

基于金属-介质-金属的可调谐窄带完美吸收的研究

王晓坤 李周 梁国龙

Tunable narrow-band perfect absorber based on metal-dielectric-metal

WANG Xiao-kun, LI Zhou, LIANG Guo-long

引用本文:

王晓坤, 李周, 梁国龙. 基于金属-介质-金属的可调谐窄带完美吸收的研究[J]. *中国光学*, 2024, 17(2): 263-270. doi: 10.37188/CO.2023-0125

WANG Xiao-kun, LI Zhou, LIANG Guo-long. Tunable narrow-band perfect absorber based on metal-dielectric-metal[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 263-270. doi: 10.37188/CO.2023-0125

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0125>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深紫外大口径非球面反射膜的均匀性研究

Film thickness uniformity of deep ultraviolet large aperture aspheric mirror

中国光学 (中英文). 2022, 15(4): 740 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0005>

高性能中波红外陷波滤光片设计与研制

Theoretical design and preparation of high performance MWiR notch filter

中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 904 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0193>

基于二氧化钒宽、窄带可切换的双功能超材料吸收器研究

Wide and narrow band switchable bi-functional metamaterial absorber based on vanadium dioxide

中国光学 (中英文). 2022, 15(2): 387 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0174>

聚偏二氟乙烯及其共聚物薄膜非线性光学研究进展

Research progress on nonlinear optics of polyvinylidene fluorid and its copolymers films

中国光学 (中英文). 2022, 15(4): 640 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0191>

铌酸锂薄膜调制器的研究进展

Research progress of lithium niobate thin-film modulators

中国光学 (中英文). 2022, 15(1): 1 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0115>

双波长窄带宽介质超材料吸收器

Dual-wavelength narrow-bandwidth dielectric metamaterial absorber

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1327 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0075>

文章编号 2097-1842(2024)02-0263-08

基于金属-介质-金属的可调谐窄带完美吸收的研究

王晓坤¹, 李周^{2*}, 梁国龙²

(1. 空军航空大学航空作战勤务学院, 长春 130022;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院天基动态
快速光学成像技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了实现窄带完美吸收, 本文提出了一种简单的三层金-二氧化硅-金薄膜 (MDM) 结构。通过电磁波时域差分算法 (FDTD) 进行模拟仿真和理论计算, 详细分析了该结构的可调谐吸收特性, 同时建立了理论模型, 分析了其中存在的电磁模式以及窄带完美吸收的物理机制。首先, 利用电磁波时域差分算法和传输矩阵算法 (TMM) 对该结构进行了理论计算, 详细地分析了各个结构参数对吸收光谱的影响。然后, 对该结构形成的窄带完美吸收物理机制进行了分析讨论。最后, 利用磁控溅射制备手段, 成功制备了三层结构的样片。实验观测到的结果与理论仿真一致。实验结果表明: 本文提出的窄带完美吸收结构, 最窄带宽约为 21 nm, 最高吸收可达 99.51%, 基本实现了窄带完美吸收。本文研究成果为相关应用奠定了基础。

关键词: 薄膜; 完美吸收; 超薄薄膜

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2023-0125

Tunable narrow-band perfect absorber based on metal-dielectric-metal

WANG Xiao-kun¹, LI Zhou^{2*}, LIANG Guo-long²

(1. Aviation Operations Service College, Air Force Aviation University, Changchun 130022, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Key Laboratory of Space-based Dynamic & Rapid Optical Imaging Technology,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: 15500027661@163.com

Abstract: To achieve perfect narrowband absorber, we proposed a simple three-layer thin film (MDM) structure and developed a theoretical model. A comprehensive investigation was conducted on this structure through a combination of simulations and theoretical calculations. First, we executed theoretical calculations on the structure using both finite-difference time-domain algorithm (FDTD) and transfer matrix algorithm. The effects of several structural parameters on the absorption spectrum were analyzed in this study. We analyzed and discussed the physical mechanism of narrow band perfect absorber structure caused by the structure. Finally, we successfully used magnetron sputtering as a fabrication method to produce three-layer

收稿日期: 2023-07-28; 修订日期: 2023-09-08

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 62105330)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62105330)

samples. The experimental results were consistent with the theoretical simulation. Our proposed structure for a narrowband perfect absorber can achieve a maximum narrow bandwidth of approximately 21 nm and a maximum absorption of 99.51%. We establish a strong basis for related applications by achieving perfect narrowband absorption.

Key words: thin film; perfect absorber; ultrathin film

1 引言

近年来完美吸收体得到了研究人员的广泛关注,完美吸收体无论在理论研究还是实际应用都存在着潜在的应用价值,其可应用于太阳能^[1-5]、光电探测^[6-7]、成像传感^[8-15]以及热辐射^[16-17]等领域。完美吸收是指可以在期望的波段内将近乎全部的入射光吸收,有效地抑制反射和透过。近年来,随着微纳加工水平的提高,加工具有亚波长尺度的微纳结构成为现实,由此表面等离子体学应运而生。基于表面等离子体的微纳结构可以在亚波长尺度上操控入射光与结构的相互作用,通过这样的方式来获取期望的反射、透过以及吸收光谱^[18-23]。基于此,研究人员提出很多种纳米结构,例如纳米颗粒、纳米光栅和纳米孔阵列等。这些基于表面等离子体的完美吸收结构可以通过调节结构的尺寸参数来获得特定波段内的完美吸收。但是,这种新型的完美吸收体也面临着一些缺陷:微纳结构的加工往往需要借助昂贵的加工手段,例如离子束聚焦和电子束曝光技术,另外,也不适合大面积的加工制作,这些缺点限制了其在具体领域的应用。

与微纳结构相比,没有纳米图案的一层或者多层薄膜结构被广泛应用于滤光片、减反射薄膜以及反射镜等的制作。许多传统的光学薄膜依靠法珀(FP)干涉效应来实现所需的特定光谱。1952年,研究人员通过一个由金属基底,中间介质层,顶层金属薄膜组成的简单的三层薄膜结构,实现了雷达波的吸收。Capasso 研究组采用一种简单的薄膜结构实现了完美吸收。该结构由金属基底和一层超薄带有损耗的半导体材料锗薄膜构成,可以在很薄的膜层内实现干涉效应^[24]。与传统光学薄膜不同的是,该结构在薄膜界面处的透过或者反射相位变化不再是 0 或者 π 。锗材料的虚部对这种相位变化有着重要的影响,因此,在反

射谱上形成了一个下降波段范围,而该结构金属基底又没有透过,所以这部分入射光被吸收损耗掉了。更重要的是,这种薄膜结构十分简单,不需要昂贵的加工工艺,使得这种结构有着广泛的应用空间。但是,由于锗材料光学常数虚部的存在,使得这种结构形成的吸收谱带较宽,无法形成窄带的吸收谱,相关工作亟待开展。

本文提出了一种基于金-二氧化硅-金三层薄膜(MDM)结构,用于实现可见光到近红外波段内(400 nm~2000 nm)的窄带完美吸收,吸收率最高可达 99.51%,最窄带宽为 21 nm。本文深入研究了其中的物理机制,对这种结构的设计具有指导性意义。此外,该结构的吸收峰波长可以通过调整腔层二氧化硅厚度来实现可调谐,使得提出的这种三层窄带完美吸收结构非常适合于传感、成像以及探测领域。

2 三层 MDM 结构的原理及设计

2.1 三层 MDM 薄膜的电磁模拟仿真

图 1 为提出的三层 MDM 结构示意图。玻璃基底为 K9 玻璃,底层金膜厚度 d_1 为 100 nm,可保证在 400~2000 nm 波段内没有光可以透过该结构;顶层为超薄的金膜,厚度 d_3 为 30 nm,这个厚度是经过设计优化的,以保证实现最高吸收;中间层为二氧化硅层,厚度为 d_2 。二氧化硅制备简单、成本低,而且二氧化硅材料在可见和近红外波段内基本没有损耗,使得入射光可以无损耗地通过该层。这样在两层金薄膜之间形成了一个不对称的法珀腔,在顶层和底层金膜厚度固定的情况下,该法珀腔的共振波长是由腔层厚度 d_2 决定的。在这个三层结构中,底层和顶层金属材料的选择对形成窄带完美吸收有着决定性影响。前期调研了很多常用的薄膜金属材料,例如金属铝,这种材料在可见光波段损耗较大,形成的吸收峰带宽较宽,不利于形成窄带的完美吸

收; 而金属银, 可以形成比较窄的完美吸收峰, 但是银在空气中极易氧化变质, 不适合长期保存使用。最后选择了金材料, 因为金在可见光波段损耗较小, 有利于形成窄带的完美吸收, 同时金属材料性质稳定, 可以长期保存和使用, 更加有利于具体应用。



图 1 提出的三层金-氧化硅-金薄膜结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the proposed three-layered Au-SiO₂-Au thin film structure

利用电磁波时域有限差分算法(FDTD)研究了中间腔层氧化硅厚度 d_2 对所提出的三层结构的整体吸收率的影响。在模拟仿真中采用如下设置: 在垂直于薄膜平面的方向上使用吸收性边界条件, 一个反射率光强监视器位于吸收性边界下方 $10 \mu\text{m}$ 处; 入射光源垂直入射, 波长范围为 $400 \text{ nm} \sim 2000 \text{ nm}$ 。在薄膜平面内采用周期性边界条件, 选取 $5.0 \mu\text{m} \times 5.0 \mu\text{m}$ 的仿真区域就可以替代整个的结构。在该结构中, 底层金薄膜厚度达到了 100 nm , 保证没有光可以透过, 所以整个结构的吸收可以通过公式 $A=1-R$ 求得。本次仿真中使用的金和二氧化硅的光学常数来源于 Palik 数据^[25]。

在前面已经介绍过, 这种三层结构可以形成一个 FP 腔。通过调整中间层二氧化硅层的厚度 d_2 , 就可以在需要的波段形成法珀共振, 所以二氧化硅层厚度 d_2 的选取至关重要。如图 2 所示, 当中间层厚度 d_2 为 580 nm 时, 发生了高级次的法珀共振, 依次为法珀 1 到 4 级共振, 这些共振模式形成了窄带的完美吸收。此时, 该结构在 $400 \sim 2000 \text{ nm}$ 波段内形成了 4 个共振峰, 依次位于 483 nm 、 635 nm 、 938 nm 以及 1870 nm 处, 吸收率依次为 66.8% 、 85.1% 、 97.4% 、 68.1% , 形成的 4 个吸收峰的半波宽度分别为 9 nm 、 11 nm 、 8 nm 、 15 nm 。可见提出的这种结构可以获得带宽比较窄的吸收峰。同时, 还模拟了发生共振模式时, 电场在二氧化硅层内的分布情况, 具体如图 3 所

示。可见, 当发生共振时, 电场在腔层内形成了明显的驻波图案, 从左至右分别对应着法珀共振的 1 到 4 级。

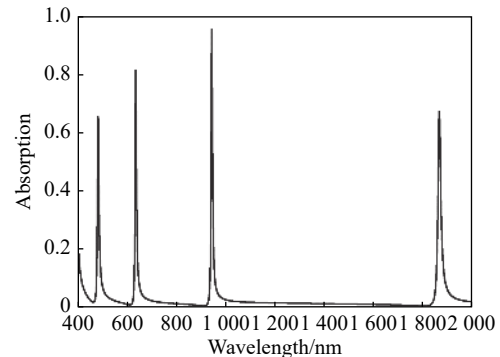


图 2 模拟仿真的 MDM 结构吸收光谱, 该结构中 d_1 、 d_2 、 d_3 分别为 100 nm 、 580 nm 和 30 nm 。

Fig. 2 Simulated absorption spectra of MDM structure with thicknesses d_1 , d_2 and d_3 of 100 nm , 580 nm , and 30 nm , respectively

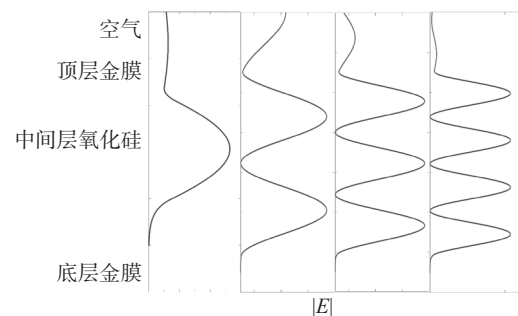


图 3 共振时腔层内的电场分布仿真结果

Fig. 3 Simulated electric field distribution in the cavity when the FP mode resonance was formed

在以上的仿真分析中, 最顶层金薄膜的厚度是 30 nm 。下面讨论顶层超薄金膜厚度 d_3 对整体吸收率的影响结果。首先模拟分析了单层金薄膜的吸收情况, 具体如图 4(a)(彩图见期刊电子版)所示。可以看出, 当金膜厚度分别为 15 nm 、 30 nm 、 45 nm 时, 都没有形成共振, 3 种情况相差不多, 吸收基本都是由金薄膜材料的属性决定的。但是对于三层 MDM 结构来说, 当底层金膜厚度为 100 nm , 中间氧化硅厚度固定为 125 nm 时, 改变顶层超薄金膜厚度, 得到了三层结构吸收与厚度 d_3 的关系如图 4(b) 所示。可以看到, 当顶层金膜厚度为 15 或者为 40 时, 共振模式都不明显, 所以也没有形成那么高的吸收, 而当顶层金膜厚度大约在 30 nm 左右时, 形成了显著的共振效应, 此时的吸收最高接近百分之百。

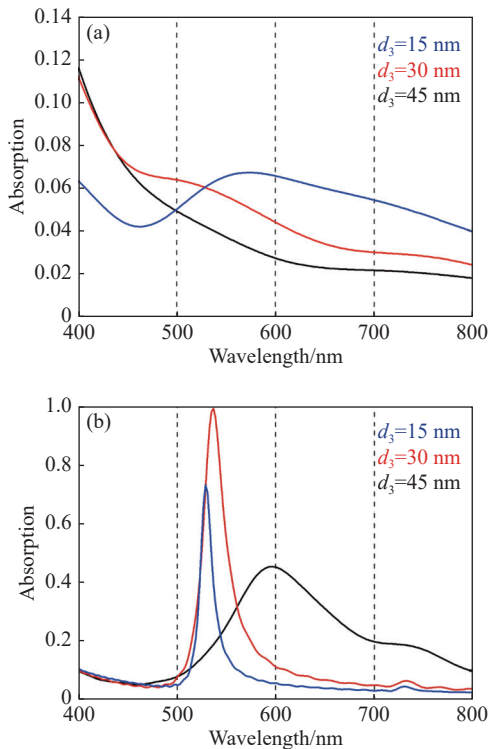


图 4 不同顶层金属膜厚度下吸收率的仿真结果。(a) 单层金薄膜的吸收率。(b) MDM 三层结构的吸收率, 此时中间层氧化硅厚度固定为 125 nm

Fig. 4 Simulated results of absorption at different thicknesses of the top Au layer. (a) Simulated absorption curves of single Au film with various thicknesses. (b) Simulated absorption curves of MDM three-layer structure with various thicknesses of the top Au layers, when the thickness of the intermediate silicon oxide is fixed at 125 nm

2.2 三层 MDM 薄膜的理论计算

对于这种三层薄膜结构, 一般可以用传输矩阵方法计算其反射率, 下面将介绍具体过程。

对于特定基底上的单层薄膜, 设定入射介质折射率为 n_0 , 单层薄膜折射率为 n_1 , 基底折射率为 n_2 , 单层薄膜物理厚度为 d_1 , 一束平面波以 θ 角度入射, 如图 5 所示。

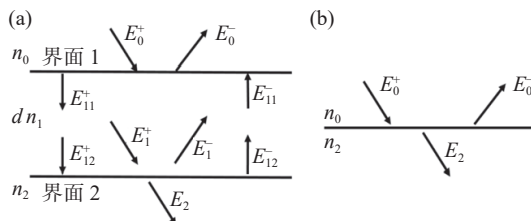


图 5 (a) 入射光通过单层薄膜示意图。(b) 等效界面示意图
Fig. 5 (a) Schematic diagram of incident light passing through a single layer film. (b) Schematic diagram of equivalent interface of single layer

单层薄膜的特征矩阵为:

$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \cos \delta_j / \eta_j \\ i \eta_j \cos \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos \theta_1, \quad (2)$$

称为薄膜的位相厚度, $n_1 d_1$ 为薄膜的光学厚度。对于 p 分量, $\eta_1 = n_1 / \cos \theta_1$, 而对于 s 分量, $\eta_1 = n_1 \cos \theta_1$ 。

设 $\begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix}$ 为膜系的特征方程, 则有:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i}{\eta_1} \sin \delta_1 \\ i \eta_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由导纳定义可得单层薄膜的组合导纳为

$$\mathbf{Y} = \frac{\mathbf{C}}{\mathbf{B}}. \quad (4)$$

由此可以求得单层薄膜的反射系数, 则单层薄膜的反射率公式为

$$R = rr^* = \frac{(\eta_0 - \eta_2)^2 \cos^2 \delta_1 + (\eta_0 \eta_2 / \eta_1 - \eta_1)^2 \sin^2 \delta_1}{(\eta_0 + \eta_2)^2 \cos^2 \delta_1 + (\eta_0 \eta_2 / \eta_1 + \eta_1)^2 \sin^2 \delta_1}. \quad (5)$$

通过式(1)~式(5), 可以通过理论计算可得到所提出的三层结构的反射率, 从而进一步得到该结构的吸收率。根据上面的分析, 选择法珀共振的 1 级模式重点研究该结构的完美吸收特性。利用上面介绍的传输矩阵算法, 计算了该结构的反射率, 并且通过 $A=1-R$ 来得到该结构的吸收特性。计算了中间层厚度 d_2 分别为 85 nm、105 nm、125 nm、155 nm、175 nm 的情况, 此时顶层金膜厚度固定为 30 nm 不变, 计算得到的反射率和吸收率如图 6 所示, 可见, 在可见光波段内实现了可调谐的窄带完美吸收。同时还用传输矩阵方法计算了不同中间层厚度时其发生共振的波长, 与之前研究的利用 FDTD 算法计算的相同中间层厚度的共振波长对比结果如表 2 所示。可以看出, 两种不同算法的计算结果基本一致, 这也进一步证明了本文计算的准确性。

为了进一步研究所提出的三层结构形成完美吸收的物理机制, 利用 FDTD 算法研究了在共振波长 543 nm 处以及非共振波长 680 nm 处, 该结构电场的具体分布情况, 如图 7 (彩图见期刊电子版) 所示。选取的三层薄膜厚度分别为 30 nm、125 nm、100 nm。正如图 7 所示, 对于非共振波长 680 nm, 电场在超薄金膜上面以及中间层二氧

化硅腔层内有一些增强,但是效果不明显;而对于共振波长 543 nm,从图中可以看到电场主要集中在中间层氧化硅腔层内。这是激发了法珀共振的结果,电场最大可以被增强 4 倍。为了进一步研究电场增强和完美吸收的关系,利用 FDTD 算法模拟了发生共振时,三层结构中每一层的吸收分布情况,具体仿真结果如图 8 所示。可以看出,入射光主要被顶层超薄金薄膜吸收,同时底层金薄膜也吸收了一部分,具体为顶层金薄膜吸收了 65.32% 的入射光,而底层金薄膜吸收了大约 33.98% 的入射光,还有大约不到百分之一的光反射了,没有被吸收。

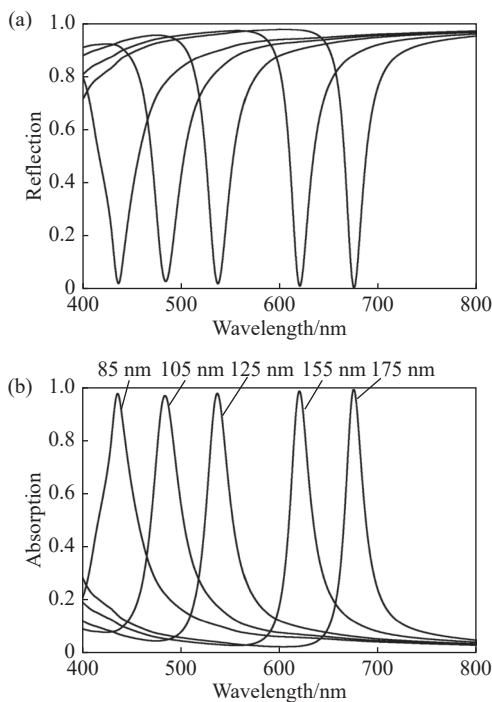


图 6 模拟仿真三层 MDM 结构的 (a) 反射率与 (b) 吸收率, 中间层厚度 d_2 分别为 85 nm、105 nm、125 nm、155 nm、175 nm

Fig. 6 (a) Reflection and (b) absorption spectra of MDM structure simulated by FDTD method with various SiO₂ thicknesses of 85 nm, 105 nm, 125 nm, 155 nm, 175 nm, respectively

在金属结构中一般都存在欧姆损耗,这种损耗可以直接通过以下公式计算得出^[26]:

$$q = \frac{1}{2} \epsilon_0 w \text{Im}\epsilon(w) |E|^2, \quad (6)$$

式中, w 是入射光圆频率, $\text{Im}\epsilon(w)$ 表示材料的介电常数的虚部, $|E|^2$ 表示结构中的电场分布。由式 (6) 可以看出, 损耗能量可以直接通过工作波长、材料介电常数和电场分布直接计算得出。计算结果如图 9 (彩图见期刊电子版) 所示, 发生共振时

吸收主要集中在金薄膜中, 并且比非共振波长要强许多, 这与 FDTD 模拟仿真的结果一致。

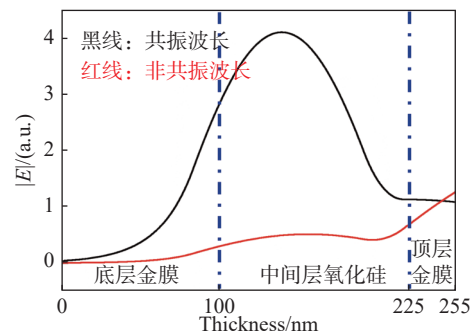


图 7 共振波长与非共振波长处腔层内电场分布仿真结果, 此时三层薄膜厚度依次为 100 nm、125 nm、30 nm

Fig. 7 Simulated electric field distributions in the cavity at the non-resonant and resonant wavelengths, with various three-layer thicknesses of 100 nm, 125 nm and 30 nm

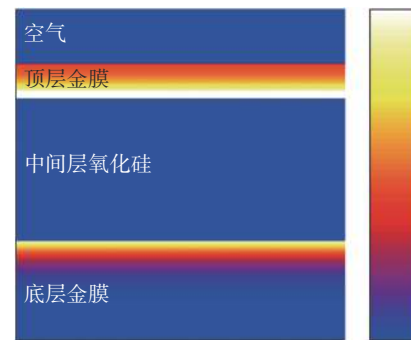


图 8 当中间层厚度为 125 nm, 共振波长 543 nm 处的吸收分布模拟结果

Fig. 8 Simulated absorption distribution at the resonance wavelength of 543 nm with an intermediate layer of 125 nm

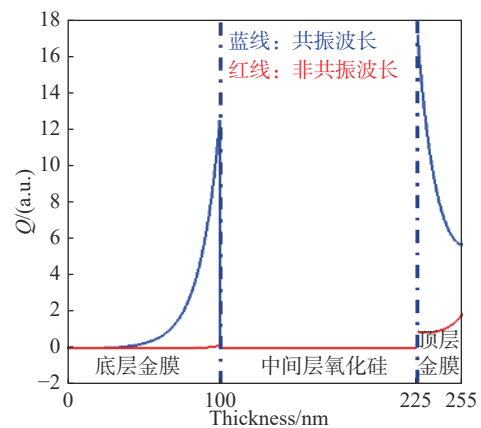


图 9 计算出的共振以及非共振波长处的欧姆损耗, 此时膜层厚度依次为 100 nm、125 nm、30 nm

Fig. 9 The calculated total Ohmic loss at the non-resonant and resonant wavelength when the three layers thicknesses are 100 nm, 125 nm and 30 nm, respectively

3 MDM 薄膜的制备工艺及实验结果

3.1 三层 MDM 薄膜的制备工艺

本文采用磁控溅射方式制备三层薄膜结构。磁控溅射具有成膜致密、速度快等优势,而被广泛应用。使用的设备是中国科学院沈阳科学仪器股份有限公司生产的 SKY-450 型磁控溅射镀膜机。金薄膜和二氧化硅薄膜分别通过直流和射频的溅射方式交替沉积在玻璃基底上。金薄膜和二氧化硅薄膜的沉积速率分别是 0.4 nm/s 和 0.2 nm/s。具体沉积工艺如表 1 所示。

表 1 镀制 Au 和 SiO₂ 薄膜的工艺参数

Tab. 1 Process parameters for Au and SiO₂ thin films

	溅射功率	氩气	氧气	成膜速率	真空度
Au	100 W	80 sccm	0	0.4 nm/s	1.1 Pa
SiO ₂	120 W	80 sccm	15 sccm	0.2 nm/s	1.1 Pa

3.2 三层 MDM 薄膜的实验结果

经过薄膜沉积,制备了一个三层薄膜结构,其中,底层为 100 nm 厚的金膜,中间层为 580 nm 厚的二氧化硅,顶层为 30 nm 厚的超薄金膜样片,反射率由分光光度计(Perkin Elmer Lamda 900)测量得到,吸收光谱由 $A=1-R$ 计算得到,如图 10(彩图见期刊电子版)所示。可以看到,该结构形成了 3 个吸收峰,分别位于 485 nm、639 nm、943 nm 处,其分别对应于法珀共振的 2、3、4 级,实际测得的曲线与 FDTD 算法的模拟仿真结果基本符合。

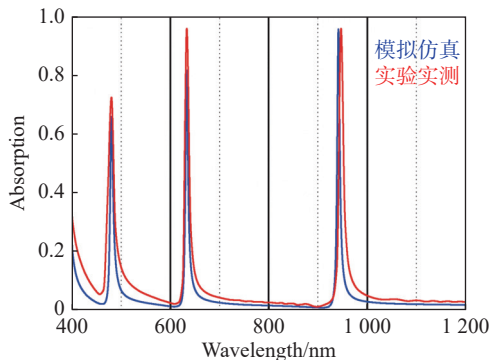


图 10 当中间层氧化硅厚度为 580 nm 时,模拟仿真和实验测得的吸收曲线对比结果

Fig. 10 Comparison of simulated and experimentally measured absorption curves with an intermediate silicon oxide layer thickness of 580 nm

除此之外,还用磁控溅射的沉积方式制备了中间层厚度分别为 85 nm、105 nm、125 nm、155 nm、175 nm 的 5 个样片,其测量反射率以及计算得到的吸收光谱如图 11(彩图见期刊电子版)所示(从左到右中间层厚度依次为 85、105、125、155、175 nm)。由图 11 可得到 5 个窄带完美吸收光谱,最高吸收率可达 99.51%,半波宽集中在 21~55 nm,具体的实验测量与 FDTD 模拟仿真对比结果如表 2 所示。可见两者具有较好的一致性。同时,吸收峰半波宽度从长波到短波逐渐增大,从 21 nm 逐步增大到 55 nm。这是由于金材料对短波长的光吸收比对长波的要大,进一步导致吸收带宽增大。表 2 以及图 10 中的理论仿真与实验结果存在一些偏差。结果偏差主要来源于两个方面:一是在模拟仿真中所用材料的光学常数来自于 Palik 模型,其数值与磁控溅射镀制出来的金和二氧化硅薄膜的光学常数值略有不同;二是在薄膜沉积过程中,很难精确控制膜厚使其与模拟仿真中的膜厚相同,会存在一定机器误差。所以模拟仿真与实际测试的结果略有不同,但整体依然符合较好。

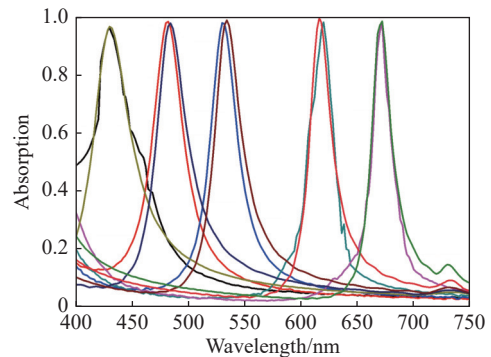


图 11 5 种样片吸收光谱的模拟仿真与实测结果对比

Fig. 11 Comparison of the simulated and experimentally measured absorption spectra of the five samples

表 2 FDTD 模拟仿真、传输矩阵算法计算结果以及实验测试结果对比

Tab. 2 Comparison of FDTD simulation, transmission matrix algorithm calculation results, and experimental test results

d_2 (nm)	仿真结果		理论计算		测试结果		半波宽 (nm)
	共振 波长(nm)	最高 吸收	共振 波长(nm)	最高 吸收	共振 波长(nm)	最高 吸收	
85	435	0.9710	438	0.9817	437	0.9831	55
105	485	0.9799	486	0.9755	483	0.9822	31
125	546	0.9872	541	0.9865	540	0.9951	27
155	620	0.9942	622	0.9910	625	0.9843	22
175	669	0.9959	674	0.9976	672	0.9857	21

4 结 论

本文提出了一种三层 MDM 结构, 实现了可见光以及近红外波段的窄带完美吸收。利用传输矩阵算法以及 FDTD 算法分别研究了中间层二氧化硅厚度以及顶层超薄金薄膜厚度变化对整体

吸收的影响, 并且进行了详细的讨论分析, 明确了该结构中存在的法珀共振模式以及形成完美吸收的物理机制。这种三层薄膜结构制作工艺简单, 实验上可以获得 99.51% 的吸收, 半波宽度最窄可达 21 nm。这种三层的 MDM 结构在光学领域有着广阔的应用空间。

参考文献:

- [1] WATTS C M, LIU X L, PADILLA W J. Metamaterial electromagnetic wave absorbers[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(23): OP98-OP120.
- [2] YONG ZH D, ZHANG S L, GONG CH SH, *et al.*. Narrow band perfect absorber for maximum localized magnetic and electric field enhancement and sensing applications[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24063.
- [3] TYSON J J, SCHEUL T E, RAHMAN T, *et al.*. Characterising the broadband, wide-angle reflectance properties of black silicon surfaces for photovoltaic applications[J]. *Optics Express*, 2023, 31(17): 28295-28307.
- [4] AZAD A K, KORT-KAMP W J M, SÝKORA M, *et al.*. Metasurface broadband solar absorber[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20347.
- [5] NAGARAJAN A, VIVEK K, SHAH M, *et al.*. A broadband plasmonic metasurface superabsorber at optical frequencies: analytical design framework and demonstration[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(16): 1800253.
- [6] LI W, VALENTINE J. Metamaterial perfect absorber based hot electron photodetection[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(6): 3510-3514.
- [7] DING H, WU SH L, ZHANG CH, *et al.*. Tunable infrared hot-electron photodetection by exciting gap-mode plasmons with wafer-scale gold nanohole arrays[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 6511-6520.
- [8] DANA B D, JI B Y, LIN J Q, *et al.*. Hybrid plasmonic modes for enhanced refractive index sensing[J]. *Advanced Sensor Research*, 2023, doi: 10.1002/adsr.202300066.
- [9] BALLEW C, ROBERTS G, FARAON A. Multi-dimensional wavefront sensing using volumetric meta-optics[J]. *Optics Express*, 2023, 31(18): 28658-28669.
- [10] PARK B, YUN S H, CHO C Y, *et al.*. Surface plasmon excitation in semitransparent inverted polymer photovoltaic devices and their applications as label-free optical sensors[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(12): e222.
- [11] LU X Y, ZHANG T Y, WAN R G, *et al.*. Numerical investigation of narrowband infrared absorber and sensor based on dielectric-metal metasurface[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10179-10187.
- [12] ZHANG L J, LU W K, ZHU L P, *et al.*. Dual-band complementary metamaterial perfect absorber for multispectral molecular sensing[J]. *Optics Express*, 2023, 31(19): 31024-31038.
- [13] 张志东, 张慧男, 梁洁, 等. 基于 Au 纳米平行双棒超表面阵列的双 Fano 共振和折射率传感器特性研究[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(4): 961-971.
ZHANG ZH D, ZHANG H N, LIANG J, *et al.*. Double Fano resonance and refractive index sensors based on parallel-arranged Au nanorod dimer metasurface arrays[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 961-971. (in Chinese).
- [14] 刘强, 赵锦, 孙宇丹, 等. 基于表面等离子体共振的光子准晶体光纤甲烷氢气传感器[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(1): 174-183.
LIU Q, ZHAO J, SUN Y D, *et al.*. A novel methane and hydrogen sensor with surface plasmon resonance-based photonic quasi-crystal fiber[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 174-183. (in Chinese).
- [15] 李爱武, 单天奇, 国旗, 等. 光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器研究进展[J]. *中国光学(中英文)*, 2022, 15(4): 609-624.
LI A W, SHAN T Q, GUO Q, *et al.*. Research progress of optical fiber Fabry-Perot interferometer high temperature sensors[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 609-624. (in Chinese).
- [16] COSTANTINI D, LEFEBVRE A, COUTROT A L, *et al.*. Plasmonic metasurface for directional and frequency-selective thermal emission[J]. *Physical Review Applied*, 2015, 4(1): 014023.

- [17] LIU X L, TYLER T, STARR T, *et al.*. Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(4): 045901.
- [18] AMELING R, DREGELY D, GIESSEN H. Strong coupling of localized and surface plasmons to microcavity modes[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(12): 2218-2220.
- [19] YU L, LIANG Y ZH, GAO H X, *et al.*. Multi-resonant absorptions in asymmetric step-shaped plasmonic metamaterials for versatile sensing application scenarios[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 2006-2017.
- [20] QIN ZH, SHI X Y, YANG F M, *et al.*. Multi-mode plasmonic resonance broadband LWIR metamaterial absorber based on lossy metal ring[J]. *Optics Express*, 2022, 30(1): 473-483.
- [21] HU X L, SUN L B, ZENG B B, *et al.*. Polarization-independent plasmonic subtractive color filtering in ultrathin Ag nanodisks with high transmission[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(1): 148-152.
- [22] RAKHSHANI M R, RASHKI M. Metamaterial perfect absorber using elliptical nanoparticles in a multilayer metasurface structure with polarization independence[J]. *Optics Express*, 2022, 30(7): 10387-10399.
- [23] DING T, SIGLE D, ZHANG L W, *et al.*. Controllable tuning plasmonic coupling with nanoscale oxidation[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(6): 6110-6118.
- [24] 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.
- [25] PALIK E D. *Handbook of Optical Constants of Solids*[M]. Orlando: Academic Press, 1998.
- [26] HAO J M, ZHOU L, QIU M. Nearly total absorption of light and heat generation by plasmonic metamaterials[J]. *Physical Review B*, 2011, 83(16): 165107.

作者简介:



王晓坤(1980—),女,吉林靖宇人,博士,副教授,2003年于长春大学获得学士学位,2009年、2016年于长春理工大学分别获得硕士、博士学位,现就职于空军航空大学,主要从事军事装备保障等方面的研究。E-mail: wzk_90046@163.com



李周(1989—),男,山东临沂人,博士,2018年于中国科学院大学获得博士学位,现工作于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,主要从事红外辐射特性测量系统的定标和非均匀性校正方法方面的研究。E-mail: 15500027661@163.com