

利用高阶表面等离子体共振实现窄带完美吸收

岳嵩¹, 王然¹, 侯茂菁¹, 黄刚², 张紫辰¹

(1. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029;

2. 四川智溢实业有限公司, 四川成都 610041)

摘要: 超材料完美吸波体是一种典型的电磁功能材料, 在包括高效太阳能利用等领域有巨大的应用前景。迄今的工作主要集中在工作波长的可调谐性以及双波段、三波段甚至宽带吸收方面。激光防护等特殊应用要求超材料完美吸波体在指定波长附近拥有窄带吸收性能, 然而这方面的研究当前还比较少。基于铝反射镜-SiO₂ 介质层-铝圆盘的三层结构, 设计并数值模拟研究了一种工作在 1 064 nm 的窄带超材料完美吸波体。通过对比发现, 相比于利用小尺寸结构单元的表面等离子体振荡基模, 利用大尺寸结构单元的表面等离子体振荡高阶模式, 可以在指定波长处得到线宽更窄的完美吸收效果。进一步, 通过对介质层厚度、圆盘直径和晶格周期等主要结构参数进行系统研究, 揭示了各个结构参量对于超材料完美吸波体光学响应的影响规律。在此基础上, 通过对结构参数的优化, 最终得到了透过率为 0、反射率低至 8.56×10^{-5} 、模式线宽约为 55 nm 的高性能、窄带超材料完美吸波体设计。由于该工作中涉及的所有材料均 CMOS 兼容, 同时结构单元的特征尺寸也处于光刻技术易于加工的区间, 因此拥有良好的大规模实际应用前景。

关键词: 超材料; 表面等离子体; 窄带完美吸波体; CMOS 兼容; 偏振不敏感

中图分类号: TN213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190489

Narrow-band perfect absorption utilizing higher-order surface plasmon resonance

Yue Song¹, Wang Ran¹, Hou Maojing¹, Huang Gang², Zhang Zichen¹

(1. Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Sichuan Wisepride Industry Co. Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: Metamaterial perfect absorber is a typical functional electromagnetic material and holds great potential in application fields such as highly efficient utilization of solar energy. Up to date, most works are devoted to the tunability of working wavelength as well as realization of dual-, triple- and even broad-band perfect absorption. However, applications such as laser protection require that the metamaterial perfect absorber can function at specific wavelength with narrow bandwidth, and work devoted to this direction is rather rare. In this work, based on a triple-layer structure made of Al back mirror-SiO₂ spacer-Al disk, a narrow-band metamaterial perfect absorber working at 1 064 nm was proposed and studied by numerical simulations. It was found that, compared to utilizing the fundamental mode of plasmonic resonance of smaller structure unit, utilization of higher-order mode of larger structure unit allowed for a narrower bandwidth of perfect absorption at

收稿日期:2020-02-19; 修订日期:2020-03-18

基金项目:北京市科技新星(Z191100001119058); 国家自然科学基金(61905273, 51505456); 吉林省发展改革委员会项目(2015Y028)

作者简介:岳嵩(1985-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事表面等离子体与介质超表面方面的研究。Email: yuesong@ime.ac.cn

张紫辰(1983-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光微米纳米加工技术方面的研究。Email: zz241@ime.ac.cn

designated wavelength. In addition, through systematic study of the geometric parameters such as the thickness of spacer layer, the diameter of the Al disk and the period of the lattice, the influence of such geometric parameters on the optical response of metamaterial perfect absorber was revealed. Based on these findings and through optimization of geometric parameters, a high performance and narrow-band metamaterial perfect absorber design was obtained with a zero transmittance, a reflectance as low as 8.56×10^{-5} and a bandwidth of about 55 nm. Since all the materials involved are CMOS compatible, and the characteristic dimensions of the structure unit lie within the range of feasible fabrication method such as optical lithography, the metamaterial perfect absorber proposed here holds good promise towards large-scale real-world applications.

Key words: metamaterial; plasmonics; narrow-band perfect absorber; CMOS compatibility; polarization insensitive

0 引言

超材料是通过将人工设计的亚波长“超原子”进行三维有序排布,从而得到新颖电磁性质的一种人工电磁材料^[1]。最早由英国的 John Pendry 等人理论提出基于超材料实现电磁隐身和完美透镜的概念,到 2006 年 Duke 大学的 David Smith 等人率先在微波波段实现了基于超材料的电磁隐身^[2],从而掀起了本世纪电磁超材料研究的热潮。这之后,工作在红外、近红外与可见光波段的电磁超材料被广泛地提出和研究。随着研究的深入,人们发现超材料新颖电磁性质的实现十分依赖于微纳结构的高效制备,而这随着工作波长的缩短将会变得越发地具有挑战性:特别是工作在近红外与可见光波段的三维超材料要求比较困难的、高精度三维微纳结构制备,而这一点给超材料的大规模实际应用带来一定阻碍^[3]。为突破三维超材料的这种困境,哈佛大学的 Yu 和 Capasso 等人于 2011 年提出了电磁超表面的概念,并基于 V 型天线相位梯度超表面实现了广义的反射、折射定律^[4],从而掀起了超表面研究的热潮并延续至今。目前,人们基于超表面已经可以实现诸如平面透镜、光束偏折器、偏振转换器、全息器件等一系列平面光学器件,表明人们对电磁场各自由度的操控能力得到了很大的提升。在诸多平面光学器件中,电磁吸波材料在包括高效太阳能利用在内的很多领域都存在着巨大应用前景,因而受到了研究者的广泛关注,人们也展示了很多工作在不同波段的超材料完美吸波体^[5-9]。然而迄今为止,大部分的研究注意力均投入到对于工作波段的灵活调谐以及实现双波段^[10]、三波段^[11]甚至宽带^[12]的连续吸收上面,而对于激光防护等应用而

言,要求超材料完美吸波体在指定的工作波段拥有尽量窄的线宽,即指定波段的窄带超材料完美吸波体,而这方面的研究目前还是比较少的。同时,从大规模制造和应用的角度考虑,超材料的制造过程中应尽量避免诸如电子束曝光 (EBL) 这种昂贵又缓慢的技术,应尽量满足与当代主流半导体生产工艺的兼容性 (CMOS 兼容)。从这个角度考虑,目前常见的基于贵金属金、银表面等离子体共振的超材料完美吸波体就显得不太合适了。该工作从 CMOS 兼容性、大规模应用的可能性以及指定波段窄带吸收的要求出发,理论设计并数值模拟研究了基于 Al-SiO₂-Al 三层结构的超材料吸波体。通过基本结构单元一系列结构参数的系统研究,揭示了各结构参数对于超材料完美吸波体光学性能的影响规律,发现利用大尺寸结构的高阶模式可以得到比利用小尺寸结构的基模线宽更窄的完美吸收光学响应。在优化各结构参数的基础上,最终得到了在 1 064 nm 波长处工作的窄带、高性能超材料完美吸波体的设计。

1 结构设计

文中提出的超材料完美吸波体结构示意图如图 1(a) 所示。该吸波体由存在于硅衬底上的三层结构构成,从硅衬底开始向上分别是铝背反射镜层 (Al back mirror), 二氧化硅介质隔离层 (SiO₂ spacer layer) 以及铝圆盘微/纳米结构层 (Al micro-/nano-disk)。与常见的基于金、银等贵金属表面等离子体共振的超材料完美吸波体不同,本工作中所涉及的材料 (铝、硅、二氧化硅) 全部都是 CMOS 工艺兼容的材料,因此保留了通过主流半导体晶圆加工厂进行大规模生产及应用的可能性。电磁波从空气侧垂直入射

到超材料完美吸波体表面, 由于最上层的圆盘是各向同性结构, 因此该吸波材料不具备偏振选择性, 可以应用于线偏、圆偏、椭圆以及非偏振光入射的情况, 具有广泛的适用性。图 1(b) 给出了其中一个结构单元的示意图。这里, 由于我们将铝背反射镜的厚度固定为 $t_{\text{Mirror}}=200\text{ nm}$, 这个厚度已远大于 $1\ 064\text{ nm}$ 电磁波在金属铝中的穿透深度 (约 $20\sim 30\text{ nm}$ 量级), 因此可以认为是无穷厚金属反射镜。这样, 电磁场将无法感受到铝背反射镜下方的硅衬底, 因此硅衬底在整个模拟计算的过程中可以不予考虑。在铝背反射镜之上存在着 SiO_2 介质隔离层, 该层从物理上将顶部的铝微/纳米结构层与背反射镜隔开, 同时提供了二者在光学上进行近场耦合的空间及对耦合强度进行调节的可能性。在 SiO_2 介质隔离层的上方存在铝微/纳米结构层, 该工作中选取的结构是直径为 D 、厚度固定为 $t_{\text{Al}}=40\text{ nm}$ 的圆盘。这些铝圆盘以正方形晶格的形式在平面上进行周期性排列, 周期为 P 。介质隔离层的厚度 t_{SiO_2} 、铝圆盘的直径 D 和正方形晶格的周期 P 构成了文中主要研究的结构参量。

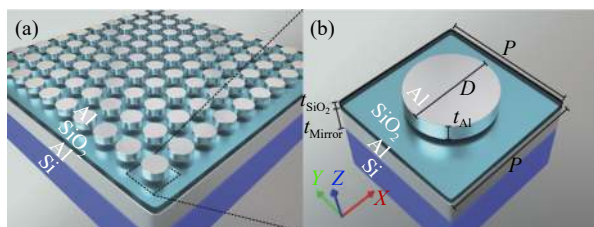


图 1 偏振不敏感窄带超材料完美吸波体的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the polarization-insensitive narrow-band metamaterial perfect absorber

2 结果分析与讨论

2.1 基模与高阶模分析

利用商用有限元数值分析软件 COMSOL Multiphysics 对如图 1(b) 所示的基本结构单元进行数值模拟, 可以得到该结构的光学响应, 模拟过程简述如下: 首先建立如图 1(b) 所示的结构单元几何模型, 四周采用周期性边条件, 上下两端设置为端口; 由于结构本身不具备偏振依赖性, 因此不失一般性地, 可以采用沿 X 方向偏振的线偏振光入射, 波矢沿 $-Z$ 方向; 通过对结构的几何参量 t_{SiO_2} 、 D 和 P 以及入射波长进行参数扫描, 可以得到给定几何尺寸下超材料完

美吸波体的反射谱, 从而分析其光学行为。通过大范围参数扫描, 找到了可以在 $1\ 064\text{ nm}$ 波长附近实现完美吸收的两组典型结构参数, 其对应的反射谱如图 2(a) 所示。这两个典型结构被分别标记为大尺寸结构 (对应绿色曲线) 和小尺寸结构 (对应红色曲线), 对应的结构参数分别为: $P=1\ \mu\text{m}$, $D=0.78\ \mu\text{m}$, $t_{\text{SiO}_2}=50\text{ nm}$ 与 $P=0.5\ \mu\text{m}$, $D=0.23\ \mu\text{m}$, $t_{\text{SiO}_2}=20\text{ nm}$, 结构单元的示意图如图 2(a) 左下角的插图所示。通过观察图 2(a) 中的反射谱, 可以发现这两个典型结构光学响应的不同: 对于小尺寸结构而言, 其在感兴趣的 $600\sim 3\ 400\text{ nm}$ 光谱范围内只存在一个共振模式, 如图 2(a) 中的红色箭头所标记; 与之相应的, 对于大尺寸结构而言, 在所考察的光谱范围内除了 $1\ 064\text{ nm}$ 处的光学模式之外 (标记为 mode-i), 在长波长处 ($\sim 2\ 750\text{ nm}$) 还存在一个明显的光学模式 (标记为 mode-ii)。定义铝圆盘下表面所在平面为 $Z=0$, 在 $Z=-5\text{ nm}$ 处以平行于 XY 平面的方式截取电场强度的剖面图, 同时在 $Y=0$ 处 (圆盘中心) 以平行于 XZ 平面的方式截取电场强度的剖面图, 得到小尺寸结构在 $1\ 064\text{ nm}$ 波长处的电场分布, 分别如图 2(b) 和 (c) 所示。可以看出, 对于小尺寸结构而言, $1\ 064\text{ nm}$ 处的光学模式是一个以铝圆盘中电荷分布满足电偶极子特征的基模。沿 X 方向偏振的入射电场在铝圆盘上激发出局域表面等离子体共振, 使得铝圆盘可以被等效视作一个沿 X 方向的电偶极子。在如图 2(b) 所示的瞬间, 通过电场分布的箭头图可以看出左侧为负电荷、右侧为正电荷, 中央为节点。由于铝背反射镜的存在, 铝圆盘的电偶极子将在金属膜中激发起镜像电荷 (见图 2(c)), 二者通过 SiO_2 介质层发生耦合。通过调节 SiO_2 介质层的厚度, 铝圆盘中的表面等离子体共振和镜像电荷共振之间的耦合强度以及相位差可以得到调节。当介质层厚度合适时, 镜像电荷形成的电偶极子取向与铝圆盘中的电偶极子取向刚好反向 (即反平行, 相位差为 π), 这将在介质隔离层中导致环形电流分布, 从而诱导出一个磁共振模式^[13]。在共振条件下考虑超材料完美吸波体的阻抗, 可以发现其阻抗 $Z \approx 1$, 与自由空间匹配, 从而使得该吸波体的透过率 $\mathcal{T} = 0$, 反射率 $\mathcal{R} = 0$, 从而在该波长下实现完美吸收^[13]。类似地, 截取大尺寸结构对应于 mode-i 和 mode-ii 波长下的电场分布剖面图, 得到结果如图 2(d)、(e)、(f) 和 (g) 所示。从图 2(f)

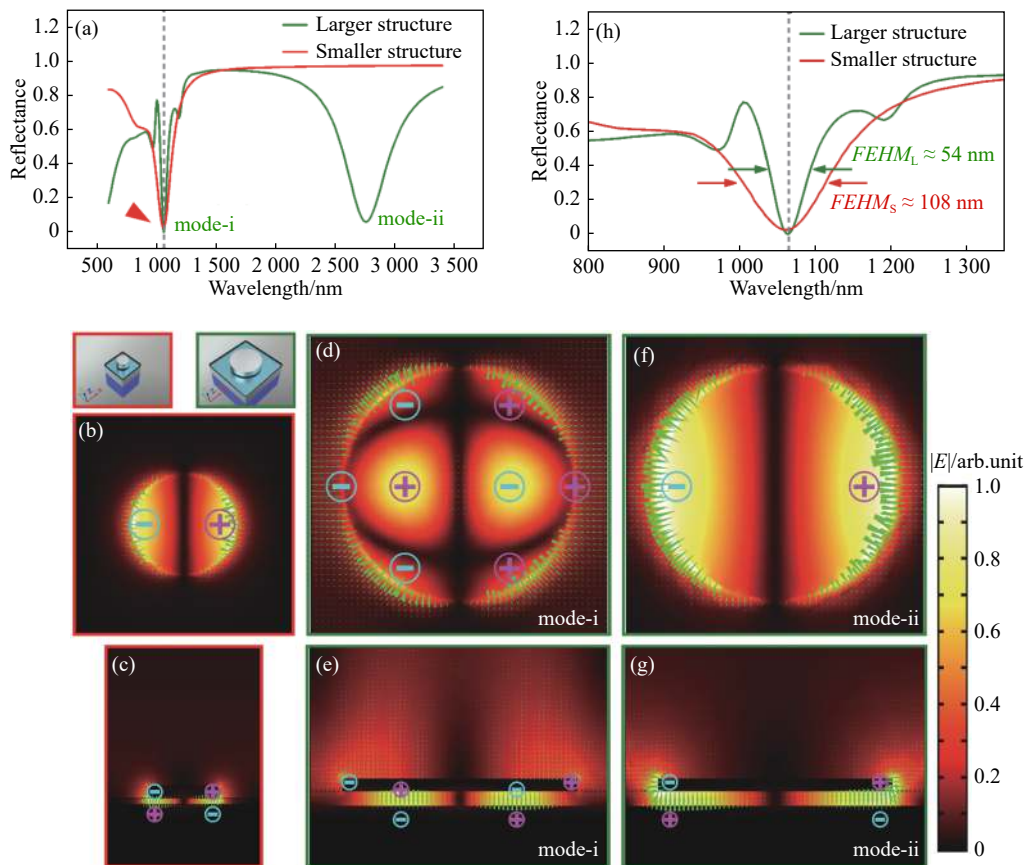


图 2 大尺寸结构与小尺寸结构完美吸波体的光学行为分析

Fig.2 Optical behavior analysis of a perfect absorber with a large-sized structure and a small-sized structure

和 (g) 可以看出, 对于 mode-ii 而言, 其电场分布情况与小尺寸结构的光学模式相同, 因此可以认定 mode-ii 为大尺寸结构的基模。比较有意思的是 mode-i 所对应的场分布, 通过图 2(d) 可以看出, mode-i 的电场分布在 X 方向上存在三个节点, 在 Y 方向上存在两个节点。由于这些节点的存在, 可以确认铝圆盘中的表面等离子体共振是一个高阶模式。同时, 由于铝圆盘的尺寸较大, 使得铝圆盘上下表面的电荷并未完全同步振荡, 而是存在着一定的相位差, 这一点可以通过一个光周期内电荷的振荡情况看出。从图 2(e) 可以看出, 铝圆盘边缘处的电荷更多地集中于靠近上表面的一侧, 而铝圆盘内部的电荷更多地集中于下表面一侧。这些集中于铝圆盘下表面的电荷诱导出背反射镜中的镜像电荷并与之耦合, 形成类似的磁共振模式。从上述模式分析可以看出, mode-i 对应的是大尺寸结构的高阶模式。此外, 在更短波长 (~ 500 nm) 附近, 大尺寸结构可能还存在别的更高阶的模式, 但是由于该波长不在本工作感兴趣的波段内, 因此文中

不予细致讨论。

在明确了 mode-i 与 mode-ii 的基本性质之后, 将 1 064 nm 附近的光谱加以局部放大, 得到图 2(h)。可以看出, 利用小尺寸结构的基模与大尺寸结构的高阶模均可以在 1 064 nm 处实现很好的完美吸收。细致地分析发现, 大尺寸的高阶模所能达到的吸收效果更好一些, 表现为更低的反射率 (大: 0.001 5, 小: 0.025 5)。更重要的是, 当从窄带吸收的角度考虑两个光学模式的半高全宽 (FWHM) 时, 可以明显发现大尺寸结构的高阶模式拥有更窄的线宽。通过读取图 2(h) 中反射光谱的具体数值并按 FWHM 的定义进行计算, 可以得到小尺寸结构基模的 $FWHM_S \approx 108$ nm, 而大尺寸结构高阶模的 $FWHM_L \approx 54$ nm, 为前者的一半。因此, 从获得工作在 1 064 nm 处的窄带超材料完美吸波体角度考虑, 利用大尺寸结构的高阶模在吸收效果和线宽方面都更具优势。此外, 从大规模加工制备的角度考虑, 更大的结构允许使用更容易实现的工艺进行制备 (比如光刻技术), 而更小的结构往往要求电子束曝光

技术 (EBL) 等工艺, 不利于大规模应用。因此, 基于上述理由, 文中后续的参数化研究均集中在大尺寸结构的高阶模上面。

2.2 隔离层厚度的影响

在确定利用大尺寸结构的高阶模可以得到线宽更窄的完美吸波光学响应之后, 针对 t_{SiO_2} 、 D 和 P 这三个主要结构参量进行了细致的参数化研究。首先, 由于 SiO_2 隔离层的厚度对于铝圆盘所支持的局域表面等离子体共振与背反射镜中镜像电荷之间的耦合强度影响很大, 因此在固定周期 $P=1 \mu\text{m}$ 和圆盘直径 $D=0.78 \mu\text{m}$ 的情况下, 通过逐步改变 t_{SiO_2} 来探索这一参数对光学响应的影响。通过图 3(a) 可以看出, 随着 t_{SiO_2} 从 20 nm 逐步增大到 90 nm, 超材料完美吸波体的光学响应也在逐渐发生变化。初步观察可以发现完美吸波体的光学响应可以分为长波长端和短波长端两个主要部分。长波长端对应着这些吸波体的基模 (2 250~3 500 nm, 图 3(a) 中黄色区域)。当 $t_{\text{SiO}_2}=20 \text{ nm}$ 时 (红色曲线), 其基模共振位于 3 250 nm 处, 由于这时介质层比较薄, 上下金属层之间耦合过强, 因此整个吸波体的阻抗并未能和自由空间的阻抗完美匹配, 从而造成吸波体在这个模式处的反射率并不为零。当 $t_{\text{SiO}_2}=30 \text{ nm}$ 时 (蓝色曲线), 该吸波体的基模位置发

生了明显的蓝移 (至 3 000 nm), 通过表面等离子体杂化理论分析^[14], 可以得知上下两层金属之间的耦合减弱, 同时超材料完美吸波体的阻抗与自由空间的阻抗匹配得更好, 因此该模式的反射率更接近于零。随着 t_{SiO_2} 进一步增大到 40 nm (粉红色曲线), 两层金属之间的耦合进一步减弱, 该吸波体的基模继续蓝移至 2 800 nm, 同时反射率进一步降低, 此时阻抗匹配条件更好地得到满足。继而, 随着 t_{SiO_2} 进一步增大到 50 (绿色)、70 (紫色) 和 90 nm (酒红色曲线), 基模在蓝移的同时, 其共振深度也在逐渐降低, 反射率逐渐增大, 说明阻抗匹配条件不再很好地满足。因此, 从基模的角度来看, 可以发现基模的波长位置随着介质隔离层厚度的增加而不断蓝移, 同时其共振深度先增加后减少, 从而决定了一个优化的介质隔离层厚度范围 (约 30~50 nm), 在这个范围内基模可以在长波长端 (~3 μm) 实现很好的完美吸收。

在 1 064 nm 附近的短波长端, 如图 3(a) 中的蓝色区域所示, 随着 t_{SiO_2} 的不断变化, 相应的光学模式波长及共振行为也在发生变化。粗略地看, 从光谱移动范围的角度而言, 高阶模对于介质隔离层厚度变化的敏感性比基模要低。当 t_{SiO_2} 从 20 nm 增大到 90 nm 时, 基模蓝移了超过 550 nm, 而高阶模的移动不超过 120 nm, 基本上集中于 1 064 nm 的设计波长范围附近。从这个意义上讲, 这里给出了利用大尺寸结构的高阶模实现超材料完美吸波体的另一个好处, 即对于实验加工过程中介质层膜厚误差的容忍性比基模要高。将图 3(a) 中高阶模所在蓝色区域进行局部放大, 得到的结果如图 3(b) 所示。可以看出, 当 $t_{\text{SiO}_2}=20 \text{ nm}$ 时 (红色曲线), 由于两层金属之间的耦合很强, 1 064 nm 附近的高阶模被进一步劈裂成位于 1 017 nm 和 1 175 nm 处的两个模式; 同时由于耦合过强, 因此这两个模式的阻抗与自由空间阻抗匹配得都不好, 因此这两个模式的反射率不能到零, 也就是未能实现完美吸收。当 $t_{\text{SiO}_2}=30 \text{ nm}$ 时 (蓝色曲线), 原先被劈裂的两个模式合并为 FWHM 较宽的一个模式, 该模式中心位于 1 092 nm 处, 接近于 1 064 nm 的设计波长, 反射率为 0.12, 不过仍未能达到完美吸收。当 $t_{\text{SiO}_2}=40 \text{ nm}$ 时 (粉红色曲线), 吸波体高阶模的中心波长移动到 1 070 nm, 同时反射率下降到 0.01。当 t_{SiO_2} 进一步增大到 50 nm 时 (绿色曲线), 吸波体高阶模的中心波长移

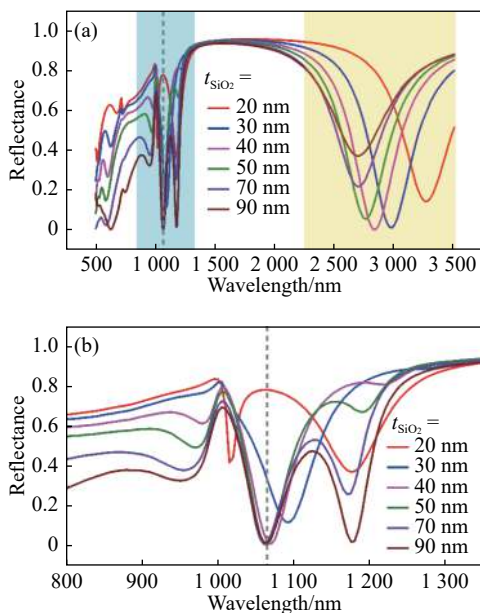


图 3 SiO_2 隔离层的厚度变化对超材料完美吸波体反射谱的影响
Fig.3 Effect of thickness variation of SiO_2 spacer on the reflection spectra of the perfect absorber

动到 1 064 nm 的设计波长, 此时的反射率达到 $R=0.001 5$, 非常接近完美吸收。应当指出的是, 这时在 1 180 nm 波长附近, 一个新的高阶模式开始出现, 表现为反射谱上该位置处一个小的凹陷。随着 t_{SiO_2} 进一步增大到 70(紫色曲线) 和 90 nm(酒红色曲线), 可以看到 1 064 nm 处的高阶模基本没有发生光谱移动, 仍保持在设计波长位置处, 同时反射率保持在 0.02 以下, 只是 1 180 nm 附近新出现的高阶模式变得越发地明显。这一行为提供了在一定光谱范围内, 通过改变介质隔离层的厚度, 对高阶模的个数、峰位和共振深度进行调谐的可能性。针对所需要的 1 064 nm 附近的窄带完美吸收体而言, 综合上述分析, 介质隔离层的厚度范围控制在 40~50 nm 范围内比较合适。

2.3 横向几何尺寸的影响

在研究了介质隔离层的厚度 t_{SiO_2} 对超材料完美吸波体光学性质的影响后, 将注意力集中在圆盘直径 D 和晶格周期 P 这两个横向几何参数上。从实验的角度讲, 这两个结构参数可以在二维版图设计的过程中很方便地进行改变。图 4(a) 给出了当固定 $t_{\text{SiO}_2}=50$ nm 和 $P=1 \mu\text{m}$ 时, 吸波体高阶模随圆盘直径 D 变化的行为。可以看出, 当圆盘直径 D 从 0.60 μm 逐步增大到 0.80 μm 时, 吸波体的高阶模发生了行为较为复杂的改变: 首先, 在设计波长 1 064 nm 附近, 高阶模的个数并不恒定 ($D=0.60 \mu\text{m}$ 和 0.65 μm 一个, 其它两个); 其次, 随着圆盘直径的增大, 高阶模的中心波长并不是单调地发生红移, 而是在从 $D=0.60 \mu\text{m}$ 到 $D=0.65 \mu\text{m}$ 发生红移以后, 到了 $D=0.70 \mu\text{m}$ 却发生了一个蓝移(同时高阶模个数增加为两个); 在这之后, 随着圆盘直径的进一步增大, 高阶模个数保持为两个(一个较为显著、另一个共振深度较浅), 同时发生相应的红移。从这里可以看出, 当圆盘直径增大到一定程度以后, 在一定的光谱范围内将能够支持不止一个高阶模式(原则上可以利用类似于图 2(d) 和 (e) 的场分布情况对其进行区分和编号)。通过对于结构参数的细致调节, 可以将共振深度较深的高阶模式中心波长调谐到设计波长处; 同时只要高阶模式不发生波长简并, 则可以保持其窄线宽的优点(如这里的 $D=0.78 \mu\text{m}$, 绿色曲线)。

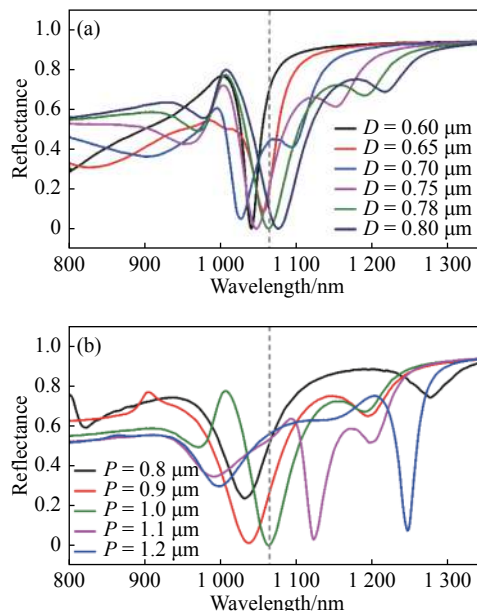


图 4 完美吸波体结构中圆盘直径与周期变化对光学响应的影响
Fig.4 Effects of disc diameter and periodicity on the optical response of perfect absorber structure

类似地, 图 4(b) 给出了当固定 $t_{\text{SiO}_2}=50$ nm 和 $D=0.78 \mu\text{m}$ 而改变正方形晶格的周期 P 时, 吸波体高阶模光学响应的变化。可以看出, 当圆盘直径一定时, 周期 P 的改变主要会影响相邻两个圆盘边缘之间的间距, 继而影响到相邻圆盘之间的横向近场耦合。当 $P=0.8 \mu\text{m}$ 时(黑色曲线), 相邻两个圆盘之间的间距很小(20 nm), 因此耦合很强, 超材料完美吸波体的表面阻抗与自由空间阻抗并未完美匹配, 从而反射率未能降低到零; 当 $P=0.9 \mu\text{m}$ 时(红色曲线), 相邻圆盘之间的耦合减弱, 阻抗匹配情况大大改善, 从而反射率接近于零, 同时高阶模的中心波长发生少许红移; 当 $P=1.0 \mu\text{m}$ 时(绿色曲线), 在保持好的阻抗匹配条件基础上高阶模继续红移至 1 064 nm 的设计波长; 当 P 进一步增大到 1.1 μm (粉红色曲线) 和 1.2 μm (蓝色曲线) 时, 高阶模进一步红移并逐步偏移设计波长, 同时阻抗匹配条件稍有变差, 高阶模的反射率有所增加。值得指出的是, 当晶格周期 P 过大时, 在这个波长范围内可能会有光栅衍射级次出现, 应着力避免这种情况。综合上述分析, 通过横向尺寸 D 和 P 的大范围参数扫描, 可以方便地在设计波长附近得到一系列的高阶模式, 并对其中心波长和反射率值进行调谐; 通过细致地调节 D 、 P 参数值, 总可以在设计波长 1 064 nm

处得到一个窄带的完美吸波体。

2.4 优化的设计参数

最后在前述几何参数研究的基础上,综合考虑 t_{SiO_2} 、 D 和 P 三个参数各自对吸波体高阶模光学行为的影响,采取合理组合以求在设计波长 1 064 nm 处得到一个高性能的窄带完美吸波体,相应的结果如图 5 所示。在这里,固定圆盘直径 $D=0.78 \mu\text{m}$ 、周期 $P=1.0 \mu\text{m}$,然后在 42~50 nm 的范围内非常细致地调节介质隔离层的厚度 t_{SiO_2} ,最终得到当 $t_{\text{SiO}_2}=46 \text{ nm}$ 时,超材料完美吸波体在 1 064 nm 处的反射率可以达到 8.56×10^{-5} (蓝色曲线),其对应的 $\text{FWHM} \approx 55 \text{ nm}$ 。

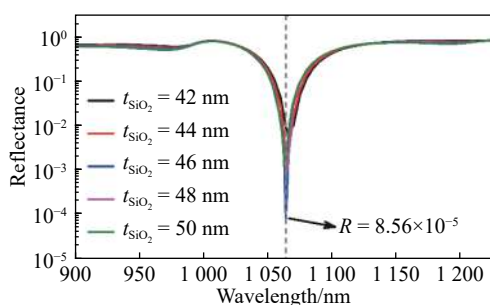


图 5 优化各结构参数后得到的高性能完美吸波体

Fig.5 High-performance perfect absorber obtained by optimizing structural parameters

3 结 论

该工作基于铝反射镜-SiO₂ 隔离层-铝圆盘三明治结构,从 CMOS 兼容性、大规模应用的可能性以及指定波段窄带吸收的要求出发,理论设计并数值模拟研究了一种超材料完美吸波体。通过对大尺寸结构和小尺寸结构的光学响应进行对比,发现利用大尺寸结构的高阶模式可以在指定波长处得到线宽更窄的完美吸波响应,为窄带超材料完美吸波体的设计提供了新的思路。继而,通过对基本结构单元一系列重要结构参数的系统性研究,揭示了各结构参数对于超材料完美吸波体光学性能的影响规律。在优化各结构参数的基础上,得到了在 1 064 nm 波长处工作的 FWHM 约为 55 nm、反射率小于 10^{-4} 的窄带完美吸波体。最后,由于该工作中所涉及的材料全部 CMOS 兼容,微纳结构的特征尺寸也处于光刻技术易于实现的区间,因此拥有非常好的大规模应用可能性。

参考文献:

- [1] McPhedran R C, Shadrivov I V, Kuhlmeiy B T, et al. Metamaterials and metaoptics [J]. *NPG Asia Materials*, 2011, 3(11): 100-108.
- [2] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [3] Soukoulis C M, Wegener M. Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials [J]. *Nat Photon*, 2011, 5(9): 523-530.
- [4] Nanfang Y, Patrice G, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [5] Tao H, Landy N I, Bingham C M, et al. A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization [J]. *Opt Express*, 2008, 16(10): 7181-7188.
- [6] Grant J, Ma Y, Saha S, et al. Polarization insensitive terahertz metamaterial absorber [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(8): 1524-1526.
- [7] Wang Hua, Sun Xiaohong, Wang Zhen, et al. Characteristic analysis of metamaterial absorber in terahertz wavelength [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1225003. (in Chinese)
- [8] Li Yihan, Zhang Mile, Cui Hailin, et al. Terahertz absorbing properties of different metal split-ring resonators [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1225002. (in Chinese)
- [9] Li Yongqian, Guo Yongjun, Su Lei, et al. Polarization-dependent absorption of rectangular-block metamaterials in infrared region [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(11): 2998-3003. (in Chinese)
- [10] Liao Y, Zhao Y, Zhang W, et al. A wide-angle polarization-sensitive dual-band absorber in the infrared regime [J]. *Optik*, 2015, 126(23): 4469-4471.
- [11] Shen X, Yang Y, Zang Y, et al. Triple-band terahertz metamaterial absorber: Design, experiment, and physical interpretation [J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(15): 154102.
- [12] Lei L, Li S, Huang H, et al. Ultra-broadband absorber from visible to near-infrared using plasmonic metamaterial [J]. *Opt Express*, 2018, 26(5): 5686-5693.
- [13] Tittl A, Harats M G, Walter R, et al. Quantitative angle-resolved small-spot reflectance measurements on plasmonic perfect absorbers: impedance matching and disorder effects [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(10): 10885-10892.
- [14] Nordlander P, Prodan E. Plasmon hybridization in nanoparticles near metallic surfaces [J]. *Nano Lett*, 2004, 4(11): 2209-2213.