院, 上海 200093;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

摘要: 增强可见-近红外光吸收在光电信号转换、探测、通信及传感等众多领域具有重要应用潜力。本文基于吉尔-图诺伊斯谐振腔(Gires-Tournois resonator)共振吸收原理, 利用 Al/Al₂O₃/Al 三层膜结构制备了可见到近红外波段全铝基平面薄膜堆栈型超构吸收器。通过合适的参数优化选取, 实现了吸收峰位连续可调。吸收峰值接近100%, 变角度反射光谱显示器件对入射角度不敏感, 理论数值模拟计算结果与实验结果相互吻合。完美吸收峰在500 nm附近的吸收器在532 nm激光照射下快速升温, 最高温度可达55.4 °C, 表明该结构在光热转化领域的潜在应用。

关键词: 吉尔-图诺伊斯谐振腔; 近完美吸收; 光热转化

中图分类号: TN214

文献标识码: A

Visible-near infrared light superabsorption of aluminum-based planar metamaterial

LU Yue¹, XU Hao², LI Xiao-Wen², PENG Fang², SUN Yan^{2*}, WANG Ding^{1*}, HAO Jiao-Ming²

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The enhanced visible-near infrared light absorber has important application potentials in many fields such as photoelectric signal conversion, detection, communication, and sensing. In this paper, based on the principle of Gires-Tournois resonator resonance absorption, an all-aluminum-based planar thin-film stacked metamaterial light wave absorber is proposed. The device is composed of a sub-wavelength Al/Al₂O₃/Al three-layer film structure. Through optimal selection of appropriate parameters, the absorption peak position is continuously adjustable from visible to near infrared, the absorption peak is close to 100%, and the variable angle reflection spectra show that the device is not sensitive to the incident angle. The theoretical calculation results are in perfect agreement with the experimental results. The absorber with a perfect absorption wavelength near 500 nm heats up rapidly under 532 nm laser irradiation, and the maximum temperature can reach 55.4 °C, indicating potential applications in the field of photothermal conversion.

Key words: gires-Tournois resonance, near perfect absorption, light-to-heat conversion

引言

可见-近红外波段的超吸收器在光电探测^[1-4]、生物医疗^[5, 6]、折射率传感器^[7-9]及太阳能吸收^[10-15]等方面有巨大的应用前景。电磁超构材料是指由亚波长“人工原子”按照特定的排列方

式组合而成的复合材料, 其对电磁波具有超强的调控能力, 增强光吸收是电磁超构材料的一个重要的应用^[16]。自2008年Landy等^[17]首次利用超构材料结构在微波波段实现完美吸收以来, 人们已经设计了多种类型的结构, 并构建多波段的超

收稿日期: 2020-07-01, 修回日期: 2020-12-01

Received date: 2020-07-01, Revised date: 2020-12-01

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0202200); 上海市经济和信息化委员会项目(GYQJ20190123)

Foundation items: Supported by National Key R&D Program of China (2016YFA0202200); Shanghai Economic and Information Committee (GY-QJ20190123)

作者简介(Biography): 卢玥(1995-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 超构材料微结构增强吸收. E-mail: Lyue8730@163.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: sunny@mail.sitp.ac.cn, wangding@usst.edu.cn

吸收器。如 Hao 等^[18]利用周期性的金纳米方块,首次在近红外波段(1.58 μm)实现约 88% 的吸收率; Kai Chen 等^[19]利用铝圆盘阵列制备的超构材料吸收器在 5.8~6.6 μm 波段范围内有 90% 以上的光吸收; Pan 等^[20]利用不同周期的金属条状结构,在太赫兹波段达到 99% 的吸收。以上研究工作大多数采用的是图形化的微纳结构阵列来实现高效率的电磁波吸收,其制备成本昂贵且耗时费力。尤其是应用于可见波段的吸收器,其结构单元只有亚微米甚至数十纳米大小,需要昂贵的微纳加工设备和复杂的工艺,耗时长且无法大面积制备,为产业化所需的大面积、低成本制备超吸收器带来了极大的困难。

多层介质膜是光学器件中广泛应用的结构,把折射率不同的介质膜组合在一起,通过膜层设计可以实现特定波长的高反射率和透射率,这在各种激光器、探测器和其它光子器件中广泛地应用。这种平面多层膜结构制备过程无需复杂的微纳加工技术,可实现大面积制备。如 Kat 等^[21]研究了涂覆在金属上的超薄吸收性半导体薄膜中的强光学干涉效应,并证明亚波长厚度的连续吸收性薄膜可实现光吸收增强; Pan 等^[22]研究了深亚波长的 CuO/Au 薄膜结构,在可见光区域实现连续可调的近完美吸收; Zhongyang Li 等^[23]提出了金属/介质层/金属(metal/insulator/metal, MIM)三层平面薄膜结构的 Ag/SiO₂/Ag 电磁吸收器,对可见光的吸收可达到 97%。这些薄膜结构的超吸收器制备工艺简单,但是在结构中普遍使用了贵金属金或银,因而成本较高,不利于产业化应用。金属铝在可见-近红外区域具有较优的电磁特性,并且和各种衬底具有很好的粘附性,因而在增强光波吸收方面具有很大的应用潜能^[24]。

本文基于 Al/Al₂O₃/Al 三层薄膜堆栈结构制备了可见到近红外波段的电磁吸收器,该器件可实现大面积、低成本制备。利用原子层沉积系统调控 Al₂O₃ 的厚度,实现了可见-近红外波段连续可调的宽波段近完美吸收。不同偏振状态下变角度光谱显示器件对入射角度不敏感。实验测量了吸收器反射光谱,其结果与时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)仿真结果高度符合。最后的光照升温实验表明这种三层膜堆栈结构的吸收器在光照情况下升温快速,在光热转化领域具有广泛的应用前景。

1 实验部分

为了利用金属铝材料制备可见-近红外波段完美吸收波长可调的大面积吸收器,设计了 Al/Al₂O₃/Al 三层薄膜堆栈结构,其制备流程图如图 1 所示。

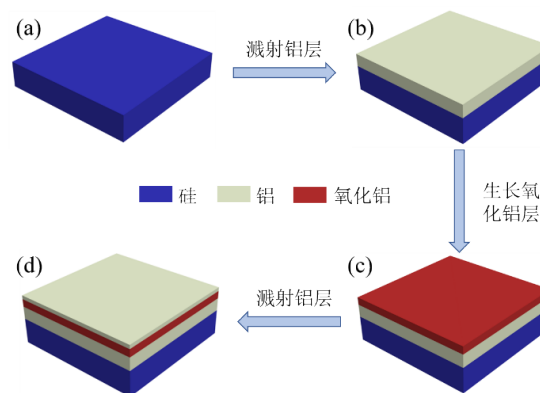


图1 铝基电磁吸收器制备流程图 (a) 硅衬底, (b) 硅衬底/铝薄膜, (c) 硅衬底/铝/氧化铝薄膜, (d) 硅衬底/铝/氧化铝/铝薄膜

Fig. 1 Preparation flowchart of aluminum-based electromagnetic absorber (a) Silicon substrate, (b) Silicon substrate/aluminum film, (c) Silicon substrate/aluminum/alumina film, (d) Silicon substrate/aluminum/alumina/aluminum film

1.1 制备流程

以单晶硅为衬底,制备流程如下:(1)清洗硅片衬底,先将硅片放入丙酮中超声 10 min,取出放入乙醇中超声 10 min,取出并用大量超纯水冲洗,放入浓硫酸/双氧水(比例 1:4)混合溶液中浸泡 20 min,取出并用大量超纯水冲洗后放入乙醇中浸泡后取出吹干;(2)用高真空电子束沉积系统在硅表面生长厚度约为 100 nm 的金属铝,作为结构中的金属反射层(图 1(b));(3)利用原子层沉积系统在 Al 薄膜上沉积 Al₂O₃ 薄膜,腔体气压设置为 19 hPa,温度为 190 $^{\circ}\text{C}$,薄膜厚度从 60 nm 变化至 145 nm 共 8 个厚度(图 1(c));(4)利用高真空电子束沉积设备在氧化铝铝表面生长 5 nm 的铝薄膜(图 1(d))。

1.2 主要仪器设备

电子束沉积系统(High Vacuum E-beam evaporation system, Tri-Axis)用于底层和顶层金属铝的制备;原子层沉积系统(Atomic Layer Deposition, Picosun R200)用于氧化铝薄膜的生长;紫外-可见分光光谱仪(Lamda 950, PerkinElmer)用于测试器件的光谱特性;扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscopy, SEM, FEI Siron 200)用于表征样品形貌,采用超高分辨模式(Ultra High Resolution, 简称 UHR);

紫外-可见-近红外分光光度计(Cary 5000, Agilent Technologies)用于表征器件在不同偏振状态下样品的变角度反射光谱。

2 结果与讨论

2.1 结构表征

我们对制备的超吸收器进行形貌及结构表征。图2(a)是设计的超吸收器 Al/Al₂O₃/Al 的结构示意图。图2(b)是制备的吸收器SEM截面图,自下而上依次是硅衬底、底层铝、氧化铝、顶层铝,这与图2(a)所展示的吸收器结构示意图完全一致。可以看到底层铝及中间氧化铝层界面清晰,氧化铝和底层铝膜厚度均匀,成膜质量较好。底层铝膜厚度大约为108 nm,中间氧化铝厚度为80 nm,最上层的白色薄膜为5 nm厚的顶层铝,这些尺寸和设计厚度基本符合。其中中间层氧化铝的厚度由ALD生长的循环数决定,对制备的8个厚度的吸收器都进行了截面的测量,其氧化铝的厚度分别为63 nm、73 nm、90 nm、105 nm、117 nm、136 nm和146 nm,与ALD生长预设厚度基本符合。

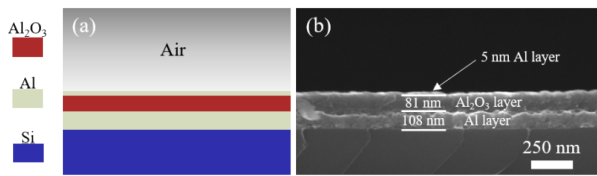


图2 三层薄膜堆栈结构的吸收器 (a) 结构示意图, (b) SEM截面图

Fig. 2 An absorber with a three-layer film stack structure (a) Schematic structure, (b) SEM cross-sectional view

2.2 光谱表征

当电磁波入射到吸收器表面时,在界面处发生了反射、透射、吸收及散射,满足关系式^[25]: $A(\lambda) + S(\lambda) + T(\lambda) + R(\lambda) = 1$ 。其中 $T(\lambda)$ 为透射率,因为器件底层铝厚度大于100 nm,远超工作波段的趋肤深度,因此 $T(\lambda)$ 为零; $S(\lambda)$ 为散射率,由于上层铝膜为均匀的平面结构,因此 $S(\lambda)$ 为零; $R(\lambda)$ 为反射率; $A(\lambda)$ 为吸收率。因此,吸收率表达式简化为 $A(\lambda) = 1 - R(\lambda)$,只需测试吸收器的反射光谱即可。

用紫外-可见分光光度计 Lamda 950 对制备的吸收器进行了反射光谱的表征,入射角度为8°。如图3(a)和3(c)所示,制备的三层膜结构100 nm Al/Al₂O₃/5 nm Al,在只改变中间层Al₂O₃厚度的条件下,实现了可见和近红外波段的超吸收,并且吸收峰的

宽度较宽。为了便于表达,定义大于90%的部分认为是超吸收波段范围。如图3(a)所示,当Al₂O₃厚度为63 nm时,在504 nm处出现明显的反射谷,其反射率仅为0.4%,并且超吸收范围为231 nm(417~648 nm)。当Al₂O₃厚度增加为73 nm、81 nm及90 nm时,反射谷峰红移至567 nm、630 nm和687 nm,其谷底处反射率均小于1%,基本覆盖整个可见光范围。当继续增加Al₂O₃的厚度到100 nm以上时,器件的超吸收峰红移至近红外波段。如图3(c)所示,当Al₂O₃的厚度为105 nm时,在891 nm处出现明显的超吸收,其反射率仅为0.25%;另外其超吸收范围覆盖717~1149 nm波段,宽度达432 nm。当Al₂O₃厚度为117 nm、136 nm及146 nm时,可以看到随Al₂O₃厚度的逐渐增加,吸收峰发生了红移,超吸收波段范围也随着Al₂O₃厚度增加而增大。我们把以上吸收器的超吸收峰位和峰宽整理成表1,从表中可以明显看到随着Al₂O₃厚度的增加,超吸收峰位明显红移,吸收峰位调控范围为500 nm~1.2 μm;并且超吸收带宽也逐渐增加,从231 nm增加到540 nm。超吸收器的宽带吸收有非常好的应用潜力,比如Al₂O₃厚度为73 nm的超吸收器,其超吸收的波段范围为474~720 nm,基本覆盖了70.3%的可见光区,可以有效的提高太阳能电池及可见光波段探测器的光吸收能力。表1为超吸收体功能器件设计提供了参数依据。

为了深入理解结构的特征,我们进行了理论分析。该三层膜结构的反射光谱符合斯涅尔反射定律。假定一束平行光从空气入射到结构表面(见图4),入射角为 θ 。顶层铝厚度为 d_1 ,氧化铝厚度为 d_2 。

根据文献[22],结构整体反射系数为:

$$r = \frac{\tilde{r}_{01} + \tilde{r}_{12} e^{2i\tilde{\beta}_1} + \tilde{r}_{23} e^{2i\tilde{\beta}_2} (\tilde{r}_{01} \tilde{r}_{12} + e^{2i\tilde{\beta}_{21}})}{1 + \tilde{r}_{01} \tilde{r}_{12} e^{2i\tilde{\beta}_1} + \tilde{r}_{23} e^{2i\tilde{\beta}_2} (\tilde{r}_{12} + \tilde{r}_{01} e^{2i\tilde{\beta}_{21}})}, \quad (1)$$

其中: \tilde{r}_{ij} 表示从介质 i 入射到介质 j 的反射系数,入射光为TE模式时, $\tilde{r}_{ij} = \frac{(N_i \cos \theta_i - N_j \cos \theta_j)}{(N_i \cos \theta_i + N_j \cos \theta_j)}$,入射光

为TM模式时, $\tilde{r}_{ij} = \frac{(N_j \cos \theta_i - N_i \cos \theta_j)}{(N_j \cos \theta_i + N_i \cos \theta_j)}$; $N_m = n + ik_m$ 表示介质 m 的复折射率; $\tilde{\beta}_m$ 是在介质 m 中的传输相位, $\tilde{\beta}_m = \frac{2\pi}{\lambda} N_m h \cos \theta_m$; R 表示为结构的反射率, $R = |r|^2$ 。入射光在该结构中传播,当相位移动累积到 $m\pi$ 时,便会增强上下两层铝和氧化铝之间界面区

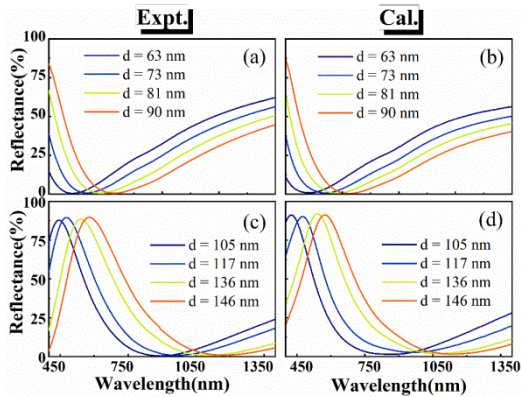


图3 吸收器的反射光谱曲线 (a) Al₂O₃厚度分别为63 nm、73 nm、81 nm、90 nm样品的实验反射光谱曲线, (b) Al₂O₃厚度分别为63 nm、73 nm、81 nm、90 nm样品的模拟反射光谱曲线, (c) Al₂O₃厚度分别为105 nm、117 nm、136 nm、146 nm样品的实验反射光谱曲线, (d) Al₂O₃厚度分别为105 nm、117 nm、136 nm、146 nm样品的模拟反射光谱曲线

Fig. 3 Reflectance spectrum curves of the absorber (a) The experimental reflection spectrum curve of samples with alumina thickness of 63 nm, 73 nm, 81 nm, and 90 nm, (b) The simulation of samples with alumina thickness of 63 nm, 73 nm, 81 nm, and 90 nm. Reflection spectrum curve, (c) The experimental reflection spectrum curve of samples with alumina thickness of 105 nm, 117 nm, 136 nm and 146 nm, (d) The simulated reflection spectrum curve of samples with alumina thickness of 105 nm, 117 nm, 136 nm and 146 nm

表1 氧化铝厚度和器件超吸收峰位、吸收带宽及超吸收范围之间的关系

Table 1 The relationship between the thickness of alumina and the peak position, bandwidth and range of the devices' superabsorption

氧化铝厚度/ nm	超吸收峰位/ nm	吸收带宽/nm	超吸收范围/nm
63	504	231	417~648
73	567	246	474~720
80	630	279	525~804
90	687	312	573~885
105	891	432	717~1 149
117	963	462	777~1 239
136	1 098	537	894~1 431
146	1 176	540	960~1 500

域的光吸收^[26]。另外,当顶层金属的厚度增加时(即反射率增大),这类吸收器的吸收带宽变窄^[27]。因此,通过实验验证,我们设置5 nm厚度的顶层铝来获得宽带吸收器。

针对设计的器件结构,我们用时域有限差分法

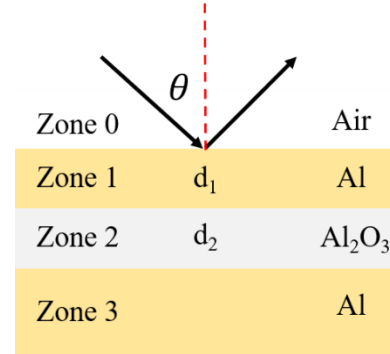


图4 吸收器结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of absorber structure

进行了数值仿真计算。首先对100 nm Al/ Al₂O₃/5 nm Al三层薄膜结构进行椭圆偏振测试,数值反演计算获得每层薄膜的光学参数。图5为每层薄膜的光学参数,选用样品100 nm Al/ 63 nm Al₂O₃/5 nm Al的光学参数进行仿真模拟。

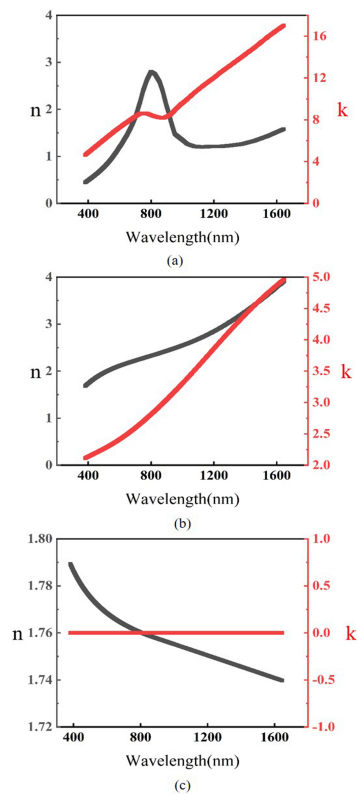


图5 100 nm Al/ 63 nm Al₂O₃/5 nm Al样品中各层薄膜的光学参数 (a) 100 nm厚度的Al, (b) 63 nm厚度的Al₂O₃, (c) 5 nm厚度的Al。黑色曲线为折射率n,红色曲线为消光系数k

Fig. 5 Optical parameters of each layer of 100 nm Al/63 nm Al₂O₃/5 nm Al (a) 100 nm aluminum, (b) 63 nm Alumina, (c) 5 nm aluminum. The black curve is the refractive index n, and the red curve is the extinction coefficient k

仿真计算的结果如图 3(b)和 3(d)所示。从图上可以看出模拟结果和实际测量光谱在峰位和峰的宽度上基本保持一致。如当氧化铝厚度为 63 nm 时,该器件的模拟反射低谷在 503 nm,其反射率仅为 0.8%,与实际制备的吸收器反射特性相吻合。另外随 Al_2O_3 厚度的变化趋势也和实际测试相同。拟合结果说明 100 nm Al/ Al_2O_3 /5 nm Al 三层薄膜结构的设计从理论上是可行的。

为了更直观的描述超吸收器 100 nm Al/ Al_2O_3 /5 nm Al 的峰位与介质层 Al_2O_3 厚度之间的关系,我们从实验与模拟的反射光谱中提取两者的数据,作超吸收峰位与 Al_2O_3 厚度关系的折线图,如图 6 所示。从图中可以看出,超吸收峰位和 Al_2O_3 厚度基本成线性关系,实验与模拟数据基本符合。

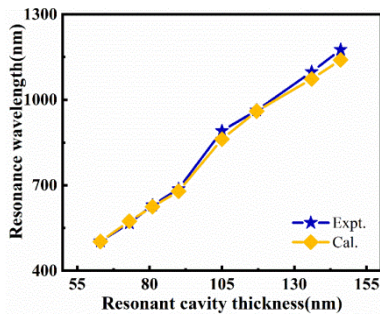


图 6 超吸收器中间 Al_2O_3 厚度与吸收峰位关系的折线图
Fig. 6 Line chart of the thickness relationship between the superabsorber cavity and the position of the absorption peak

以上讨论都基于入射光近似于垂直照射在超吸收器表面上的情况。在很多领域的应用中,超吸收器在变角度入射下的性质是一个非常重要的性能指标。如隐身领域中,飞行器在雷达不同角度照射下,需要保持较高的电磁波吸收率。如太阳能电池领域中,针对不同时间段太阳不同角度的照射,希望吸收体具有宽波段吸收的特性。因此,我们研究了超吸收器在变角度下对吸收性能的影响。利用 Cary 5000 型分光光度计对 100 nm Al/90 nm Al_2O_3 /5 nm Al 吸收器分别在 s 偏振和 p 偏振态下进行了变角度反射光谱的测试,角度范围为 $6\text{--}61^\circ$,测试的结果如图 7(a-c)所示。从图中可以看到超吸收器具有典型的宽波段吸收特点。变角度的反射光谱显示器件在 s 偏振和 p 偏振态下的吸收特性稍有差别。在 s 偏振光照射下,随着入射角度增大,吸收强度基本保持不变,在大于 40° 时吸收峰在长波部分略有缩小(图 7(a));而在 p 偏振光照射条件下,器件在大于 50° 范围吸收强度整体随入射角度增大而

有所下降(图 7(b))。考虑到很多光源是非偏振光入射,我们也研究了器件在非偏振入射时的吸收性能(图 7(c))。实验表明制备的器件在 0° 到 50° 范围内对于入射角度不敏感。利用数值模拟计算出器件的变角度反射光谱,其结果如图 7(d-f)所示。计算结果与实验结果基本相同。变角度的反射光谱测试和模拟结果证明 100 nm Al/ Al_2O_3 /5 nm Al 的三层薄膜堆栈结构对入射角度不敏感,这个特性可用于热光伏、热发电、海水淡化、取暖等^[28-30]多种场景。我们对其他几个厚度的吸收器也进行了测试和模拟,结果和 100 nm Al/90 nm Al_2O_3 /5 nm Al 吸收器类似。

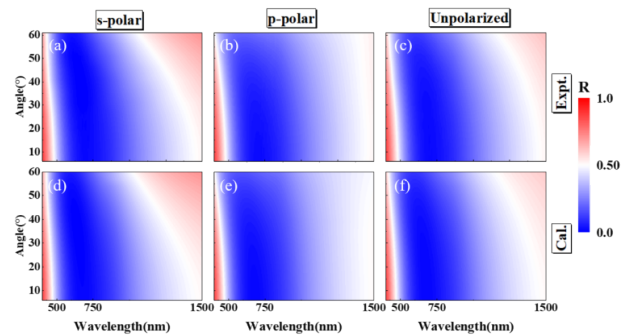


图 7 不同偏振状态下器件的变角度反射光谱 (a-c) 分别是实验测量的 s, p 及非偏振状态下的器件变角度反射光谱, (d-f) 分别是模拟计算的 s, p 及非偏振状态下的器件变角度反射光谱

Fig. 7 Variable angle reflection spectra of the device under different polarization states. Experimental (a-c) and calculated (d-f) reflectance spectra as a function of incidence angles under different polarization conditions

2.3 电磁场分布

为了研究器件超吸收峰形成的物理机制,我们利用时域有限差分法对 100 nm Al/90 nm Al_2O_3 /5 nm Al 吸收器的 679 nm 处吸收峰进行了电磁场分布模拟计算。设置单个监视器,为 xz 纵截面 ($y=0$ nm),入射角度为 8° 。图 8(a)是吸收峰的电场模拟图,可以看到超吸收峰位处的电场主要局域在中间介质层 Al_2O_3 的上部分和表面 Al 层之间,表明超吸收主要来自于上层 Al 膜的损耗。图 8(b)的磁场主要分布在底层 Al 上表面和中间介质层 Al_2O_3 的下半部分,这一电场非对称分布的现象符合典型的吉尔-图诺伊斯共振模式^[31],顶部金属层、中间介质层和底部反射层形成干涉从而引起共振吸收增强。

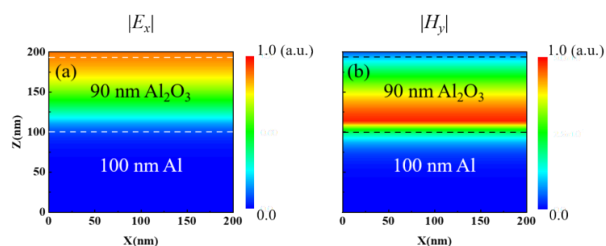


图8 8° 入射条件下样品共振波长处的电场及磁场分布 (a) xz纵截面($y=0$ nm)处电场分布, (b) xz纵截面($y=0$ nm)处磁场分布

Fig. 8 The electric and magnetic field distribution at the resonant wavelength of the sample at 8° incidence (a) The electric field distribution at the xz longitudinal section ($y=0$ nm), (b) The magnetic field distribution at the xz longitudinal section ($y=0$ nm)

3 光照升温

由于超吸收器的吸收性能来自于金属的耗散,利用这个特性在超吸收峰附近可以实现光照升温。超吸收器 100 nm Al/63 nm Al_2O_3 /5 nm Al 的吸收峰位为 504 nm,其超吸收范围为 417~648 nm,因此我们选择 532 nm 激光器对其光照升温。如图 9(a)为实验装置图,固定激光光纤出光口到样品表面的距离为 4 cm,样品大小为 1.5×1.5 cm,光斑直径为 1 mm,热电偶探头固定在吸收器背后,通过调整激光的功率照射样品,记录下样品温度随时间的变化曲线。图 9(b-d)为样品温度随时间变化曲线,对应的照射激光功率为 240 mW、300 mW、440 mW。图中浅绿色阴影部分代表激光处于打开状态。从图中可以看到,当激光打开时,样品温度迅速上升,3 分钟后样品的温度曲线进入了平台区,可以看到平台区所对应的温度和入射光强相关,光强越强,最终温度越高,分别为 41.1 $^\circ\text{C}$ 、54.1 $^\circ\text{C}$ 及 54.4 $^\circ\text{C}$ 。当激光被关闭时,样品表面的温度迅速下降,5 min 之后样品表面的温度和室温一致。

4 总结

本文利用三层膜全铝基结构 Al/ Al_2O_3 /Al,通过改变中介质层 Al_2O_3 的厚度,制备了吸收波长可调的可见-近红外波段的吸收器。电磁场分布仿真模拟结果表明,该吸收器符合吉尔-图诺伊斯谐振腔共振吸收模型。光照升温实验表明其具有良好的光热效应。这种三层平面薄膜结构的电磁吸收器工艺简单、价格低、适合大面积制备,可应用在太阳能电池、探测器、光热转化等领域。

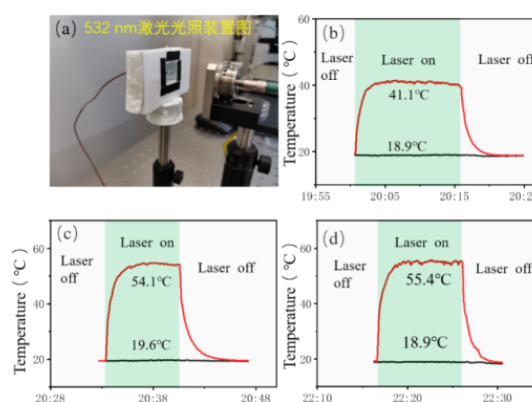


图9 (a)电磁吸收器进行光照升温的实验装置图, (b) 样品在 240 mW 激光功率下光照升温曲线, (c) 样品在 300 mW 激光功率下光照升温曲线, (d) 样品在 440 mW 激光功率下光照升温曲线,其中黑色曲线为室温变化曲线,红色曲线为样品温度变化曲线

Fig. 9 (a) Diagram of the experimental setup of the electromagnetic absorber for light heating, (b) The heating curve of the sample under 240 mW laser power, (c) The heating curve of the sample under 300 mW laser power, (d) The heating curve of the sample under 440 mW laser power, in which the black curve is the room temperature change curve, and the red curve is the sample temperature change curve

References

- [1] WANG K, HU H, LU S, *et al.* Visible and near-infrared dual-band photodetector based on gold-silicon metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*. 2020, **116**(20): 203107.
- [2] SOBHANI A, KNIGHT M W, WANG Y, *et al.* Narrow-band photodetection in the near-infrared with a plasmon-induced hot electron device [J]. *Nature Communications*. 2013, **4**(1).
- [3] QIU F, QIU W, LI Y, *et al.* An investigation of exciton behavior in type-II self-assembled GaSb/GaAs quantum dots [J]. *Nanotechnology*. 2016, **27**(6), 065602.
- [4] TONG L, QIU F, WANG P, *et al.* Highly tunable doping in Ge quantum dots/graphene composite with distinct quantum dot growth evolution [J]. *Nanotechnology*. 2019, **30**(19), 195601.
- [5] LI B, TAN L, LIU X, *et al.* Superimposed surface plasma resonance effect enhanced the near-infrared photocatalytic activity of Au@Bi₂WO₆ coating for rapid bacterial killing [J]. *Journal of Hazardous Materials*. 2019, **380**: 120818.
- [6] DOU X, CHUNG P, JIANG P, *et al.* Surface plasmon resonance-enabled antibacterial digital versatile discs [J]. *Applied Physics Letters*. 2012, **100**(6): 63702.
- [7] LI R, WU D, LIU Y, *et al.* Infrared Plasmonic Refractive Index Sensor with Ultra-High Figure of Merit Based on the Optimized All-Metal Grating [J]. *Nanoscale Research Letters*. 2017, **12**(1).
- [8] LUO S, ZHAO J, ZUO D, *et al.* Perfect narrow band absorber for sensing applications [J]. *Optics Express*. 2016, **24**

- (9): 9288.
- [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] MEHRABI S, REZAEI M H, ZARIFKAR A. Ultra-broadband solar absorber based on multi-layer TiN/TiO₂ structure with near-unity absorption [J]. *Journal of the Optical Society of America B*. 2019, **36**(9): 2602.
- [11] KHAN A D, KHAN A D, KHAN S D, *et al.* Light absorption enhancement in tri-layered composite metasurface absorber for solar cell applications [J]. *Optical Materials*. 2018, **84**: 195–198.
- [12] RUFANGURA P, SABAH C. Wide-band polarization independent perfect metamaterial absorber based on concentric rings topology for solar cells application [J]. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016, **680**: 473–479.
- [13] LIN K, LIN H, YANG T, *et al.* Structured graphene metamaterial selective absorbers for high efficiency and omnidirectional solar thermal energy conversion [J]. *Nature Communications*. 2020, **11**(1).
- [14] YANG J, ZHAO B, WANG C, *et al.* Improving the growth of Ge/Si islands by modulating the spacing between screen and accelerator grids in ion beam sputtering deposition system [J]. *Applied Surface Science*. 2016, **386**: 303–308.
- [15] ZHANG Z, WANG R F, ZHANG J, *et al.* Direct growth of Ge quantum dots on a graphene/SiO₂/Si structure using ion beam sputtering deposition [J]. *Nanotechnology*. 2016, **27** (30): 305601.
- [16] Zhang M, Introduction to Metamaterials [M], National Defense Industry Press. 2014 (张明习. 超材料概论. 国防工业出版社), 2014.
- [17] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, *et al.* Perfect Metamaterial Absorber [J]. *Physical review letters*. 2008, **100**(20): 207402.
- [18] HAO J, WANG J, LIU X, *et al.* High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial [J]. *Applied Physics Letters*. 2010, **96**(25): 251104.
- [19] CHEN K, DAO T D, ISHII S, *et al.* Infrared Aluminum Metamaterial Perfect Absorbers for Plasmon-Enhanced Infrared Spectroscopy [J]. *Advanced Functional Materials*. 2015, **25**(42): 6637–6643.
- [20] PAN Xiao-Hang, XU Hao, YU Wei-Wei, *et al.* Flexible metasurface-based Terahertz super-absorber [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (潘晓航, 许昊, 俞伟伟, 等. 柔性可弯曲人工超构材料太赫兹波超吸收研究. 红外与毫米波学报). 2019, **38**(1): 50–54.
- [21] KATS M A, BLANCHARD R, GENEVET P, *et al.* Nanometre optical coatings based on strong interference effects in highly absorbing media [J]. *Nature Materials*. 2013, **12** (1): 20–24.
- [22] PAN H, WEN Z, TANG Z, *et al.* Wide gamut, angle-insensitive structural colors based on deep-subwavelength bilayer media [J]. *Nanophotonics (Berlin, Germany)*. 2020.
- [23] LI Z, BUTUN S, AYDIN K. Large-Area, Lithography-Free Super Absorbers and Color Filters at Visible Frequencies Using Ultrathin Metallic Films [J]. *ACS Photonics*. 2015, **2**(2): 183–188.
- [24] DAO T D, CHEN K, ISHII S, *et al.* Infrared Perfect Absorbers Fabricated by Colloidal Mask Etching of Al - Al₂O₃ - Al Trilayers [J]. *ACS Photonics*. 2015, **2** (7) : 964–970.
- [25] YOU X, UPADHYAY A, CHENG Y, *et al.* Ultra-wide-band far-infrared absorber based on anisotropically etched doped silicon [J]. *Optics letters*. 2020, **45**(5): 1196.
- [26] WU J, GUO J, WANG X, *et al.* Dual-Band Infrared Near-Perfect Absorption by Fabry-Perot Resonances and Surface Phonons [J]. *Plasmonics*, 2018.
- [27] ZHAO D, MENG L, GONG H, *et al.* Ultra-narrow-band light dissipation by a stack of lamellar silver and alumina [J]. *Applied Physics Letters*. 2014, **104**(22): 207402.
- [28] FAN S. Photovoltaics: an alternative 'Sun' for solar cells [J]. *Nat Nanotechnol*. 2014, **9**(2): 92–93.
- [29] LENERT A, BIERMAN D M, NAM Y, *et al.* A nanophotonic solar thermophotovoltaic device [J]. *Nature Nanotechnology*. 2014, **9**(2): 126–130.
- [30] BIERMAN D M, LENERT A, CHAN W R, *et al.* Enhanced photovoltaic energy conversion using thermally based spectral shaping [J]. *Nature Energy*. 2016, **1**(6).
- [31] GIRES F, TOURNOIS P. An interferometer useful for pulse compression of a frequency modulated light pulse [J]. *CR Acad. Sci*, 1964, **258**: 6112–6115.