Design of Infrared Wideband Ultra-thin Absorber for Fault Detection of Electric Power Equipment

LIU Feng*, ZHANG Zhen, JI Donghong, SONG Qiang
(State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou Gansu 730030, China)

Abstract: The infrared thermal imaging non-destructive testing technology can detect cracks and holes in power equipment on-site with advantages such as non-contact operation, no damage to the equipment, and high detection efficiency. To enhance the detection rate of electromagnetic waves in the target band, the resonance obsorption mechanisms of propagating surface plasma (PSP) resonance and localized surface plasma (LSP) resonance are combined, and according to the intrinsic absorption of corresponding materials, a metal-insulator-metal (MIM) structure of Ti/Ge/Si3N4/Ti is designed for an ultra-thin wave absorber with a total thickness of 0.739 μm and a periodic unit size of 1.8 μm×1.8 μm. The absorber achieves over 90% absorption in the 9.5 μm~14 μm band and 100% in the 11 μm band. By optimizing the top nanometer metal structure, absorption rates of over 90% are achieved in the 9 μm~16 μm wavelength range, expanding the frequency band. The structure is simulated through equivalent circuit mode and the strong absorption principles of infrared-band absorber are analyzed according to electric field distribution and equivalent input impedance.

Key words: fault detect; infrared broadband; absorber; equivalent circuit
EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2026.09.007

面向电力设备故障检测的红外宽带超薄吸波器设计

刘 锋*, 张 振, 冀东红, 宋 强
(国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730030)

摘 要: 红外热成像无损检测技术可对电力设备中存在的裂纹、孔洞等缺陷进行原位检测, 具有非接触、无损伤、检测效率高等优点。为提高目标波段电磁波宽带探测率, 结合传播表面等离子体(Propagating Surface Plasmon, PSP)共振和局域表面等离子体(Localized Surface Plasmon, LSP)共振的谐振吸收机理, 辅以相应材料的本征吸收, 采用 Ti/Ge/Si_3N_4/Ti 四层材料, 设计了一种基于金属-绝缘体-金属(Metal-Insulation-Metal, MIM)结构的红外宽带超薄吸波器。该吸波器整体厚度为 0.739 μm, 周期单元尺寸为 1.8 μm×1.8 μm, 在 9.5 μm~14.0 μm 波段吸收率达到 90%以上, 在 11 μm 处实现 100%完美吸收。并且通过优化顶层纳米金属结构使得电磁波在 9 μm~16 μm 的波长范围内达到了 90%以上的吸收率, 实现频带拓展。使用等效电路模型对结构进行了仿真, 通过电场分布以及等效输入阻抗分析了红外宽带吸波器强吸收的原理。

关键词: 故障检测; 红外宽带; 吸波器; 等效电路模型
中图分类号: TP394.1; TH691.9; TN214 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2026)09-1972-05

在发电、输电、变电、配电等多种电力系统的运行过程中, 因运行环境复杂、工作时间长等因素, 各类设备及线路会出现变压器箱体过热、接触不良引起的导流体过热等不同程度的热缺陷[1-3], 此外, 力学结构也会在长时间交变荷载下出现疲劳、蠕变等效应, 产生裂纹、孔洞等结构缺陷。非接触式红外热成像技术是检测电力设备各种缺陷的最佳选择, 可让工作人员在安全距离通过无损的方式原位检测安全隐患和缺陷问题, 减少事故的发生, 保证电网安全经济运行[4-6]。提高红外传感器的灵敏度和探测性能是从事这一领域的研究者一致努力追求的目标[7-8]。

提高红外辐射吸收是提升传感器灵敏度最直接的方法[9-10], 其途径主要分为两类。一种是利用由有损材料组成的多层结构吸收热辐射, 例如高德智感的非制冷氧化钒器件利用氮化硅材料在 7.5 μm~14 μm 波段的本征吸收对红外热辐射信号进行收集。另一种方法是结合不同的谐振器来获得宽带或多波段响应[11-12]。然而, 随着谐振器数量和厚度的增加, 器件热容也会相应增加, 加之很多人工材料难以制备, 使得高效的宽带吸收器目前没有在中红外区域实现普遍应用。因此, 电力设备故障无损检测市场对具有高吸收率、超薄和易于配置的红外成像宽频带吸收器提出巨大需求。

本文采用常见的半导体材料 Ti/Ge/Si_3N_4/Ti, 设计了一种基于金属-绝缘体-金属(Metal-Insulation-Metal, MIM)的结构的红外宽带超薄吸波器, 通过理

收稿日期: 2024-08-29 **修改日期**: 2024-09-27

论分析,分析了该吸收器中的谐振吸收机理。该吸波器结合等离子体(Propagating Surface Plasmon,PSP)共振、局域表面等离子体(Localized Surface Plasmon,LSP)共振和有损材料氮化硅的本征吸收对红外热辐射信号进行收集,可以实现 9.5 μm~14.0 μm 的宽带吸收,并通过对顶层金属结构优化实现频带拓宽,在 9 μm~16 μm 平均吸收率达到 90%以上。

1　吸收机理

由于 MIM 独特的电磁损耗机制,使得入射的电磁波在材料内部发生衰减,从而将电磁波的能量转化为热能并通过导热系统散发出去。目前吸波器通常呈现 MIM 的结构,部分电磁波会被封闭在这种谐振腔中,并激发出各种谐振模式。当入射光经过顶部金属层折射进入介质层后,顶部、底部金属层都会对金属-绝缘体界面激发的表面等离子体进行反射,表面等离子体在上、下金属-绝缘体界面之间产生的破坏性干涉在介电腔中发生谐振,从而导致光被捕获和吸收。通过调整 MIM 吸波器的几何参数,可以实现在各种谐振模式下目标波段电磁波的最大化吸收,同时最大限度地减少过量的能量耦合,从而减少不必要的反射。底部金属层的厚度远大于趋肤深度,使得辐射对器件的透过率接近于 0。绝缘体层的厚度远小于辐射波长,使表面等离子体在介质腔内进行有效耦合。MIM 结构器件的波长依赖吸收率 A 可表示为[13-14]:

$$A=1-R=1-\left|\frac{Z-Z_0}{Z+Z_0}\right|^2=1-\left|\frac{\sqrt{\mu}-\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\mu}+\sqrt{\varepsilon}}\right| \tag{1}$$

式中:R 为波长依赖的反射率,μ 和 ε 分别为吸波器的有效磁导率和介电常数,Z 和 Z_0 分别为吸波器的有效阻抗和自由空间阻抗。当 $Z=Z_0$ 或 $\mu=\varepsilon$ 时,器件达到完美吸收。为使器件在特定检测频带有较好的吸收特性,了解其内在光学谐振模式尤为重要。对于本文提出的 MIM 吸波器,PSP 和 LSP 共振两种谐振模式共同影响了吸收特性。因此,为了实现吸波器最大化吸收,需要基于 PSP 共振对器件吸收波段和基于 LSP 共振对器件有效阻抗之间的对应关系进行理论分析。

1.1　PSP 谐振吸收

对于 PSP 共振,当金属表面电子被入射光激发时,会产生一种特殊的非局域化模式。当入射波照射在金属光栅上时,可以将一个或几个反向网格矢量添加到入射波的波矢量中,这导致在反向晶格矢量的加入后的波矢量满足金属介质界面处的波矢量,从而激发 PSP 共振。此处,顶层的周期性金属结构被视为光栅匹配衍射的波向量,PSP 共振表现为沿着底部金属层和中间介质层之间界面传播的倏逝波。PSP 共振波矢量,k_{PSP}可以由下式确定[15]:

$$k_{\mathrm{PSP}}=k_0 n_d\sin\theta+2\pi m/p-n_d h\cos\theta/m=k_0\left[\varepsilon_m n_d^2/\varepsilon_m+n_d^2\right]^{1/2} \tag{2}$$

式中:k_0 为自由空间波数,p 是吸波器的周期,h 是介电厚度,n_d 是介电层的折射率,θ 是入射角,m 代表 PSP 共振的阶数,ε_m 是底层金属层的复合介电常数。在多种共振原理中,金属层是 MIM 完美吸收的必要组成部分,通常由顶部的周期性纳米结构和底面反射层组成。在长波红外波段,顶部金属层的行为与直流表面电阻不同,本文使用 Drude 模型[16]来描述谐振特性,此时金属层的介电常数 ε_m 可表示为:

$$\varepsilon_m=1-\frac{\omega_p^2}{\omega^2+\mathrm{i}\gamma\omega} \tag{3}$$

式中:ω 为入射波的角频率,ω_p 是等离子体的频率,γ 是阻尼常数。通过计算 k_{PSP}可以确定 PSP 共振作用的吸收波段。

1.2　LSP 谐振吸收

LSP 是存在于绝缘体顶部金属结构附近并逐渐扩散到整个绝缘体中的局部模式,LSP 共振可以等效为由式(4)~式(6)描述的电阻-电感-电容(Resistor-Inductor-Capacitor,RLC)电路模型[17]。具有多个 RLC 集总元件的等效电路阻抗 Z_{LC}表示为:

$$Z_{\mathrm{LC}}=R+\frac{2\varepsilon_i}{\omega C(\varepsilon_r+1)^2}+\mathrm{i}\omega(L_e+L_m)+\frac{2}{\mathrm{i}\omega C(\varepsilon_r+1)} \tag{4}$$

式中:集总元件包括欧姆电阻 R,由金属层皮肤深度内的漂移电子引起的动力电感 L_e,由两个金属层之间的相互作用产生的法拉第电感 L_m 以及两个金属层之间的绝缘体的等效电容 C。ε_r 和 ε_i 分别为绝缘层介电常数 ε_d 的实部和虚部。底部为金属的 MIM 的绝缘层类似于短路传输线,其长度等于介质层的厚度。短路传输线模型的输入阻抗 Z_{in}表示为:

$$Z_{\mathrm{in}}=\mathrm{i}\sqrt{\frac{\mu_d}{\varepsilon_d}}Z_0\tan(k_0\sqrt{\varepsilon_d\mu_d}h) \tag{5}$$

式中:μ_d 为绝缘层的相对磁导率[18]。该模型的整体阻抗表示为:

$$Z_{\mathrm{Absorber}}=\frac{Z_{\mathrm{LC}}Z_{\mathrm{in}}}{Z_{\mathrm{LC}}+Z_{\mathrm{in}}} \tag{6}$$

该模型将在后文图 4(a)中详细展示。通过对比 Z_{Absorber}和自由空间阻抗 Z_0 可确定 LSP 共振引起的吸收是否达到完美匹配。

2　吸波器设计

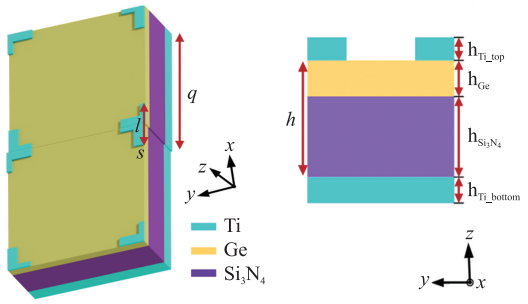
2.1　材料选择

在各种金属材料的红外波段性质中,Ti 的折射

率较低,消光系数小,说明在该金属中电磁波的传播速度快,衰减速度慢,对电磁波具有较高的吸收性能,在 9.5 μm 处,红外吸收率可以达到 90%,相较于 Al、Ni、Pt 等其他金属材料,Ti 是表层金属的良好选择[19-21]。对于具有超薄宽带吸收器,需要高折射率的材料来控制谐振带在目标波长范围内的定位,无损介质层 Ge 满足这一需求,在红外波段具有高折射率实部和零虚部。对于有损耗介质层的吸收层,有损介质层 Si_3N_4 具有目标频带内适合的折射率虚部,能够吸收一部分的入射波,这部分吸收可以与 LSP 共振共同增强宽带吸收。综上所述,本设计采用 Ti/Ge/Si_3N_4/Ti 作为 MIM 结构模型。

2.2 结构设计

如图 1(a)所示,单个红外宽频带吸超薄波器单元周期为 q,该结构由金属顶层、介质层和底部反射层组成。金属顶层采用 Ti“十”字结构,由两个垂直的长为 l,宽为 s 的长条组成,其厚度为 h_{Ti_top}。这种结构能够激发 PSP 沿 x 和 y 方向传播,产生两个垂直方向的 PSP 共振,且对称的设计不会对极化波产生选择性吸收,其具体参数见表 1。在 LSP 诱导前,PSP 共振的两个方向协同主导了吸收率,以实现宽带吸收。介质层由 Ge(h_{Ge})和 Si_3N_4($h_{Si_3N_4}$)组成,其厚度(介电厚度)为 h,底部反射层仍为 Ti 金属,厚度为 h_{Ti_bottom},器件整体厚度($h+h_{Ti_bottom}+h_{Ti_top}$)为 0.739 μm。



(a) 结构三维示意图 (b) 结构剖面图

图 1 红外宽频带超薄吸波器

表 1 模型参数表 单位:μm

q	l	h	s
1.8	0.95	0.695	0.1
h_{Ti_top}	h_{Ti_bottom}	h_Si3N4	h_Ge
0.022	0.022	0.425	0.27

在上述理论分析基础上,使用基于有限元法的商业有限差分时域软件包 CST(2019)进行仿真分析。模型中的参数设置如表 1 所示,x,y 方向上使用周期作为边界,z 方向上使用完美匹配层作为边界,用于解决仿真区域上的反射问题,入射波矢量沿 z 轴方向。结构吸收率曲线如图 2 所示,该设计在 9.5 μm ~ 14 μm 波段吸收率达到 90% 以上,在 11 μm 吸收率达到 100%。

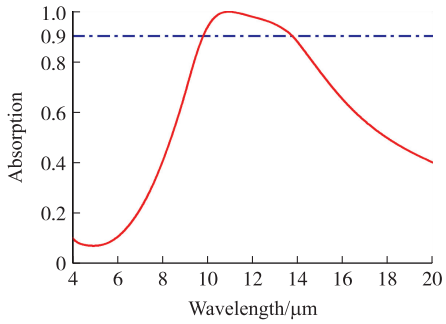


图 2 结构吸收率

2.3 频带拓展

为了实现频带扩展,需要优化谐振单元的共振波段,达到叠加吸收的效果。在此调整 LSP 共振的谐振波长,为单元阵列加入半径为 R(R=0.4 μm)的 Ti 纳米“〇”型结构,吸收曲线见图 3。相比于“十”字而言,叠加上“〇”型结构在 9 μm~16 μm 波段可达到 90%以上的吸收,吸收波段拓展了 1 μm。周期性的纳米“十”字和“〇”型金属结构为目标波段带提供了宽波段的共振。选取 yz 平面为三维示意图的切面(图 4(b)),由图 4(a)“〇”型切面提供的 x 方向电场分布线可以看出,在 4 μm 波段电磁线多表现在表面的传播,LSP 占主导。而在 11 μm 吸收率达到 95%时,周期结构中上下表面沿介质层传播的电力线表明高阶 PSP 占主导。

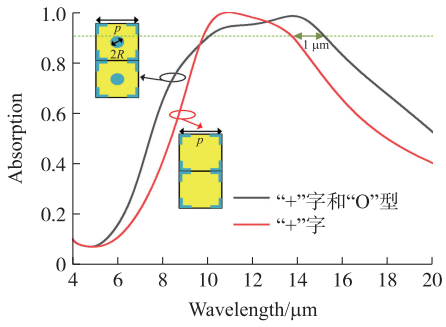
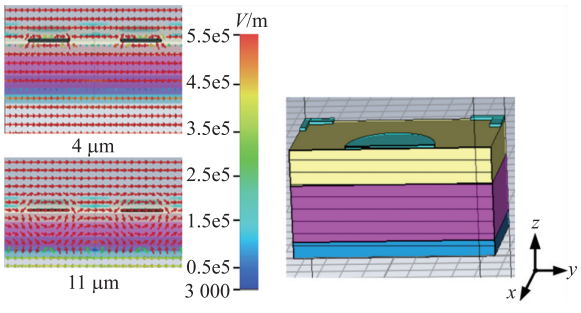


图 3 宽频带拓展吸波器模型吸收曲线对比图



(a) 电场分布剖面图 (b) 电场分布三维示意图(yz 切面)

图 4 宽频带拓展吸波器三维模型电场分布图

3　模型理论计算

为更好理解整体吸收机理,采用 LSP 等效电路模型进行分析[22-23]。图 5 是整体阻抗的等效传输线示意图,在短路传输线模型中,β_0 表示自由空间中的传播常数,Z_{Ti}、$Z_{Si_3N_4}$、β_{Ti}、$\beta_{Si_3N_4}$分别表示相应介质层中的特征阻抗与传播常数。Z_{Ti}为顶层“十”字与“○”型结构等效阻抗,底部金属可以表示为接地。

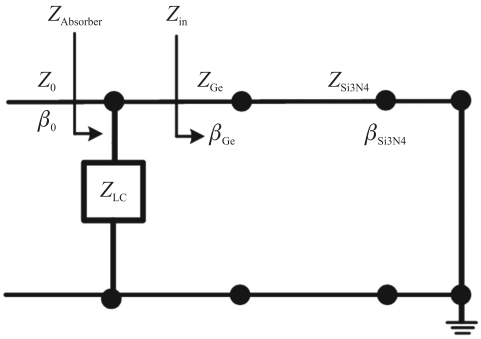


图 5　等效电路传输线示意图

为验证模型有效性,在此使用 MATLAB(R2021a)代入具体数据对该模型进行计算。由于空气的特征阻抗为实数,输入阻抗为复数,很难达到完全相等的目的,为了尽可能降低反射,一般通过对吸波器结构的优化,使其输入阻抗虚部趋近于 0,同时保证实部趋近于空气阻抗 377 Ω。根据阻抗匹配理论,利用式(4)~式(6)对吸波结构的输入阻抗进行计算,并利用自由空间阻抗 Z_0 对其进行归一化处理。从图 6(a)可得,在 4 μm~20 μm 吸收范围内,吸波器的归一化阻抗(Z_0/Z)实部在 0~1 范围内,而虚部归一化阻抗接近于 0,基本满足阻抗匹配条件。在吸收峰 11 μm 处,实部阻抗趋近于 1,虚部阻抗趋近于 0,达到完美匹配的要求。图 6(b)是传输线模型在 MATLAB 上进行数值计算所得出的结果,结果与 CST 仿真结果大体上趋势吻合,模型有效但存在一定差异:在 6 μm~20 μm 区间都存在吸收,在 10 μm 处,两种模型计算出的吸收率都达到最大值,但在 12 μm 之后相较 CST 仿真结果,传输线模型计算出的吸收率出现更早的衰减。分析产生差异的原因:其一是由于 MATLAB 材料库中介电常数为实际测量的波段加上扩展波段拟合的结果,与 CST 材料库中的输入参数有出入,在这里只有公开的 6 μm~20 μm 波段数据;其二是由于 RLC 电路模型中 Drude 模型参数具有波长依赖性[24-25],基于有限元法的 CST 仿真谐振效果更加精确;其三是等效电路模型只能分析由 LSP 共振引起的吸收,忽略了由 PSP 共振引起的吸收,因此在某些波段,由等效电路模型计算出的吸收率偏小。

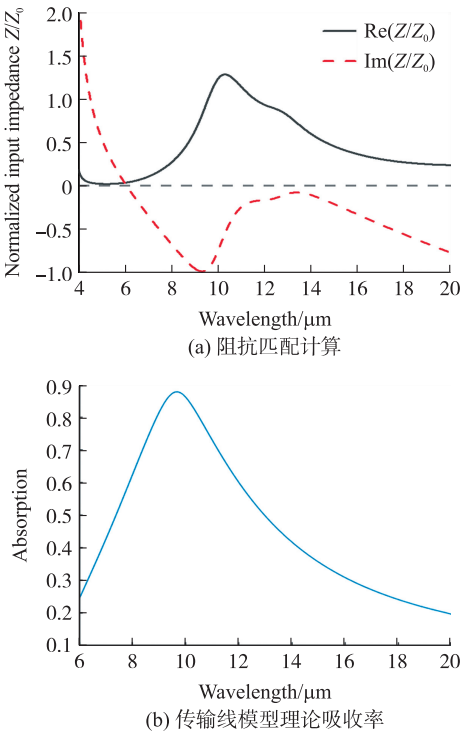


图 6　传输线模型计算

4　结论

目前电力设备故障检测基本采用基于 MIM 结构的氧化钒红外热探测器,本文将 PSP、LSP 共振和有损材料氮化硅的本征吸收机理相结合,提出了一种基于常见半导体材料 Ti/Ge/Si_3N_4/Ti 制作的红外宽带超薄吸波器,该设计单元尺寸为 1.8 μm×1.8 μm,整体厚度为 0.739 μm,在 9.5 μm~14 μm 波段吸收率达到 90%以上,在 11 μm 处达到 100%完美吸收;此外通过优化顶层金属结构实现了带宽拓宽,在 9 μm~16 μm 的波长范围内达到了 90%以上的吸收率。文中详细介绍了该结构下的两种谐振机理,并用等效电路理论模型对电磁波的完美吸收进行解释,该设计适用于航空航天、机械、医疗、石化等红外热成像无损检测领域。

参考文献:

[1]　史洪玮,许崇彩. 基于红外热成像的传感器电路板缺陷检测方法[J]. 传感技术学报, 2023, 36(8): 1261-1267.

[2]　潘晓花. 基于红外热成像技术的建筑围护结构热工缺陷检测方法[J]. 工程技术研究,2023,8(4):60-62.

[3]　冯辅周,朱俊臻,李志农. 超声红外热像技术发展现状及其在航空材料缺陷检测中的应用[J]. 航空制造技术,2022,65(20):36-53.

[4]　温启良,文华. 基于物联网的电力变压器过热故障红外检测系统设计[J]. 电子设计工程,2024,32(1): 68-72.

[5] 代晓丰,陈泽涛,刘秦铭,等. 基于红外传感的配电房变压器高温过热故障识别研究[J]. 电网与清洁能源,2022,38(9):73-79,88.
[6] 代子阔,史可鉴,宋仕达,等. 基于红外成像的中低压电网电力稳定器高温运行可靠性图像识别方法[J]. 红外技术,2023,45(12):1351-1357.
[7] 林叶繁,党岩盟,孙海燕,等. 基于兰姆波谐振器和超表面的谐振式热红外探测器研究[J]. 传感技术学报,2024,37(3):381-388.
[8] 刘岗,梁庭,林斯佳,等. 铌酸锂晶片热释电红外探测器设计及性能测试[J]. 传感技术学报,2013,26(3):333-337.
[9] 王丹,黄金英. 超宽带中红外超材料吸收器的光学性能分析[J]. 科技资讯,2022,20(21):215-218.
[10] 景致,张健. 航空电磁超材料研究进展及发展建议[J]. 航空材料学报,2023,43(6):44-51.
[11] 罗奕,梁中翥,孟德佳,等. 混合谐振模式宽带长波红外超表面吸收器研究[J]. 中国光学,2020,13(1):131-139.
[12] 何建澄. 基于表面等离激元的纳米真空沟道集成红外增强吸收结构[D]. 成都:电子科技大学,2022.
[13] 张潇,吕奇皓,金城,等. 电磁偏谐振阻抗匹配宽带传输超表面设计[J]. 电讯技术,2024,64(1):1-7.
[14] 刘雄飞,王壮,吴尧尧,等. 电磁吸波结构研究进展[J]. 材料导报,2023,37(22):15-22.
[15] Xu Y,Bai P,Zhou X,et al. Optical Refractive Index Sensors with Plasmonic and Photonic Structures: Promising and Inconvenient Truth[J]. Advanced Optical Materials,2019,7(9):1801433.
[16] Heavens O S. Handbook of Optical Constants of Solids II [J]. Journal of Modern Optics,1992,39(1):189.
[17] Feng R,Qiu J,Liu L H,et al. Parallel LC Circuit Model for Multi-Band Absorption and Preliminary Design of Radiative Cooling[J]. Optics Express,2014,22(S7):A1713-A1724.
[18] Lam V D,Kim J B,Lee S J,et al. Dependence of the Magnetic-Resonance Frequency on the Cut-Wire Width of Cut-Wire Pair Medium[J]. Optics Express,2007,15(25):16651-16656.
[19] Zhu L,Jin Y,Liu H,et al. Ultra-Broadband Absorber Based on Metal-Insulator-Metal Four-Headed Arrow Nanostructure[J]. Plasmonics,2020,15(6):2153-2159.
[20] Yu P,Yang H,Chen X,et al. Ultra-wideband Solar Absorber Based on Refractory Titanium Metal [J]. Renewable Energy,2020,158:227-235.
[21] Luo Y,Meng D,Liang Z,et al. Ultra-Broadband Metamaterial Absorber in Long Wavelength Infrared Band Based on Resonant Cavity Modes[J]. Optics Communications,2020,459:124948.
[22] 梁雅英. 新型波纹梁夹芯复材结构微波-红外隐身特性研究[D]. 成都:电子科技大学,2023.
[23] 林一夫,杨贤昭,李享成. 基于偶极子方环交叉元有损电容表面的薄宽带吸波器设计[J]. 光学学报,2023,43(3):185-193.
[24] Bai Y,Zhao L,Ju D,et al. Wide-Angle,Polarization-Independent and Dual-Band Infrared Perfect Absorber Based on L-Shaped Metamaterial[J]. Optics Express,2015,23(7):8670-8680.
[25] Dayal G,Ramakrishna S A. Design of Multi-Band Metamaterial Perfect Absorbers with Stacked Metal-Dielectric disks[J]. Journal of Optics,2013,15(5):055106.

刘 锋(1974—),男,学士,副高级工程师,国网甘肃省电力公司指挥中心副主任,主要研究方向:变电站继电保护、输电线路运检管理、数字化智能运检研究等,gdliufeng@163.com;

张 振(1973—),男,硕士,高级工程师,国网甘肃省电力公司设备管理部高级主管,主要研究方向:输变电运检管理、数字化智能运检等;

冀东红(1980—),男,硕士,副高级工程师,国网甘肃省电力公司设备管理部中级主管,主要研究方向:高压试验、状态检修、技改大修项目管理等;

宋 强(1989—),男,学士,工程师,国网甘肃省电力公司设备管理部专责,主要研究方向:柔性直流输电技术、特高压直流输电技术等。