

基于双尺度4分离层优化的石墨烯太赫兹宽带吸波结构

檀立刚 骆明伟 李捷

Wide-band terahertz absorbing structure with graphene based on dual-scale four separation layers optimization

TAN Ligang, LUO Mingwei, LI Jie

引用本文:

檀立刚, 骆明伟, 李捷. 基于双尺度4分离层优化的石墨烯太赫兹宽带吸波结构[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 6–16. DOI: 10.5768/JAO202344.0101002

TAN Ligang, LUO Mingwei, LI Jie. Wide-band terahertz absorbing structure with graphene based on dual-scale four separation layers optimization[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1): 6–16. DOI: 10.5768/JAO202344.0101002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0101002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于石墨烯复合材料的近红外光驱动的柔性可调光栅

Near-infrared light-controlled tunable grating based on graphene/elastomer composites

应用光学. 2018, 39(6): 885–889 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0605002>

太赫兹波通信技术研究进展

Research progress on terahertz communication technology

应用光学. 2018, 39(1): 12–21 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0101003>

基于高斯混合模型的液体电磁参数太赫兹测量方法

Terahertz measurement method of liquid electromagnetic parameters based on Gaussian mixture model

应用光学. 2021, 42(6): 982–988 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601006>

太赫兹源发散角测量技术研究

Research on divergence angle measurement technique of terahertz sources

应用光学. 2021, 42(3): 499–503 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0303001>

大尺寸太赫兹平顶波束的产生研究

Generation of large-size terahertz flat-topped beam

应用光学. 2021, 42(4): 622–629 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401008>

用太赫兹时域光谱法检测沙粒中的微量原油

Detection of trace crude oil in surface sands by THz time-domain spectroscopy

应用光学. 2020, 41(2): 361–365 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0203004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 01-0006-11

基于双尺度 4 分离层优化的石墨烯 太赫兹宽带吸波结构

檀立刚, 骆明伟, 李 捷

(四川九洲电器集团有限责任公司 技术创新中心, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 为实现对未来远程太赫兹雷达的高效对抗与隐身, 针对典型太赫兹雷达工作频率设计了一种石墨烯太赫兹宽带吸波结构。宽带吸波结构以表层金属层/石墨烯层/介质层/底层金属层为基本吸波结构单元, 利用遗传算法对双尺度基本吸波结构单元进行 4 分离层优化设计, 确定宽带吸波结构的各层结构参数。仿真结果表明: 宽带吸波结构在 0.138 THz~2 THz 频率范围内吸收效率优于 80%, 在 0.157 THz~2 THz 频率范围内吸收效率优于 97.46%, 典型太赫兹雷达工作频率处吸收效率均优于 92.27%, 满足太赫兹雷达对抗与隐身要求。

关键词: 太赫兹雷达; 石墨烯; 隐身对抗; 宽带吸收

中图分类号: TN202; O43

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0101002

Wide-band terahertz absorbing structure with graphene based on dual-scale four separation layers optimization

TAN Ligang, LUO Mingwei, LI Jie

(Technological Innovation Center, Sichuan Jiuzhou Electric Group Co., Ltd., Mianyang 621000, China)

Abstract: To realize high-efficiency countermeasures and stealth for future remote terahertz radar, a wide-band terahertz absorbing structure with graphene was designed for typical operating frequencies of terahertz radar. The basic absorbing structure unit of wide-band absorbing structure was the surface metal layer/graphene layer/dielectric layer/bottom metal layer, and the dual-scale four separation layers were designed and optimized to certain the structure parameters of each layer using the genetic algorithm. Simulation results show that the absorption efficiency of wide-band absorbing structure is better than 80% in the frequency range of 0.138 THz~2 THz, 97.46% in the frequency range of 0.157 THz~2 THz, and 92.27% at the typical terahertz radar operating frequency, which satisfy the demands of countermeasures and stealth for terahertz radars.

Key words: terahertz radar; graphene; stealth countermeasure; wide-band absorption

引言

太赫兹雷达具有透射性好、方向性强、频谱宽、分辨率高等特点^[1], 有望成为在未来战争中改变战争格局的颠覆性技术, 尤其是在对四/五/六代隐身战机的反隐身探测方面将发挥重大作用, 受到各国政府高度重视和广泛关注, 纷纷将太赫兹

技术列入颠覆性技术和战略需求。自 20 世纪 90 年代起, 美国先后开展了 0.14 THz、0.22 THz、0.58 THz、0.67 THz、1.14 THz、1.57 THz 等工作频段的太赫兹雷达研究, 验证了太赫兹雷达的可行性, 并不断提升太赫兹雷达的作用距离^[2-3]。2017 年, DARPA 开发并报道了视频合成孔径雷达(ViSAR),

收稿日期: 2022-04-22; 修回日期: 2022-06-28

基金项目: 某纵向预研项目 (2019408XXXX)

作者简介: 檀立刚 (1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事红外探测与对抗、太赫兹雷达与对抗、光学隐身超材料等研究。

E-mail: tlgbb@163.com

通信作者: 骆明伟 (1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电子对抗、雷达及对抗、光电对抗等研究。

E-mail: 30233441@qq.com

工作频段 0.23 THz, 作用距离可达 10 km, 成功实现了可透视云层的视频高分辨率成像和机动定位等功能。2018 年, DARPA 进一步开发出了小型化、低成本新型太赫兹成像雷达(ASTIR), 具有高帧率、高分辨率、非运动成像能力, 可实现广域视频监视^[4-5]。随着太赫兹技术的进步, 太赫兹雷达已逐步应用于空间/临近空间平台, 太赫兹雷达大气远程探测已不再遥不可及^[6-7]。

纵观太赫兹雷达发展历程, 太赫兹雷达典型工作频率有 0.14 THz、0.22 THz、0.58 THz、0.67 THz、1.14 THz 和 1.57 THz, 主要集中在 0.1 THz~2 THz 低频波段。鉴于未来远程太赫兹雷达对现有装备构成的潜在巨大威胁, 如何实现对太赫兹雷达的高效对抗与隐身成为亟待解决的现实问题。超材料吸波结构的出现与快速发展为太赫兹雷达对抗与隐身提供了可行的技术途径, 有望成为太赫兹雷达对抗与隐身的有效手段。现有多数超材料吸波结构仅对单一频率较窄波段范围内实现近完美吸收, 无法满足太赫兹雷达对抗与隐身所需的宽带和高吸收效率要求, 超材料宽带吸收结构设计又往往比较复杂, 已成为超材料吸波结构研究的热点和难点。在多波段或宽波段吸收器研究方面, Tao 等人^[8]通过优化设计, 实现了一种在 1.4 THz 和 2.9 THz 处理论吸收率达 99.99% 的双波段太赫兹吸收器, 在 1.4 THz 处吸收率为 85%, 在 3.0 THz 处吸收率为 94%。Wen 等人^[9]设计了一种双波段太赫兹吸收器, 在 0.50 THz 和 0.94 THz 处吸收率可达 99%。Ma 等人^[10]设计了一种太赫兹双波段吸收器, 在 2.7 THz 和 5.2 THz 处吸收率约 70%。Shen 等人^[11-12]设计了一种太赫兹波段 3 波段吸收器, 在 0.5 THz、1.03 THz 和 1.71 THz 处吸收率优于 96%。邹涛波等人设计了一种多波段太赫兹吸收器, 在 4.5 THz~5.7 THz 波段内吸收率优于 80%^[13]。Cui 等人^[14]实验验证了一种长波红外宽波段吸收器, 实现了 7 μm ~13 μm 波长范围的宽波段近完美吸收。Cui 等人^[15]设计了一种中波红外宽波段吸收器, 在 3 μm ~5.5 μm 波长范围内垂直入射时吸收率大于 95%。Ding 等人^[16]设计了一种金字塔宽带吸收器, 在 7.8 GHz 到 14.7 GHz 范围内, 垂直入射时吸收率大于 90%。在石墨烯动态调控方面, 顾钰等人^[17]设计了一种太赫兹宽带动态调节吸收器, 实现了吸收率优于 90%, 频率范围从 2.04 THz~3.53 THz 和 3.15 THz~4.24 THz 连续动态调节。Xiao 等人^[18]设计并验证了一种基于石墨烯-垂直排列碳

纳米管杂化物的柔性超宽带太赫兹吸波器, 在 0.2 THz~3.0 THz 范围内平均功率吸收率为 98.6%。Liu 等人^[19]提出了一种基于二氧化钒-石墨烯混合结构的双波段可调谐吸波器, 通过改变二氧化钒金属或介电状态以及调节石墨烯费米能级, 成功实现了在 0.4 THz 处吸收率 45.3%~94.5% 和 1.0 THz 处吸收率 31%~96.3% 的动态调控。Zhang 等人^[20]设计了一种具有波段切换能力的超材料完美吸收器, 实现了 500 nm~1 700 nm 波长范围宽带吸收和 589 nm、1 097 nm 处双波长窄带吸收之间的波段切换, 在 500 nm~1 700 nm 范围内宽带吸收率优于 93%, 在 589 nm 和 1 097 nm 处吸收率 100%, 具备极化独立性和角度不敏感性。Bao 等人^[21]利用图案化石墨烯和多层膜系结构设计了一种具备调控能力的多波段石墨烯超材料吸波器, 实现了在 0.139 THz、0.415 THz、0.685 THz 和 0.931 THz 处的完美吸收, 分析了石墨烯调控效能。Bao 等人^[22]在多层膜系上对石墨烯层图案化实现了 4 波段角度不敏感的石墨烯超材料吸波器, 在 3.67 THz、4.73 THz、5.90 THz 和 6.94 THz 处具备角度不敏感性的窄带完美吸收效能。Wang 等人^[23]设计了峰值可调的石墨烯基多腔对波导系统, 在 5 μm ~8 μm 红外波段实现了多吸收峰值的有效调控。

综上所述, 目前太赫兹宽带超材料吸波器结构大多集中在太赫兹高频波段, 存在高吸收率频率范围展宽较小、高吸收不连续等问题, 典型太赫兹雷达工作频段范围内的宽带超材料吸波器较少, 石墨烯可作为调控手段实现对吸波带宽的有效动态调控。本文针对典型太赫兹雷达工作频率范围 0.1 THz~2 THz, 设计了一种石墨烯太赫兹宽带吸波结构, 具有对 0.1 THz-2 THz 范围内入射太赫兹波连续吸收效率优于 80% 的吸波效能, 满足太赫兹雷达对抗与隐身需求。

1 宽带吸波结构设计

传统超材料吸波结构通常为金属/介质/金属 3 层结构形式, 只有当表面金属层结构、介质层和底面金属反射层构成的等效谐振电路的等效阻抗与自由空间阻抗匹配时, 才可实现特定频率附近窄带近完美吸收。超材料宽带吸收主要利用多吸收峰的叠加吸收效应, 由不同尺寸的表面层金属结构在表面等离子元作用下实现多峰吸收。多峰吸收的叠加能否满足设计要求取决于多吸收峰的吸收带宽, 每个吸收峰的吸收带宽又与介质层的

厚度紧密相关。因此,要达到宽带连续吸收性能要求,需要开展多尺度多分离层结构设计来实现。

1.1 基本吸波结构单元设计

为达到吸波频率范围动态可控目的,在设计基本吸收结构单元时,在传统的金属/介质/金属3层结构基础上,表面金属层和介质层中间插入均匀单层石墨烯层作为调控层,从而构成金属层/石墨烯层/介质层/底层金属层的4层基本吸波结构单元,如图1所示。

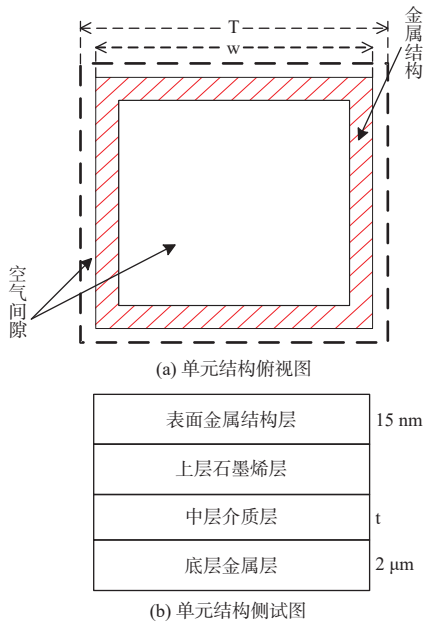


图1 金属/石墨烯/介质/金属4层基本吸波结构单元示意图
Fig.1 Schematic diagram of four layers basic absorbing unit of metal/graphene/dielectric/metal

基本吸波结构单元的表面金属层结构采用正方环形,材质选用镍镉合金,厚度为15 nm,色散模型使用金属Drude模型: $\varepsilon(\omega) = 1 - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\omega\Gamma)$, 等离子体频率 ω_p 和电子碰撞频率 Γ 分别为 2.90×10^{15} rad/s 和 1.65×10^{14} Hz。上层的均匀单层石墨烯层厚度为0.334 nm,由于太赫兹波最短波长为30 μm,远远大于石墨烯层厚度,仿真时一般将石墨烯层厚度设置为1 nm,不会影响仿真结果。中间介质层采用聚酰亚胺,因为大部分非金属材料在太赫兹波段损耗均极低,介电常数设置为3.5。底层金属反射层选用铝,厚度为2 μm,电导率为 4×10^7 S/m^[17]。在表面等离子元作用下,表面金属和底层金属层形成金属等效谐振电路,石墨烯层和底层金属层形成石墨烯等效谐振电路,2个等效谐振电路并联形成金属层/石墨烯层/介质层/底层金属层对应的等效谐振电路,如图2所示。

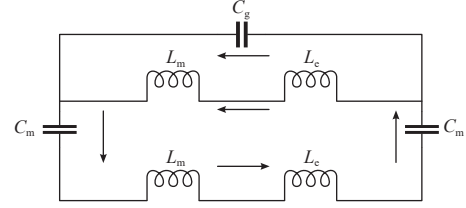


图2 等效谐振电路示意图

Fig.2 Schematic diagram of equivalent resonance circuit

下面详细阐述等效谐振电路参数推演方法^[24]。

1) 表面金属层结构参数确定

表面金属层结构参数包括表面金属层的结构形状、结构尺度、层厚度,结构形状选用正方环形,可增加结构尺度,内径边长为外径边长的3/4。表面金属层的结构尺度与吸收频率对应的吸收波长相关,设计为吸收波长的1/4,即:

$$\lambda = \frac{c}{f}, w = \frac{1}{4}\lambda \quad (1)$$

表面金属层厚度应小于金属趋肤深度,设计为小于金属趋肤深度的1/3,即:

$$\delta = \frac{\lambda}{4\pi k_a}, h = \frac{1}{3}\delta \quad (2)$$

式中: w 为亚波长金属结构宽度; c 为真空电磁波速度, 3×10^8 m/s; f 为特征吸收频率; λ 为特征波长; δ 为金属趋肤深度,约70 nm; k_a 为金属的消光系数; h 为表面金属层的厚度,设置为15 nm。

2) 金属等效谐振电路参数推演

相邻表面层金属周期结构之间形成间隙电容 C_g ,可表示为

$$C_g = \varepsilon_0 h / (T - w)^2 \quad (3)$$

式中: ε_0 为自由空间介电常数,即真空电导率; h 为表面金属层的厚度; T 为单元结构边长; w 为正方环形外径边长,内径边长为外径的3/4。

表面层金属结构与底层金属层形成平行平板电容 C_m ,可表示为

$$C_m = c_1 \varepsilon_d \varepsilon_0 S / t \quad (4)$$

式中: c_1 为调节因子,取0.2; ε_0 为自由空间介电常数; ε_d 为介质层介电常数; S 为表面层金属结构面积; t 为介质层厚度。

表面层金属结构的漂移电子在入射电磁波作用下形成动态电感 L_c ,可表示为

$$L_c = -S / (\omega^2 \delta \varepsilon_0) \cdot (\varepsilon' / (\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2)) \quad (5)$$

式中: ω 为入射电磁波角频率; δ 为金属趋肤深度; ε' 和 ε'' 分别为金属材质介电常数的实部和虚部。

表面层金属结构与底层金属层之间形成互感 L_m ,可表示为

$$L_m = 0.5\mu_0 S \cdot t \quad (6)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; S 为金属结构面积; t 为介质层厚度。

在表面等离子元作用下, 表面金属层/介质层/底层金属层形成等效谐振电路, 等效阻抗 Z_m 为

$$Z_m = \frac{i\omega(L_m + L_e)}{1 - \omega^2 C_g(L_m + L_e)} + \frac{2}{i\omega C_m} + i\omega(L_m + L_e) \quad (7)$$

3) 石墨烯等效谐振电路参数推演

类似于金属等效谐振电路参数推演过程, 根据下列公式确定石墨烯等效谐振电路的等效电路参数:

$$L_{m_g} = 0.5\mu_0 S_g \cdot t \quad (8)$$

$$L_{e_g} = -S/(\omega^2 \delta \epsilon_0) \cdot (\epsilon'_g/(\epsilon_g'^2 + \epsilon_g''^2)) \quad (9)$$

$$C_g = \epsilon_0 h/(T - w)^2 \quad (10)$$

$$C_m = c_1 \epsilon_d \epsilon_0 S/t \quad (11)$$

$$Z_{m_g} = \frac{i\omega(L_{m_g} + L_{e_g})}{1 - \omega^2 C_g(L_{m_g} + L_{e_g})} + \frac{2}{i\omega C_m} + i\omega(L_{m_g} + L_{e_g}) \quad (12)$$

其中, (9) 式较为关键, 需要根据石墨烯光电特性计算石墨烯层的介电常数。石墨烯二维表面电导率 σ_{2D} 为

$$\sigma_{2D} \approx \frac{ie^2 k_B T}{\pi \hbar (\omega + i2\Gamma)} \left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln(e^{-\frac{\mu_c}{k_B T}} + 1) \right] + \frac{ie^2}{4\pi \hbar} \ln \left[\frac{2|\mu_c| - (\omega + i2\Gamma)\hbar}{2|\mu_c| + (\omega + i2\Gamma)\hbar} \right] \quad (13)$$

式中: $k_B T$ 为热能; μ_c 为石墨烯化学势; Γ 为带电粒子散射率; $\hbar$ 、 k_B 和 e 分别为普朗克常量、玻尔兹曼常数和电子电荷。

石墨烯的化学势 μ_c 由载流子密度 n_0 决定, 即:

$$n_0 = \frac{2}{\pi \hbar^2 v^2} \int_0^{+\infty} \epsilon [f_0(\epsilon - \mu_c) - f_0(\epsilon + \mu_c)] d\epsilon \quad (14)$$

式中: v 为费米速度, 约为 1×10^6 m/s; $f_0 = (1 + e^{(\epsilon - \mu_c)/k_B T})^{-1}$ 为费米-狄拉克分布。载流子密度可以通过石墨烯上的偏置电压 V 进行控制:

$$n_0 = \epsilon_d \epsilon_0 \cdot V/(et) \quad (15)$$

式中: n_0 为载流子密度; ϵ_d 为介质材料的介电常数; t 为介质层厚度; V 为偏置电压。

石墨烯三维电导率 $\sigma_{3D} = \sigma_{2D}/\delta_g$, δ_g 为石墨烯厚度, 石墨烯层介电常数 ϵ_g 为

$$\epsilon_g = 1 + i\sigma_{2D}/(\epsilon_0 \omega \delta_g) \quad (16)$$

$$\epsilon'_g = \text{real}(\epsilon_g), \quad \epsilon''_g = \text{imag}(\epsilon_g) \quad (17)$$

4) 基本吸波结构单元等效阻抗及吸收率

表面金属层/石墨烯层/介质层/底层金属层基本单元结构的等效电阻 Z 可表示为

$$Z = \frac{Z_m \cdot Z_{m_g}}{Z_m + Z_{m_g}} \quad (18)$$

基本吸收结构单元的吸收率由 $A = 1 - R - T$ 计算得出。其中 T 代表透射率, R 代表反射率, 即:

$$R = \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2 \quad (19)$$

$Z_0 \approx 377 \Omega$ 为自由空间阻抗。因为底层金属反射层具有足够的厚度使透过率为零, 吸收率仅与反射率有关, 当 $Z = Z_0$ 时, 可达到完美吸收效果 $A = 1$ 。等效电阻 Z 可以通过改变石墨烯层的偏置电压进行调控, 从而达到调控吸收频率范围的目的。

1.2 多尺度多分离层结构优化

上述单一尺寸的基本吸收结构单元仅能实现设计波长的窄带近完美吸收, 还需进行多分离层优化设计, 以拓展吸收带宽。由于表面等离子元效应受入射电磁波频率影响, 单一尺寸的宽带吸收拓展能力有限, 超宽带吸收需要多尺度表面金属结构和多分离介质层结构共同完成。其中, 多尺度表面金属结构用于典型特征吸收频率的近完美吸收, 多分离层结构用于拓展多吸收峰的吸收带宽, 而每个基本结构单元的表面金属层结构尺寸、多分离层的介质层厚度及层数等多个参数需要不断尝试, 花费过多精力且效果较低。本文在吸收带宽和吸收效率的约束下, 利用智能优化算法对多尺度、多分离层结构参数进行全局优化, 从而确定最终结构参数。基于遗传算法多分离层结构优化流程如图3所示。

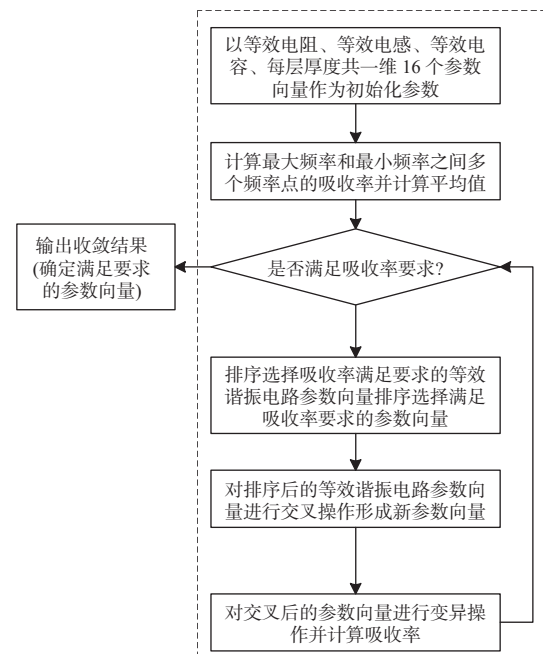


图3 基于遗传算法多分离层结构优化流程

Fig. 3 Flow chart of multi-layer structure optimization by genetic algorithm

为尽量降低工艺复杂度,对单一尺度基本吸波结构单元进行 4 分离层结构设计。将每层的等效电阻 $[Z_1, Z_2, Z_3, Z_4]$ 、等效电感 $[L_1, L_2, L_3, L_4]$ 、等效电容 $[C_1, C_2, C_3, C_4]$ 、介质层厚度 $[d_1, d_2, d_3, d_4]$ 构成的一维向量作为初始化参数,输入至遗传算法优化程序中,即初始化参数 $para = [Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, L_1, L_2, L_3, L_4, C_1, C_2, C_3, C_4, d_1, d_2, d_3, d_4]$,遗传算法输出结果为优化后各分离层的等效电阻、等效电感、等效电容和介质层厚度。

为实现“满足 0.1 THz~2 THz 波段范围内吸收率优于 80%”的设计目标,项目组设计了以金属层/石墨烯层/介质层/底层金属层为基本结构单元的双尺度 4 分离层结构,共计 25 层小层结构。其中,表面金属层、石墨烯层和介质层均为 8 层,底层金属反射层为 1 层。表面金属层厚度为 15 nm,石墨烯层厚度为 1 nm,双尺度 4 分离层结构如图 4 所示,各层具体结构参数见表 1 所示。

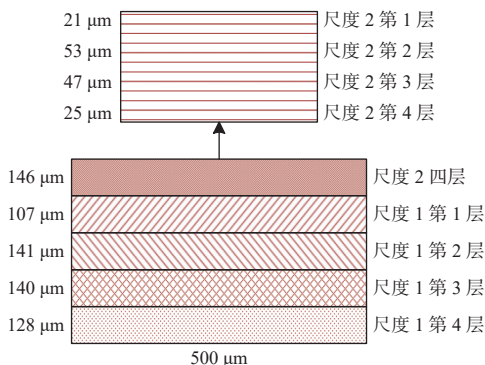


图 4 双尺度 4 分离层结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of dual scale and four separation layers structure

表 1 双尺度 4 分离层结构各层参数

名称	表面金属 结构尺度/ μm	介质层 厚度/ μm	基本层 结构	表面金属/ 石墨烯厚度/nm
尺度2第1层	24	21	M/G/I	15/1
尺度2第2层	15	53	M/G/I	15/1
尺度2第3层	6.4	47	M/G/I	15/1
尺度2第4层	8.8	25	M/G/I	15/1
尺度1第1层	449	107	M/G/I	15/1
尺度1第2层	246	141	M/G/I	15/1
尺度1第3层	221	140	M/G/I	15/1
尺度1第4层	170	128	M/G/I/M	15/1/2 μm

2 太赫兹宽带吸波结构吸收性能仿真与分析

2.1 单一尺度 4 分离层结构吸收性能仿真

针对典型太赫兹雷达工作频率 0.14 THz、0.22 THz、0.58 THz、0.67 THz、1.14 THz、1.56 THz,对每个工作频率进行 4 分离层结构优化,以明确单一尺度 4 分离层结构的吸收性能,初始化参数由上述 1.1 节等效谐振电路参数推演方法确定。

对应于太赫兹雷达工作频率的表面金属层方环形结构尺度分别为 640 μm ~480 μm , 320 μm ~240 μm , 160 μm ~120 μm , 80 μm ~60 μm , 60 μm ~40 μm , 40 μm ~20 μm , 为描述方便,记为尺度 1~尺度 6。利用多分离层结构优化流程,项目组采用 matlab 软件开发了多尺度多分离层结构优化仿真程序,在 0.1 THz~2 THz 频率范围内对多分离层结构参数进行全局优化,并获得优化后尺度 1~尺度 6 的 4 分离层结构的吸收率,如图 5 所示。从图 5 可以看出,尺度 1 吸收率优于 80% 的频率范围为 0.23 THz~0.3 THz, 0.75 THz~0.82 THz, 1.28 THz~1.35 THz, 1.81 THz~1.86 THz; 尺度 2 吸收率优于 80% 的频率范围为 0.63 THz~1.42 THz; 尺度 3 吸收率优于 80% 的频率范围为 0.72 THz~1.62 THz; 尺度 4 吸收率优于 80% 的频率范围为 0.72 THz~2 THz; 尺度 5 吸收率优于 80% 的频率范围为 0.78 THz~2 THz; 尺度 6 吸收率优于 80% 的频率范围为 0.56 THz~1.97 THz。由此可以得出以下结论: 1) 单一尺度 4 分离层结构的吸收性能均无法满足 0.1 THz~2 THz 频率范围内连续吸收率优于 80% 的要求; 2) 尺度 1 在 0.1 THz~0.5 THz 范围内的吸收率优于尺度 2~尺度 6 的吸收率,吸收性能呈现周期性,尺度 2~尺度 6 在 0.5 THz~

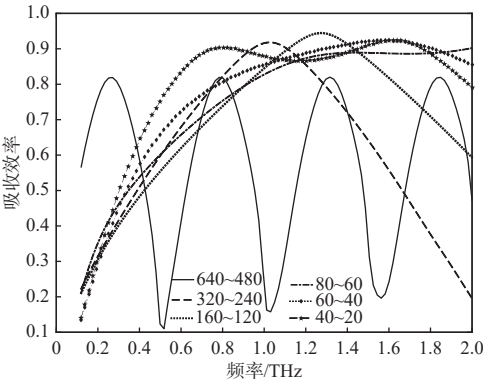


图 5 单一尺度 4 分离层结构吸收效率仿真

Fig. 5 Absorption efficiency simulation of single scale and four separation layers structure

2.0 THz 频率范围内吸收率优于尺度 1; 3) 尺度 2~尺度 6 吸收率优于 80% 的频率下限向低频偏移。因此,通过合理的双尺度 4 分离层设计,拓展了尺度 1 吸收率优于 80% 频率范围,并叠加尺度 5 或尺度 6 的吸收性能,可以实现 0.1 THz~2 THz 频率范围内吸收率优于 80% 的设计目标。

2.2 双尺度 4 分离层结构吸收性能仿真

从图 5 中单一尺度 4 分离层结构吸收性能仿真结果可以看出,通过对双尺度 4 分离层结构优化,有望满足设计要求,因此,选用尺度 1 和尺度 6 为基本吸波结构单元进行双尺度 4 分离层结构优化设计。由(1)式~(7)式获得的尺度 1 基本吸波结构单元等效谐振电路参数为:等效电阻 300 Ω ,等效电感 2.25×10^{-17} H,等效电容 5.19×10^{-12} F,介质层厚度 200 μm 。尺度 2 基本吸波结构单元等效谐振电路参数为:等效电阻 341 Ω ,等效电感 1.16×10^{-20} H,等效电容 3.32×10^{-10} F 和介质层厚度 19.1 μm 。双尺度 4 分离层结构优化的初始化参数利用对尺度 1 和尺度 2 的等效谐振电路参数进行扩展得到。双尺度金属层/介质层/底层金属层 4 分离层结构吸收率仿真结果如图 6 所示。

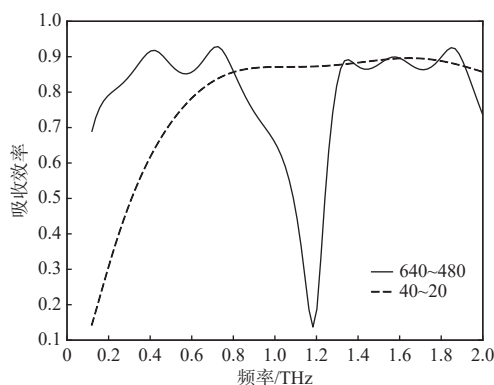


图 6 双尺度金属层/介质层/金属层 4 分离层结构吸收率仿真结果

Fig. 6 Absorption efficiency simulation of dual scale and metal/dielectric/metal four separation layers structure

从图 6 中双尺度 4 分离层结构吸收率仿真结果可以看出,尺度 1 的 4 分离层结构在 0.22 THz~0.85 THz 频率范围内吸收率优于 80%,尺度 2 的 4 分离层结构在 0.62 THz~2.0 THz 频率范围内吸收率优于 80%。尺度 1 吸收效率优于 70% 的频率范围为 0.12 THz~0.95 THz,主要贡献在 0.1 THz~0.9 THz 低中频率范围的吸收。尺度 2 吸收率优于 70% 的频率范围为 0.5 THz~2 THz,主要贡献在 0.5 THz~2 THz 中高频频率范围的吸收。在 0.1 THz~

0.12 THz 频率范围内,尺度 2 吸收率优于 10%,叠加尺度 1 的吸收效率后可达到吸收率优于 80% 的设计要求。

2.3 石墨烯层对双尺度 4 分离层结构吸收性能的影响

以金属层/介质层/底层金属层为基本吸波结构单元进行双尺度 4 分离层结构吸收率仿真,结果见图 6 所示。从图 6 可以看出,即使不加入石墨烯层,依然可以达到吸收频率范围和吸收率的设计要求,石墨烯层的作用在于可实现对吸收频率范围的调控并提升部分吸收率。加入石墨烯层将改变金属层/介质层/底层金属层结构的等效谐振电路参数^[4],可根据(8)式~(18)式确定加入石墨烯后尺度 1 和尺度 2 金属层/石墨烯层/介质层/底层金属层基本吸波结构单元的等效谐振电路参数,并作为双尺度 4 分离层结构优化的初始化参数。优化后的双尺度金属/石墨烯/介质/金属 4 分离层结构的吸收率仿真结果如图 7 所示。

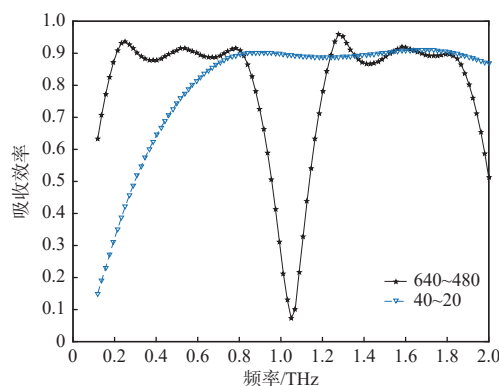


图 7 双尺度金属/石墨烯/介质/金属 4 分离层结构吸收率仿真

Fig. 7 Absorption efficiency simulation of dual scale and metal/graphene/dielectric/metal four separation layers structure

从图 7 可以看出,石墨烯层加入前后,吸波体结构的总体吸收性能大体一致,这是由于表面金属层结构尺寸未发生明显变化,仍然表现出对 0.1 THz~2 THz 频率范围入射电磁波具有很强的吸收特性。加入石墨烯层,使得吸波体结构的整体吸收性能在低频和高频的吸收带宽范围略有增加,即吸收率优于 80% 的频率范围略有拓宽,这是因为加入石墨烯层相当于增大了基本吸波结构单元的等效电感,使其吸收率进一步提升,吸收带宽略有扩展。虽然石墨烯层在 0.1 THz~2 THz 频率范围内调控效果并不明显,其原因是该频率范围内,

石墨烯层对基本吸波结构单元的等效谐振电路参数贡献不大造成的,但可以预见在 2 THz~10 THz 太赫兹高频波段调控效果将更为显著。

将图 7 中双尺度 4 分离层吸波结构的两条吸收曲线叠加后得到结构整体吸收率曲线,如图 8 所示。从图 8 可以看出,在 0.1 THz~2 THz 范围内 100 个均匀频率采样点上,仅有 0.1 THz 和 0.119 THz 这 2 个频率处吸收率低于 80%,在 0.138 THz、0.157 THz 和 1.145 THz 这 3 个频率处吸收率略小于 1,其余 96 个频率点处吸收率均大于 1,吸收率优于 80% 的频率范围为 0.138 THz~2 THz,吸收率优于 97.46% 的频率范围为 0.157 THz~2 THz,在典型太赫兹雷达工作频率 0.14 THz 处吸收效率为 92.27%,在 0.22 THz、0.58 THz、0.67 THz、1.14 THz、1.56 THz 处吸收效率为 100%。因此,本设计较好地达到 0.1 THz~2 THz 范围内吸收效率优于 80% 的设计要求,可以满足太赫兹雷达对抗与隐身需求。这里值得指出的是,图 8 是图 7 中两种尺度 4 分离层结构吸收效率曲线直接叠加后的吸收率曲线,因两条吸收曲线吸收率优于 80% 频率范围存在重叠,导致吸收率相加大于 1。若从单一工作频率太赫兹雷达角度看,吸收率极值上限为 1,图 8 中吸收效率大于 1 区间的吸收率调整为 1,即吸收率为 100%。但在实际战场环境中,尤其是分布式作战时,若两部工作频率相同的太赫兹雷达在不同方向同时入射,图 8 中存在吸收率大于 1 的频率范围便不难理解了,两部太赫兹雷达的平均吸收率应为图 8 中吸收率的 1/2。

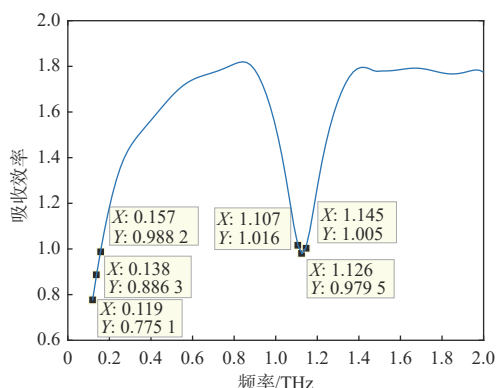


图 8 结构整体吸收率

Fig. 8 Total absorption efficiency of structure

2.4 入射角度和加工误差对双尺度 4 分离层结构吸收性能的影响

前面分析了太赫兹波垂直入射时吸收率的仿真结果,若要满足太赫兹雷达对抗与隐身需求,则

设计结构还需在不同入射角度下均保持在较宽频率范围内具有高吸收率。因此,模拟太赫兹波在 0°(垂直入射)、10°、20°、30°、40°、50°、60°等不同角度入射,对尺度 1 和尺度 2 的 4 分离层结构及整体吸收效率进行仿真,结果如图 9~图 11 所示。

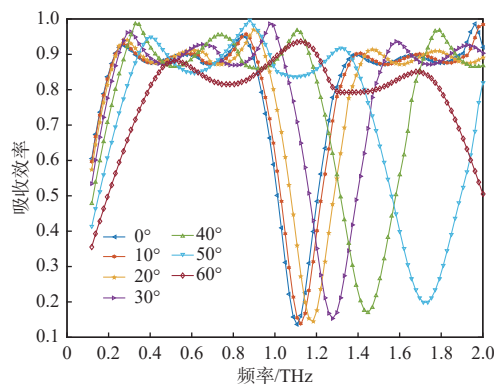


图 9 不同入射角度下尺度 1 的 4 分离层结构吸收率仿真

Fig. 9 Absorption efficiency simulation of four separation layers structure in scale 1 at different incident angles

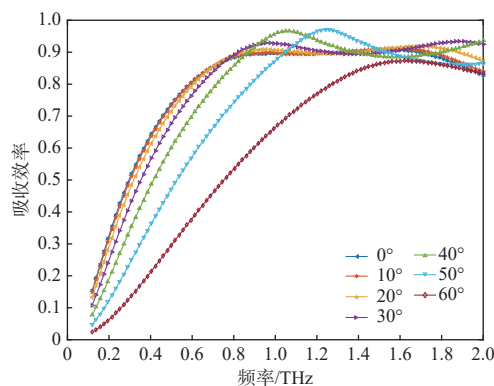


图 10 不同入射角度下尺度 2 的 4 分离层结构吸收率仿真

Fig. 10 Absorption efficiency simulation of four separation layers structure in scale 2 at different incident angles

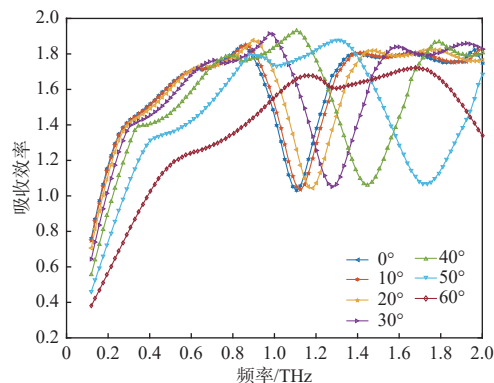


图 11 不同入射角度下双尺度的 4 分离层结构吸收率仿真

Fig. 11 Absorption efficiency simulation of dual scale and four separation layers structure at different incident angles

从图9~图11仿真结果可以看出,随着入射角度的增加,尺度1的4分离层结构和尺度2的4分离层结构的吸收率曲线整体向高频偏移,吸收率优于80%的频率范围略有减小;入射角在0~30°范围内时,入射角对尺度1和尺度2的吸收率曲线影响较小,整体吸收率基本保持一致;入射角在30°~60°范围内时,尺度1和尺度2的吸收率优于80%的频率范围有所减小,频率下限向高频偏移,吸收率有所起伏,整体吸收率在低频处逐步下降;在入射角小于40°时,吸收率优于80%的频率范围为0.176 THz~2.0 THz,吸收率接近100%的频

率范围为0.2 THz~2 THz;当入射角为60°时,吸收率优于80%的频率范围为0.309 THz~2.0 THz,吸收率接近100%的频率范围为0.4 THz~2 THz。因此,在0~60°入射角范围内,双尺度4分离层结构整体吸收率保持稳定,吸收率优于80%的频率范围差异不大,除了在0.14 THz处入射角大于30°时和在0.22 THz处,入射角大于50°时吸收效率低于80%外,在0.58 THz、0.67 THz、1.14 THz、1.56 THz处吸收效率均为100%,可以满足太赫兹雷达对抗与隐身需求。不同入射角度下单尺度和双尺度4分离层结构吸收率见表2所示。

表2 不同入射角度下单尺度和双尺度4分离层结构吸收率

Table 2 Absorption efficiency of single scale and dual scale four separation layers structure at different incident angles

入射角度/(°)	尺度1吸收率优于80%频率范围/THz	尺度2吸收率优于80%频率范围/THz	双尺度吸收率优于80%频率范围/THz
0	[0.195~0.936], [1.297~2.0]	[0.594~2.0]	[0.138~2.0]
10	[0.195~0.936], [1.316~2.0]	[0.594~2.0]	[0.138~2.0]
20	[0.195~0.993], [1.373~2.0]	[0.613~2.0]	[0.138~2.0]
30	[0.214~1.069], [1.487~2.0]	[0.651~2.0]	[0.157~2.0]
40	[0.233~1.202], [1.677~2.0]	[0.727~2.0]	[0.176~2.0]
50	[0.290~1.430], 2.0(频点)	[0.898~2.0]	[0.233~2.0]
60	[0.404~1.278], [1.506~1.791]	[1.278~2.0]	[0.309~2.0]

双尺度4分离层金属层/石墨烯层/介质层/底层金属层结构共计25层小层,加工工艺复杂,加工精度往往会影响到结构吸收性能。本文分别对加工误差正偏10%(结构尺寸正偏10%)和加工误差负偏10%(结构尺寸负偏10%)时双尺度4分离层结构的吸收率进行仿真,结果如图12~图15所示。

从图12~图15仿真结果可以看出,当加工误差正偏10%时,尺度1和尺度2的4分离层结构的吸收率曲线均向低频偏移,整体吸收率曲线也向低频偏移,吸收率基本一致;当加工误差负偏离时,尺度1和尺度2的4分离层结构的吸收率曲线向高频偏移,整体吸收率曲线也向高频偏移,吸收

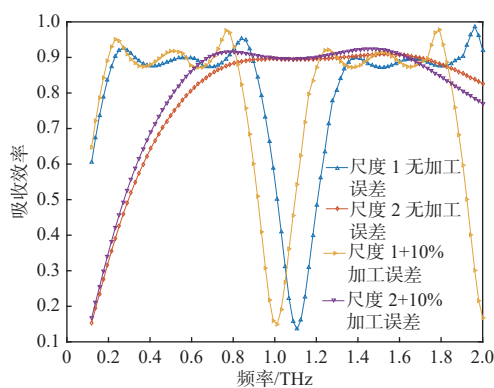


图12 加工误差正偏10%条件下尺度1和尺度2的4分离层结构吸收率仿真

Fig. 12 Absorption efficiency simulation of scale 1 and scale 2 four separation layers structure at +10% machining errors

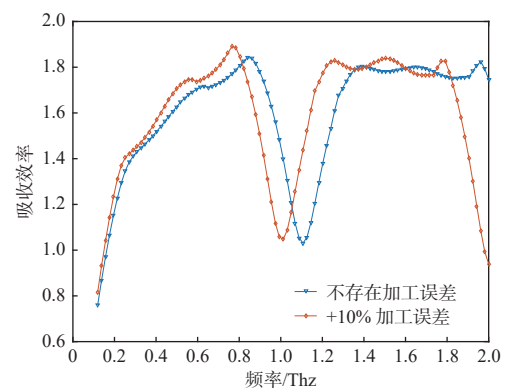


图13 加工误差正偏10%条件下双尺度4分离层结构吸收率仿真

Fig. 13 Absorption efficiency simulation of dual scale four separation layers structure at +10% machining errors

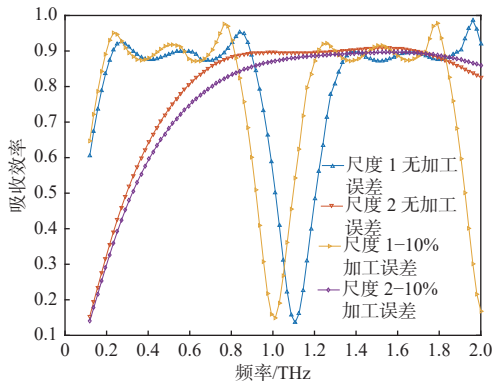


图 14 加工误差负偏 10% 条件下尺度 1 和尺度 2 的 4 分离层结构吸收率仿真
Fig. 14 Absorption efficiency simulation of scale 1 and scale 2 four separation layers structure at -10% machining errors

率基本一致。当加工误差正偏离时,表面金属层结构尺度变大,所对应的等效波长变大,频率向低频偏移;当加工误差负偏离时,表面金属层结构尺度变小,所对应的等效波长变小,频率向高频偏移。无论正偏还是负偏,均未对整体吸收率造成很大影响,其原因在于整体吸收率为多尺度结构的多重吸收叠加,对加工误差不敏感。不同加工误差下单尺度和双尺度 4 分离层结构吸收率见表 3 所示。通过以上分析可知,在实际加工过程中,加工误差取决于最小加工精度,而尺度 1 和尺度 2 的

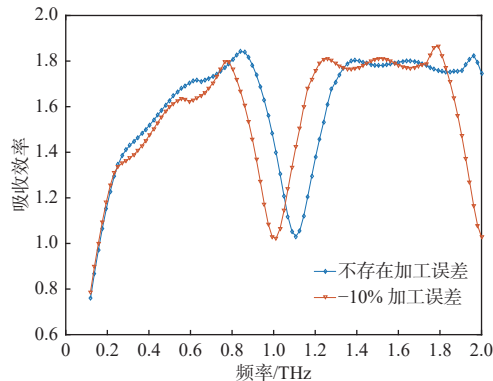


图 15 加工误差负偏 10% 条件下双尺度 4 分离层结构吸收率仿真
Fig. 15 Absorption efficiency simulation of dual scale four separation layers structure at -10% machining errors

结构尺度相差约 20 倍,若以最小结构单元 $6.4\ \mu\text{m}$ 的 10%($0.64\ \mu\text{m}$) 为最小加工精度进行加工,加工误差对双尺度 4 分离层结构的影响应在太赫兹高频波段,尺度 1 在高频部分也存在高吸收率区间,可以弥补加工误差带来的影响。因此,结构尺度正负偏离 10% 的加工误差不会明显影响双尺度 4 分离层结构吸收率。值得注意的是,基本结构单元中表面金属层和石墨烯层的厚度为纳米级,其作用在于保证显著的表面等离子元效应,可不考虑其加工精度。

表 3 不同加工误差下单尺度和双尺度 4 分离层结构吸收率

加工误差/%	尺度1吸收率优于80%频率范围/THz	尺度2吸收率优于80%频率范围/THz	双尺度吸收率优于80%频率范围/THz
0	[0.195~0.917], [1.297~2.0]	[0.594~2.0]	[0.138~2.0]
+10	[0.176~0.741], [1.164~1.848]	[0.518~1.905]	[0.119~2.0]
-10	[0.176~0.841], [1.164~1.848]	[0.727~2.0]	[0.138~2.0]

3 结论

本文针对典型太赫兹雷达工作频率 0.14 THz、0.22 THz、0.58 THz、0.67 THz、1.14 THz 和 1.57 THz 设计出了一种石墨烯太赫兹宽带吸收结构,以表层金属层/石墨烯层/介质层/底层金属层为基本吸波结构单元,分别对单一尺度 4 分离层结构和双尺度 4 分离层结构的吸收特性进行了仿真。设计的双尺度 4 分离层吸波结构在 0.1 THz~2 THz 波段范围内吸收率优于 80%,并可进一步向太赫兹高频拓展吸收带宽。同时仿真了石墨烯层对双尺度 4 分离层结构吸收特性的影响,以及不同入射角和加工误差对双尺度 4 分离层结构吸收特性的影

响。若辅助以灵活的石墨烯费米能级调控手段,有望实现高效吸收带宽的动态调控,在典型太赫兹雷达工作频率的吸收效率均优于 90%,一定程度上具备对入射角度和加工精度的不敏感性,可以达到对未来远程太赫兹雷达的对抗与隐身目的。本文研究结果在太赫兹探测器、太赫兹天线、宽波段探测和多波段对抗与隐身等^[25-34]方面也具有潜在的应用价值。

参考文献:

[1] 吕治辉,张栋文,赵增秀,等.太赫兹雷达技术研究[J].国防科技,2015,36(2):23-26.

- LYU Zhihui, ZHANG Dongwen, ZHAO Zengxiu, et al. Research of terahertz radar technology[J]. National Defense Science and Technology, 2015, 36(2): 23-26.
- [2] 董坤. 太赫兹雷达的特点及其应用[J]. 科技视界, 2021(3): 58-59.
- DONG Kun. Characteristics and applications of terahertz radar[J]. Science & Technology Vision, 2021(3): 58-59.
- [3] 周智伟. 太赫兹技术发展综述[J]. 军民两用技术与产品, 2020(1): 40-44.
- HOU Zhiwei. Overview of the development of terahertz technology[J]. Dual Use Technologies & Products, 2020(1): 40-44.
- [4] 武帅, 屈浩, 涂昊, 等. 太赫兹技术应用进展[J]. 电子技术应用, 2019, 45(7): 3-18.
- WU Shuai, QU Hao, TU Hao, et al. Progresses towards the application of terahertz technologies[J]. Terahertz Technology and Its Application, 2019, 45(7): 3-18.
- [5] 张剑, 杨悦. 太赫兹技术在未来陆海空天的军事应用[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(8): 9-11.
- ZHANG Jian, YANG Yue. Military application of terahertz technology in the future ground-air integrative battlefield[J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 40(8): 9-11.
- [6] 延凯悦, 冯毅, 马静艳, 等. 太赫兹应用分析和展望[J]. 邮电设计技术, 2020(4): 6-10.
- YAN Yuekai, FENG Yi, MA Jingyan, et al. Analysis and prospect of terahertz technology application[J]. Post and Telecommunications Design Technology, 2020(4): 6-10.
- [7] 司黎明, 徐浩阳, 董琳, 等. 2020年太赫兹科学与技术热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 201-209.
- SI Liming, XU Haoyang, DONG Lin, et al. Hot spots looking back of terahertz science and technology in 2020[J]. Technology Review, 2021, 39(1): 201-209.
- [8] TAO H, BINGHAM C M, PILON D, et al. A dual band terahertz metamaterial absorber[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010, 43(22): 225102.
- [9] WEN Q Y, ZHANG H W, XIE Y S, et al. Dual band terahertz metamaterial absorber: design, fabrication, and characterization[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(24): 241111.
- [10] MA Y, CHEN Q, GRANT J, et al. A terahertz polarization insensitive dual band metamaterial absorber[J]. Optics Letters, 2011, 36(6): 945-947.
- [11] SHEN X P, CUI T J, ZHAO J M, et al. Polarization-independent wide-angle triple-band metamaterial absorber[J]. Optics Express, 2011, 19(10): 9401-9407.
- [12] SHEN X P, YANG Y, ZANG Y Z, et al. Triple-band terahertz metamaterial absorber: design, experiment, and physical interpretation[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(15): 154102.
- [13] 邹涛波. 基于超材料的太赫兹吸波体理论与工艺研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2015.
- ZOU Taobo. Research on the theory and process of metamaterial terahertz absorber[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2015.
- [14] CUI Y X, XU J, FUNG K H, et al. A thin film broadband absorber based on multi-sized nanoantennas[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(25): 253101.
- [15] CUI Y X, FUNG K H, XU J, et al. Ultrabroadband light absorption by a sawtooth anisotropic metamaterial slab[J]. Nano Letters, 2012, 12(3): 1443-1447.
- [16] DING F, CUI Y X, GE X C, et al. Ultra-broadband microwave metamaterial absorber[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(10): 103506.
- [17] 顾钰, 王民, 蒲明博, 等. 基于石墨烯结合亚波长金属结构的太赫兹宽带动态吸收器[J]. 光电工程, 2016, 46(1): 60-64.
- GU Yu, WANG Min, PU Mingbo, et al. Tunable broadband absorber in terahertz regime based on graphene and metallic sub-wavelength structure[J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 46(1): 60-64.
- [18] XIAO D, ZHU M, WANG Q, et al. A flexible and ultra-broadband terahertz wave absorber based on graphenevertically aligned carbon nanotube hybrids[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2020, 8(21): 7244-7252.
- [19] LIU W, SONG Z. Terahertz absorption modulator with largely tunable bandwidth and intensity[J]. Carbon, 2020, 174: 617-624.
- [20] ZHANG B L, LI Z X, HU Z D, et al. Analysis of a bidirectional metamaterial perfect absorber with band-switchability for multifunctional optical applications[J]. Results in Physics, 2022, 34: 105313.
- [21] BAO Z Y, WANG J C, HU Z D, et al. Coordination multi-band absorbers with patterned irrelevant graphene patches based on multi-layer film structures[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(5): 505306.
- [22] BAO Z Y, WANG J C, HU Z D, et al. Coordinated multi-band angle insensitive selection absorber based on graphene metamaterials[J]. Optics Express, 2019, 27(22): 31435-31445.

- [23] WANG J C, WANG X S, SHAO H Y, et al. Peak modulation in multicavity-coupled graphene-based waveguide system[J]. *Nanoscale Research Letter*, 2017, 12: 1-7.
- [24] 冯睿. 红外波段周期微结构近完美吸收特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- FENG Rui. Study on nearly perfect absorption of infrared periodic microstructure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [25] 苟杨九州, 彭晓昱. 太赫兹快速成像技术研究进展[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(2): 216-229.
- GOU Yanjiuzhou, PENG Xiaoyu. Research progress of terahertz rapid imaging[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition)*, 2021, 33(2): 216-229.
- [26] 张玉平, 唐利斌, 刘玉菲, 等. 太赫兹新型探测器的研究进展及应用[J]. *红外与毫米波学报*, 2020, 39(2): 191-210.
- ZHANG Yuping, TANG Libin, LIU Yufei, et al. The research progress and application of novel terahertz detectors[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2020, 39(2): 191-210.
- [27] 罗成高, 刘康, 王宏强, 等. 太赫兹单光子雷达探测技术[J]. *中国科学:物理学力学天文学*, 2021, 51: 054202.
- LUO Chenggao, LIU Kang, WANG Hongqiang, et al. Terahertz single-photon radar detection technology[J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2021, 51: 054202.
- [28] 石粒力, 吴敬波, 涂学凑, 等. 太赫兹单光子探测器[J]. *中国科学:物理学力学天文学*, 2021, 51: 054203.
- SHI Libo, WU Jingbo, TU Xuecou, et al. Terahertz single photon detectors[J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2021, 51: 054203.
- [29] 罗成高, 邓彬, 程永强, 等. 精确制导前沿成像探测技术[J]. *国防科技大学学报*, 2019, 41(5): 174-184.
- LUO Chenggao, DENG Bin, CHENG Yongqiang, et al. Advanced imaging and detecting technology for precision guidance[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2019, 41(5): 174-184.
- [30] 杨玉平, 杨一宏, GRISCHKOWSKY D R. 宽带太赫兹波在大气中的远程探测研究及展望[J]. *物理*, 2013, 42(10): 712-719.
- YANG Yuping, YANG Yihong, GRISCHKOWSKY D R. Broadband long-path THz pulse transmission through the atmosphere[J]. *Physics*, 2013, 42(10): 712-719.
- [31] 王玉文, 李瀚宇, 董志伟. 0.1 THz-1 THz频段太赫兹波在云雾中传输的衰减特性[J]. *微波学报*, 2014(6): 560-563.
- WANG Yuwen, LI Hanyu, DONG Zhiwei. The attenuation characteristics of 0.01 THz-1 THz band terahertz wave transmitted in the clouds[J]. *Journal of Microwave Science*, 2014(6): 560-563.
- [32] 王蓉蓉. 大气水凝物中THz波和红外波的辐射传输特性[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- WANG Rongrong. Radiation and transmission characteristics of THz and infrared waves by atmospheric hydrometeors[D]. Xian: Xidian University, 2014.
- [33] 盛楠, 廖成, 张青洪, 等. 太赫兹波大气衰减的抛物方程模型[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2016, 14(2): 175-179.
- SHENG Nan, LIAO Cheng, ZHANG Qinghong, et al. Parabolic equation model for calculating atmospheric attenuation of THz wave[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2016, 14(2): 175-179.
- [34] 房艳燕, 王玉文, 董志伟, 等. 太赫兹波大气分层传输特性[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2016, 14(1): 1-6.
- FANG Yanyan, WANG Yuwen, DONG Zhiwei, et al. Atmospheric attenuation characteristics of THz layered propagation[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2016, 14(1): 1-6.