

doi: 10.3788/gzxb20174608.0823005

# 金属-电介质微盘阵列红外吸收器的光学特性分析

魏东, 张贵忠, 丁欣, 姚建铨

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘 要:** 根据亚波长微结构的异常光谱特性, 提出了一种“圆形铝盘-圆形 SiO<sub>2</sub> 盘-铝衬底”的二维周期性微结构可调谐红外吸波器, 利用有限元算法对其红外光谱反射性质进行了数值模拟, 发现该结构对入射的 TE 或 TM 光偏振态、在 0°~60° 大入射角范围内具有良好的吸波效果, 共振波长调谐范围 4~11 μm. 用局域等离子体激元共振理论解释了红外吸波机理, 证明了所提出的多层微盘结构具有更宽的调谐特性和更好的吸收效率.

**关键词:** 耦合等离子激元; 超材料; 吸收器; 红外; 有限元算法; 反射率

中图分类号: O43

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)08-0823005-7

## Analysis of Optical Properties of Metal - Dielectric Microplate Array Infrared Absorber

WEI Dong, ZHANG Gui-zhong, DING Xin, YAO Jian-quan

(Key Lab of Optoelectronic Information Technology of the Ministry of Education, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

**Abstract:** A reflective-type infrared filter is proposed based on a two-dimensional periodic micro-structure of circular aluminum disc-circular silica disc-aluminum substrate. Its infrared spectral reflectance is numerically simulated by finite element method. The simulated results show that this micro-structure exhibits excellent spectral filtering over 4~11 μm spectral range which is tunable, insensitive to TE or TM polarization and incident angles over 0 to 60°. The extraordinary infrared reflectance is deciphered with the plasmon polariton resonance theory, upon which a multilayered nanoring structure is proposed for further tuning to longer wavelengths and better absorption efficiency.

**Key words:** Coupled plasmon polariton; Metamaterials; Absorber; Infrared; Finite element method; Reflectivity

**OCIS Codes:** 230.4000; 240.6680; 300.1030; 310.6628; 040.3060

## 0 引言

Ebbesen 等在 1998 年发现, 当光通过金属薄膜上的亚波长小孔阵列时, 会在某些特定波长处发生异常透射, 透射率比经典理论值高 2 到 3 个数量级<sup>[1]</sup>. 1996 年 Möller 等在 3 μm 厚的镍金属薄膜上制作了二维周期性十字形孔阵列, 周期在 10~20 μm, 发现当波长在 20~25 μm 时, 光的最高吸收效率超过 80%<sup>[2]</sup>; 2008 年, 宾夕法尼亚州立大学的 Tang 等设计了一种纳米金属薄膜的双周期阵列结构, 发现在 3~5 μm 之间的最小光反射率小于 1.5 dB<sup>[3]</sup>; 2012 年, 国立台湾大学 Mohammed Nadhim Abbas 设计了一种椭圆银薄片的周期性结构, 发现中红外光 0~15° 入射可取得良好滤波效果<sup>[4]</sup>; 2013 年, 韩国的 Tuong 等设计了一种双金属圆环周期阵列结构, 数值模拟证明该结构具有双频带的滤波特性<sup>[5]</sup>. 国内外众多学者在微纳结构设计<sup>[6-8]</sup>、材料选取<sup>[9-11]</sup>以及光学特性研究<sup>[12-14]</sup>等方面取得了极大成就. 然而上述研究的周期性结构或者结构复杂, 不能较

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 11674243, 11674242), 中央高校基本科研业务费专项基金(No. 3122016D029)资助

第一作者: 魏东(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超材料仿真. Email: weid\_1992@tju.edu.cn

导师(通讯作者): 张贵忠(1963-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为强光与分子相互作用、激光和光电子技术. Email: johngzhang@tju.edu.cn

收稿日期: 2017-03-16; 录用日期: 2017-05-08

<http://www.photon.ac.cn>

为方便地调控参数;或者入射角度的调控范围小,限制了其实际应用。

本文针对传统红外滤波器吸波效率偏低,调谐范围偏小,偏振敏感等问题,设计了一种结构简洁、材料普通、易大规模生产的圆形铝圆盘-SiO<sub>2</sub>圆盘-金属铝衬底周期性微结构.数值模拟计算了该结构的红外反射特性,发现在TE和TM偏振光入射条件下,在0~60°的宽入射角度范围内该结构有优良光谱滤波特性,吸收波长可在4~11 μm范围内通过改变结构而调谐.运用局域等离激元理论研究了其红外滤波的物理机理,设计了多层结构Al-SiO<sub>2</sub>纳米圆盘,吸收效率最高时接近100%,并可以拓展波长调谐范围.该结构的红外吸波器在生物传感<sup>[15]</sup>、热光伏发电<sup>[16]</sup>、红外探测<sup>[17]</sup>、红外热图像处理等领域具有潜在的应用价值。

## 1 微盘阵列结构及数值模拟

圆形金属微盘与等大小的电介质微盘上下排列,呈二维周期性排列在金属基底上.出于经济和实用性考虑,选取金属铝作为该结构的金属材料(其他金属亦可),电介质SiO<sub>2</sub>微圆盘作为调节层.如图1所示, $a$ 为圆形微盘的直径, $d$ 为圆形微盘边到重复单元边界的距离, $p$ 表示重复单元的长度,有 $a+2d=p$ .顶部的金属铝微盘与SiO<sub>2</sub>微盘的厚度分别用 $t_1$ 和 $t_2$ 表示。

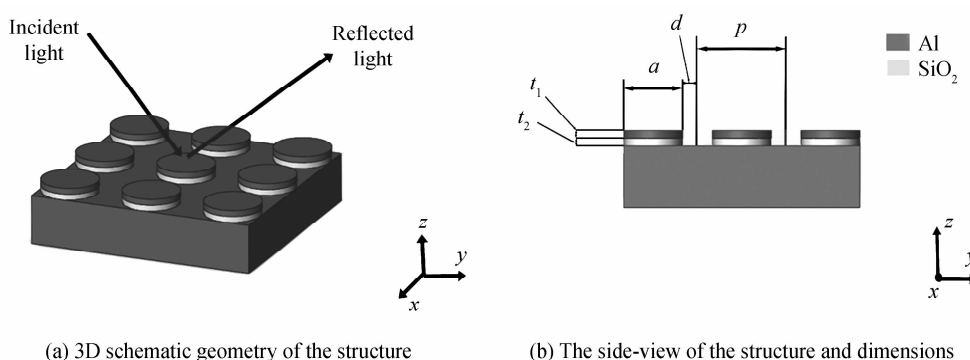


图1 “圆形铝盘-圆形SiO<sub>2</sub>盘-铝衬底”微结构阵列模型

Fig. 1 The micro-structure of “circular aluminum disc/circular silica disc/aluminum substrate”

图2为一个结构单元数值模拟计算原理. TE或TM偏振光以入射角 $\theta$ 入射.由于设计的二维周期性结构呈轴对称,因此方位角 $\phi$ 可以取为0°,入射角的取值范围为0°~60°.SiO<sub>2</sub>的折射率 $n=1.5$ ,金属铝在1~12 μm范围内的折射率数据来自文献[18].计算中,在由“圆形铝盘-圆形SiO<sub>2</sub>盘-铝衬底”构成的重复结构单元上方,采用空气层作为上边界.在该重复单元的四个侧面加入周期性边界条件.由于所设计的金属铝衬底的厚度远大于红外区域的趋肤深度,光不能透过铝衬底,故设透射率为0,作为该重复单元下表面的边界条件.入射的红外波满足反射定律以反射角 $\theta$ 出射.基于有限元算法,采用数值模拟软件COMSOL Multiphysics的波动光学模块对该结构进行了模拟计算,入射电磁波激励下提取了S参数, $S_{11}$ 为反射参数.以红外平面波入射,红外光的光反射率为

$$R = |S_{11}|^2 = |E_R|^2 / |E_0|^2 \quad (1)$$

大量数值模拟计算结果表明,当铝衬底的厚度超过一定值(0.1 μm)时,该微结构的红外光谱反射特性保持不变.通过改变计算网格的尺寸大小,验证了计算结果的重复性和收敛性。

## 2 模拟计算结果及机理讨论

### 2.1 共振波长调谐

在数值模拟过程中,采用的入射角范围是0°~60°.图3为TE偏振波以入射角 $\theta=10^\circ$ 入射时的结果.金属铝微盘厚度 $t_1=0.15 \mu\text{m}$ ,SiO<sub>2</sub>微盘的厚度 $t_2=0.15 \mu\text{m}$ ,间隔 $d=1.06 \mu\text{m}$ .微盘直径 $a$ 则选取四个不同

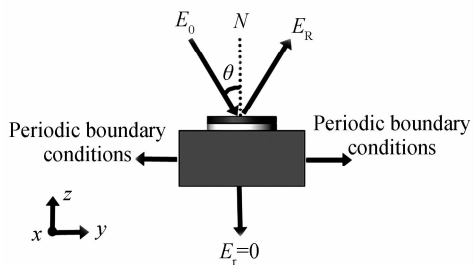


图2 数值模拟计算的原理示意图

Fig. 2 Schematic illustration for the numerical simulation

的数值(1.7  $\mu\text{m}$ , 2.3  $\mu\text{m}$ , 2.9  $\mu\text{m}$ , 3.6  $\mu\text{m}$ ), 计算获得的四个红外反射率曲线如图 3 所示. 定义吸收峰(反射率谷)的波长值为  $\lambda_0$ ; 吸收峰的半高全宽为  $\Delta\lambda$ ; 吸收峰处的(最小)反射率为  $R_{\min}$ . 模拟计算结果见表 1. 由图 3 发现, 随着微盘直径  $a$  的增大, 吸收峰的位置明显向着长波长方向单调移动. 1996 年 Möller 研究了镍金属薄膜上由十字形孔构成的周期阵列微结构, 实验测量了光学透射率, 得到了类似模拟结果的透射峰的光谱特性<sup>[2]</sup>; 2011 年 Zhang 将四个椭圆金薄片呈十字形组合, 该微结构单元周期排列组成二维阵列, 实验测量了光学反射特性, 观察到了双吸收峰的光谱特性<sup>[19]</sup>; 2012 年 Mohammed Nadhim Abbas 在  $\text{SiO}_2$  衬底上, 制作了椭圆银薄片的周期性微结构, 光学反射率的测量发现了光谱特性也有吸收峰结构, 而且与他们的数值模拟结果相吻合<sup>[4]</sup>. 上述研究表明, 理论数值模拟结果得到了实验印证, 模拟结果正确.

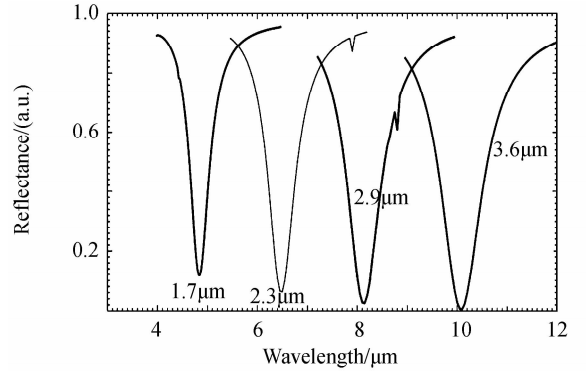


图 3 不同微盘直径  $a$  时的光谱反射率曲线  
Fig. 3 The simulated spectral reflectance for different disc diameters  $a$

表 1  $\lambda_0, \Delta\lambda, R_{\min}$  随  $a$  的变化

Table 1 Variations of  $\lambda_0, \Delta\lambda$  and  $R_{\min}$  with  $a$

$a/\mu\text{m}$	1.7	2.3	2.9	3.6
$\lambda_0/\mu\text{m}$	4.8	6.5	8.1	10.1
$\Delta\lambda/\mu\text{m}$	0.41	0.62	0.80	1.0
$R_{\min}$	0.12	0.07	0.03	0.01

## 2.2 高吸波率

保持 TE 偏振波以入射角  $\theta=10^\circ$  入射, 取微盘直径  $a=1.8 \mu\text{m}$ , 间隔  $d=1.06 \mu\text{m}$ , 金属铝微盘厚度  $t_1=150 \text{ nm}$ .  $\text{SiO}_2$  微盘的厚度  $t_2$  则选取四个不同的数值(0.10  $\mu\text{m}$ , 0.14  $\mu\text{m}$ , 0.18  $\mu\text{m}$ , 0.22  $\mu\text{m}$ ). 模拟计算得到的波长值  $\lambda_0$ 、半高全宽  $\Delta\lambda$ 、吸收峰处的反射率  $R_{\min}$  如表 2 所示. 可以看到, 作为隔层的  $\text{SiO}_2$  微盘越薄, 吸收峰处的最小反射率就越小, 吸波效果越明显.

表 2  $\lambda_0, \Delta\lambda, R_{\min}$  随  $t_2$  的变化

Table 2 Variations of  $\lambda_0, \Delta\lambda$  and  $R_{\min}$  with  $t_2$

$t_2/\mu\text{m}$	0.1	0.14	0.18	0.22
$\lambda_0/\mu\text{m}$	5.3	5.2	5.1	5.1
$\Delta\lambda/\mu\text{m}$	0.47	0.49	0.44	0.40
$R_{\min}$	0.05	0.03	0.10	0.25

仍保持 TE 偏振波以入射角  $\theta=10^\circ$  入射, 微盘直径  $a=1.8 \mu\text{m}$ , 间隔  $d=1.06 \mu\text{m}$ ,  $\text{SiO}_2$  微盘的厚度  $t_2=0.15 \mu\text{m}$ . 铝微盘的厚度  $t_1$  则选取三个不同的数值(0.10  $\mu\text{m}$ , 0.12  $\mu\text{m}$ , 0.14  $\mu\text{m}$ ). 数值计算得到的吸收峰的波长值  $\lambda_0$ 、半高全宽  $\Delta\lambda$ 、吸收峰处的反射率  $R_{\min}$  如表 3 所示. 可以看出, 在一定范围内, 金属铝微盘的厚度对吸收峰的位置、带宽、吸收率影响不大.

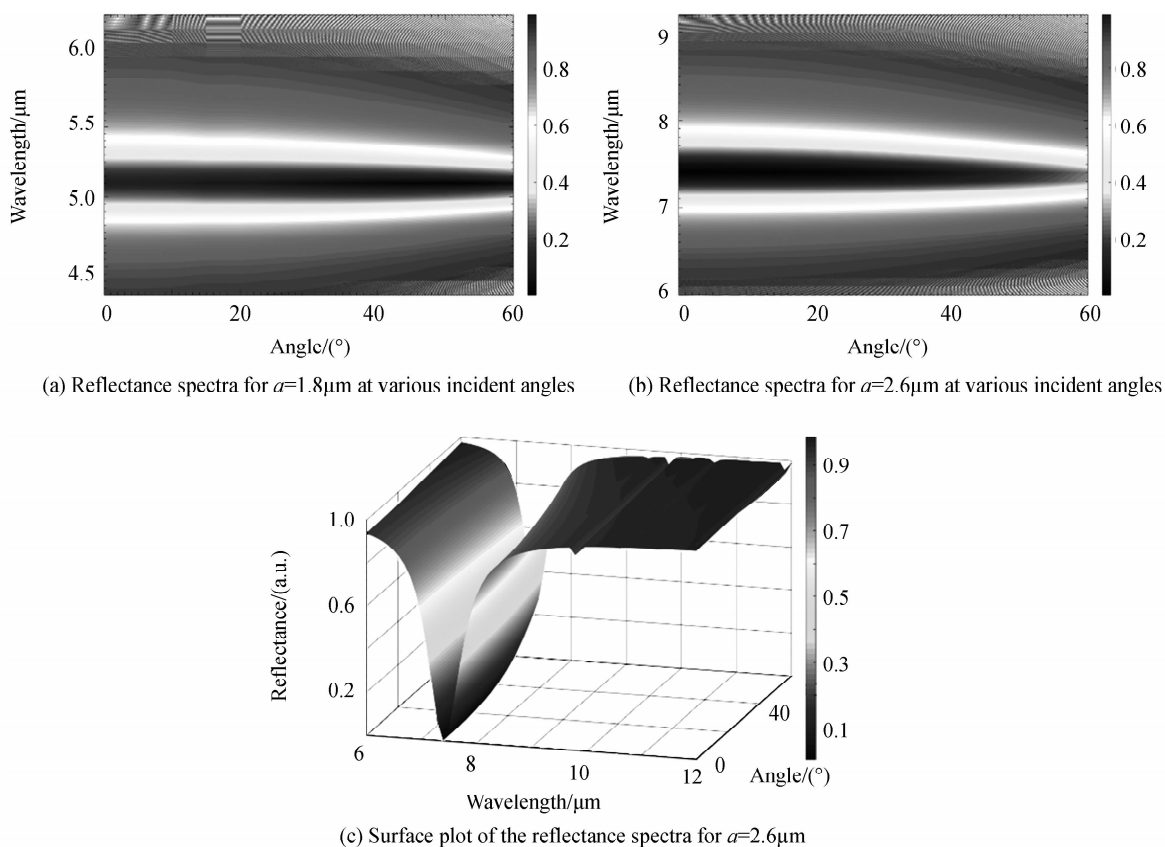
表 3  $\lambda_0, \Delta\lambda, R_{\min}$  随  $t_1$  的变化

Table 3 Variations of  $\lambda_0, \Delta\lambda$  and  $R_{\min}$  with  $t_1$

$t_1/\mu\text{m}$	0.1	0.12	0.14
$\lambda_0/\mu\text{m}$	5.1	5.1	5.1
$\Delta\lambda/\mu\text{m}$	0.44	0.46	0.43
$R_{\min}$	0.05	0.03	0.10

## 2.3 宽入射角范围

以 TE 偏振波入射, 间隔  $d=1.06 \mu\text{m}$ , 金属铝微盘的厚度  $t_1=0.15 \mu\text{m}$ ,  $\text{SiO}_2$  微盘的厚度  $t_2=0.15 \mu\text{m}$ . 微盘直径  $a$  选取两个不同的数值(1.8  $\mu\text{m}$ , 2.6  $\mu\text{m}$ ). 改变入射角度  $\theta$ , 模拟计算出的光谱反射率如图 4 所示. 由图 4 不难看出, 两种结构(不同微盘直径  $a$ ) 对于以  $0^\circ \sim 60^\circ$  入射的红外光波其反射特征一样: 即在  $0^\circ \sim 60^\circ$  的宽入射角范围内, 反射率曲线几乎不变. 只是当入射角大于约  $40^\circ$  时, 吸收峰的宽度有所更窄.

图4 不同入射角度时不同微盘直径  $a$  对应的光谱反射率Fig. 4 Contour plots of the reflectance spectra for different disc diameters  $a$  at various incident angles

## 2.4 偏振不敏感

选取吸收谱峰位于  $7.4\mu\text{m}$  时的结构参数数据,分析该微结构的红外光谱反射特性的偏振不敏感性. 红外光以  $\theta=5^\circ$  度入射,只改变入射平面波的偏振状态,即由 TE 波改为 TM 波,进行反射谱的模拟计算. 将计算结果与入射波为 TE 模式时的反射谱进行比较,见图 5. 可以明显看出,对不同的入射偏振态,该吸波器的吸波效果几乎没有变化.

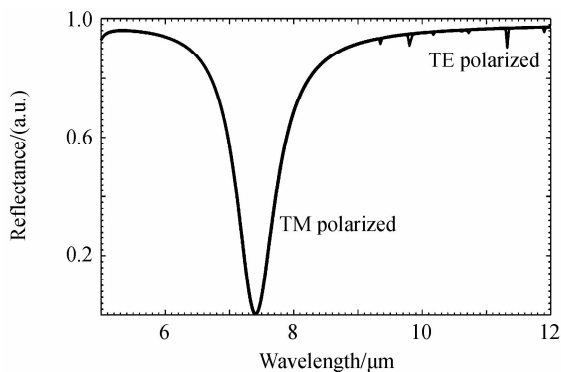


图5 TE 与 TM 偏振波入射条件下的光谱反射率曲线

Fig. 5 The spectral reflectance curves for TE and TM polarizations

## 2.5 耦合等离子激元机理

为了研究该微盘结构阵列吸波器的不同微盘直径诱导不同波长红外吸收的物理机制,计算了在不同波长 TE 偏振波入射时,一个金属-电介质微盘单元结构的磁场的空间分布,因为磁场的偏振方向为  $y$  方向,所以取沿微盘  $y$  直径方向的  $xz$  磁场截面图,如图 6 所示. 微结构参数同于图 3,取  $a$  为  $3.6\mu\text{m}$  时的磁场分布图. 选取两个波长位置分别为:  $\lambda = 7.5\mu\text{m}$ 、 $\lambda = 10.1\mu\text{m}$ . 从图 6 可以看出,当红外入射波的波长等于最大吸收波长 ( $10.1\mu\text{m}$ ) 时,微结构(主要是  $\text{SiO}_2$  微盘内)内部的场强最大;而当红外入射波的波长偏离最大吸收

波长时(7.5 μm),微结构(主要是 SiO<sub>2</sub> 微盘内)内部的场变弱. 这就是共振吸收的表现. 事实上,共振发生时,入射的红外光在上层的金属铝微盘与等大小的 SiO<sub>2</sub> 隔层微盘界面处激发了等离激元. 由于 SiO<sub>2</sub> 微盘较薄,透过该层的红外光在 SiO<sub>2</sub> 微盘与下层的金属铝衬底之间的界面也激发出了等离激元. 同时激发的上下两个等离激元相耦合,形成耦合等离激元,它产生特定波长的共振吸收,微盘的结构尺寸决定共振吸收的波长值. Barnes<sup>[1]</sup> 提出一个公式,可以估算二维金属小孔阵列的共振波长,即

$$\lambda = p \sqrt{\frac{\epsilon_d |\epsilon_m|}{\epsilon_d + |\epsilon_m|}} \quad (2)$$

式中,  $p$  是小孔阵列的空间周期大小,  $\epsilon_d$  和  $\epsilon_m$  是电介质和金属的介电常数. 从图 6 可以看出,电磁场主要局域于 SiO<sub>2</sub> 微盘内,而相邻微盘(或相邻的重复单元间)之间的电磁场几乎不重叠,所以相邻微盘之间电磁场的耦合作用可以忽略. 因此,对上式中的周期  $p$  修正为微盘的直径  $a$ (见图 1),根据经典振子理论,该直径就大致决定耦合等离激元共振吸收的半波长,即

$$\frac{\lambda_0}{2} = a \sqrt{\frac{\epsilon_d |\epsilon_m|}{\epsilon_d + |\epsilon_m|}} \quad (3)$$

式(3)的物理意义很明显,微盘直径乘以有效折射率就等于光学长度,该光学长度就是电磁振子基模的半波长. 图 7 给出由式(3)画出的曲线. 因为介电常数是波长的函数,所以式(3)右边是波长的函数,在图 7 中作为横坐标;由式(3)估算的波长作为纵坐标,如此画出图 7 中的四条曲线(对应四个直径  $a$  的取值;其他微结构参数同于图 3). 这些曲线与对角线的交点就确定共振波长的数值,圆点表示数值模拟计算出的共振波长数值. 图 7 中还标出了模拟计算得到的共振波长大小,作为比较. 可见,除最大波长 10.1 μm 外,其余波长均符合较好,即由式(3)估算的共振波长和数值模拟得到的波长符合较好,这证实了该微结构红外共振吸收的耦合等离激元机理.

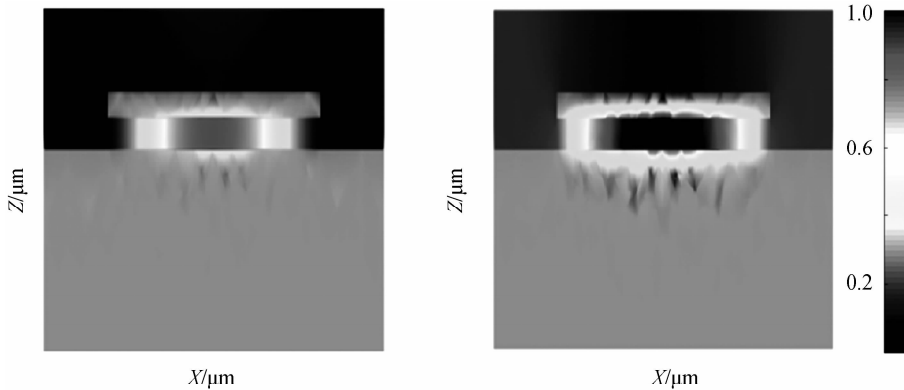


图 6 入射波长为 7.5 μm、10.1 μm 时周期性微结构中的磁场分布对比

Fig. 6 The magnetic field distribution in the micro-structure for incident wavelengths of 7.5 μm, 10.1 μm

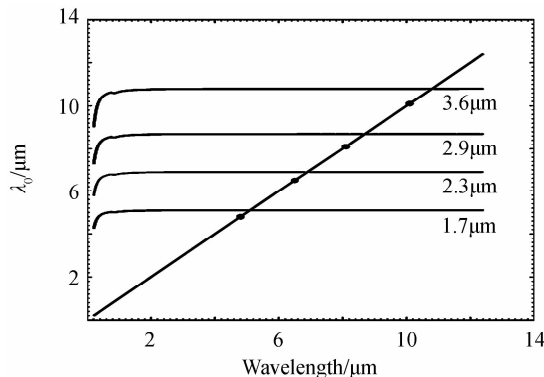


图 7 不同微盘直径时由耦合等离激元机理估算的共振波长曲线

Fig. 7 Resonance wavelength curves estimated from the coupled plasmon polariton theory for different disc diameters  $a$

## 2.6 多层微盘结构与精细调谐

同于图 3 中直径  $a$  为  $2.3 \mu\text{m}$  时的微结构参数,保持铝微盘与  $\text{SiO}_2$  微盘的总厚度为  $t_1 + t_2$  ( $0.15 \mu\text{m} + 0.15 \mu\text{m} = 0.3 \mu\text{m}$ ) 不变,取铝微盘的厚度为  $t_1/2$ ,  $\text{SiO}_2$  微盘的厚度为  $t_2/2$ ,组成 Al-SiO<sub>2</sub>-Al-SiO<sub>2</sub> 的双层微盘结构阵列;再以此类推组成三层微盘结构阵列,则铝微盘的厚度为  $t_1/3$ , $\text{SiO}_2$  微盘的厚度为  $t_2/3$ .图 8 给出了双层微盘结构阵列与三层微盘结构阵列的示意图.数值模拟计算得到的双层微盘结构和三层微盘结构吸波器的红外光反射特性如图 9 所示.可见随着 Al-SiO<sub>2</sub> 微盘层数的增加,尽管铝微盘和  $\text{SiO}_2$  微盘的总厚度未变,但吸波器的吸收峰出现在  $6.5 \mu\text{m}$ , $6.9 \mu\text{m}$ , $7.3 \mu\text{m}$  的波长位置,呈现出向长波长方向移动的趋势,且吸收峰处的吸收率也由 90% 提高到接近 100%.该现象可以用前述的局部耦合等离激元的机理来解释.当共振发生时,入射的红外光在最上层的金属铝微盘与等大小的  $\text{SiO}_2$  隔层微盘界面处激发了等离激元.由于  $\text{SiO}_2$  微盘较薄,透过该层的红外光在  $\text{SiO}_2$  微盘与下一层的金属铝微盘之间的界面也激发出了等离激元,同时激发的上下两个等离激元相耦合,形成耦合等离激元.而这一层红外光又在  $\text{SiO}_2$  微盘与下一层的金属铝衬底激发了等离激元.依此类推,多层微盘阵列结构形成了更多耦合等离激元,它产生的共振吸收效果要好于单层“金属-电介质”微盘阵列.由此可见,多层微盘结构阵列可有效提高红外吸波率.

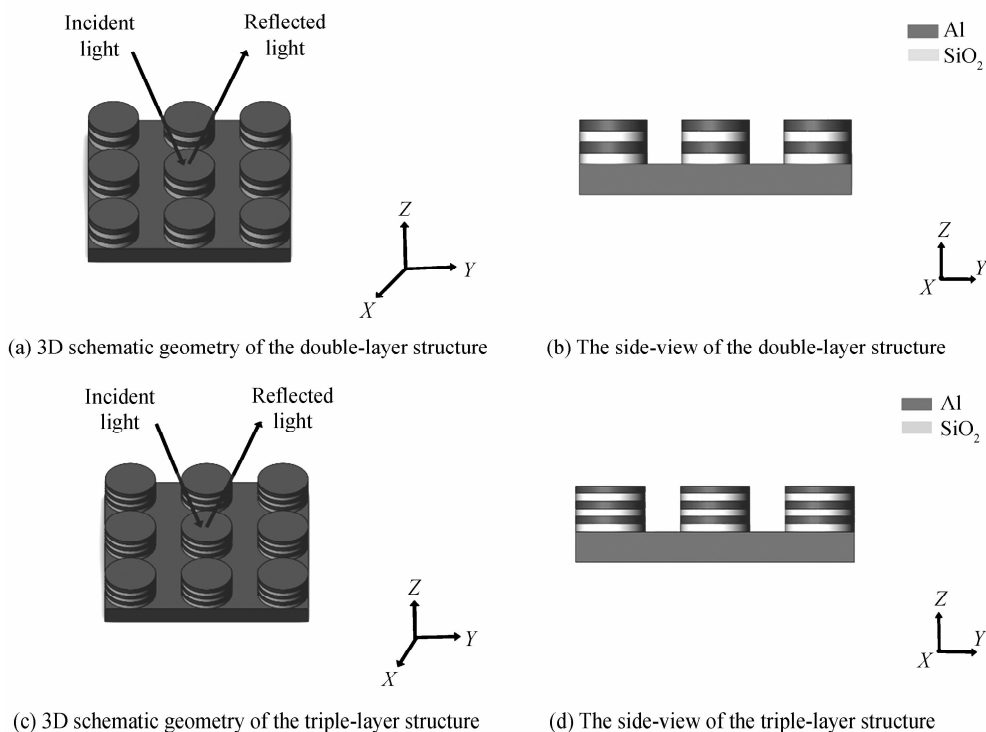


图 8 双层和三层微结构阵列的模型

Fig. 8 The double-layer and the triple-layer micro-structure arrays

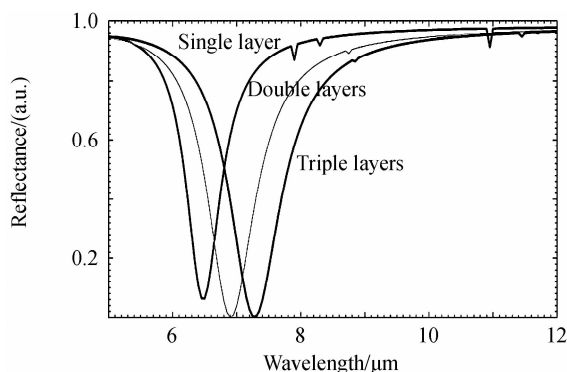


图 9 多层微盘结构的反射率曲线

Fig. 9 The spectral reflectance curves for different multilayered disc structures

### 3 结论

提出了一种基于“圆形铝盘-圆形 SiO<sub>2</sub> 盘-铝衬底”的周期性微结构的可调谐红外吸波器。数值模拟计算发现,在 4 μm 到 11 μm 范围内,该微结构吸波器具有优良的红外吸波特性和偏振特性,对于入射角度(0~60°)和偏振状态(TE 和 TM)不敏感。用耦合等离子体共振机理对该红外吸波特性和偏振特性作了解释,估算的共振波长与数值计算结果符合较好。进一步将该结构从单层变为多层微盘结构时,可实现吸收峰向长波方向的精细调谐,且峰值吸收率接近 100%。该红外吸波器为发展新一代高效的红外吸波材料提供了理论和技术支持,在热光伏发电、红外探测等领域都具有良好的应用前景。

### 参考文献

- [1] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**:824-830.
- [2] MÖLLER K D, WARREN J B, HEANEY J B, *et al.* Cross-shaped bandpass filters for the near-and mid-infrared wavelength regions[J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(31):6210-6215.
- [3] TANG Y, BOSSARD J A, WERNER D H, *et al.* Single-layer metallo dielectric nanostructures as dual-band mid-infrared filters[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(26): 263106.
- [4] ABBAS M N, WEN C C, CHUNG C Y, *et al.* An omni-directional mid-infrared tunable plasmonic polarization filter[J]. *Nanotechnology*, 2012, **23**:444007.
- [5] TUONG P V, PARK J W, RHEE J Y, *et al.* Polarization-insensitive and polarization-controlled dual-band absorption in metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**:081122.
- [6] TIAN Zi-jian, JIANG Bo-fan. Performance analysis of two-dimensional incident left-handed metamaterial based on double trapezoid metal strips[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(1): 0116001.  
田子建, 姜泊帆. 基于双梯形金属条的二维超材料性能分析[J]. *光子学报*, 2017, **46**(1): 0116001.
- [7] FENG R, DING W Q, LIU L H, *et al.* Dual-band infrared perfect absorber based on asymmetric T-shaped plasmonic array[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(s2): A335-A345.
- [8] ZHU Lu, WANG Yang, LIU Yuan-yuan, *et al.* Design of slot yagi-uda nanoantennas and their broadband absorption properties[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(10): 1024002.  
朱路, 王杨, 刘媛媛, 等. 缝隙八木纳米天线设计及宽波段吸收特性[J]. *光子学报*, 2016, **45**(10): 1024002.
- [9] NAKAYAMA K, TANABE K, ATWATER H A. Plasmonic nanoparticle enhanced light absorption in GaAs solar cells [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(12): 121904.
- [10] REN F, LI M, GAO Q, *et al.* Surface-normal plasmonic modulator using sub-wavelength metal grating on electro-optic polymer thin film[J]. *Optics Communications*, 2015, **352**:116-120.
- [11] SOUKOULIS C M, WEGENER M. Optical metamaterials--more bulky and less lossy[J]. *Science*, 2010, **330**(6011): 1633-1634.
- [12] CATCHPOLE K R, POLMAN A. Plasmonic solar cells[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(26):21793-21800.
- [13] LI E W, CHONG X Y, REN F R, *et al.* Broadband on-chip near-infrared spectroscopy based on a plasmonic grating filter array[J], *Optics Letters*, 2016, **41**(9):1913-1916.
- [14] HU Shou-zhong, HOU Shang-lin, LIU Yan-jun, *et al.* Propagation characteristics of Terahertz wave double-cladding photonic crystal fiber[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(7):845-851.  
胡守重, 侯尚林, 刘延军, 等. 双包层太赫兹光子晶体光纤的传输特性[J]. *发光学报*, 2016, **37**(7):845-851.
- [15] LEE M H, HUNTINGTON M D, ZHOU W, *et al.* Programmable soft lithography: solvent-assisted nanoscale embossing[J]. *Nano Letters*, 2011, **11**(2):311-315.
- [16] AYDIN K, FERRY V E, BRIGGS R M, *et al.* Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers[J]. *Nature Communications*, 2011, **2**: 517-524.
- [17] ADATO R, ALTUG H. In-situ ultra-sensitive infrared absorption spectroscopy of biomolecule interactions in real time with plasmonic nanoantennas[J]. *Nature Communications*, 2013, **4**:2154.
- [18] PALIK E D. Handbook of optical constants of solids[J]. *Optics & Laser Technology*, 1986, **18**(2):104-104.
- [19] ZHANG B X, ZHAO Y H, HAO Q Z, *et al.* Polarization-independent dual-band infrared perfect absorber based on a metal-dielectric-metal elliptical nanodisk array[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(16):15221.