

电介质/金属/电介质膜系实现可见光 波段高透兼容激光隐身研究*

农洁¹⁾²⁾ 张伊祎¹⁾²⁾ 韦雪玲¹⁾²⁾ 姜鑫鹏²⁾ 李宁¹⁾²⁾ 王冬迎²⁾³⁾
肖思洋¹⁾²⁾ 陈泓廷²⁾³⁾ 张振荣^{1)†} 杨俊波^{2)‡}

1) (广西大学计算机与电子信息学院, 广西多媒体通信与网络技术重点实验室, 南宁 530004)

2) (国防科技大学物质与材料科学实验中心, 长沙 410073)

3) (西南科技大学数理学院, 绵阳 621010)

(2023年5月25日收到)

各类光电设备的光学窗口中普遍存在的“猫眼效应”是激光主动探测系统的主要依据, 这对军事装备和单兵作战人员构成了极大的威胁. 然而, 在保证高可见光透过率的条件下, 针对激光主动探测的狙击隐身方案仍然有待商榷. 本文利用遗传算法对超表面减反射膜进行逆向设计, 用 Si_3N_4 和Ag组成三层减反增透膜, 并在其顶层增加长方形阵列的微纳结构金属形成波长选择性吸收器, 以实现激光波长低反射高吸收的效果. 将器件设计与遗传算法相结合, 通过算法优化得出最符合器件目标性能的参数组合, 达到了可见光平均透过率88%, 最大透过峰值94%, 1550 nm激光波长反射率10%, 吸收率80%的效果. 本文设计的超表面减反射膜不需要增加额外装置且成像质量得以保证, 同时能有效减小激光的回波能量, 从而高质量地实现可见光透过与激光隐身的兼容, 为反猫眼探测的作战策略提供了一种行之有效的设计思路.

关键词: 电介质/金属/电介质膜系, 激光隐身, 表面等离子极化激元, 遗传算法

PACS: 78.67.-n, 78.67.Pt, 78.20.-e

DOI: 10.7498/aps.72.20230855

1 引言

在现代战争中, 狙击手能用最小的作战成本让敌军受到最大的威胁, 因此成为各个国家军队单兵作战关注的对象, 世界各国不遗余力地训练优秀狙击手的同时, 对反狙击作战系统^[1]的研究也不断发展, 各式各样的反狙击系统层出不穷. 声探测系统^[2]是反狙击探测系统之一, 通过布置麦克风阵列来接收子弹出膛以及飞行时产生的冲击信号, 从而对到达麦克风阵列的时间差进行计算, 大致定位出狙击

手方位. 声探测系统的工作原理限制了使用场景, 声探测系统在多名狙击手同时作战的场景下很难分辨出具体方位, 由于设备众多, 声探测系统大多被安装在装甲车上, 应用于城市作战, 且声探测系统只能确定狙击手的方位, 无法进行精确定位. 自1990年代起, 光电对抗技术^[3]开始在反狙击领域崭露头角, 红外反狙击手探测系统^[4]采集狙击手开枪后枪口处的闪光和热量变化, 分析其红外信号以精确判断狙击手位置. 但是红外反狙击手探测属于被动探测方式, 只有当狙击手开枪后才能定位, 开枪与定位的时间差给狙击手提供了转移的可能, 且

* 国家自然科学基金 (批准号: 12272407, 62275269, 62275271)、国家重点研发计划 (批准号: 2022YFF0706005) 和粤桂联合科学重点基金 (批准号: 2021GXNSFDA076001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zzz76@gxu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: yangjunbo@nudt.edu.cn

该方式受天气变化和环境影响较大,糟糕的天气和环境条件下,极有可能出现错误判断影响战略部署.同时,红外探测系统无法区分具有与枪口闪光相同红外特征的红外发射器.随着光电子技术的进一步发展和实际作战形势的需要,基于“猫眼效应”的激光主动探测^[5-7]技术在反狙击手侦察和信息获取中发挥着重要作用.与猫的眼睛一样,根据光路可逆原理,当激光光束照射到目标光电设备的光学窗口且进入光学系统视场时,有一部分激光光束被反射回来,被激光探测器接收并进行滤波处理,对回波功率进行分析,就可以精确确定枪手位置.激光探测系统采取主动探测的方式且具有方向性好、功率高、亮度大、灵敏度高、探测距离远和抗电磁干扰能力强等优点,被广泛应用于反狙击探测领域,但该方式必须依托光学目标“猫眼效应”的工作原理,若狙击方消除了“猫眼效应”则激光探测系统致盲.

狙击与反狙击作为矛和盾的存在,愈发先进的反狙击技术大大增加了狙击手暴露的可能性,因此伪装技术的优劣以及对探测系统的应对策略与任务的成败和狙击手的生命安全直接相关.针对在军事领域广泛使用的激光主动探测方式,狙击方可通过减小光电系统自身的“猫眼效应”以降低激光回波功率的强度,从而缩短探测距离,增强作战隐蔽性和生存能力.常见的激光器有波长为 1060 nm 的 Nd:YAG 激光器^[8]、波长为 1550 nm 的掺铒激光器^[9]和波长为 10600 nm 的二氧化碳激光器^[10],1550 nm 波长是探测系统常用的激光波长之一^[11,12],其具有光束能量高且集中,空气衰减较低,人眼安全性更高,探测距离更远,隐蔽性更强的优点,因此 1550 nm 激光器具有更广泛的应用前景,成为新的发展趋势.

李攀等^[13]利用有限时域差分方法设计并优化了由 SiO₂ 组成的双层和三层减反射膜在 1550 nm 波长附近实现了减反射效果.季雪淞等^[14]设计了微纳阵列复合结构增强 1550 nm 处的吸收.应用于狙击光学系统的隐身策略不仅要求实现激光隐身,同时需要保证可见光光路的正常通行,确保可见光的透射效果.郑臻荣等^[15]利用 TiO₂ 和 MgF₂ 组成的 8 层结构设计了 400—1000 nm 范围内的超宽带减反射膜.寇立选等^[16]选用 Ti₃O₅, SiO₂ 和 MgF₂ 制备了 10 层结构的超宽带减反射膜.贺才美等^[17]选择 ZnS 和 YbF₃ 作为高低折射率材料实现

了可见光到近红外以及远红外波段的双波段增透.

制备可见光波段的减反增透薄膜已经屡见不鲜,各类针对激光隐身的光电子器件也数不胜数.然而,两者都是仅关注透过或吸收性能,鲜有将两者性能结合起来应用于狙击光学系统反侦察的超表面研究.基于上述研究现状存在的空缺,本文设计了由金属 Ag 和介质材料 Si₃N₄ 组成的超表面减反射膜,实现了在 380—780 nm 可见光波段的高透射效果与近红外激光波长 1550 nm 高吸收性能的兼容,利用纳米级超薄 Ag 膜的异常透射特性,通过选择能与 Ag 膜实现阻抗匹配^[18]的介质材料 Si₃N₄ 来达到增强透射减少反射的效果,又得益于纳米结构调控光场的特殊能力,电磁波的光场能量被吸收,减少了激光波长处的强反射,进而实现了目标激光波长上的隐身效果,为反猫眼探测的作战策略提供了一种行之有效的设计思路.

2 结构模型和方法

本文所设计的超表面减反射膜的结构示意图 1 所示,由顶层长方形微纳结构 Ag 阵列/上层 Si₃N₄/Ag 层/下层 Si₃N₄ 组成,通过遗传算法优化得到的几何参数 t_1 , t_2 , t_3 分别表示下层 Si₃N₄ 厚度,中间 Ag 层厚度,上层 Si₃N₄ 厚度,以及 l , w , t_4 分别表示顶层长方形微纳结构 Ag 的长、宽和厚度.所设计的超表面减反射膜由于等离子体共振和材料的固有特性,实现了在可见光波段的高透过与激光隐身的兼容.

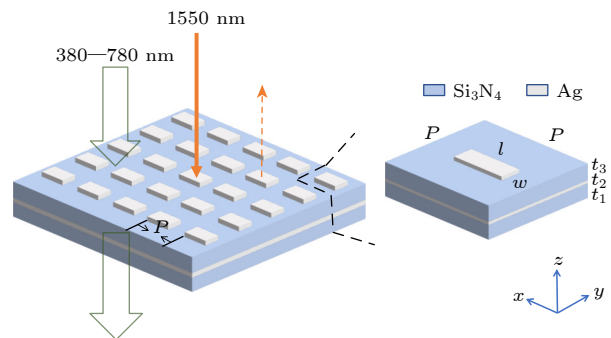


图 1 超表面减反射膜示意图

Fig. 1. Diagram of metasurface antireflection film.

通常,对于设计复杂结构的物理现象及其电磁场特性很难完全用解析式表达出来,得益于计算机的发展,出现了数值模拟这一研究手段.本文在研究时主要采用时域有限差分方法 (finite difference

time dome, FDTD), 这是一种求解麦克斯韦方程组的直接时域求解方法, 其基本思想是在电磁场中对电场和磁场在空间上和时间上间隔交替采样, 并且在任意电场或磁场分量的周围都包围着 4 个电场或磁场分量, 用这种离散的方式把含有时间分量的旋度方程转化为差分方程, 进而在时间轴上推解出空间分布的电磁场. 当离散后的差分方程是收敛且稳定的, 则差分方程的数值解可以被认为是原方程的解.

遗传算法是通过模拟达尔文的遗传选择和优胜劣汰的生物进化过程的一种随机搜索算法, 采用概率化寻找参数能够自动调整优化方向, 本文利用遗传算法来寻找满足目标光谱要求的最优参数组合. 将需要优化的参数 t_1, t_2, l 和 w 作为个体的基因, 用二进制编码表示, 算法将每一个个体的基因传递到仿真软件进行模拟仿真, 得到透射光谱和反射光谱后再反馈给算法, 通过逐代的选择、交叉和变异的具体操作, 产生新个体. 为了性能优越的个体不被淘汰, 将每一代每一个个体的适应度函数 (figure-of-merit, FOM) 计算出来并进行排序, 将保留下 FOM 函数最大的 30 个个体, 剩余的个体则由选择、交叉和变异的个体组成, 由此构成新一代种群, 继续进行迭代. 经过不断的迭代, 得出适应度最大的个体基因即结构的最优参数组合, 本文所用遗传算法流程如图 2 所示.

本文中设定遗传算法的适应度函数为

$$\text{FOM} = 0.6\overline{T(\lambda_1, \lambda_2)} + 0.4A(\lambda), \quad (1)$$

其中, λ_1 和 λ_2 分别表示所关注波段的起始波长和截止波长, 对应可见光范围 380—780 nm; $\overline{T(\lambda_1, \lambda_2)}$

表示 λ_1 和 λ_2 波段内的平均透过率; $A(\lambda)$ 表示 λ 波长下的吸收率. 利用公式 $A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda)$ 计算出吸收光谱 $A(\lambda)$, $\overline{T(\lambda_1, \lambda_2)}$ 可以由 (2) 式计算出来:

$$\overline{T(\lambda_1, \lambda_2)} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

其中, $T(\lambda)$ 表示 λ 波长下的透射率. 设计 FOM 函数时, 将可见光平均透过率和近红外吸收率的权重分别设定为 0.6 和 0.4, 是为了侧重于保证可见光的高透过, 以便能够清晰成像, 同时又能够保证近红外的高吸收率.

3 结果和分析

3.1 数值模拟仿真结果

本文将电介质/金属/电介质 (dielectric/metal/dielectric, DMD) 三层膜系与周期性图案化微纳结构结合, 把遗传算法运用到最优几何参数组合的寻找上, 得到性能优越的超表面减反射膜, 在 380—780 nm 可见光波段有较高的透过率并且能够有效降低 1550 nm 激光的回波能量, 通过常用的膜层制备方法和微纳结构刻蚀工艺即可将该超表面减反射膜制备出来.

在数值模拟仿真中, 设定平面波从 z 轴的正方向入射到超表面减反射膜, 在 x 和 y 方向上设置周期性边界条件, z 方向上设置完美匹配层, 超表面减反射膜的透射光谱 $T(\lambda)$ 和反射光谱 $R(\lambda)$ 可以从仿真软件的监视器中得到. 将未使用算法的结构初始参数设定为: 周期 $P = 350$ nm, 下层 Si_3N_4 薄膜

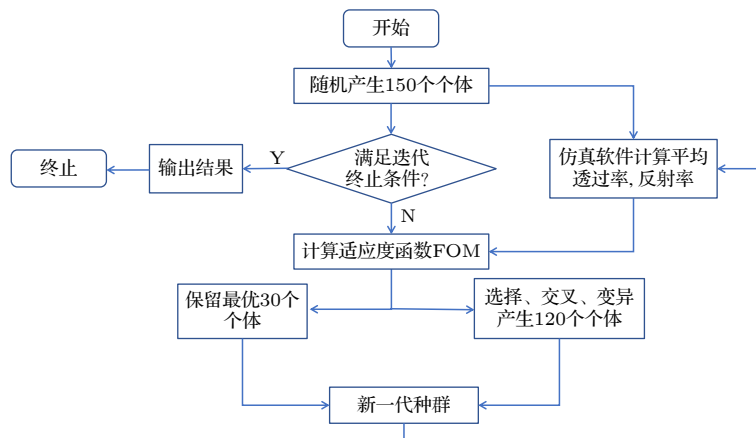


图 2 遗传算法流程图

Fig. 2. Genetic algorithm flow chart.

厚度 $t_1 = 35$ nm, 中间 Ag 层厚度 $t_2 = 10$ nm, 上层 Si_3N_4 厚度 $t_3 = 35$ nm, 以及顶层微纳结构 Ag 的几何参数, 长 $l = 190$ nm, 宽 $w = 60$ nm, 厚 $t_4 = 10$ nm, 整个初始超表面减反射膜的总厚度为 90 nm. 经过遗传算法 30 次迭代, 对整体结构的 t_1, t_2, t_3 以及 l 和 w 进行迭代优化, 得到最优几何参数为: $P = 350$ nm, $t_1 = 41$ nm, $t_2 = 18$ nm, $t_3 = 41$ nm 以及 $l = 166$ nm, $w = 62$ nm, $t_4 = 10$ nm, 整个超表面减反射膜的总厚度为 110 nm.

模拟仿真得到所设计的超表面减反射膜的透射光谱、吸收光谱以及反射光谱与初始结构的对比结果如图 3 所示. 优化后的结构在 380—780 nm 可见光波段内的平均透过率可达 88%, 在 484 nm 处出现峰值为 94% 的透射峰, 在 1550 nm 激光波长处的反射率仅为 10%, 吸收率为 80%, 算法优化前后的参数和性能对比如表 1 所示. 分析结果可知, 经过算法优化后的几何参数能够显著提高可见光范围内的平均透过率及 1550 nm 处的吸收率,

整体结构在不影响成像质量的前提下, 可以很好地实现激光隐身的预期目标.

表 1 算法优化前后结构的性能对比

Table 1. Performance comparison of the structure before and after algorithm optimization.

	初始结构	优化结构
结构参数/nm	$t_1 = 35, t_2 = 10,$ $t_3 = 35, t_4 = 10,$ $l = 190, w = 60$	$t_1 = 41, t_2 = 18,$ $t_3 = 41, t_4 = 10,$ $l = 166, w = 62$
总厚度/nm	90	110
380—780 nm 平均透过率/%	84	88
1550 nm 反射率/%	58	10
1550 nm 透过率/%	2	10
1550 nm 吸收率/%	40	80

超表面减反射膜同时实现了可见光高透过和近红外低反射的功能, 这归因于超薄 Ag 膜的异常透射特性和 Si_3N_4 材料几乎无损耗的性质, 以及微纳结构产生的等离子体共振. 超表面减反射膜的等效阻抗与自由空间相匹配, 使得金属反射电磁波的特性被抑制, 因此可见光电磁波可以最大限度地透过整个超表面减反射膜, 又因为微纳结构能够操控光场, 使得光场能量转化为热能而被消耗.

3.2 理论分析

在所有金属材料中, Ag 在可见光波段内具有较小的吸收^[19], 且超薄 Ag 膜比常用的透明导电薄膜 ITO 具有更高的可见光透过率^[20], 是设计 D/M/D 减反射膜系的理想选择. 纳米量级的连续金属薄膜的透过率与厚度密切相关, 若 Ag 薄膜的厚度低于临界厚度, 则由于未形成连续薄膜而表现为岛状 Ag 膜对光能量的强烈吸收; 若 Ag 薄膜的厚度过大, 则反射率大大提高导致透射性能不佳. Ag 和 Si_3N_4 材料的折射率如图 4 所示, 可以看出在可见光范围内, Ag 的消光系数较低, 被选作增透层材料的 Si_3N_4 在可见光波段内可以看作是无损耗的, 即消光系数近乎为 0^[21]. 超薄 Ag 膜与介质材料 Si_3N_4 组成 D/M/D 三层膜系, 合理设计膜系的各层厚度使整个膜系的等效阻抗与自由空间的阻抗相匹配, 可达到减反增透的效果, 实现可见光波段高透过的设计目标.

使用仿真软件查看结构内部的电磁场分布, 以便更好地理解其在可见光波段产生高透过和在近红外波段中产生吸收效应的机理. 用 Lorent-Drude

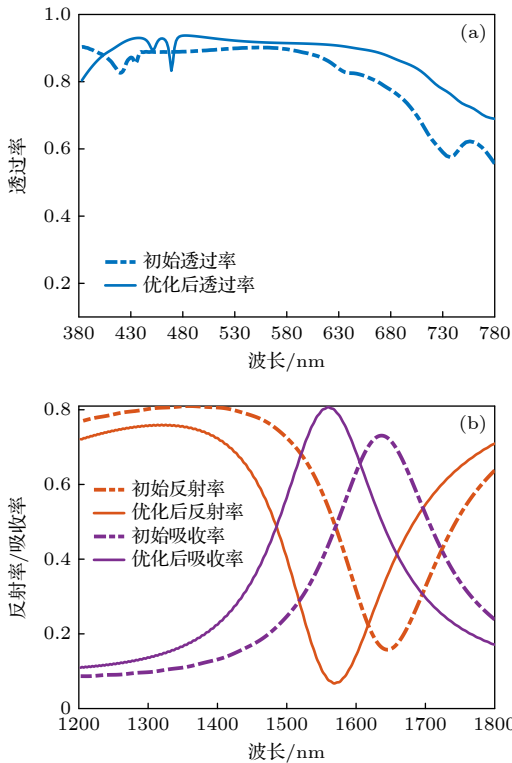


图 3 算法优化前后性能对比 (a) 算法优化前后 380—780 nm 透过率对比; (b) 算法优化前后 1550 nm 反射率/吸收率对比

Fig. 3. Performance comparison before and after algorithm optimization: (a) Comparison of transmittance between 380 nm and 780 nm before and after optimization; (b) reflectance/absorption ratio of 1550 nm before and after optimization is compared.

色散模型分析厚度为 18 nm 的超薄 Ag 膜在 484 nm 波长下 xz 截面的归一化电场分布, 如图 5 所示, 大部分的电场能量被超薄 Ag 膜反射, 且能量在 Ag 膜里有所衰减, 只有少部分能量可以穿透 Ag 膜.

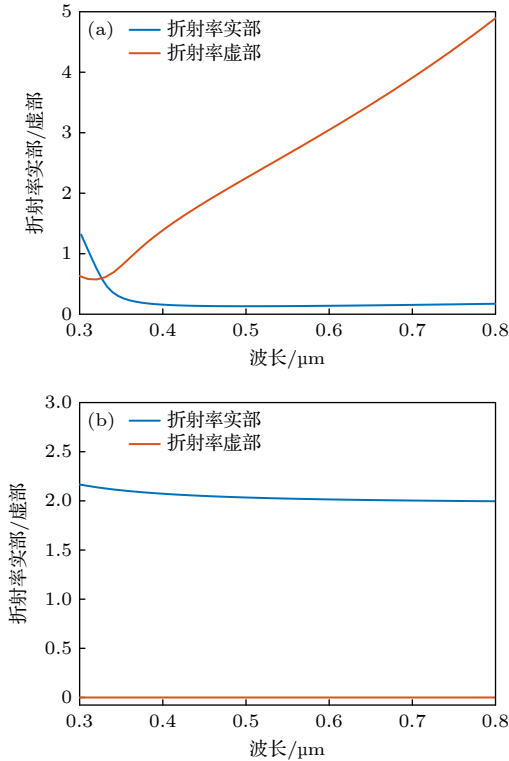


图 4 Ag 和 Si_3N_4 的折射率 (a) Ag 在 380—780 nm 的折射率; (b) Si_3N_4 在 380—780 nm 的折射率

Fig. 4. Refractive index of Ag and Si_3N_4 : (a) Refractive index of Ag at 380—780 nm; (b) refractive index of Si_3N_4 at 380—780 nm.

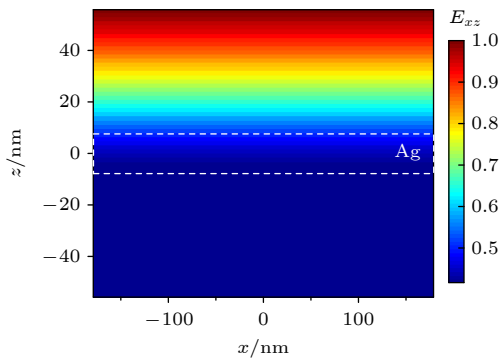


图 5 超薄 Ag 膜 484 nm 处 xz 截面的归一化电场图

Fig. 5. Normalized electric field diagram of xz section at 484 nm of ultra-thin Ag film.

在超薄 Ag 膜的上下涂覆 Si_3N_4 薄膜作为增透层, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ag}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 三层膜系 xz 截面的归一化电场分布如图 6(a)—(c) 所示. 从随机选取的 3 个可见光波长分别为 380, 470, 560 nm 处的电场分布

来看, 有较高的电磁波能量透过下层 Si_3N_4 , 三层膜系在可见光范围内没有发生谐振, 除了材料固有的本征吸收外, 不会产生额外的吸收, 所以可见光可以尽可能地透过三层膜系, 展现出可见光高透过的效果. 在 1550 nm 波长下, 三层膜系 xz 截面的归一化电场分布如图 6(d) 所示, 可以看到没有添加顶层微纳结构金属的情况下, 三层膜系依然不产生谐振, 但是电磁波无法透过膜系, 这是因为随着波长的增大, 材料的折射率发生变化, 导致三层膜系与自由空间阻抗失配, 绝大部分的能量被反射回去, 因此电磁波既无法透过膜系也不会被吸收.

当 1550 nm 电磁波作用于超表面减反射膜时, 其在 xy 截面和 xz 截面的电磁场分布如图 7 所示. 从图 7 可以看出在顶层图案的四周出现了电场增强现象, 顶层金属与中间层金属的电位移矢量相反, 因此在介质层中产生了强烈的磁谐振, 磁场被局限在顶层图案下方的介质区域内, 观察电磁场的分布可知在顶层金属周边激发了局域型表面等离子体谐振, 电磁波能量被吸收, 最后耦合的电磁波能量通过欧姆损耗的方式转化为热能.

4 讨论

从图 3(a) 发现, 超表面减反射膜在 700 nm 后的透射效果有所下降, 通过观察 700 nm 处的电磁场分布来探究其原因. 如图 8 所示, 当入射电磁波穿透上层金属和介质到达中间层金属时, 会在中间层金属与介质的交界面上激发出传播型表面等离子体极化波. 中间层金属具有一定的反射作用, 上层介质与中间层金属的交界面和上层介质与顶层金属交界面之间的表面等离子体极化波发生相消干涉, 激发了 F-P 腔模式共振. 磁场能量不仅局限在顶层金属下方的介质区域内, 而且在单元结构之间也有增强, 这是传播型等离子体模式和 F-P 腔共振模式的结合, 从而在 700 nm 后产生小幅度的吸收导致透射效果下降.

探究不同入射角度对超表面减反射膜性能的影响, 如图 9 所示, 可见光透过率和 1550 nm 处的吸收率几乎不会受到入射角度变化的影响, 虽然在入射角度大于 35° 时, 长波可见光的透过率有所下降, 透射窗口稍窄, 但下降幅度不大, 基本不会影响整体性能, 表明所设计器件具有良好的角度不敏感特性.

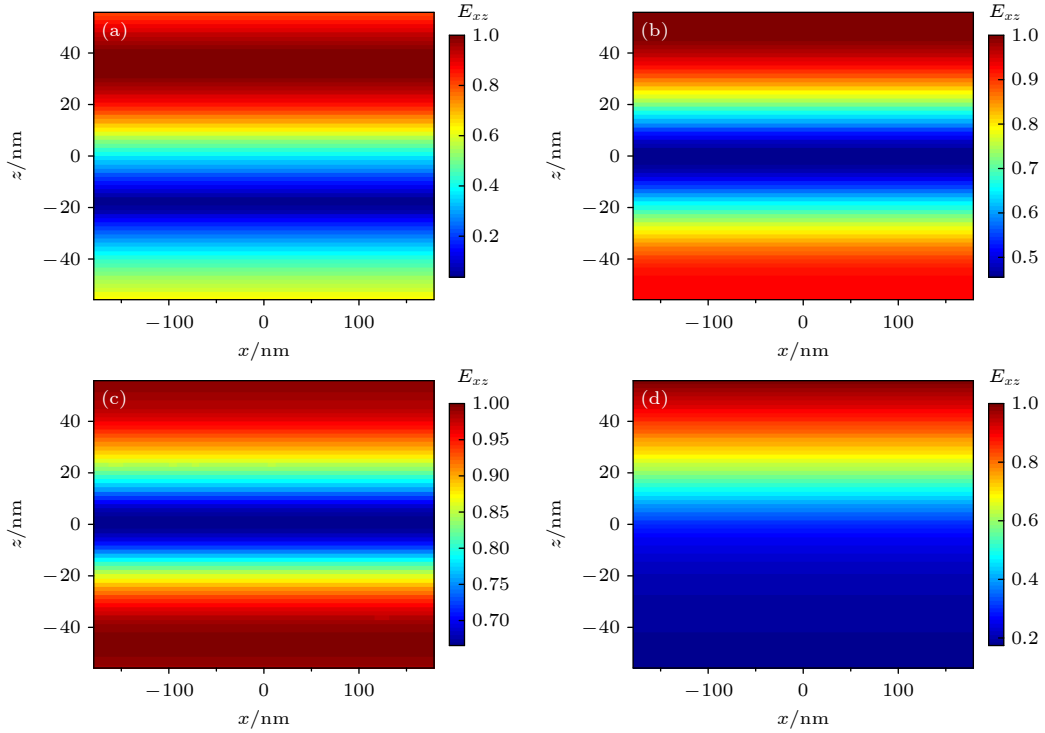


图 6 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ag}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 三层膜系 xz 截面的归一化电场图 (a) 380 nm 处 xz 截面的归一化电场图; (b) 470 nm 处 xz 截面的归一化电场图; (c) 560 nm 处 xz 截面的归一化电场图; (d) 1550 nm 处 xz 截面的归一化电场图

Fig. 6. Normalized electric field diagram of xz section of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ag}/\text{Si}_3\text{N}_4$ three-layer films: (a) Normalized electric field diagram of xz section at 380 nm; (b) normalized electric field diagram of xz section at 470 nm; (c) normalized electric field diagram of xz section at 560 nm; (d) normalized electric field diagram of xz section at 1550 nm.

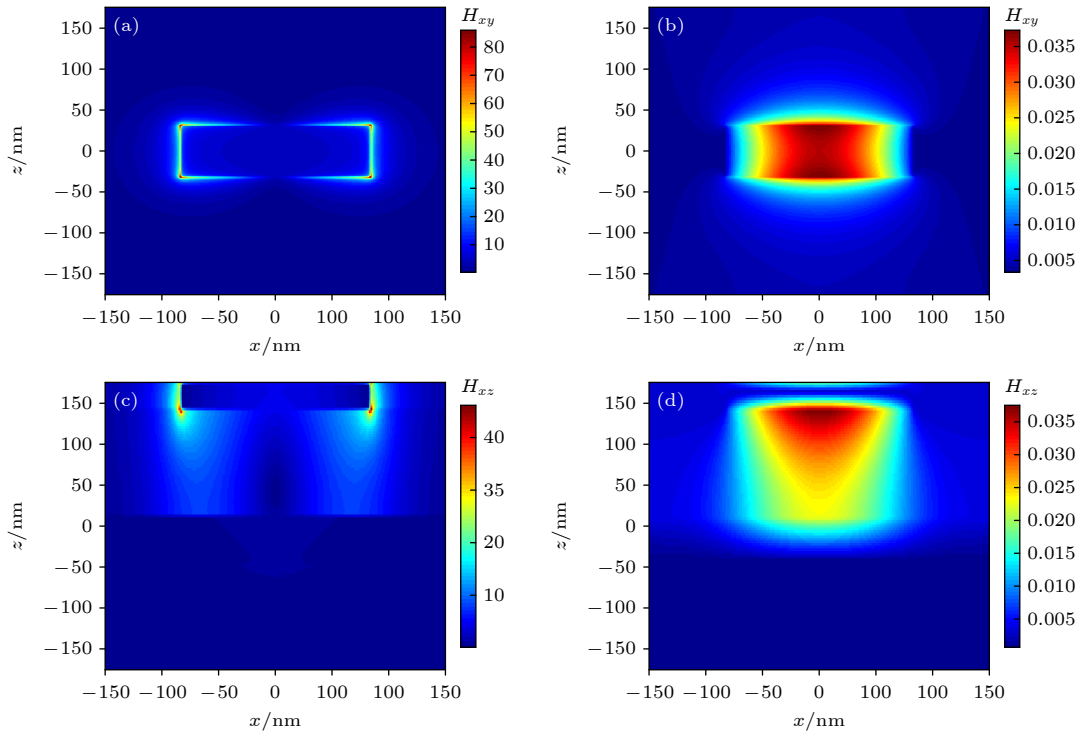


图 7 1550 nm 处的电磁场分布 (a) 1550 nm 处 xy 截面电场图; (b) 1550 nm 处 xy 截面磁场图; (c) 1550 nm 处 xz 截面电场图; (d) 1550 nm 处 xz 截面磁场图

Fig. 7. Electromagnetic field distribution at 1550 nm: (a) Electric field diagram of xy section at 1550 nm; (b) magnetic field diagram of xy cross section at 1550 nm; (c) electric field diagram of xz section at 1550 nm; (d) magnetic field diagram of xz cross section at 1550 nm.

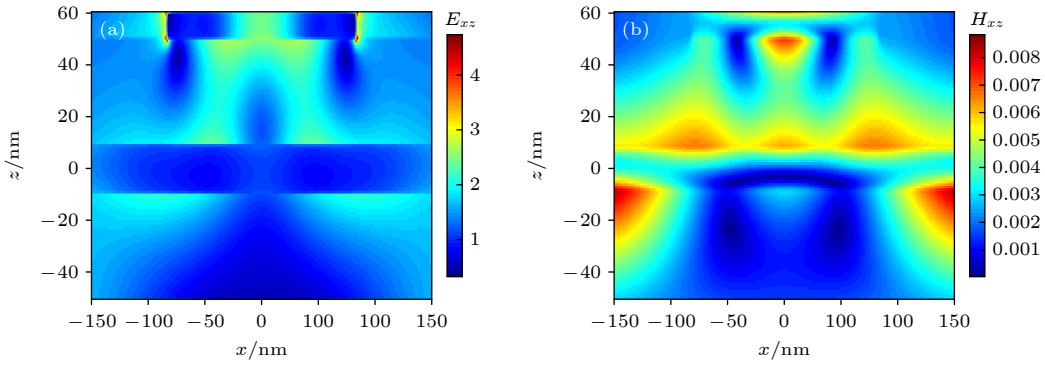


图 8 700 nm 处 xz 截面的电磁场分布 (a) 700 nm 处 xz 截面电场图; (b) 700 nm 处 xz 截面磁场图

Fig. 8. Electromagnetic field distribution at 700 nm: (a) Electric field diagram of xz section at 700 nm; (b) magnetic field diagram of xz cross section at 700 nm.

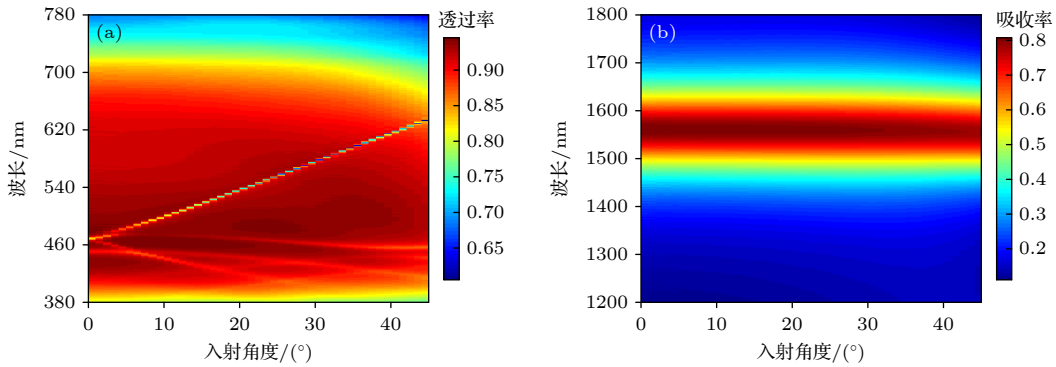


图 9 不同入射角度对性能的影响 (a) 不同入射角度对 380—780 nm 透过率的影响; (b) 不同入射角度对 1550 nm 吸收率的影响

Fig. 9. Effects of different incident angle on properties: (a) Effect of different incident angle on transmittance of 380—780 nm; (b) effect of different incident angle on absorptivity of 1550 nm.

上述基础结构对入射光极化角度具有敏感性,在实际应用中存在一定的局限性,因此需对结构进行改进.将长方形金属阵列替换为中心对称交叉型金属阵列,以获得偏振不敏感特性.使用同样的设计方法优化结构的几何参数,结构模型和结果如图 10 所示, $P = 350$ nm, $t_1 = 43$ nm, $t_2 = 13$ nm, $t_3 = 56$ nm 以及 $l = 181$ nm, $w = 51$ nm, $t_4 = 10$ nm.

偏振不敏感结构的可见光平均透过率为 82%,相比于长方形阵列结构有所下降,这是因为交叉型金属阵列的占空比为 13%,略大于基础结构的占空比.在 1550 nm 处存在 84% 的吸收峰,反射率 5%.从图 10(b), (c) 可以看到,改进后的交叉型阵列依然可以保持较高的可见光透过率,并且在近红外激光波长上存在更大的吸收峰,激光的回波强度进一步减小.入射光极化角度对该结构的影响如图 11 所示,可见光透过率和激光波长的吸收率几乎不会发生变化,由于结构的对称性,该设计

获得了良好的偏振不敏感特性.

探究 MgF_2 , SiO_2 , Si_3N_4 , SiC , TiO_2 材料作为增透层对超表面减反射膜性能的影响,这些材料都是在可见光波段内几乎无损耗的电介质材料,且折射率依次增大.从图 12(a) 可以看出,折射率小于 Si_3N_4 的电介质材料作为增透层会导致可见光波段的透射窗口向短波方向移动且平均透过率明显降低,折射率大于 Si_3N_4 的电介质材料作为增透层会导致可见光波段的透射窗口向长波方向移动.从图 12(b) 可以看出,折射率小于 Si_3N_4 的电介质材料作为增透层会导致近红外吸收峰蓝移;折射率大于 Si_3N_4 的电介质材料作为增透层会导致近红外吸收峰红移.根据图 12 的结果,选取 Si_3N_4 作为增透层可以使得超表面减反射膜与自由空间的自由电子达成阻抗匹配,所以透射性能最佳,且在 1550 nm 处的吸收率最高.

单独变换底层电介质材料对性能的影响如图 13 示,选取 SiO_2 和 SiC 作为底层电介质材料时,在近

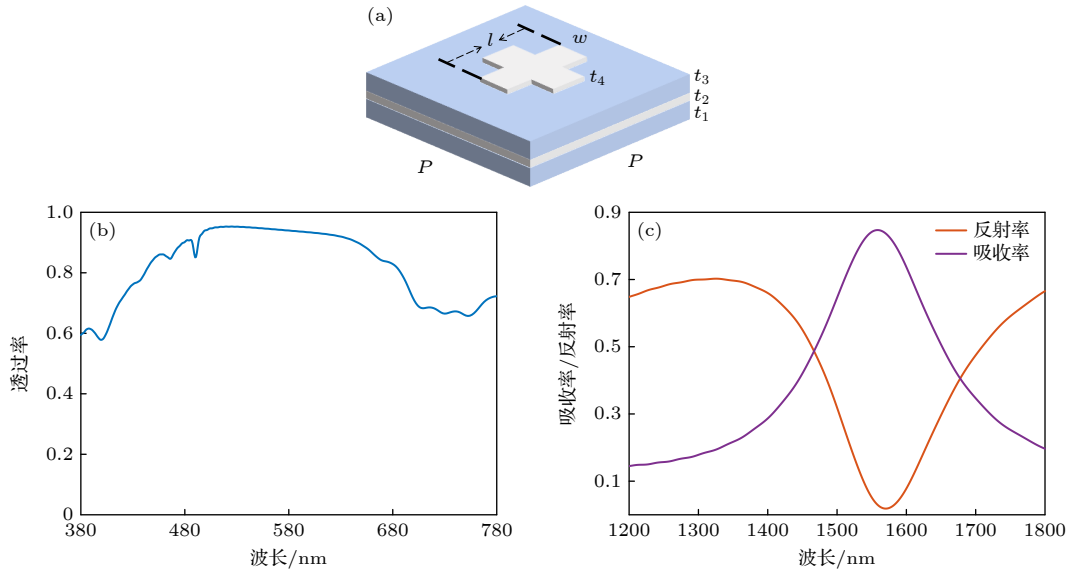


图 10 (a) 偏振不敏感结构示意图; (b) 380—780 nm 的透过率; (c) 1550 nm 处吸收率

Fig. 10. (a) Schematic diagram of polarization insensitive structure; (b) transmittance between 380 nm and 780 nm; (c) absorption/reflectance ratio of 1550 nm.

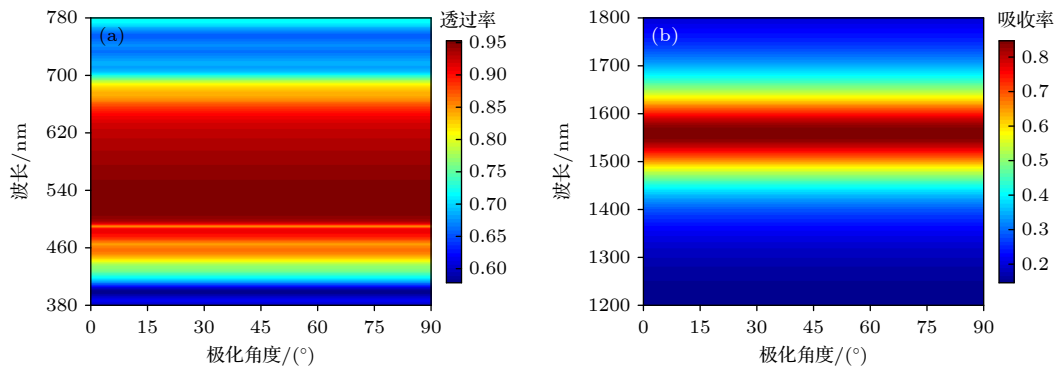


图 11 偏振角度对性能的影响 (a) 不同极化角度对 380—780 nm 透过率的影响; (b) 不同极化角度对 1550 nm 吸收率的影响

Fig. 11. Effect of polarization angle on property: (a) Effect of different polarization angles on the transmittance of 380—780 nm; (b) effect of different polarization angles on the absorption rate of 1550 nm.

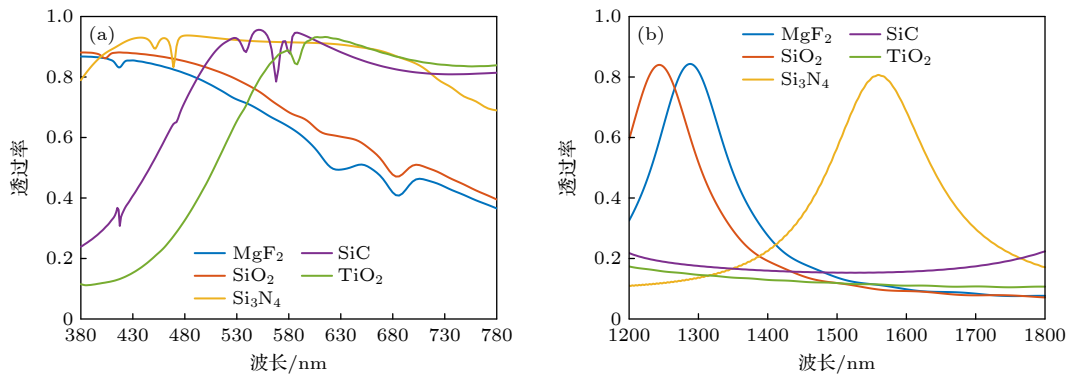


图 12 不同电介质材料对性能的影响 (a) 不同电介质材料对 380—780 nm 透过率的影响; (b) 不同电介质材料对 1550 nm 吸收率的影响

Fig. 12. Effects of different dielectric materials on properties: (a) Effect of different dielectric materials on transmittance of 380—780 nm; (b) effect of different dielectric materials on transmittance of 1550 nm.

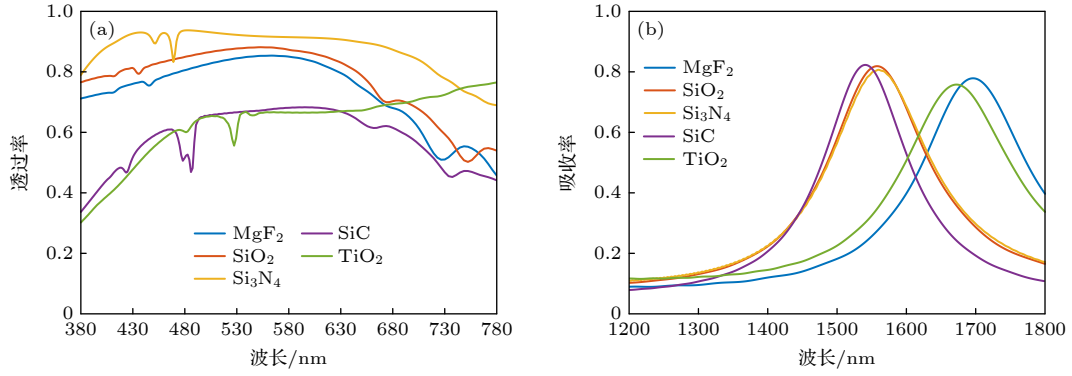


图 13 不同底层电介质材料对性能的影响 (a) 不同底层电介质材料对 380—780 nm 透过率的影响; (b) 不同底层电介质材料对 1550 nm 吸收率的影响

Fig. 13. Effects of different bottom dielectric materials on properties: (a) Effect of different bottom dielectric materials on transmittance of 380—780 nm; (b) effect of different bottom dielectric materials on transmittance of 1550 nm.

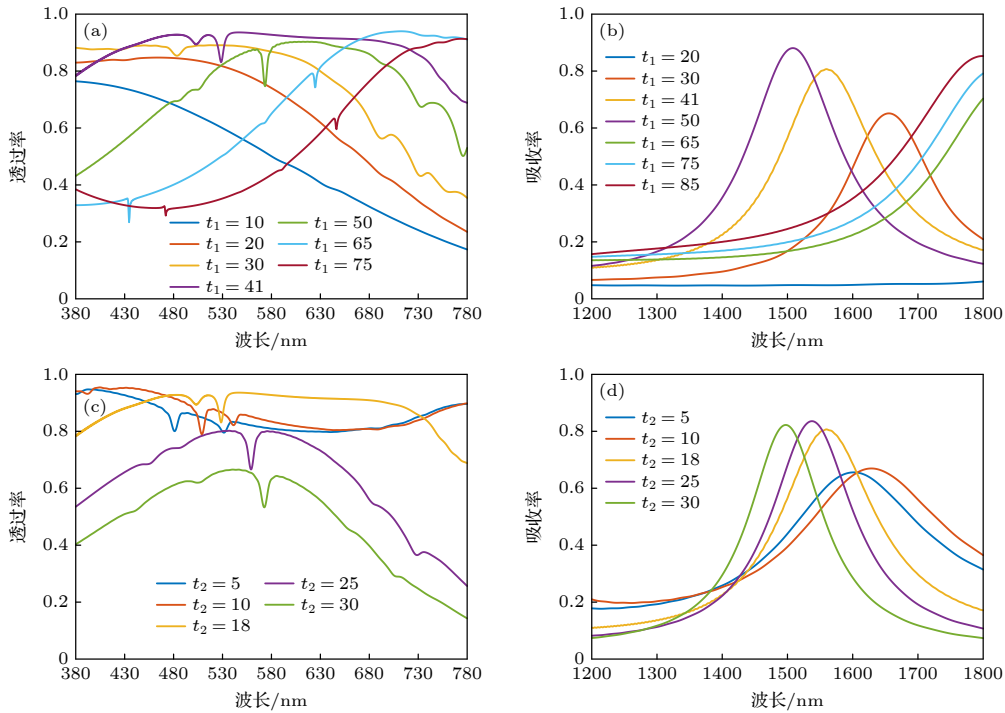


图 14 介质层厚度 t_1 和金属层厚度 t_2 对性能的影响 (a) t_1 对 380—780 nm 透过率的影响; (b) t_1 对 1550 nm 吸收率的影响; (c) t_2 对 380—780 nm 透过率的影响; (d) t_2 对 1550 nm 吸收率的影响

Fig. 14. Effect of medium layer thickness t_1 and metal layer thickness t_2 on properties: (a) Effect of t_1 on transmittance of 380—780 nm; (b) effect of t_1 on absorption rate of 1550 nm; (c) effect of t_2 on transmittance of 380—780 nm; (d) effect of t_2 on absorption rate of 1550 nm.

红外波段的吸收性能与 Si_3N_4 相差无几,但是在可见光波段的平均透过率显著下降,影响观测效果.选取 MgF_2 和 TiO_2 时,平均透过率下降且吸收峰红移,1550 nm 处的吸收率显著降低,达不到目标隐身要求.

可以看出单独变换某一层或同时变换上下两层电介质材料会导致整个超表面减反射膜的等效阻抗与自由空间的阻抗失配,表现为透过性能明显

降低.在近红外波段起吸收作用的是由中间金属 Ag 层、上层 Si_3N_4 以及顶层微纳结构金属 Ag 阵列组成的谐振吸收器,仅变换底层电介质材料对该吸收器的影响不大,但同时变换上层电介质材料时,介电常数的改变会影响等离子共振及 F-P 腔模式共振所处波长.

研究介质层厚度 t_1 和中间金属层厚度 t_2 对超表面减反射膜性能的影响.从图 14(a), (b) 可以看

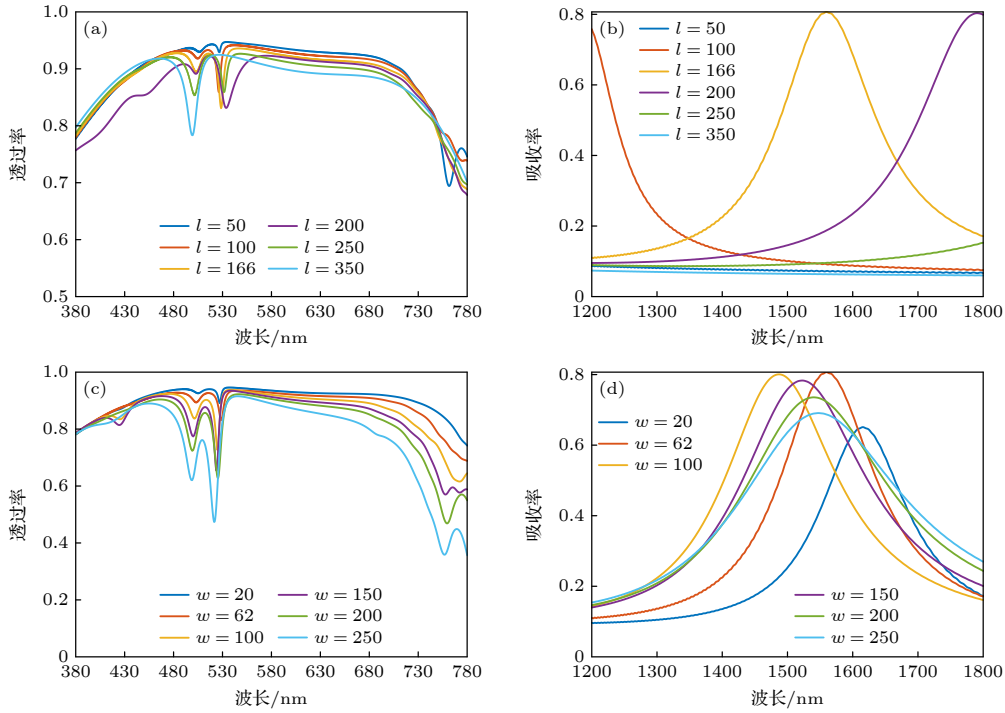


图 15 图案微纳结构的长 l 和宽 w 对性能的影响 (a) l 对 380—780 nm 透过率的影响; (b) l 对 1550 nm 吸收率的影响; (c) w 对 380—780 nm 透过率的影响; (d) w 对 1550 nm 吸收率的影响

Fig. 15. Effects of length l and width w on performance of patterned micro-nano structures: (a) Effect of l on transmittance of 380—780 nm; (b) effect of l on absorption rate of 1550 nm; (c) effect of w on transmittance of 380—780 nm; (d) effect of w on absorption rate of 1550 nm.

出, 随着 t_1 增大, 可见光波段的透射效果得到明显提升, 当 t_1 增大到 50 nm 之后, 可见光透射效果显著下降, 且透射窗口有红移趋势. 在近红外波段, t_1 在 20 nm 厚度以下几乎不会产生吸收, 在 20—50 nm 之间吸收峰随着 t_1 增大而蓝移且强度增大, 在 50 nm 之后超表面减反射膜在 1550 nm 目标波长上的吸收率大幅度降低. 从图 14(c), (d) 可以看出, 中间金属层厚度 t_2 对可见光透射效果的影响较大, 透射率随着 t_2 的增大而降低, 在近红外的吸收峰因为 t_2 的增大而蓝移.

研究顶层微纳结构金属 Ag 的长 l 和宽 w 对超表面减反射膜性能的影响. 从图 15(a), (c) 可以看出, 长方形 Ag 块的长度 l 和宽度 w 增大会导致超表面减反射膜在可见光波段的平均透过率呈下降趋势. 从图 15(b), (d) 可以看出, 吸收峰随着 l 的增大而红移且强度变化不大, 随着 w 增至 150 nm, 吸收峰蓝移且强度增大, w 增大超过 150 nm 后吸收峰强度降低并有红移趋势. 由图 14 和图 15 可知, 同时兼顾可见光波段和近红外目标波长上的高透射和低反射高吸收的性能需要各部分参数的相互配合, 遗传算法在设计超表面减反射膜当中起到

重要作用, 比扫描参数的传统方法更有指向性地朝着最优参数组合方向优化, 大大降低了时间成本.

5 结 论

本文结合 D/M/D 多层膜系特性加入图案化微纳结构金属, 利用遗传算法设计了超表面减反射膜, 其从功能上可以分为两部分: 第一部分由下层 Si_3N_4 、中间层金属 Ag 以及上层 Si_3N_4 组成的与自由空间阻抗相匹配的减反增透薄膜; 第二部分是由中间层金属 Ag、上层 Si_3N_4 以及顶层微纳结构 Ag 阵列组成的谐振吸收器, 激发出局域型等离子引起近红外吸收. 在一个周期中, 顶层微纳结构金属的占空比仅为 8.4%, 可以在 1550 nm 处产生吸收峰来实现抗反射效果的同时, 不影响可见光电磁波的透过性能. 本文所设计的超表面减反射膜总厚度仅为 110 nm, 具有质轻且薄的特点, 所选取的材料丰富可得, 性能稳定, 结构设计简单而易于制备. 本文将遗传算法应用到结构的逆向设计上, 对结构参数进行优化, 数值模拟仿真的结果表明, 该超表面减反射膜在 380—780 nm 的平均透过率为

88%, 最大透过峰值可达 94%; 在 1550 nm 处的反射率仅为 10%, 同时吸收率可达 80%. 为了更切合实际应用场景的需求, 对结构进行改进, 设计了十字交叉型金属阵列, 获得偏振不敏感特性. 改进结构组成的超表面减反射膜可实现可见光平均透过率 82%, 1550 nm 处反射率 5% 的效果. 与普通的减反增透薄膜相比, 两种超表面减反射膜可以在不影响成像质量即可见光高透过的情况下, 实现对特定波长的激光隐身的效果; 与无透过的窄带吸波器相比, 超表面减反射膜不仅实现了近红外激光波长的高吸收效果, 还可以保证可见光高透过的性能. 除此之外, 通过调整顶层金属的几何参数, 可以选择性地在特定激光波长上实现低反射高吸收的目标, 这表明本文所提出的超表面减反射膜具有灵活可调节的特点, 通过调节单一结构的几何参数就可以实现目标波长上的低反射高吸收效果, 这为军事上反猫眼探测策略提供了一种方案.

感谢国防科技大学杨俊波教授与广西大学张振荣教授以及其他作者的讨论.

参考文献

- [1] Wang X G 2011 *Foreign Tanks* **8** 38 (in Chinese) [王雄高 2011 国外坦克 **8** 38]
- [2] Sun W, Wang L F 2018 *Electron Mass* **10** 14 (in Chinese) [孙武, 王良峰 2018 电子质量 **10** 14]
- [3] Yin K, Wang L S, Wu W M 2010 *Sichuan Armam. Eng. J.* **31** 10 (in Chinese) [殷科, 王良斯, 吴武明 2010 四川兵工学报 **31** 10]
- [4] Shi L, Wang H 2010 *Ele-Optic Technol. Appl.* **25** 16 (in Chinese) [石岚, 王宏 2010 光电技术应用 **25** 16]
- [5] Xie J H, Huang S C, Wei D Z, Zhang Z Y 2022 *Acta Opt. Sin.* **42** 85 (in Chinese) [谢家豪, 黄树彩, 韦道知, 张翌宇 2022 光学学报 **42** 85]
- [6] Zhang Q, Lin T, Deng Z L, Xie T P, Jiang C H, Zhu J G, Ye Z Y 2019 *Security techn. Appl. China* **01** 66 (in Chinese) [张权, 林涛, 邓泽霖, 解天鹏, 姜成昊, 朱精果, 叶征宇 2019 中国安全防范技术与应用 **01** 66]
- [7] Li X D, Wang L P, Mi J J, Li S Q 2022 *Laser Infrared* **52** 559 (in Chinese) [李旭东, 王立平, 米建军, 李双全 2022 激光与红外 **52** 559]
- [8] Xing J H, Jiao M X, Liu Y 2014 *Chin. Opt. Lett.* **41** 39 (in Chinese) [刑俊红, 焦明星, 刘芸 2014 中国激光 **41** 39]
- [9] Cheng X, Jiang H W, Feng Y 2022 *Infrared Laser Eng.* **51** 99 (in Chinese) [程鑫, 姜华卫, 冯衍 2022 红外与激光工程 **51** 99]
- [10] Li Y F, Liu Z W, Zhang T Y, Zheng C T, Wang Y D 2020 *Acta Opt. Sin.* **40** 144 (in Chinese) [李亚飞, 刘志伟, 张天宇, 郑传涛, 王一丁 2020 光学学报 **40** 144]
- [11] Chang J Y, Xiong C, Hao Q, Wang C L, Zhu L N, Pan Z P, Wang Z N, Liu S P, Ma X Y 2023 *Acta Opt. Sin.* **43** 112 (in Chinese) [常津源, 熊聪, 祁琼, 王翠鸾, 朱凌妮, 潘智鹏, 王振诺, 刘素平, 马骁宇 2023 光学学报 **43** 112]
- [12] Wen Q, Wang C M, Li Y, Yu Y, Zhang K, Zhang H B, Zhu C 2020 *Laser Infrared* **50** 948 (in Chinese) [温强, 王超梅, 李尧, 余洋, 张昆, 张浩彬, 朱辰 2020 激光与红外 **50** 948]
- [13] Li P, Zhu L Q, Lu H 2021 *Opt. Techn.* **47** 28 (in Chinese) [李攀, 朱良秋, 卢宏 2021 光学技术 **47** 28]
- [14] Ji X S, Zhang M, Yang P F, Sun G B, Jiang S L, Yang L 2021 *Laser Optoelectron. P.* **58** 124 (in Chinese) [季雪淞, 张锦, 杨鹏飞, 孙国斌, 蒋世磊, 杨柳 2021 激光与光电子学进展 **58** 124]
- [15] Zheng Z R, Gu P F, Chen H X, Tao Z H, Ai M L, Zhang M J, Tang J F 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 2026 (in Chinese) [郑臻荣, 顾培夫, 陈海星, 陶占辉, 艾曼灵, 张梅骄, 唐晋发 2009 光学学报 **29** 2026]
- [16] Kou L X, Guo X Z, Jiang W S, Wu L, Liu S P, Yang H T 2019 *Chinese ceramic Industry* **26** 5 (in Chinese) [寇立选, 郭兴忠, 蒋文山, 吴兰, 刘盛浦, 杨海涛 2019 中国陶瓷工业 **26** 5]
- [17] He C M, Fu X H, Sun Y L, Li M X 2009 *Chin. Opt. Lett.* **36** 1550 (in Chinese) [贺才美, 付秀华, 孙钰林, 李美萱 2009 中国激光 **36** 1550]
- [18] Tang J F, Gu P F 2006 *Modern Optical Thin Film Technology* (Hangzhou: Zhejiang University Press) p154 (in Chinese) [唐晋发, 顾培夫, 刘旭 著 2006 现代光学薄膜技术 (杭州: 浙江大学出版社) 第 154 页]
- [19] Wang Z J 2018 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [王子君 2018 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [20] Wu Y J, Luo J, Pu M B, Liu B, Jin J J, Li X, Ma X L, Guo Y H, Guo Y C 2022 *Opt. Express* **37** 17259
- [21] Liu Y D, Li Z H, Yu J Z 2019 *Physics* **48** 82 (in Chinese) [刘耀东, 李志华, 余金中 2019 物理 **48** 82]

Research on realizing high permeability and laser stealth compatibility in visible light band with dielectric/metal/dielectric film system*

Nong Jie¹⁾²⁾ Zhang Yi-Yi¹⁾²⁾ Wei Xue-Ling¹⁾²⁾ Jiang Xin-Peng²⁾
 Li Ning¹⁾²⁾ Wang Dong-Ying²⁾³⁾ Xiao Si-Yang¹⁾²⁾ Chen Hong-Ting²⁾³⁾
 Zhang Zhen-Rong^{1)†} Yang Jun-Bo^{2)‡}

1) (*Key Laboratory of Multimedia Communication and Network Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China*)

2) (*Center of Material Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

3) (*College of Sciences, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China*)

(Received 25 May 2023)

Abstract

The “cat’s eye effect” in the optical window of all kinds of photoelectric equipment is the main basis of a laser active detection system, which poses a great threat to military equipment and combatants. However, under the condition of ensuring high visible transmittance, the sniper stealth scheme for anti-laser active detection remains to be discussed. In this paper, genetic algorithm is used to inverse design the metasurface anti-reflection film. The three-layer anti-reflection film are composed of Si_3N_4 and Ag, and rectangular array of metal micro-nano structures is added on the top layer to form a wavelength selective absorber, so as to achieve the effect of low reflection and high absorption at laser wavelength. By combining the device design with genetic algorithm, the parameter combination that best possesses the target performance of the device is obtained. The average transmittance in a wavelength range of 380–780 nm is 88%, and a maximum transmittance peak is 94%. The reflectance and the absorption rate at 1550 nm are achieved to be 10% and 80%, respectively. In order to better meet the requirements for practical application, we further design the cross metal array to obtain polarization insensitive characteristics. The metasurface anti-reflective membrane with improved structure can achieve an average visible transmittance of 82% and a reflectance of 5% at 1550 nm. The two metasurface anti-reflection films designed in this work do not require additional devices, and the imaging quality can be guaranteed. At the same time, it can effectively reduce the laser echo energy, so as to achieve the effect of high-quality visible light transmittance and laser stealth compatibility.

Keywords: dielectric/metal/dielectric film systems, laser stealth, surface plasmon polariton, genetic algorithm

PACS: 78.67.-n, 78.67.Pt, 78.20.-e

DOI: [10.7498/aps.72.20230855](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230855)

* Projects funded by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12272407, 62275269, 62275271), the National Key R & D Program of China (Grant No. 2022YFF0706005), and the Guangdong-Guangxi Joint Scientific Key Fund, China (Grant No. 2021GXNSFDA076001).

† Corresponding author. E-mail: zrz76@gxu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: yangjunbo@nudt.edu.cn



电介质/金属/电介质膜系实现可见光波段高透兼容激光隐身研究

农洁 张伊祎 韦雪玲 姜鑫鹏 李宁 王冬迎 肖思洋 陈泓廷 张振荣 杨俊波

Research on realizing high permeability and laser stealth compatibility in visible light band with dielectric/metal/dielectric film system

Nong Jie Zhang Yi-Yi Wei Xue-Ling Jiang Xin-Peng Li Ning Wang Dong-Ying Xiao Si-Yang
Chen Hong-Ting Zhang Zhen-Rong Yang Jun-Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 177802 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230855

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230855>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金属基底上光学偶极纳米天线的自发辐射宽带增强: 表面等离子激元直观模型

Broadband enhancement of spontaneous emission by optical dipole nanoantenna on metallic substrate: An intuitive model of surface plasmon polariton

物理学报. 2022, 71(11): 118101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20212290>

基于塔姆激元-表面等离子极化激元混合模式的单缝加凹槽纳米结构的增强透射

Enhanced optical transmission by exciting hybrid states of Tamm and surface plasmon polaritons in single slit with multi-pair groove nanostructure

物理学报. 2018, 67(10): 107104 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180117>

高导热聚酰亚胺电介质薄膜研究进展

Research progress of high thermal conductivity polyimide dielectric films

物理学报. 2022, 71(23): 233601 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221398>

光子角动量在环形金属纳米孔异常透射过程中的作用

Role of optical angular momentum in enhanced transmission process of plasmonic coaxial nanoring aperture

物理学报. 2019, 68(7): 077801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182017>

表面等离子极化激元的散射及波前调控

Scatterings and wavefront manipulations of surface plasmon polaritons

物理学报. 2020, 69(15): 157804 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200614>

基于双层阿基米德螺线的表面等离子激元涡旋产生方法

Generation of surface plasmon vortices based on double-layer Archimedes spirals

物理学报. 2019, 68(23): 234201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190747>