

文章编号: 2095-4980(2024)05-0565-10

基于石墨烯的多功能超表面设计

王连胜^{1a}, 夏冬艳^{1b}, 付全红², 丁学用^{1a}, 汪源^{1b}

(1. 三亚学院 a. 理工学院; b. 财经学院, 海南 三亚 572022; 2. 西北工业大学 物理科学与技术学院, 陕西 西安 710129)

摘要: 为实现机载天线罩吸波/透射波/反射波功能一体化, 设计了一种基于石墨烯和光电二极管(PIN)的宽带吸波/反射波/透射波多功能超表面。当 PIN 正向导通时, 超表面对入射电磁波的透过率接近于 0, 反射率可以通过改变石墨烯的费米能级进行调节; 当石墨烯的费米能级为 0.3 eV 时, 超表面在 1.55~5.51 GHz 范围内的吸收率超过了 90%; 当石墨烯能级为 0 eV 时, 超表面在 1.55~5.51 GHz 范围内的反射系数高达 45%。当 PIN 反向截止时, 超表面在 4.76 GHz 处出现了一个透射峰, 石墨烯费米能级为 0.3 eV 和 0 eV 时的透射系数分别为 61% 和 71%。设计的超表面具有结构简单、宽带吸波/反射波/透射波多功能等优点, 在通信和雷达等领域具有广泛的应用前景。

关键词: 超表面; 石墨烯; 宽带吸波; 透射; 反射; 光电二极管

中图分类号: TB34

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022131

A graphene-based multi-function metasurface

WANG Liansheng^{1a}, XIA Dongyan^{1b}, FU Quanhong², DING Xueyong^{1a}, WANG Yuan^{1b}

(1a. School of Science and Technology; 1b. School of Finance and Economics, University of Sanya, Sanya Hainan 572022, China; 2. School of Physical Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710129, China)

Abstract: In order to achieve the integrated function of absorption/transmission/reflection of airborne antenna covers, a multifunctional metasurface based on graphene and Positive Intrinsic-Negative (PIN) diode is presented, which bears the function of wideband absorption/reflection/transmission. When the PIN diode operates in forward biased condition, the transmittance of the metasurface is close to 0, and the reflection can be adjusted by changing the Fermi energy of graphene. When the Fermi level of graphene is 0.3 eV, the absorption of the metasurface is more than 90% from 1.55 GHz to 5.51 GHz, and the reflection coefficient is 45% at this band with the graphene energy level of 0 eV. On the contrary, with the PIN diode acting in reverse biased condition, a transmission peak appears at 4.76 GHz with the transmission coefficients of 61% and 71% respectively when the Fermi level of graphene is 0.3 eV and 0 eV. Due to its advantages of having a simple structure, wideband absorption, and switchable reflection/transmission, the proposed metasurface shows the potential in the fields of stealth of communication equipment and radar.

Keywords: metasurface; graphene; wideband absorption; transmission; reflection; Positive Intrinsic-Negative

随着超材料研究的深入, 多功能超材料吸波体受到了广泛关注^[1-15]。为提高通信的安全性, 同时减少雷达的散射截面, 设计具有透波窗口的超材料吸波体具有重要的现实意义。典型的具有透波窗口的超材料吸波体由有损结构层和底层的无损频率选择表面组成, 有损结构层主要通过加载有损电子元件的平面金属结构实现吸波特性和无损频率选择表面主要用来实现透射波窗口。近年来, 许多具有可开关透波窗口的超材料吸波体结构被提出^[16-19]。2017年, Y Han等^[16]基于缝隙阵列和开关型二极管设计了一种具有透射波窗口的超材料吸波体, 吸波体在 1.79~5.25 GHz 范围内的吸收率超过了 90%, 同时在 3.68 GHz 处的插入损耗为 -1.28 dB。2019年, S Ghosh等^[17]同样基于光电二极管(PIN)设计了一种具有可开关透波窗口的超材料吸波体。当二极管正向导通时, 吸波体在 3~7.82 GHz 范围内的吸收率超过了 90%; 反向截止时, 在 9.28 GHz 处出现了透射波窗口。2020年, M J Qu等^[18]设

收稿日期: 2022-06-29; 修回日期: 2022-12-12

基金项目: 海南省自然科学基金资助项目(620MS062)

计了一种双极化石墨烯基多功能超材料吸波体。当石墨烯费米能级为 1 eV 和 0 eV 时, 吸波体在 0.63 THz 处出现了一个透射波窗口; 当石墨烯费米能级为 0 eV 和 1 eV 时, 吸波体在 0.29~0.91 THz 范围内的吸收率超过了 90%。2021 年, S C Bakshi 等^[19]设计了一种双层加载二极管的具有透射波窗口的超材料吸波体。当 2 层二极管反向截止时, 吸波体在 2.9~5.4 GHz 和 6.3~8.2 GHz 范围内的吸收率超过了 90%, 透射波频率为 5.8 GHz; 当 2 层二极管正向导通时, 吸波体在 2.85~8.11GHz 范围内的吸收率超过了 90%。

相比于上述具有透射波窗口的超材料吸波体, 具有吸波/反射波/透射波多功能的超表面具有更广泛的应用前景。André de Lustrac 等^[20]基于 PIN 设计了具有吸波/反射波/透射波多功能的超表面电磁屏。当二极管反向截止时, 电磁波在 2.31~2.5 GHz 范围内的透射率高于 -3 dB; 当二极管正向导通并施加 2 mA 电流时, 电磁屏在 1.7~2.6 GHz 范围的反射率接近 -0.4 dB; 当二极管正向导通并施加 1 μ A 电流时, 电磁屏在 1.9~2.6 GHz 范围内的吸收率超过了 90%。Xinyun Song 等^[21]基于变容二极管设计了主动调节的具有吸波/反射波/透射波多功能的超表面, 通过调节变容二极管的状态, 可以实现 4.72 GHz 处的吸波、透射波和反射波。

本文基于石墨烯和 PIN 设计了一种宽带吸波/反射波/透射波多功能超表面, 通过改变石墨烯的费米能级和底层金属板开槽处 PIN 的状态, 可以实现超表面宽带吸波、反射波和透射波 3 种功能之间的相互切换。设计的超表面具有结构简单、宽带吸波/反射波/透射波多功能、与电磁性能极化无关等优点, 在通信和雷达等领域具有广泛的应用前景。

1 设计原理

实现宽带超材料吸波体的典型方法是在顶层谐振单元层中加载电阻膜。电阻膜型宽带超材料吸波体的等效电路如图 1 所示^[22]。图中, 顶层谐振单元、中间介质和底层金属覆铜分别等效为一个 RLC 串联电路、电阻和导线。图 1 所示电路的等效阻抗 Z_f 、品质因数 Q 、谐振角频率 ω_0 以及中间介质阻抗 Z_d 可表示为:

$$Z_f(\omega) = R_j + R_c + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (1)$$

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R_j + R_c} \quad (2)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

$$Z_d(\omega) = j \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}} \tan\left(\frac{k_0 d}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}}\right) \quad (4)$$

带宽 BW 、等效输入阻抗 Z_{in} 及吸收率 $A(\omega)$ 可表示为:

$$BW = \frac{\omega_0}{Q} \quad (5)$$

$$Z_{in}(\omega) = \frac{Z_f(\omega)Z_d(\omega)}{Z_f(\omega) + Z_d(\omega)} \quad (6)$$

$$A(\omega) = 1 - \left| \frac{Z_f(\omega)Z_d(\omega)}{Z_f(\omega) + Z_d(\omega)} \right| \quad (7)$$

式(1)~(7)中: R_c 、 L 和 C 分别为顶层谐振单元的等效电阻、电感和电容; R_j 为加载的电阻膜的等效电阻; ω 为入射电磁波的角频率; ε_0 、 μ_0 和 k_0 分别为自由空间的介电常数、磁导率和波数; ε_r 、 μ_r 分别为中间介质的相对介电常数和磁导率。由式(1)~(7)可以看出, 加载电阻膜既可以展宽吸波体的吸收带宽, 又可以通过调节加载电阻膜的阻值调节其输入阻抗以及与自由空间的阻抗匹配程度, 进而调节其反射率。

石墨烯是一种由单层碳原子组成的二维平面晶体, 石墨烯的电导率可以通过外加电压改变其费米能级进行调节。因此, 石墨烯可作为可调电阻膜用来实现宽带超材料吸波体, 同时也可以实现反射率的调节。从微波段到可见光波段, 石墨烯的电导率可以用 Kubo 公式进行表示^[23]:

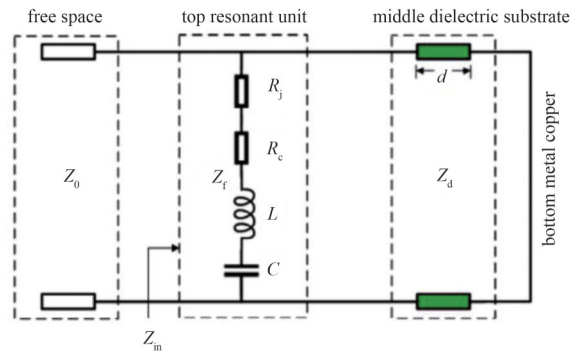


Fig.1 Equivalent circuit of wideband metamaterial absorber based on resistance film

图1 电阻膜型宽带超材料吸波体的等效电路

$$\sigma(\omega, \mu_c) = \frac{-ie^2(\omega + 2i\Gamma)}{\pi\hbar^2} \left\{ \frac{1}{(\omega + 2i\Gamma)^2} \int_0^\infty \varepsilon \left[\frac{\partial f_d(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} - \frac{\partial f_d(-\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \right] d\varepsilon - \int_0^\infty \varepsilon \left[\frac{f_d(-\varepsilon) - f_d(\varepsilon)}{(\omega + 2i\Gamma)^2 - 4(\varepsilon/\hbar)^2} \right] d\varepsilon \right\} \quad (8)$$

$$f_d(\varepsilon) = \left[\exp \left(\frac{\varepsilon - \mu_c}{k_B T} \right) + 1 \right]^{-1} \quad (9)$$

式(8)~(9)中： k_B 为玻尔兹曼常数； \hbar 为狄拉克常数； $f_d(\varepsilon)$ 为费米-狄拉克分布； ε 为能量； μ_c 为石墨烯的费米能级； T 为温度； Γ 为载流子散射率。根据式(8)~(9)，得到不同费米能级下石墨烯的电导率，如图2所示。由图2可以看出，随着费米能级的增加，石墨烯的电导率逐渐增大。

在石墨烯基电阻膜型宽带超材料吸波体的基础上，用加载开关型PIN的频率选择表面替代底层金属覆铜。当PIN正向导通时，可以等效为一个小电阻，此时吸波体对入射电磁波透过率几乎为0，通过调节石墨烯的电导率调节吸波体的反射率，可以实现宽带吸波/反射波功能；反向截止时，可以等效为一个阻值很大的电阻，吸波体会产生一个透射波窗口，实现透射波功能。

2 模型设计

设计的石墨烯基宽带吸波/反射波/透射波多功能超表面如图3所示，由3层结构组成：顶层为加载石墨烯的开口金属铜环，中间层为FR4介质，底层为开槽处加载PIN的金属铜基板。性能优化后的结构参数为： $a=b=14$ mm， $c=1$ mm， $d=1$ mm， $r=5$ mm， $e=f=5$ mm， $g=0.6$ mm， $t_1=0.1$ mm， $t_2=0.01$ mm(多层石墨烯)， $t_3=2$ mm， $t_4=0.1$ mm。铜的电导率 $\sigma = 5.7 \times 10^7$ S/m；FR4介质的介电常数 $\varepsilon = 4.3$ ，损耗角正切值 $\tan \delta = 0.025$ 。石墨烯按照图2所示的电导率进行设置。PIN的型号为SMP1345-079LF，其正向导通和反向截止时的等效电路如图4所示，等效电路的参数为 $R_{on}=5 \Omega$ ， $L_{on}=1.4$ nH， $R_{off}=50\ 000 \Omega$ ， $C_{off}=0.4$ pF^[13]。

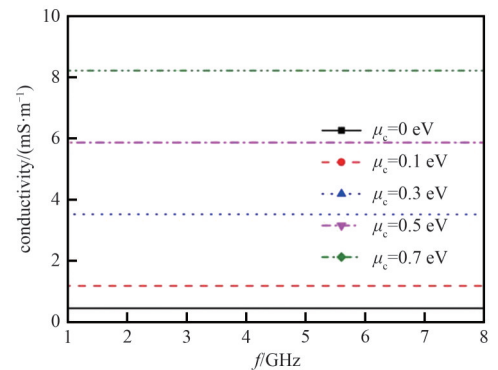


Fig.2 Conductivity of graphene at different Fermi levels
图2 不同费米能级下石墨烯的电导率

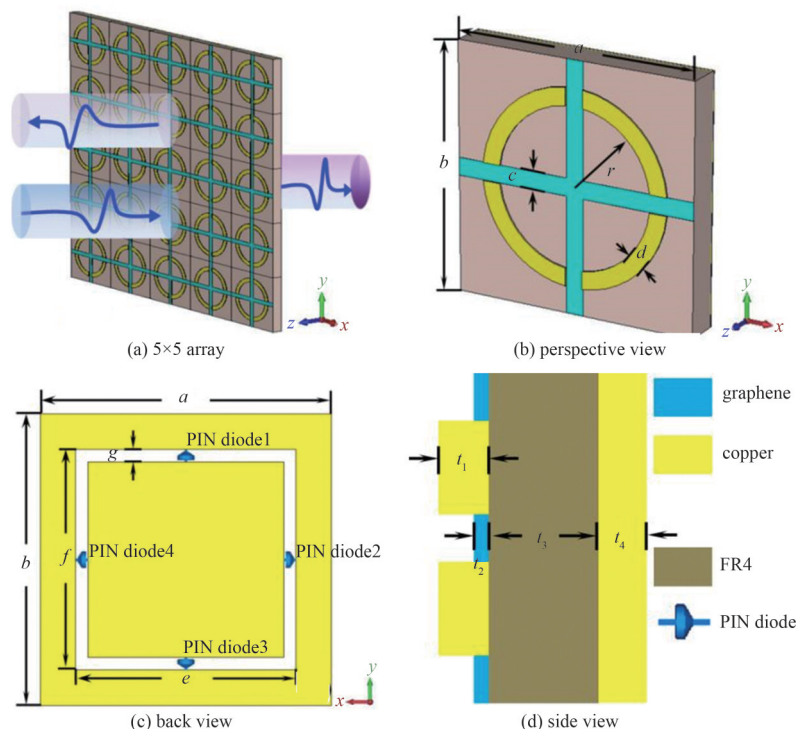


Fig.3 Schematic diagram of multi-function metasurface with wideband absorption/reflection/transmission
图3 宽带吸波/反射波/透射波多功能超表面结构单元示意图

采用商业电磁仿真软件 Microwave Studio CST 对图3所示的超表面进行全波仿真。仿真过程中，设置x和y方向的边界条件为 unit cell，z方向的边界条件为 open。采用频域求解器对超表面的有关电磁参数进行仿真计算。

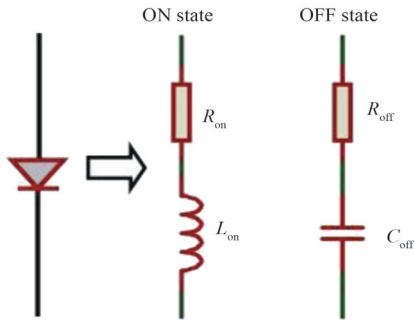


Fig.4 Equivalent circuits of PIN diode at forward biased and reverse biased condition
图4 PIN二极管正向导通和反向截止时等效电路

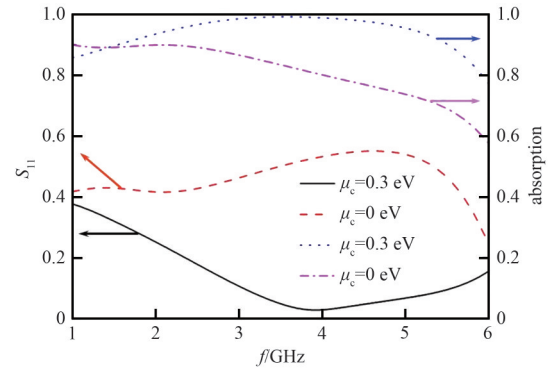


Fig.5 Reflection coefficient and absorption of metasurface with the Fermi level of graphene at 0.3 eV and 0 eV when the PIN diodes act in forward biased condition
图5 PIN二极管正向导通情况下石墨烯费米能级为0.3 eV和0 eV时超表面的反射系数和吸收率

3 结果与讨论

通过对结构单元进行性能最优化研究,选择石墨烯费米能级为0 eV和0.3 eV,对结构单元进行模拟计算分析。图5为二极管正向导通情况下,石墨烯费米能级为0.3 eV和0 eV时超表面的 S_{11} 参数(反射系数)和吸收率曲线。由图5可以看出,石墨烯费米能级为0.3 eV时,超表面在1.55~5.51 GHz范围内的反射系数较低,吸收率超过了90%;当石墨烯费米能级为0 eV时,超表面在1.55~5.51 GHz范围的反射系数超过了45%,吸收率较低。上述结果表明,在二极管正向导通情况下,通过改变石墨烯的费米能级可以实现超表面宽带吸波/反波的功能。在吸收带宽方面,与文献[20]和文献[21]的比较结果如表1所示。

表1 超表面在宽带吸收方面与文献[20]和文献[21]的比较结果

Table1 Comparison results of metasurface at wideband absorption with reference[20] and reference[21]

model	proposed	ref[20]	ref[21]
absorption frequency/GHz	1.55~5.51	1.90~2.60	4.72
absorption bandwidth/GHz	3.96	0.70	single frequency

图6为二极管反向截止情况下石墨烯费米能级为0.3 eV和0 eV时,超表面的 S_{21} 参数(透射系数)和吸收率。由图6可以看出,二极管反向截止时,石墨烯费米能级为0 eV和0.3 eV时,超表面在4.76 GHz处的透射系数分别达到了71%和61%,表明二极管反向截止时超表面具有透射波功能。综合图5和图6的结果可知,改变二极管的状态以及石墨烯的费米能级,超表面具有宽带吸波/反射波/透射波功能。

利用参数参量法对二极管正向导通情况下石墨烯费米能级为0.3 eV和0 eV时,超表面与自由空间的归一化输入阻抗进行计算^[24],结果如图7所示。由图7(a)可以看出,石墨烯费米能级为0.3 eV时,超表面与自由空间的归一化输入阻抗实部在1.55~5.51 GHz范围内接近于1,表明超表面在此情况下与自由空间的阻抗匹配良好,此时反射率很低,吸收率很高;在1.55~5.51 GHz范围内归一化输入阻抗虚部为负值,表明超表面对入射电磁波产生了大量的损耗。由图7(b)可以看出,当石墨烯费米能级降为0 eV时,超表面在1.51~5.51 GHz范围内与自由空间的归一化输入阻抗实部相比0.3 eV时下降了很多,导致了其与自由空间的阻抗匹配程度降低,反射率增大,吸收率减小。

为深入探究二极管正向导通情况下石墨烯费米能级为0.3 eV时超表面的宽带吸波机理,对超表面在3.5 GHz处的表面电流分布进行监控,结果如图8所示。由图8(a)可以看出,顶层横向石墨烯层上的表面电流平行向下,这种平行电流会导致电荷在顶层横向石墨烯层的上下部分积累,产生电谐振^[25]。由图8(b)可以看出,在底层频率

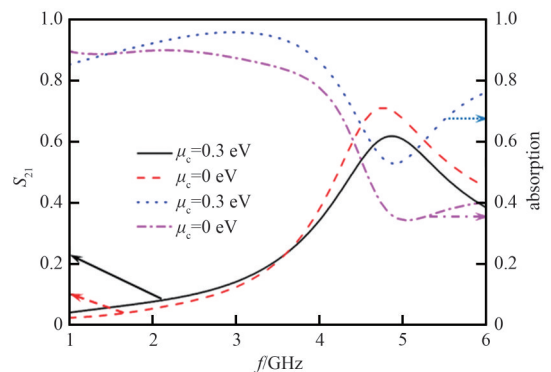


Fig.6 Transmission coefficient and absorption of metasurface with the Fermi level of graphene at 0.3 eV and 0 eV when the PIN diodes act in reverse biased condition

图6 二极管反向截止情况下,石墨烯费米能级为0.3 eV和0 eV时超表面的透射系数和吸收率

选择层上纵向开槽左右两边的表面电流是反向平行的，这种反向平行电流形成了电流回路，进而形成了磁谐振^[25]。超表面在 3.5 GHz 处同时形成了电谐振和磁谐振，导致了超表面入射电磁波的吸收。顶层开口铜环中加载的石墨烯作为电阻膜展宽了其吸收频带。

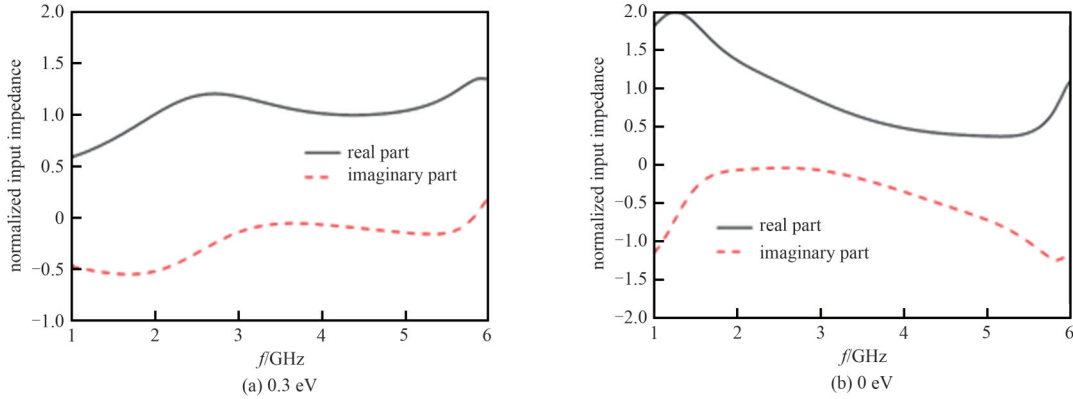


Fig.7 Normalized input impedance of metasurface with free space when the Fermi level of graphene is 0.3 eV and 0 eV under PIN diode acting in forward biased condition

图7 二极管正向导通情况下石墨烯费米能级为 0.3 eV 和 0 eV 时超表面与自由空间的归一化输入阻抗

图 9 为二极管正向导通情况下石墨烯费米能级为 0 eV 时超表面在 3.5 GHz 处的表面电流分布。由图 9(a)可以看出，入射电磁波在顶层横向石墨烯层上激发的表面电流相比 0.3 eV 时非常小，没有形成电谐振，导致超表面对入射电磁波的反射率很高，吸收率很低。

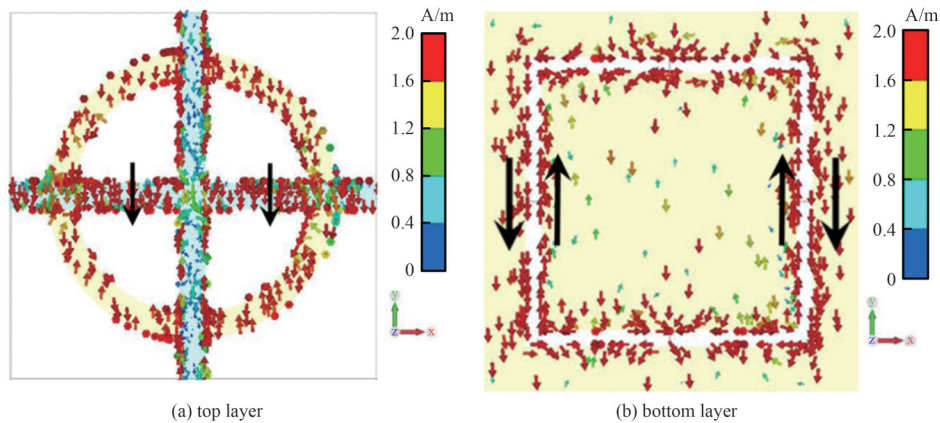


Fig.8 Surface current distribution of metasurface at 3.5 GHz when the Fermi level of graphene is 0.3 eV under PIN diode acting in forward biased condition

图8 二极管正向导通情况下石墨烯费米能级为 0.3 eV 时超表面在 3.5 GHz 处的表面电流分布

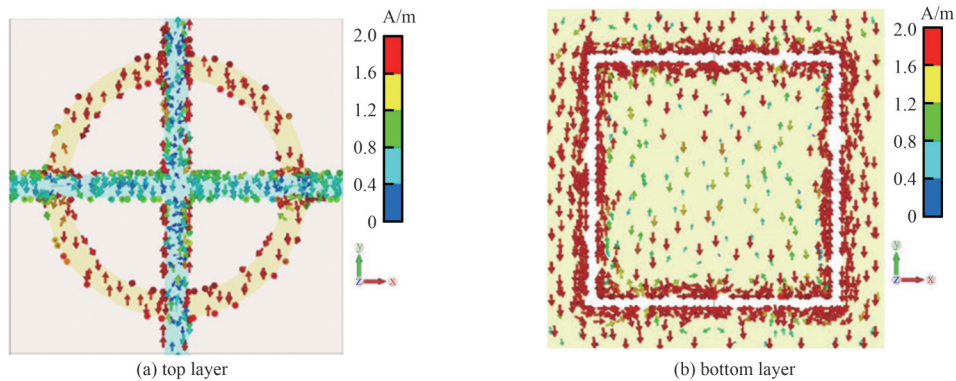


Fig.9 Surface current distribution of metasurface at 3.5 GHz when the Fermi level of graphene is 0 eV under PIN diode acting in forward biased condition

图9 二极管正向导通情况下石墨烯费米能级为 0 eV 时超表面在 3.5 GHz 处的表面电流分布

图 10 和图 11 为二极管反向截止情况下，石墨烯费米能级为 0 eV 和 0.3 eV 时超表面在 4.76 GHz 处的表面电流分布。由图 10(a)和图 11(a)可以看出，入射电磁波在顶层横向石墨烯层上激发的表面电流相比图 8 非常小，没有形成电谐振，吸收率很低；此时由于底层金属板开槽处的二极管处于反向截止状态，因此带有正方形开槽的金属基板相当于一个频率选择表面，使特定频率的入射波透过。

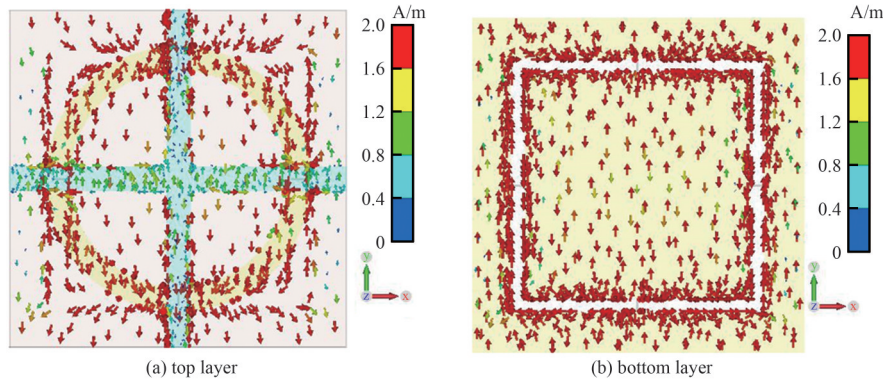


Fig.10 Surface current distribution of metasurface at 4.76 GHz when the Fermi level of graphene is 0 eV under PIN diode acting in reverse biased condition

图 10 二极管反向截止情况下石墨烯费米能级为 0 eV 时超表面在 4.76 GHz 处的表面电流分布

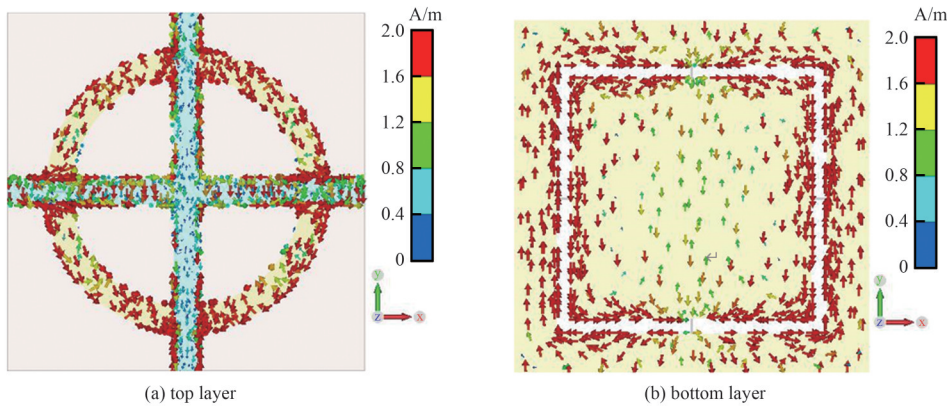


Fig.11 Surface current distribution of metasurface at 4.76 GHz when the Fermi level of graphene is 0.3 eV under PIN diode acting in reverse biased condition

图 11 二极管反向截止情况下石墨烯费米能级为 0.3 eV 时超表面在 4.76 GHz 处的表面电流分布

图 12 和图 13 为不同入射电磁波极化角下超表面的反射波、吸波和透射波特特性曲线。结果表明，超表面的反射波、吸波和透射波特特性是极化无关的，主要原因是结构单元具有旋转对称性。

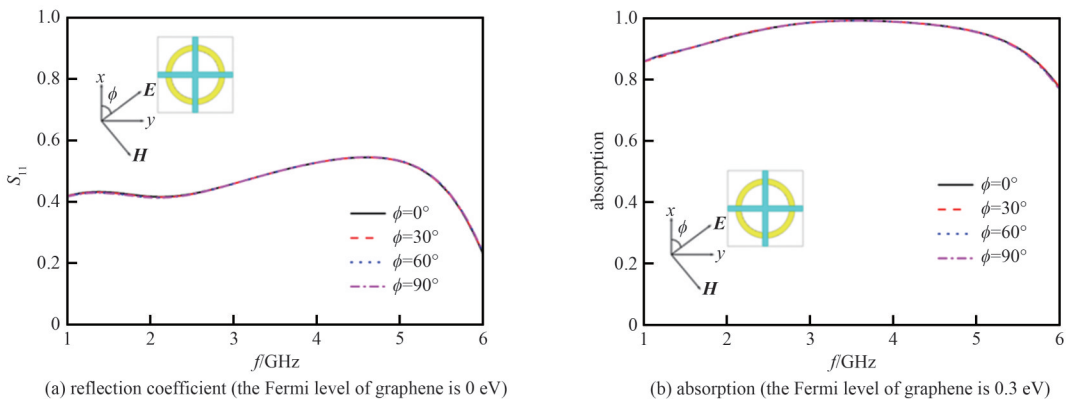


Fig.12 Reflection coefficient and absorption of metasurface at different polarization angles when the diodes act in forward biased condition

图 12 不同极化角下二极管正向导通时超表面的反射波系数和吸波率

图 14 为二极管正向导通情况下，石墨烯费米能级为 0 eV 时不同入射角下超表面的反射波特性曲线。在 TE 模式下，当入射角度从 0° 逐渐增加至 60° 时，超表面在 1.55~5.51 GHz 范围内的反射系数逐渐减小，但入射角度为 80° 时，反射系数突然增加；在 TM 模式下，当入射角度从 0° 逐渐增加至 80° 时，超表面在 1.55~5.51 GHz 范围内的反射系数逐渐增加。主要原因是随着入射角度的增大，超表面与自由空间的阻抗匹配程度减小，反射系数逐渐增加。图 15 为二极管正向导通情况下，石墨烯费米能级为 0.3 eV 时不同入射角下超表面的吸波特性曲线。在 TE 和 TM 模式下，当入射角度从 0° 逐渐增加至 80° 时，超表面在 1.55~5.51 GHz 范围内对入射电磁波的吸收率逐渐减小。主要原因是随着入射角度的增大，超表面与自由空间的阻抗匹配程度减小，反射率增大，吸收率减小。图 16 为二极管反向截止情况下，石墨烯费米能级为 0.3 eV 时不同入射角下超表面的透射波特性曲线。在 TE 和 TM 模式下，当入射角度从 0° 逐渐增加至 80° 时，超表面在透射波频率 4.76 GHz 处对入射电磁波的透射系数逐渐减小。主要原因是随着入射角度的增大，入射电磁波在传播方向上的电场和磁场强度减弱，透射系数减小。

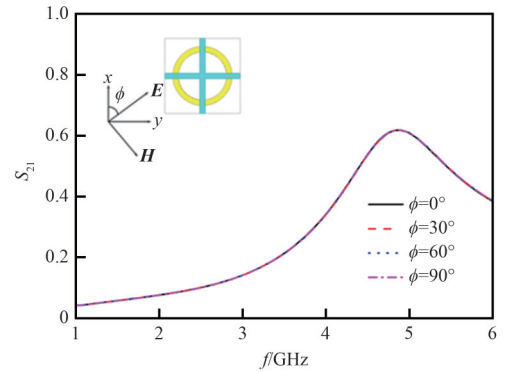


Fig.13 Transmission coefficient of metasurface at different polarization angles when the PIN diodes act in reverse biased condition(the Fermi level of graphene is 0.3 eV)
图 13 不同极化角下二极管反向截止情况时超表面的透射系数(石墨烯费米能级为 0.3 eV)

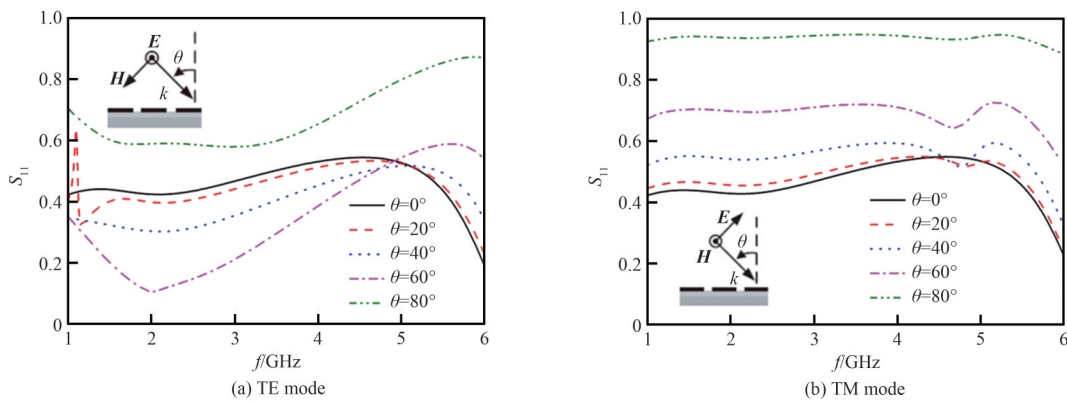


Fig.14 Reflection coefficient of metasurface at different incident angles with the diodes acting in forward biased condition when the Fermi level of graphene is 0 eV
图 14 二极管正向导通情况下石墨烯费米能级为 0 eV 时,不同入射角度下超表面的反射系数

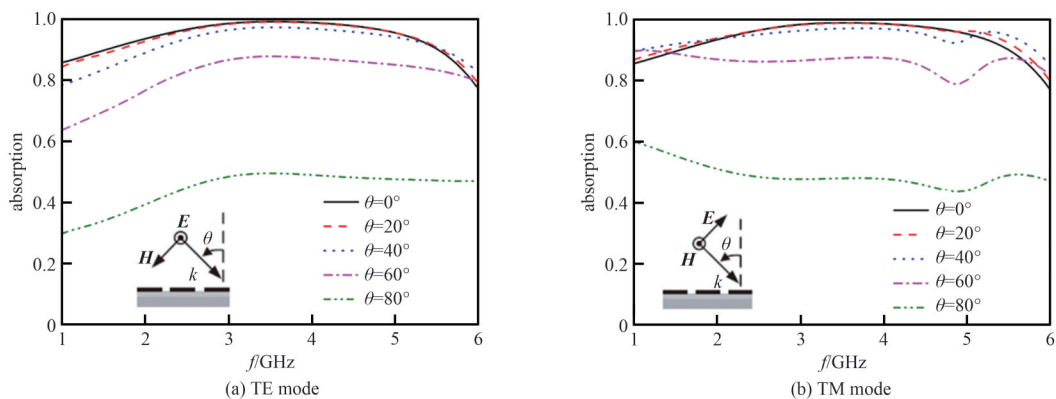


Fig.15 Absorption of metasurface at different incident angles with the diodes acting in forward biased condition when the Fermi level of graphene is 0.3 eV
图 15 二极管正向导通情况下石墨烯费米能级为 0.3 eV 时,不同入射角度下超表面的吸收率

对不同开口槽宽度 g 下超表面的宽带吸波(二极管正向导通情况下石墨烯费米能级为 0.3 eV)、反射波(二极管正向导通情况下石墨烯费米能级为 0 eV)和透射波(二极管反向截止情况下费米能级为 0.3 eV)特性进行计算，结

果如图 17~图 19 所示。由图 17~图 19 可以看出,随着开口槽宽度的增加,超表面的吸收带宽、反射系数和透射系数逐渐减小,但减小的幅度很小。

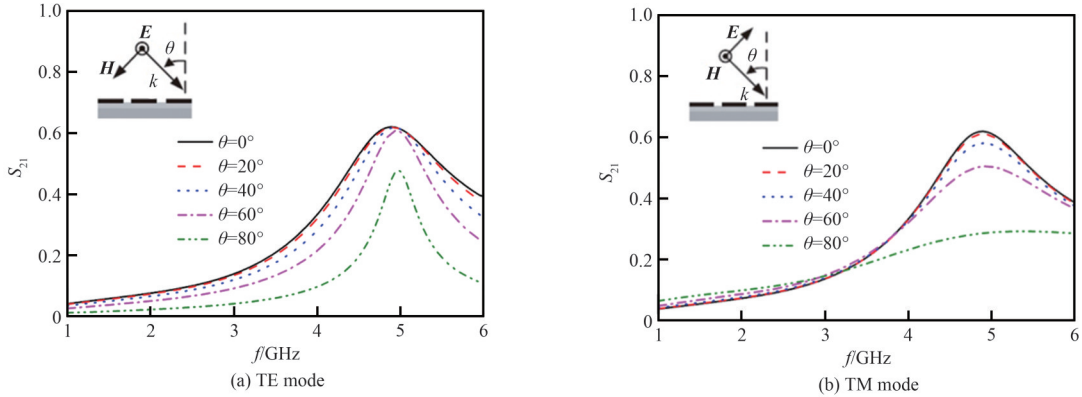


Fig.16 Transmission coefficient of metasurface at different incident angles with the diodes acting in reverse biased condition when the Fermi level of graphene is 0.3 eV

图 16 二极管反向截止情况下石墨烯费米能级为 0.3 eV 时不同入射角度下超表面的透射系数

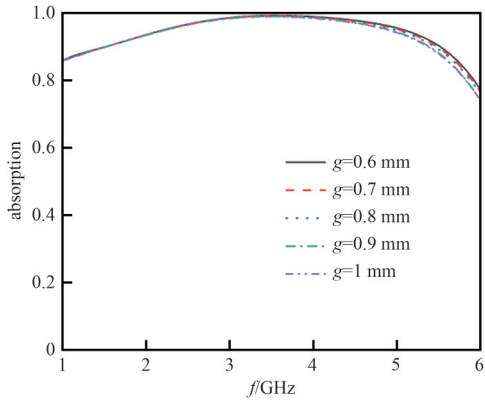


Fig.17 Absorption of metasurface at different width g of the opening slot with the PIN diodes acting in forward biased condition when the Fermi level of graphene is 0.3 eV

图 17 二极管正向导通情况下,石墨烯费米能级为 0.3 eV 时不同开口槽宽度 g 下超表面的吸收率

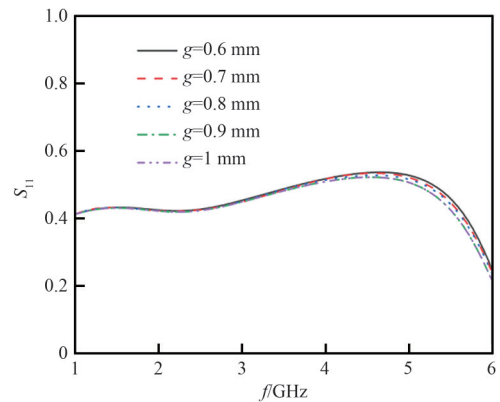


Fig.18 Reflection coefficient of metasurface at different width g of the opening slot with the PIN diodes acting in forward biased condition when the Fermi level of graphene is 0 eV

图 18 二极管正向导通情况下,石墨烯费米能级为 0 eV 时不同开口槽宽度 g 下超表面的反射系数

4 结论

本文基于石墨烯和 PIN 设计了一种宽带吸波/反射波/透射波多功能超表面。在二极管正向导通情况下,当石墨烯费米能级为 0.3 eV 时,超表面在 1.55~5.51 GHz 范围内对入射电磁波的吸收率超过了 90%;当石墨烯费米能级为 0 eV 时,超表面在 1.55~5.51 GHz 范围内对入射电磁波的反射系数超过了 40%。在二极管反向截止情况下,当石墨烯费米能级为 0 eV 和 0.3 eV 时,超表面在 4.76 GHz 处的透射系数分别达到了 71% 和 61%。通过对表面电流分布进行监控,阐述了宽带吸波和反射波的机理。由于结构单元的旋转对称性,超表面的宽带吸波、反射波和透射波特性是极化无关的,但对入射角度敏感。超表面因其宽带吸波/反射波/透射波多功能的特点,在通信设备和雷达的电磁隐身等领域具有广泛的应用前景。

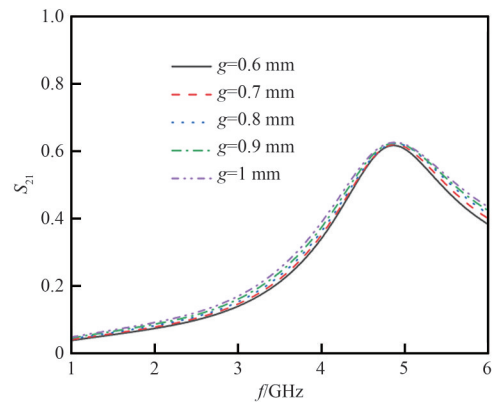


Fig.19 Transmission coefficient of metasurface at different width g of the opening slot with the PIN diodes acting in reverse biased condition when the Fermi level of graphene is 0.3 eV

图 19 二极管反向截止情况下,石墨烯费米能级为 0.3 eV 时不同开口槽宽度 g 下超表面的透射系数

参考文献：

- [1] COSTA F, MONORCHIO A. A frequency selective radome with wideband absorbing properties[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012,60(6):2740–2747. doi:10.1109/TAP.2012.2194640.
- [2] CHEN Qiang, BAI Jiajun, CHEN Liang, et al. A miniaturized absorptive frequency selective surface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015(14):80–83. doi:10.1109/LAWP.2014.2355252.
- [3] ZHOU Hang, YANG Liwei, QU Shaobo, et al. Experimental demonstration of an absorptive/transmissive FSS with magnetic material[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014(13):114–117. doi:10.1109/LAWP.2013.2296992.
- [4] CHEN Qiang, YANG Shilin, BAI Jiajun, et al. Design of absorptive/transmissive frequency-selective surface based on parallel resonance[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017,65(9):4897–4902. doi:10.1109/TAP.2017.2722875.
- [5] WANG Zhefei, ZENG Qingsheng, FU Jiahui, et al. A High-Transmittance Frequency-Selective rasorber based on dipole arrays[J]. *IEEE Access*, 2018(6):31367–31374. doi:10.1109/ACCESS.2018.2843795.
- [6] SHEN Zhongxiang, WANG Jiang, LI Bo. 3D frequency selective rasorber: concept, analysis, and design[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016,64(10):3087–3096. doi:10.1109/TMTT.2016.2604385.
- [7] YU Yufeng, SHEN Zhongxiang, DENG Tianwei, et al. 3D Frequency-Selective rasorber with wide upper absorption band[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017,65(8):4363–4367. doi:10.1109/TAP.2017.2712812.
- [8] ZHANG Yixiong, LI Bo, ZHU Lei, et al. Frequency selective rasorber with low insertion loss and dual-band absorptions using planar slotline structures[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018,17(4):633–636. doi:10.1109/LAWP.2018.2808221.
- [9] SHANG Yuping, SHEN Zhongxiang, XIAO Shaoqi. Frequency-Selective rasorber based on square-loop and cross-dipole arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014,62(11):5581–5589. doi:10.1109/TAP.2014.2357427.
- [10] OMAR A A, SHEN Zhongxiang, HUANG Hao. Absorptive frequency-selective reflection and transmission structures[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017,65(11):6173–6178. doi:10.1109/TAP.2017.2754463.
- [11] HAN Ye, CHE Wenquan, XIU Xin, et al. Switchable low-profile broadband frequency-selective rasorber/absorber based on slot arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017,65(12):6998–7008. doi:10.1109/TAP.2017.2759964.
- [12] HUANG Hao, SHEN Zhongxiang. Absorptive frequency-selective transmission structure with square-loop hybrid resonator[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017(16):3212–3215. doi:10.1109/LAWP.2017.2769093.
- [13] ZHAO Rui, GONG Boyi, XIAO Fajun, et al. Circuit model analysis of switchable perfect absorption/reflection in an active frequency selective surface[J]. *IEEE Access*, 2019(7):55518–55523. doi:10.1109/ACCESS.2019.2913406.
- [14] 胡丹, 付麦霞, 朱巧芬. 基于石墨烯超材料的宽频带可调太赫兹吸波体[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2021,19(6):973–977, 1001. (HU Dan, FU Maixia, ZHU Qiaofen. Tunable broadband terahertz absorber based on graphene metamaterial[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2021,19(6):973–977,1001.) doi:10.11805/TKYDA2021248.
- [15] 宋建勋, 徐永利, 凌东雄, 等. 基于石墨烯的可调谐高吸收率太赫兹超材料[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2019,17(6):933–938. (SONG Jianxun, XU Yongzhao, LING Dongxiong, et al. Tunable terahertz metamaterials with high absorptivity based on graphene structure[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2019,17(6):933–938.) doi:10.11805/TKYDA201906.0933.
- [16] HAN Ye, CHE Wenquan, XIU Xin, et al. Switchable low-profile broadband frequency-selective rasorber/absorber based on slot arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017,65(12):6998–7008. doi:10.1109/TAP.2017.2759964.
- [17] GHOSH S. Polarization-insensitive switchable frequency-selective rasorber/absorber[C]// 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Singapore: IEEE, 2019:399–401. doi:10.1109/APMC46564.2019.9038546.
- [18] QU Meijun, CHANG Tianyu, GUO Gan, et al. Design of graphene-based dual-polarized switchable rasorber/absorber at terahertz[J]. *IEEE Access*, 2020(8):127220–127225. doi:10.1109/ACCESS.2020.3008417.
- [19] BAKSHI S C, MITRA D, TEIXEIRA F L. Wide-angle broadband rasorber for switchable and conformal application[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021,69(2):1205–1216. doi:10.1109/TMTT.2020.3044601.
- [20] DE-LUSTRACA A, RATNI B, PIAU G P, et al. Tri-state metasurface-based electromagnetic screen with switchable reflection, transmission, and absorption functionalities[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2021(3):1184–1190. doi:10.1021/acsaelm.0c01038.
- [21] SONG Xinyun, BAI Xudong, ZHU Weiren. Reconfigurable metasurface for nearly full-range and continuous modulation of reflection, transmission, and absorption[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2022,4(3):1225–1231. doi:10.1021/acsaelm.1c01280.
- [22] 孙磊, 孙俊, 高晓梅, 等. 基于超材料的微波宽带完美吸波体设计[J]. *材料导报*, 2021,35(12):12014–12019. (SUN Lei, SUN Jun, GAO Xiaomei, et al. Design of microwave broadband perfect absorber based on metamaterial[J]. *Materials Reports*, 2021,35(12):12014–12019.) doi:10.11896/cldb.20040027.

- [23] FALLAHI A, PERRUISSEAU-CARRIER J. Design of tunable biperiodic graphene metasurfaces[J]. Physical Review B, 2012, 86(19):195408. doi:10.1103/PhysRevB.86.195408.
- [24] SMITH D R, SCHULTZ S, MARKOŠ P, et al. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients[J]. Physical Review B, 2002, 65(19):195104. doi:10.1103/PhysRevB.65.195104.
- [25] 沈晓鹏, 崔铁军, 叶建祥. 基于超材料的微波双波段吸收器[J]. 物理学报, 2012, 61(5):058101. (SHEN (Xiaopeng, CUI Tiejun, YE Jianxiang. Dual band metamaterial absorber in microwave regime[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(5):467-471.) doi: 10.7498/aps.61.058101.

作者简介:

王连胜(1982-), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为电磁超表面 .email:wls1982@126.com.

夏冬艳(1981-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为数据科学.

付全红(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电磁超表面.

丁学用(1979-), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为高功率微波源.

汪源(1984-), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为材料物理.