



## 吸收波长和吸收效率可控的超材料吸收器

江孝伟 武华

### Metamaterial absorber with controllable absorption wavelength and absorption efficiency

Jiang Xiao-Wei Wu Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 027804 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201173

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201173>

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

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于声学超材料的低频可调吸收器

A kind of tunable acoustic metamaterial for low frequency absorption

物理学报. 2019, 68(3): 034301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181908>

#### 基于超材料的可调谐的太赫兹波宽频吸收器

Tunable terahertz wave broadband absorber based on metamaterial

物理学报. 2019, 68(24): 247802 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191216>

#### 基于石墨烯振幅可调的宽带类电磁诱导透明超材料设计

Tunable graphene amplitude based broadband electromagnetically-induced-transparency-like metamaterial

物理学报. 2018, 67(9): 097801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180114>

#### 基于二氧化钒的太赫兹编码超表面

Terahertz coding metasurface based vanadium dioxide

物理学报. 2020, 69(22): 228101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200891>

#### 缺陷组合嵌入VO<sub>2</sub>薄膜结构的可调太赫兹吸收器

Tunable terahertz absorber with multi-defect combination embedded VO<sub>2</sub> thin film structure

物理学报. 2020, 69(2): 027801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191511>

#### 太赫兹液晶材料与器件研究进展

Research progress of terahertz liquid crystal materials and devices

物理学报. 2019, 68(8): 084205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182275>

# 吸收波长和吸收效率可控的超材料吸收器\*

江孝伟<sup>1)3)</sup> 武华<sup>2)3)†</sup>

1) (衢州职业技术学院信息工程学院, 衢州 324000)

2) (赣南师范大学物理与电子信息学院, 赣州 341000)

3) (北京工业大学, 光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124)

(2020年7月22日收到; 2020年9月17日收到修改稿)

为了使超材料完美吸收器 (metamaterial perfect absorber, MPA) 能够同时实现吸收效率和吸收波长的控制, 本文提出利用二氧化钒 ( $\text{VO}_2$ ) 和石墨烯作为 MPA 的材料, 通过对 MPA 的结构设计, 在红外波段实现了高吸收, 吸收效率最高可达 99%. 研究发现通过改变  $\text{VO}_2$  的温度和石墨烯的化学势, 可同时实现 MPA 吸收效率和吸收波长的控制, 吸收效率调制深度和吸收波长调谐范围分别可达 97.08% 和 3.2  $\mu\text{m}$ . 通过对 MPA 在吸收波长处的磁场分布分析可以得出, MPA 能够产生高吸收是由于其形成了法布里-帕罗 (Fabry-Pérot, FP) 干涉腔共振, 研究发现 MPA 的结构参数对 FP 腔的共振波长具有显著的影响.

**关键词:** 超材料, 吸收器, 二氧化钒, 石墨烯**PACS:** 78.67.Pt, 78.67.Wj, 78.40.-q**DOI:** 10.7498/aps.70.20201173

## 1 引言

超材料完美吸收器 (metamaterial perfect absorber, MPA) 自 2008 年被 Landy 等<sup>[1]</sup> 提出后, 逐渐引起人们的关注. 相比于传统的电磁波吸收器, MPA 具有超高吸收效率、结构紧凑、质量轻等优点<sup>[2,3]</sup>, 因此逐渐被用于生物成像、材料探测、污染诊断、医学光谱学等领域<sup>[4,5]</sup>. 随着人们对 MPA 的深入研究, 已设计和制备出具有多种不同功能的 MPA, 并且 MPA 的吸收光谱已不仅在微波波段和太赫兹波段<sup>[6,7]</sup>, 甚至已经覆盖到可见光波段<sup>[8]</sup>.

随着应用设备朝着集成化、便携化的方向发展, 人们对 MPA 的要求也随之增加, 不仅要求 MPA 在不同的光频有高吸收效率, 而且还要求能控制 MPA 的吸收波长和吸收效率. 之前已经有许多课题组提出不同的方法实现吸收波长、吸收效率

的控制, 不过这些方法都是通过改变 MPA 的结构或者改变 MPA 周围介质材料来实现 MPA 吸收效率和吸收波长的控制. 如将液晶材料、微流体置于 MPA 上<sup>[9,10]</sup>, 或利用微机械系统改变 MPA 的结构<sup>[11]</sup>. 但是通过液晶或者微机械系统等方法实现 MPA 吸收特性控制, 在增加器件制备难度的同时还会增大 MPA 的体积.

近几年, 由于二氧化钒 ( $\text{VO}_2$ ) 光学、电学性能突出, 并且可通过热致相变、电致相变等激励手段实现其半导体与金属之间的可逆相变, 因此逐渐引起人们的关注. 经测试发现  $\text{VO}_2$  的相变温度在 68  $^\circ\text{C}$ , 相变后其会从高透射率的半导体状态变为高反射率的金属状态, 电阻率也会从高电阻率变为低电阻率<sup>[12,13]</sup>. 因为  $\text{VO}_2$  具有上述这些相变特性, 因此逐渐地被用于 MPA 当中以实现 MPA 吸收效率的控制. Naorem 等<sup>[14]</sup> 设计并制备出由铝纳米阵列、硫化锌、 $\text{VO}_2$ 、金属衬底构成的 MPA, 经测试发现,

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61575008, 61650404)、江西省自然科学基金 (批准号: 20171BAB202037)、江西省教育厅科技项目 (批准号: GJJ170819) 和衢州市科技计划项目 (批准号: 2019K20) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wh1125@126.com

VO<sub>2</sub> 温度在 21—90 °C 之间变化过程中, MPA 吸收效率的调制深度达到了 57%. Liu 等<sup>[15]</sup> 利用金属钨、VO<sub>2</sub>、二氧化硅设计并制备出在近红外波段可实现吸收效率控制的 MPA, 通过调节 VO<sub>2</sub> 温度, 该 MPA 吸收效率差值可达 89.74%. 上述研究虽然可实现 MPA 吸收效率的控制, 不过并没有实现 MPA 吸收波长的控制.

与此同时, 人们发现将石墨烯与 MPA 集成后, 可不通过改变器件结构, 只需改变石墨烯的化学掺杂或两端电压就可实现 MPA 吸收波长的控制. 经过研究发现, 通过外接电压或者化学掺杂可动态的调制石墨烯的化学势, 而石墨烯的电导率则是由其化学势调控, 这一特性使 MPA 吸收波长实现调控成为可能<sup>[16,17]</sup>. Yao 等<sup>[18]</sup> 利用椭圆形石墨烯、二氧化硅介质层和金衬底构成 MPA, 经计算发现该 MPA 在近红外波段具有双吸收峰, 另外可以发现随着石墨烯化学势的下降, MPA 两吸收波长都实现了不同程度的红移; 范春珍等<sup>[19]</sup> 提出了由十字形的石墨烯层、二氧化硅介质层、金衬底构成的 MPA, 经模拟计算发现该 MPA 在太赫兹波段具有两个高吸收峰, 并且通过增加石墨烯的化学势, MPA 的两个吸收波长都实现了蓝移.

虽然借助 VO<sub>2</sub> 和石墨烯在不增加器件体积和工艺难度等的情况下, 可分别实现 MPA 吸收效率和吸收波长的控制, 不过目前它们大多是单独实现吸收效率或吸收波长的控制, 并没有在一个 MPA 上同时实现吸收效率和吸收波长的控制. 但是目前在光通信、探测、光谱分析等应用中<sup>[20,21]</sup>, 对于能同时实现吸收波长和吸收效率控制的 MPA 极为迫切, 因此需设计出结构简单、工艺制备难度低, 且能同时实现吸收波长和吸收效率控制的 MPA 来满足当前应用要求.

本文基于时域有限差分法 (finite difference time domain method, FDTD) 软件利用石墨烯和 VO<sub>2</sub> 材料设计了可同时控制吸收效率和吸收波长的 MPA, 经过模拟分析发现, 在化学势从 0.1 eV 增加到 3.0 eV 的过程中, 该 MPA 的吸收波长实现了 3.2 μm 的调谐, 并且吸收效率均在 90% 以上. 而且通过改变 VO<sub>2</sub> 温度, 在其从半导体态相变到金属态的过程中, MPA 的吸收效率调制深度达到了 97.08%. 通过本文的研究, 能够为下一代的近红外无线通信、近红外材料探测、生物探测提供高质量吸收特性可控的 MPA.

## 2 器件结构

图 1 是吸收特性可控的 MPA 结构图, 它自下而上分别由 0.1 μm 厚的 Au 衬底、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、VO<sub>2</sub>、石墨烯、周期纳米柱 (Au) 阵列构成, 其中  $P$  是纳米柱阵列的周期,  $r$  是单个纳米柱的半径,  $h$  是纳米柱的厚度. 因为 Au 衬底厚度大于红外光在 Au 衬底上的趋肤深度, 故此 MPA 的透射率为零, 而其吸收效率  $A$  将只由反射率  $R$  所决定, 具体表达式为  $A = 1 - R$ .

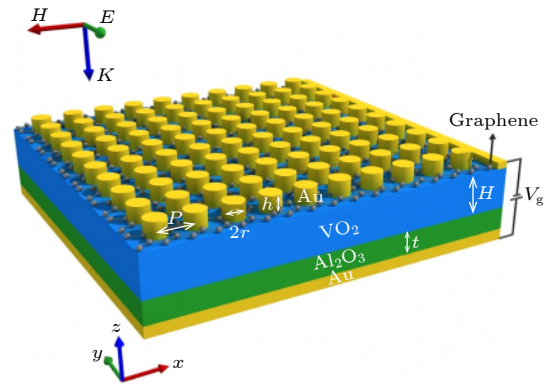


图 1 吸收特性可控的 MPA 结构图

Fig. 1. MPA structure diagram with controllable absorption characteristics.

在具体实验中, 以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为衬底, 利用磁控溅射方法在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 衬底上获得高质量 VO<sub>2</sub> 薄膜, 磁控溅射方法生长的 VO<sub>2</sub> 具有薄膜均匀性好、可大面积制备等优点<sup>[22]</sup>. 本文中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 折射率和消光系数由文献<sup>[23]</sup> 获得. Au 的介电常数  $\epsilon_{\text{Au}}$  则用 Drude 模型表示, 如 (1) 式所示:

$$\epsilon_{\text{Au}} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (1)$$

式中,  $\omega_p$  是等离子体频率,  $\gamma$  是阻尼系数,  $\omega$  是入射光角频率. 在本文中  $\omega_p = 1.37 \times 10^{16}$  rad/s,  $\gamma = 4.08 \times 10^{13}$  rad/s<sup>[24]</sup>.

石墨烯的电导率  $\delta_g$  由两部分构成<sup>[25]</sup>, 分别是带内跃迁电导率  $\delta_{\text{intra}}$  和带间跃迁电导率  $\delta_{\text{inter}}$ , 具体关系是  $\delta_g = \delta_{\text{intra}} + \delta_{\text{inter}}$ . 因为本文中 MPA 吸收波长在红外波段, 而对于石墨烯, 当处在红外或太赫兹波段时, 其电导率主要由  $\delta_{\text{intra}}$  所决定<sup>[26,27]</sup>, 所以在本文中石墨烯的  $\delta_g$  可由 (2) 式表示:

$$\sigma_g = \frac{ie^2k_B T}{\pi\hbar^2(\omega + i\Gamma)} \left[ \frac{E_f}{k_B T} + 2 \ln \left( e^{\frac{-E_f}{k_B T}} + 1 \right) \right], \quad (2)$$

式中,  $e$  是单元电荷量;  $\hbar$  为约化普朗克常数;  $k_B$  是玻尔兹曼常数;  $T$  是石墨烯温度, 在本文中  $T = 300$  K;  $E_f$  是石墨烯化学势;  $\Gamma$  为散射率, 在本文中  $\Gamma = 0.0082$  eV. 由于 FDTD 软件自带石墨烯材料, 因此在模拟计算时, 只需选择石墨烯材料, 然后将相对应的散射率  $\Gamma$ 、化学势  $E_f$ 、温度  $T$  填入即可.

从 (2) 式可以发现, 石墨烯的电导率  $\delta_g$  将会被化学势  $E_f$  所影响. 而根据 (3) 式—(5) 式可知,  $E_f$  又受外部电压  $V_g$  控制.

$$E_f = \hbar v_F \sqrt{\pi n}, \quad (3)$$

$$n = (n_0^2 + a^2 |\Delta V|^2)^{1/2}, \quad (4)$$

$$|\Delta V| = |V_{\text{CNP}} - V_g|, \quad (5)$$

式中,  $v_F$  为费米速度, 约  $1 \times 10^6$  m/s;  $n$  为载流子浓度;  $n_0$  为残留载流子浓度;  $a$  为电容率, 它与  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{VO}_2$  的厚度和介电常数有关;  $V_{\text{CNP}}$  为使载流子浓度为零的补偿电压;  $V_g$  为添加在石墨烯上的电压 [28,17].

### 3 结果与讨论

#### 3.1 MPA 吸收效率的控制

利用 FDTD 方法首先研究了  $\text{VO}_2$  处在相变前后 MPA 的吸收效率, 具体如图 2 所示, 在利用 FDTD 方法模拟计算时, 先建立一个超材料单元, 然后在  $x, y$  方向添加周期边界 (periodic), 在  $z$  方向添加完美匹配层边界条件 (perfectly matched layer, PML), 网格类型选用 auto non-uniform 形式, 精度设为 5. 从图 2 中可以发现, 温度  $T_V = 5$  °C 时, 以  $\text{VO}_2$  为材料的 MPA 在波长  $\lambda = 9.66$   $\mu\text{m}$  时的吸收效率可达 96%, 而当  $T_V$  达到  $\text{VO}_2$  的相变温度 68 °C 时, MPA 的吸收效率仅有 2.8%.  $\text{VO}_2$  相变前后的吸收效率调制深度 ( $\Delta A = (A_{\text{max}} - A_{\text{min}})/A_{\text{max}}$ ) 可达 97.08%, 相比于文献 [3,14,15] 有了较大的提升. 在  $\text{VO}_2$  温度从 5 °C 升到 68 °C 过程中, 其温度会传导给石墨烯, 但石墨烯的电导率并不会产生明显变化 [29]. 此时,  $P = 0.8$   $\mu\text{m}$ ,  $h = 0.05$   $\mu\text{m}$ ,  $r = 0.38$   $\mu\text{m}$ ,  $H = 0.3$   $\mu\text{m}$ ,  $t = 0.05$   $\mu\text{m}$ ,  $E_f = 0.1$  eV, 入射光为 TM 偏振. 由图 2 可知通过改变  $\text{VO}_2$  的温度, 成功实现了 MPA 吸收效率的控制. 本文中通过外部热源实现对  $\text{VO}_2$  的温度调制, 石墨烯的化学势  $E_f$  受外部电压  $V_g$  控制, 因此  $\text{VO}_2$  的温度石墨烯电导率影响较小, 另外根据文

献 [30] 可知, 利用电压将石墨烯化学势从 0.1 eV 调制到 3.0 eV, 对二氧化钒影响也较小, 所以可知石墨烯和  $\text{VO}_2$  的两种调制方式互不干扰.

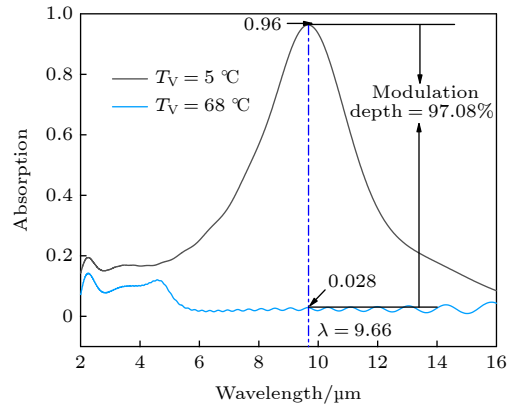


图 2  $\text{VO}_2$  不同温度下 MPA 的吸收效率  
Fig. 2. Absorption efficiency of MPA at different temperature of  $\text{VO}_2$ .

为了探寻 MPA 在  $\text{VO}_2$  相变前后吸收效率能实现高调制深度的原因, 我们计算了 MPA 在  $T_V$  分别为 5 °C 和 68 °C 时的磁场分布 (入射波长  $\lambda = 9.66$   $\mu\text{m}$ ), 具体如图 3 所示. 图 3(a) 是  $T_V = 5$  °C 时, MPA 的磁场分布, 可以看到大部分能量都聚集在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{VO}_2$  上, 这说明入射光大部分被 MPA 所吸收. 另外从图 3(a) 可以知道, 在  $\text{VO}_2$  相变前 MPA 之所以有高吸收效率, 是因为 MPA 整体结构形成了法布里-帕罗干涉 (Fabry-Pérot, FP) 腔共振, 即入射光在 Au 衬底- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{VO}_2$ -石墨烯/Au 纳米阵列之间形成了干涉增强吸收.

图 3(b) 是  $T_V = 68$  °C 时 MPA 的磁场分布, 可以发现因为温度升高, 使  $\text{VO}_2$  产生了相变, 变成了具有金属特性的金属层, 所以当入射光照射到 MPA 后, 入射光的大部分能量被反射到空气当中, 而在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{VO}_2$  上的能量非常稀少, 从而导致 MPA 的吸收效率下降到 2.8%.

在  $\text{VO}_2$  相变温度 68 °C 以下时, MPA 能形成 FP 腔共振吸收, 实现高吸收效率, 是因为在达到相变温度前,  $\text{VO}_2$  都是保持高透射的半导体状态. 而且在相变前  $\text{VO}_2$  的折射率  $n$  和消光系数  $k$  随温度变化幅度都比较小, 当  $T_V$  从 5 °C 增加到 40 °C 过程中,  $n$  只增加了 0.5 左右, 而  $k$  只增加了 0.05 左右, 具体如图 4 所示. 但是当  $T_V$  突然增加到了相变温度 68 °C 时,  $\text{VO}_2$  的  $k$  相比于  $T_V = 5$  °C 时突然增加了 0.3 左右,  $n$  增加了 6 左右, 这就明显

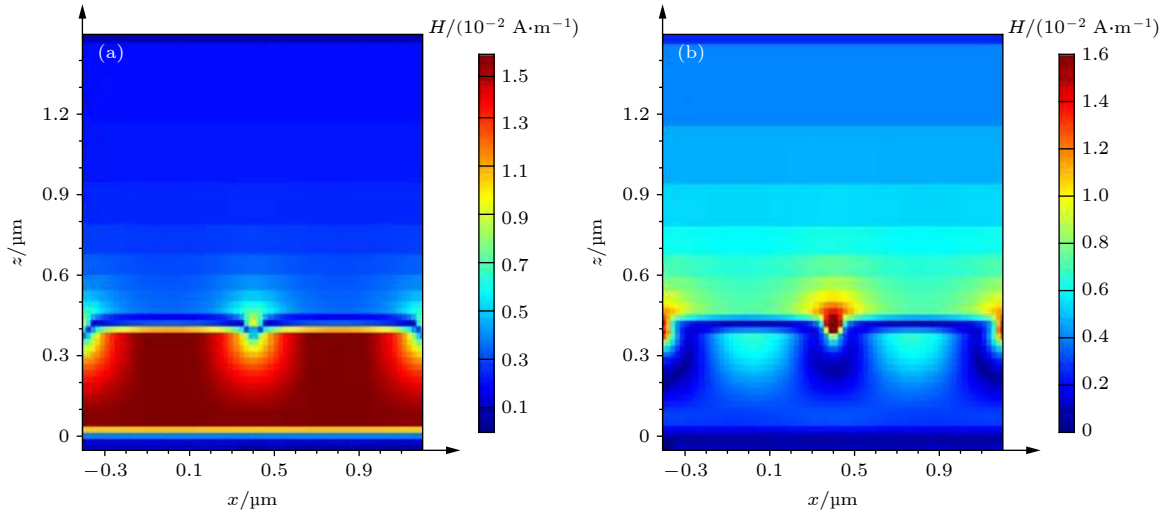


图 3  $\text{VO}_2$  不同温度下 MPA 磁场分布 (a)  $T_V = 5\text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $T_V = 68\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 3. Magnetic field distribution of MPA at different temperature of  $\text{VO}_2$ : (a)  $T_V = 5\text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $T_V = 68\text{ }^\circ\text{C}$ .

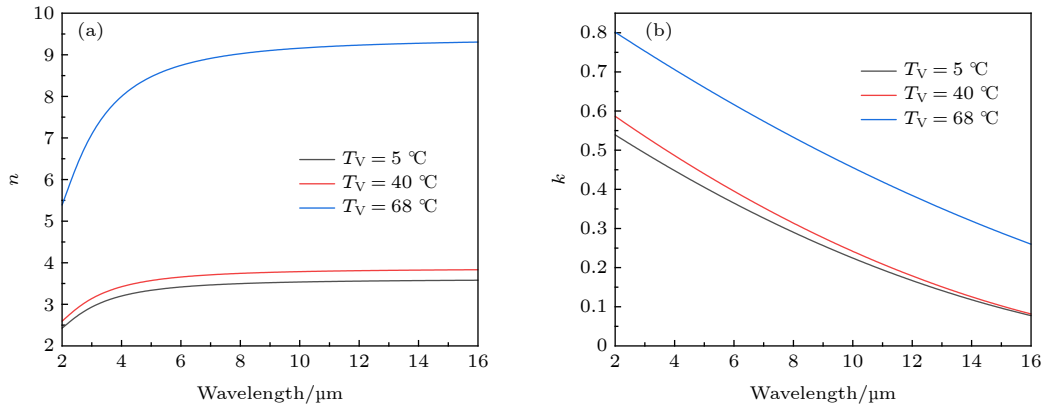


图 4 温度对  $\text{VO}_2$  折射率和消光系数的影响 (a) 折射率  $n$ ; (b) 消光系数  $k$

Fig. 4. The influence of temperature on the refractive index and the extinction coefficient of  $\text{VO}_2$ : (a) Refractive index  $n$ ; (b) extinction coefficient  $k$ .

变成了高反射的金属状态<sup>[31]</sup>, 所以当  $T_V$  达到相变温度时, MPA 会将入射光几乎全部反射到空气当中, MPA 的吸收效率显著下降. 图 4 中  $\text{VO}_2$  在不同温度下的折射率和消光系数由 Material Studio 获得, 它是一种具有多种先进算法的综合性模拟工具, 可对晶体材料的性质进行模拟分析.

### 3.2 MPA 吸收波长的控制

利用 FDTD 方法研究了石墨烯化学势  $E_f$  对 MPA 吸收波长的影响, 具体结果如图 5 所示. 可以看到, 当  $E_f = 0.1\text{ eV}$  时, MPA 的吸收波长为  $9.66\text{ }\mu\text{m}$ , 而当  $E_f = 3\text{ eV}$  时, MPA 的吸收波长为  $6.46\text{ }\mu\text{m}$ , 吸收波长蓝移了  $3.2\text{ }\mu\text{m}$ . 因此利用石墨烯实现了对 MPA 吸收波长的控制. 此时,  $P = 0.8\text{ }\mu\text{m}$ ,  $h = 0.05\text{ }\mu\text{m}$ ,  $r = 0.38\text{ }\mu\text{m}$ ,  $H = 0.3\text{ }\mu\text{m}$ ,  $t = 0.05\text{ }\mu\text{m}$ ,

$T_V = 5\text{ }^\circ\text{C}$ , 入射光为 TM 偏振. 另外从图 5 中可以发现, 当  $E_f = 1\text{ eV}$  时, MPA 吸收率最高, 可达 99.1%.

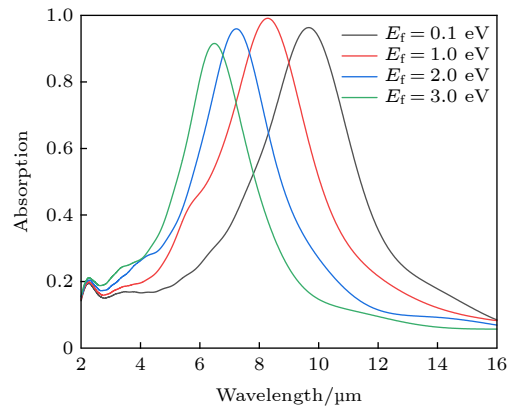


图 5 石墨烯化学势对 MPA 吸收波长的影响

Fig. 5. The effect of graphene chemical potential on the absorption wavelength of MPA.

随着  $E_f$  增加, MPA 吸收波长之所以会产生蓝移现象, 是因为石墨烯共振波长  $\lambda_{re}$  与石墨烯等效折射率有关, 具体关系为  $\lambda_{re} = \alpha + \beta \cdot n_{eff}$ , 其中  $\alpha$ ,  $\beta$  是与结构参数、周围介电常数有关的常数<sup>[32]</sup>. 根据 (2) 式、(6) 式和图 6 可知, 当  $E_f$  增加时,  $n_{eff}$  会逐渐下降, 从而导致石墨烯共振波长  $\lambda_{re}$  逐渐减小, 进而影响了 MPA 的吸收波长<sup>[19,31]</sup>. 根据 (3) 式—(5) 式可知, 对于石墨烯  $E_f$  的控制, 只需通过改变外接电压  $V_g$  就可实现 MPA 吸收波长的控制.

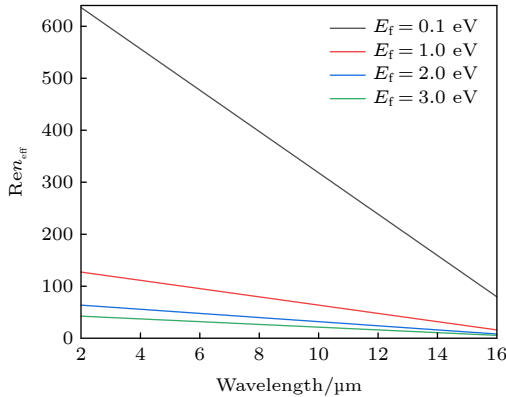


图 6 石墨烯化学势对石墨烯等效折射率的影响  
Fig. 6. The effect of graphene chemical potential on the equivalent refractive index of graphene.

石墨烯电导率  $\delta_g$  与其等效折射率  $n_{eff}$  的关系为

$$n_{eff} = \sqrt{\epsilon_{VO_2} - (2\epsilon_{VO_2}/\eta_0\delta)^2}, \quad (6)$$

式中,  $\eta_0$  是真空阻抗,  $\epsilon_{VO_2}$  是  $VO_2$  的介电常数. 由 (2) 式、(6) 式可知, 通过改变  $E_f$  可实现对石墨烯等效折射率的控制<sup>[33,28]</sup>.

通过 (2) 式和 (6) 式, 计算了不同  $E_f$  下石墨烯等效折射率实部的变化趋势, 具体结果如图 6 所示. 从图中可知, 随着石墨烯化学势  $E_f$  升高, 石墨烯等效折射率  $n_{eff}$  却逐渐减小. 另外从图 6 可知, 在相同化学势  $E_f$  下, 随着波长红移, 石墨烯等效折射率  $n_{eff}$  也会逐渐减小.

### 3.3 结构参数对 MPA 吸收特性的影响

为了能够充分掌握 MPA 结构参数对其吸收特性的影响规律, 本文基于 FDTD 方法详细地分析了 MPA 结构参数对其吸收特性地影响, 此时  $P = 0.8 \mu\text{m}$ ,  $t = 0.05 \mu\text{m}$ ,  $T_V = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $E_f = 0.1 \text{ eV}$ . 图 7 是周期纳米柱半径  $r$  对 MPA 吸收特性的影响,  $H = 0.3 \mu\text{m}$ ,  $h = 0.05 \mu\text{m}$ . 从图 7 可以发现, 随着  $r$  的增加, MPA 吸收波长会逐渐红移,

当  $r$  从  $0.32 \mu\text{m}$  增加到  $0.38 \mu\text{m}$ , 吸收波长从  $7.43 \mu\text{m}$  增加到了  $9.66 \mu\text{m}$

对于纳米柱半径  $r$  能够对 MPA 吸收波长产生影响的原因, 需要从 MPA 内部的 FP 腔共振中探索. 由图 3(a) 知道, 图 1 的 MPA 在  $VO_2$  相变之前, 能在红外波段产生高吸收效率, 是因为 FP 腔共振引起的, 而 FP 腔共振波长  $\lambda_{FP}$  是与谐振腔等效折射率  $n_q$ 、共振腔长  $d$  有关, 具体关系可表示为  $\lambda_{FP} = 2n_q d/m$ , 其中  $m$  是整数. 谐振腔等效折射率  $n_q$  由纳米柱阵列等效折射率  $n_{TM}$ 、 $VO_2$  折射率、 $Al_2O_3$  折射率、Au 衬底折射率所决定. 当纳米柱半径  $r$  增加, 纳米柱阵列的占空比  $f = 2r/P$  增加, 根据等效介质理论可知, 当  $f$  增加, 纳米柱阵列对于 TM 偏振光的等效折射率  $n_{TM}$  会增加. 由此可知,  $r$  增加会导致  $n_{TM}$  增加, 从而引起  $n_q$  增加, 最终使 FP 腔共振波长的红移<sup>[25]</sup>, 如图 8 所示. 图 8 利用 FDTD 方法计算得到, 图中显示的

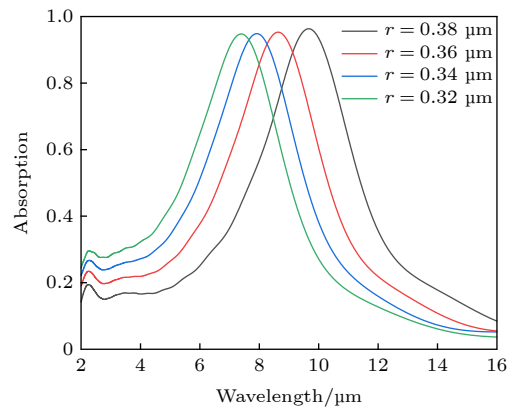


图 7 纳米柱半径对 MPA 吸收特性的影响  
Fig. 7. The influence of nano column radius on the absorption characteristics of MPA.

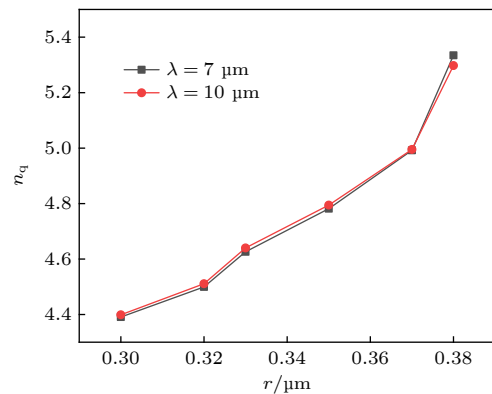


图 8 纳米柱半径对 MPA 结构等效折射率  $n_q$  的影响  
Fig. 8. The influence of nano column radius on the equivalent refractive  $n_q$  of MPA.

是在波长  $7\ \mu\text{m}$  和  $10\ \mu\text{m}$  入射条件下, 不同纳米柱半径  $r$  对应的 MPA 等效折射率  $n_q$ , 从图 8 可以看到, 当  $r$  从  $0.3\ \mu\text{m}$  增加到  $0.38\ \mu\text{m}$ , MPA 的等效折射率也相应逐渐变大, 另外不同波长下, MPA 对应的等效折射率相差并不是很明显.

FP 腔的共振腔长  $d$  主要由  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的厚度  $H$  和  $\text{VO}_2$  的厚度  $t$  所决定, 但是从图 3 中可以发现, 其实还有一部分的光会渗透进纳米柱阵列当中, 所以共振腔长  $d$  还需将渗透进纳米柱阵列中的一部分厚度  $\Delta h$  考虑进去, 因此共振腔长  $d$  可以表示为  $d = H + t + \Delta h$ . 故纳米柱厚度  $h$  增加会使  $d$  增加, 会使 FP 腔共振波长  $\lambda_{\text{FP}}$  增加, 如图 9 所示,  $r = 0.38\ \mu\text{m}$ ,  $H = 0.3\ \mu\text{m}$ . 图 9 是纳米柱厚度对 MPA 吸收特性的影响, 当  $h = 0.05\ \mu\text{m}$  时, MPA 吸收波长为  $9.66\ \mu\text{m}$ , 而当  $h = 0.15\ \mu\text{m}$  时, MPA 吸收波长则为  $10.34\ \mu\text{m}$ .  $h$  从  $0.05\ \mu\text{m}$  增加到  $0.15\ \mu\text{m}$ , MPA 的吸收波长实现了  $0.68\ \mu\text{m}$  的红移.

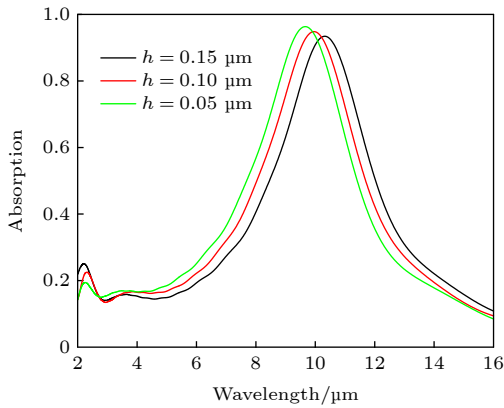


图 9 纳米柱厚度对 MPA 吸收特性的影响

Fig. 9. The influence of nano column thickness on the absorption characteristics of MPA.

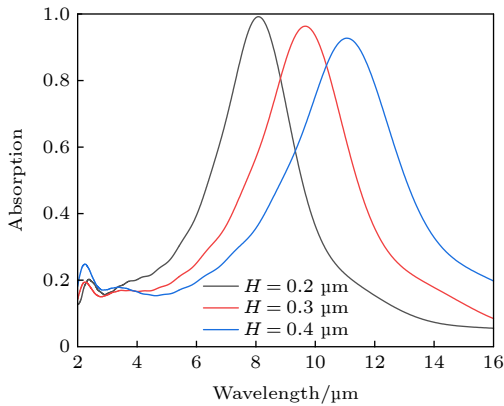


图 10  $\text{VO}_2$  厚度对 MPA 吸收特性的影响

Fig. 10. The influence of  $\text{VO}_2$  thickness on the absorption characteristics of MPA.

图 10 是在  $\text{VO}_2$  相变前其厚度  $H$  对 MPA 吸收波长的影响,  $r = 0.38\ \mu\text{m}$ ,  $h = 0.05\ \mu\text{m}$ . 从图 10 可发现,  $H$  从  $0.2\ \mu\text{m}$  增加到  $0.4\ \mu\text{m}$ , MPA 吸收波长将从  $8.06\ \mu\text{m}$  增加到  $11.09\ \mu\text{m}$ . 相比于  $h$  对 MPA 吸收波长的影响,  $H$  更为显著,  $h$  每增加  $0.1\ \mu\text{m}$ , 吸收波长增加  $0.68\ \mu\text{m}$ , 但是  $H$  增加  $0.1\ \mu\text{m}$ , 吸收波长增加  $1.515\ \mu\text{m}$ , 这主要是因为  $H$  是全部包含在共振腔长  $d$  中, 但是  $h$  只有一小部分厚度  $\Delta h$  是包含在共振腔长  $d$  中. 另外从图 10 可以发现, 随着  $H$  的增加, MPA 吸收效率将会明显下降.

## 4 结 论

利用  $\text{VO}_2$  和石墨烯材料设计了在红外波段吸收波长和吸收效率同时可控的 MPA. 经模拟计算分析发现,  $\text{VO}_2$  在  $5\ \text{℃}$  和  $68\ \text{℃}$  时, MPA 吸收效率分别为  $96.0\%$  和  $2.8\%$ , 吸收效率调制深度可达  $97.08\%$ . 而通过改变石墨烯外接电压, 使石墨烯化学势  $E_f$  从  $0.1\ \text{eV}$  增加到  $3.0\ \text{eV}$ , MPA 的吸收波长可实现  $3.2\ \mu\text{m}$  的调谐. 对 MPA 在吸收波长处的磁场分布分析可以发现, MPA 能实现高吸收效率是因为其内部形成了 FP 腔共振, 因此本文分析了 MPA 结构参数 (纳米柱阵列半径  $r$  及厚度  $h$ ,  $\text{VO}_2$  厚度  $H$ ) 对其吸收特性的影响, 发现随着  $r$ ,  $h$ ,  $H$  的增加, MPA 吸收波长都产生红移现象, 其中  $H$  对共振波长影响最为显著, 另外还发现随着  $H$  的增加, MPA 吸收效率将显著下降. 通过本文研究可为将来设计制备结构紧凑、制备难度低的吸收特性可控 MPA 提供理论指导.

## 参考文献

- [1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [2] Liu X L, Starr T, Starr A F, Padilla W J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 207403
- [3] Lei L, Li S, Hang H X, Tao K Y, Xu P 2018 *Opt. Express* **8** 1031
- [4] Wen D, Yue F, Li G, Zheng G, Chan K, Chen S, Chen M, Li K F 2015 *Nat. Commun.* **6** 8241
- [5] Chen L, Liao D G, Guo X G 2019 *Front. Inform. Technol. Electron. Eng.* **20** 591
- [6] Bian B, Liu S, Wang S 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 194511
- [7] Yin S, Zhu J F, Xu W D, Jiang W, Yuan J, Yin G 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 073903
- [8] Xiao Z, Tang J 2017 *Mater. Lett.* **192** 21
- [9] Shrekenhamer D, Chen W C, Padilla W J 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 177403
- [10] Ling K, Kim H K, Yoo M, Lim S 2015 *Sensors (Basel)* **15**

28154

- [11] Liu M K, Susli M, Silva D, Putrino G, Kala H, Fan S T, Cole M 2017 *Microsyst. Nanoeng.* **3** 17033
- [12] Hashemi M R M, Yang S H, Wang T 2016 *Sci. Rep.* **6** 35439
- [13] Pradhan J K, Ramakrishna S A, Rajeswaran B 2017 *Opt. Express* **25** 9116
- [14] Naorem R, Dayal G, Anantha Ramakrishna S 2015 *Opt. Commun.* **346** 154
- [15] Liu Z M, Li Y 2017 *J. Phys. D Appl. Phys.* **50** 38
- [16] Chen H, Zhang X X, Wang H, Ji Y H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 118101 (in Chinese) [陈浩, 张晓霞, 王鸿, 姬月华 2018 物理学报 **67** 118101]
- [17] Li X B, Lu W B, Liu Z G, Chen H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 184101 (in Chinese) [李小兵, 陆卫兵, 刘震国, 陈昊 2018 物理学报 **67** 184101]
- [18] Yao G, Ling F, Yue J 2016 *Opt. Express* **24** 1518
- [19] Fan C Z, Tian Y C, Ren P W 2019 *Chin. Phys. B* **28** 076105
- [20] Ding C F, Jiang L K, Wu L, Gao R M 2015 *Opt. Commun.* **350** 103
- [21] Lee K, Choi H J, Son J 2015 *Sci. Rep.* **5** 14403
- [22] Yang L B, Hu M, Liang J R 2008 *Acta Phys.-Chim. Sin.* **6** 101 (in Chinese) [杨海波, 胡明, 梁继然 2008 物理化学学报 **6** 101]
- [23] Kischkat J, Peters S, Gruska B 2012 *Appl. Optics* **51** 6789
- [24] Su Z, Yin J, Zhao X 2015 *Opt. Express* **23** 1679
- [25] Jiang X W, Wu H, Yuan S C 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 138101 (in Chinese) [江孝伟, 武华, 袁寿财 2019 物理学报 **68** 138101]
- [26] Zhang H Y, Huang X Y, Chen Q 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 18101 (in Chinese) [张会云, 黄晓燕, 陈琦 2016 物理学报 **65** 18101]
- [27] Lu H, Cumming B P, Gu M 2015 *Opt. Lett.* **40** 3647
- [28] Qiao W T, Gong J, Zhang L W 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 237301 (in Chinese) [乔文涛, 龚健, 张利伟 2015 物理学报 **64** 237301]
- [29] Vasko F T, Ryzhii V 2007 *Phys. Rev. B* **76** 233404
- [30] Mun B S, Yoon J, Mo S K 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 1039
- [31] Currie M, Mastro M A, Wheeler V D 2017 *Opt. Mater. Express* **7** 1697
- [32] Yao Y, Kats M A, Genevet P, Yu N, Song Y 2013 *Nano Lett.* **13** 1257
- [33] Vakil A, Engheta N 2011 *Science* **332** 1291

# Metamaterial absorber with controllable absorption wavelength and absorption efficiency\*

Jiang Xiao-Wei<sup>1)3)</sup> Wu Hua<sup>2)3)†</sup>1) (*College of Information Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou 324000, China*)2) (*College of Physics and Electronic Information, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China*)3) (*Key Laboratory of Optoelectronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

( Received 22 July 2020; revised manuscript received 17 September 2020 )

## Abstract

The metamaterial perfect absorber (MPA) is a new type of electromagnetic wave absorber first proposed by Landy. Compared with the traditional electromagnetic wave absorber, MPA has many advantages, including ultra-high absorption efficiency, ultra-thin, compact structure, easily tunable resonances, etc. so it is gradually applied to ultra-sensitive sensing, imaging, detection and other fields. Nowadays, the MPA research focuses on two areas. One area focuses on the absorption efficiency modulation and absorption wavelength tuning, and the other area is to broaden the absorption bandwidth and achieve high absorptions at different optical frequencies. Previously, the MPA absorption efficiency modulation or absorption wavelength tuning was realized by changing the device structure or the surrounding medium material. But these methods can increase the difficulty in processing and increase the device volume. In order to achieve the control of absorption wavelength and absorption efficiency without increasing the difficulty in processing or the device volume. We propose to use vanadium dioxide and graphene as the materials of MPA, which has high absorption efficiency in the infrared band. It is found that the absorption efficiency of MPA at 9.66  $\mu\text{m}$  wavelength can reach 96% when the temperature of vanadium dioxide is 5  $^{\circ}\text{C}$  by using finite difference time domain (FDTD) method. However, when the vanadium dioxide temperature rises to 68  $^{\circ}\text{C}$ , the absorption efficiency of MPA suddenly drops to 2.8%. The modulation depth of absorption efficiency can reach 97.08%. We propose that the MPA be able to control not only the absorption efficiency, but also the absorption wavelength. By changing the voltage of graphene, the chemical potential  $E_f$  of graphene can be controlled and the absorption wavelength of MPA can be tuned. When  $E_f$  increases from 0.1 eV to 3 eV, the absorption wavelength of MPA will be blue-shifted from 9.66  $\mu\text{m}$  to 6.46  $\mu\text{m}$ . The magnetic field distribution of MPA at the absorption wavelength shows that the MPA has a high absorption efficiency because of the Fabry-Pérot (FP) cavity resonance is formed in MPA. Therefore, the change of structure parameters of MPA will affect its absorption characteristics. It is found by the FDTD method that the absorption wavelength of MPA will be redshifted, when the radius, thickness, period and thickness of the nanocolumn array increase. This study can provide theoretical guidance for designing and preparing the controllable MPA, which has compact structure and low process difficulty merits.

**Keywords:** metamaterial, absorber, vanadium dioxide, graphene

**PACS:** 78.67.Pt, 78.67.Wj, 78.40.-q

**DOI:** 10.7498/aps.70.20201173

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61575008, 61650404), the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China (Grant No. 20171BAB202037), the Technology Project of Jiangxi Provincial Education Department, China (Grant No. GJJ170819), and the Quzhou Science and Technology Project, China (Grant No. 2019K20).

† Corresponding author. E-mail: [wh1125@126.com](mailto:wh1125@126.com)