

# 基于 Dirac 半金属和水的宽带太赫兹吸波体

郑 斌<sup>1</sup>, 鲁国林<sup>1</sup>, 罗超鸣<sup>1</sup>, 邓嘉豪<sup>2</sup>

(1. 重庆两江卫星移动通信有限公司, 重庆 401120;

2. 重庆大学微电子与通信工程学院, 重庆 400044)

**摘 要:** 本文提出了一种基于体 Dirac 半金属(BDS)和水的太赫兹(THz)双可调谐宽带超材料吸波体. 与传统的单控吸振器不同, 此吸波体可以通过温度和费米能级进行调节. 模拟结果表明, 当水和 BDS 的温度和费米能级分别调整在 15 °C 和 30 meV 时, 吸波体在 2.97~6.11 THz 频率范围内吸收率均大于 90%. 与没有注入水或没有 BDS 组件的吸波体相比, 吸收率在 90% 以上的带宽有了明显提高. 此外, 通过调节水的温度或 BDS 的费米能量, 吸波体的吸收带宽和强度可以独立或联合控制, 而无需重新设计器件. 利用水的介电常数可通过温度来调节的特性, 以及 BDS 可通过费米能量来控制的特点, 我们解释了双控吸波体的作用机理. 本文采用场分析的方法来研究和阐明宽带吸收的物理机理. 基于此吸波体优异的性能, 本文的研究结果可能在热探测器和太赫兹成像领域有潜在的应用价值.

**关键词:** 太赫兹吸波体; 宽带; 水; 双调谐

**中图分类号:** O441.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2022.014006

## Research on broadband terahertz absorber based on Dirac semi-metal and water mixture

ZHENG Bin<sup>1</sup>, LU Guo-Lin<sup>1</sup>, LUO Chao-Ming<sup>1</sup>, DENG Jia-Hao<sup>2</sup>

(1. Chongqing Liangjiang Satellite Mobile Communications Company Limited, Chongqing 401120, China;

2. School of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In this paper, a terahertz (THz) dual tunable broadband metamaterial absorber based on bulk Dirac semi-metal (BDS) and water is proposed. Unlike the traditional single-control vibration absorber, the vibration absorber can be adjusted by temperature and Fermi level. The simulation results show that when the water temperature and Fermi level of BDS are adjusted at 15 °C and 30 meV, respectively, the absorption rate is greater than 90% in the frequency range of 2.97~6.11 THz. Compared with the absorber without water injection or BDS mode, the bandwidth with an absorption rate of more than 90% has been significantly improved. In addition, by adjusting the temperature of water or Fermi energy of BDS, the absorption bandwidth and intensity of the absorber can be controlled independently or jointly, without redesigning the device. We use the characteristic that the dielectric constant of water can be adjusted by temperature, as well as the characteristic that BDS can be controlled by Fermi energy, the action mechanism of the dual-control absorber is explained. In this paper, the physical mechanism of broadband absorption is studied and clarified by means of field analysis. Based on its excellent perform-

收稿日期: 2021-05-26

基金项目: 东南大学毫米波国家重点实验室课题(K202204)

作者简介: 郑斌(1982-), 男, 云南楚雄人, 硕士, 主要研究微波通信、太赫兹通信设备及其性能.

通讯作者: 罗超鸣. E-mail: 461339852@163.com

ance, our research results may have potential applications in the field of thermal detectors and terahertz imaging.

**Keywords:** Terahertz absorber; Broadband; Water; Dual tunable

# 1 引言

近几十年来,太赫兹(THz)波因其在生物医学成像、第六代无线通信、安全检测等诸多工程领域的潜在应用而备受关注<sup>[1-3]</sup>. 太赫兹超材料吸波体因其广泛的应用已成为目前研究的热点之一. 典型的超材料吸波体通常由周期性金属图案、介质层和底部接地金属面组成<sup>[4]</sup>. 然而,两个缺点极大地阻碍了它们的实际应用. 其一,大多数报道的吸波体一般基于金属结构,只有一个狭窄的工作带宽,这不利于宽带需求. 为了实现宽带性能,通常采用多谐振器方法,即将不同尺寸的多个谐振器单元组合在一个单元格中<sup>[5,6]</sup>,在介质空间分隔的垂直方向上堆叠不同尺寸的谐振器单元<sup>[7,8]</sup>. 虽然吸波器有了很大的进步,但用这些方法设计的宽带吸波器有时难以制作,导致难以集成到主动可控系统中. 其二,当吸波体结构制定时,其吸收光谱是固定的. 为了实现可调特性,几种二维或三维材料逐渐受到人们的关注,如石墨烯<sup>[4,9]</sup>、黑磷<sup>[10]</sup>、二氧化钒( $\text{VO}_2$ )<sup>[11-13]</sup>和钛酸锶(STO)<sup>[14-16]</sup>. 但对于其中一些可调吸波器,调节吸收性能的方法是单控的. 因此,开发一种具有吸收带宽可受外界条件控制和吸收特性可通过两种方式调节的新型吸波器具有重要意义.

最近,一种新的量子材料——体 Dirac 半金属(BDS),因其在太赫兹范围内的双重特性引起了研究人员的浓厚兴趣<sup>[17,18]</sup>. BDS 材料结合了金属和电介质的特性. 当工作频率低于费米能级时,金属响应更明显,而高频段则以介质响应为主<sup>[19]</sup>. 此外,BDS 还可以被认作三维石墨烯,因为它的介电常数可以通过施加额外的栅极电压来调节<sup>[20-22]</sup>. 与石墨烯相比,三维 BDS 更易于加工,对环境缺陷的抵抗力更强. 这些特性使得 BDS 可以用于可调减振器的设计. 另一方面,水是自然界中最丰富、成本最低且无害的物质之一. 在微波频段和太赫兹频段范围内,水的介电常数会随频率的变化而改变<sup>[23]</sup>. 由于水的高介电损耗因子,科研人员设计了不同的水基吸波体<sup>[24,25]</sup>. 此外,最近的研究表明,水的介电常数可以通过温度来调节. 因此,水对设计宽带和热控制吸波体提供

了极大的帮助.

本文提出了一种注水的 BDS 吸波体,此吸波体单元由规则对称的 BDS 结构和注入水的氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )介质层以及底层的金膜组成,以实现太赫兹区域的双控宽带特性. 这种设计的新颖之处在于,BDS 的吸收带宽和强度不仅可以通过费米能量来控制,而且还可以通过水温来调节. 数值结果表明,当水的温度为 15 °C, BDS 的费米能级为 30 meV 时,在正常入射条件下,吸波体的吸收带宽为 3.14 THz. 通过将 BDS 的费米能级控制在 10~70 meV,或水的温度控制在 0~25 °C,可以实现对吸波体吸收带宽的动态调节. 本文计算了所选频率点的电场分布,以进一步了解宽带吸收的物理来源. 最后,我们进一步研究了吸收性能与入射光偏振角的关系. 本文所设计的吸波器在太赫兹领域具有广阔的应用前景.

# 2 材料介电常数理论

## 2.1 狄拉克半金属电导率模型

狄拉克半金属的电导率  $\sigma$  会受到其费米能级  $E_F$ 、频率  $\omega$ 、环境温度  $T$  的影响而变化,由 Kubo 公式表示为<sup>[19]</sup>:

$$\text{Re}\sigma(\Omega) = \frac{e^2}{\hbar} \frac{gk_F}{24\pi} \Omega G(\Omega/2) \quad (1)$$

$$\text{Im}\sigma(\Omega) = \frac{e^2}{\hbar} \frac{gk_F}{24\pi^2} \left\{ \frac{4}{\Omega} \left[ 1 + \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{T}{E_F} \right)^2 \right] + 8\Omega \int_0^{\epsilon_c} \left( \frac{G(\epsilon) - G(\Omega/2)}{\Omega^2 - 4\epsilon^2} \right) \epsilon d\epsilon \right\} \quad (2)$$

其中  $\text{Re}\sigma(\Omega)$  表示实部,  $\text{Im}\sigma(\Omega)$  表示虚部,  $\Omega = 2\hbar\pi f/E_F$ ,  $\epsilon = E/E_F$ ,  $\epsilon_c = E_c/E_F$  ( $E_c = 3$  是截止能量). 因此,狄拉克半金属介电常数可写为<sup>[17]</sup>:

$$\epsilon = \epsilon_b + i \frac{\sigma(\Omega)}{2\epsilon_0\pi f} = \epsilon_b + i \frac{\text{Re}(\sigma(\Omega)) + i\text{Im}(\sigma(\Omega))}{2\epsilon_0\pi f} \quad (3)$$

其中  $\epsilon_b = 1$ ,  $\epsilon_0$  为真空中的介电常数.

## 2.2 水的复介电常数

当温度和频率在  $0 \leq t \leq 100$  °C 和  $0 \leq f \leq 25$  THz 范围内时,水的复介电常数  $\epsilon(f, t) = \epsilon'(f, t) + i\epsilon''(f, t)$  可写为<sup>[23]</sup>:



$$\begin{aligned} \epsilon'(f,t) = & \epsilon_s(t) - (2\pi f)^2 \left( \frac{\tau_1^2(t) \Delta_1(t)}{1 + (2\pi f \tau_1(t))^2} + \frac{\tau_2^2(t) \Delta_2(t)}{1 + (2\pi f \tau_2(t))^2} + \frac{\tau_3^2(t) \Delta_3(t)}{1 + (2\pi f \tau_3(t))^2} \right) - \\ & (2\pi \tau_4(t))^2 \frac{\Delta_4(t)}{2} \left( \frac{f(f_0(t) + f)}{1 + (2\pi \tau_4(t)(f_0(t) + f))^2} - \frac{f(f_0(t) - f)}{1 + (2\pi \tau_4(t)(f_0(t) - f))^2} \right) - \\ & (2\pi \tau_5(t))^2 \frac{\Delta_5(t)}{2} \left( \frac{f(f_1(t) + f)}{1 + (2\pi \tau_5(t)(f_1(t) + f))^2} - \frac{f(f_1(t) - f)}{1 + (2\pi \tau_5(t)(f_1(t) - f))^2} \right) \end{aligned} \tag{4}$$
$$\begin{aligned} \epsilon''(f,t) = & 2\pi f \left( \frac{\tau_1^2(t) \Delta_1(t)}{1 + (2\pi f \tau_1(t))^2} + \frac{\tau_2^2(t) \Delta_2(t)}{1 + (2\pi f \tau_2(t))^2} + \frac{\tau_3^2(t) \Delta_3(t)}{1 + (2\pi f \tau_3(t))^2} \right) + \\ & \pi f \tau_4(t) \Delta_4(t) \left( \frac{1}{1 + (2\pi \tau_4(t)(f_0(t) + f))^2} + \frac{1}{1 + (2\pi \tau_4(t)(f_0(t) - f))^2} \right) + \\ & \pi f \tau_5(t) \Delta_5(t) \left( \frac{1}{1 + (2\pi \tau_5(t)(f_1(t) + f))^2} + \frac{1}{1 + (2\pi \tau_5(t)(f_1(t) - f))^2} \right) \end{aligned} \tag{5}$$

其中  $\epsilon_s(t) = 87.9144 - 0.404399t + 9.58726 \times 10^{-4}t^2 - 1.32802 \times 10^{-6}t^3$ ,  $\Delta_i(t) = a_i \exp(-b_it)$ ,  $\tau_i(t) = c_i \exp(\frac{d_i}{t+t_c})$ ,  $i = 1, 2, 3$ ,  $\Delta_4(t) = p_0 + p_1(t) + p_2t^2$ ,  $f_0(t) = p_3 + p_4t + p_5t^2 + p_6t^3$ ,  $\tau_4(t) = p_7 + p_8t + p_9t^2 + p_{10}t^3$ ,  $\Delta_5(t) = p_{11} + p_{12}t + p_{13}t^2$ ,  $f_1(t) = p_{14} + p_{15}t + p_{16}t^2$ ,  $\tau_5(t) = p_{17} + p_{18}t + p_{19}t^2$ . 这些系数  $a_i, b_i, c_i, d_i$  的值如表 1 所示.

表 1 方程(4)和(5)的参数

Tab. 1 Parameters of the functions (4) and (5)

$a_i, b_i, c_i, d_i, t_c$	$p_i (i=0\sim9)$	$p_i (i=10\sim19)$
$a_1=79.238\ 82$	$p_0=0.837\ 969\ 2$	$p_{10}=1.655\ 473\times10^{-19}$
$a_2=3.815\ 866$	$p_1=-6.118\ 594\times10^{-3}$	$p_{11}=0.616\ 553\ 2$
$a_3=1.634\ 967$	$p_2=-1.293\ 679\ 8\times10^{-5}$	$p_{12}=7.238\ 532\times10^{-3}$
$b_1=0.004\ 300\ 598$	$p_3=4.235\ 901\times10^{12}$	$p_{13}=-9.523\ 366\times10^{-5}$
$b_2=0.011\ 172\ 95$	$p_4=-1.426\ 088\times10^{10}$	$p_{14}=1.598\ 317\times10^{13}$
$b_3=1.634\ 967$	$p_5=2.738\ 157\times10^8$	$p_{15}=-7.441\ 357\times10^{10}$
$c_1=1.382\ 264\times10^{-13}$	$p_6=-1.246\ 943\times10^6$	$p_{16}=4.974\ 48\times10^8$
$c_2=3.510\ 354\times10^{-16}$	$p_7=9.618\ 642\times10^{-14}$	$p_{17}=2.882\ 476\times10^{-14}$
$c_3=6.300\ 35\times10^{-15}$	$p_8=1.795\ 786\times10^{-16}$	$p_{18}=-3.142\ 118\times10^{-16}$
$d_1=652.7648$	$p_9=-9.310\ 017\times10^{-18}$	$p_{19}=3.528\ 051\times10^{-18}$
$d_2=1249.533$		
$d_3=405.5169$		
$t_c=133.1383$		

3 结构与仿真

本文所研究的基于 BDS 及水的 THz 可控吸波体的结构单元模型如图 1 所示. 此结构由顶层的规则对称正方形 BDS、中间层的注水  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和底层的金膜构成, 可沿  $x$  和  $y$  方向周期性展开. 顶层 BDS 厚度为  $0.6\ \mu\text{m}$ , 底层金膜厚度为  $0.2\ \mu\text{m}$ , 金膜电导率为  $4.56\times10^7\ \text{S/m}$ .  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的相对介电常数为 2.28, 损耗角正切为 0.04. 图 1 中各参数值分别为:  $p = 46\ \mu\text{m}$ ,  $h = 11\ \mu\text{m}$ ,  $L = 44\ \mu\text{m}$ ,  $t = 9\ \mu\text{m}$ ,  $a = 28\ \mu\text{m}$ ,  $b = 14\ \mu\text{m}$ ,  $c = 2.5$

$\mu\text{m}$ ,  $d = 0.2\ \mu\text{m}$ ,  $w = 8\ \mu\text{m}$ . 在 CST 微波工作室内对本结构进行仿真模拟. 单元边界条件沿  $x$  和  $y$  方向, 电磁波沿  $z$  方向传播. BDS 的电导率  $\sigma$  会受到其费米能级  $E_F$ 、频率  $\omega$ 、环境温度  $T$  的影响而变化, 计算公式见式(1)~式(3). 图 2 为吸波体在正常太赫兹波入射下的吸收图谱. 水以及 BDS 的温度被设置为  $15\ ^\circ\text{C}$ , BDS 的费米能级为  $30\ \text{meV}$ . 由图 2 可知, 吸波体在  $2.97\sim6.11\ \text{THz}$  辐射范围内达到了 90% 以上的吸收率, 吸收带宽为  $3.14\ \text{THz}$ . 其中在  $3.18\ \text{THz}$  频点处吸收率达到最高的 97.36%. 图 2 还展示了没有

BDS 或没有水时的吸收率曲线。当仅没有 BDS 模块的存在时,吸收率在 3.65~6.52 THz 辐射范围内达到了 90%。当仅没有水时,只在 3.87~4.09 THz 辐射范围达到了 90%的吸收率。图 3 给出了入射功率为 0.5 W 下的每个部分的功率损耗。我们可以发现水和 BDS 同时决定了吸波体的吸收强度。

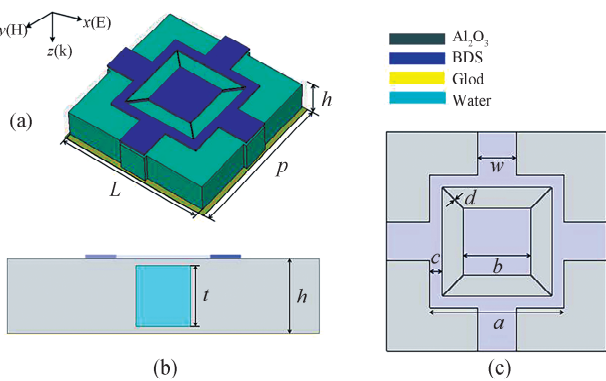


图 1 吸波体的结构单元和尺寸示意图: (a)透视图; (b)侧视图; (c)俯视图  
Fig. 1 The structural unit and size of the absorber: (a) perspective view; (b) side view; (c) top view

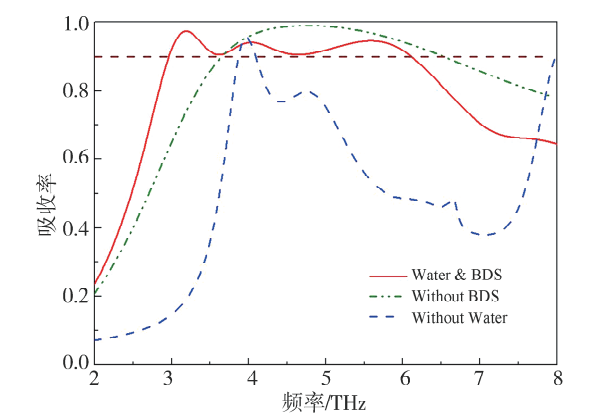


图 2 有和没有 BDS 或水的吸波体的吸收图谱  
Fig. 2 Absorption spectra of absorbers with and without BDS or water

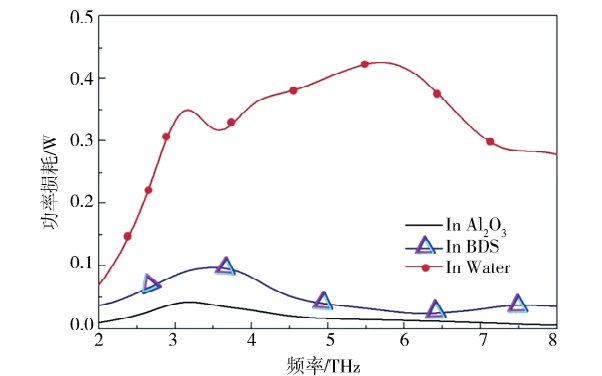


图 3 每个组件的功率损耗  
Fig. 3 Power loss of each component

图 4 为在正常入射条件下具有不同偏振角的吸收光谱的颜色图,用来证明此吸波体的偏振无关性。可以看出,吸收谱随着偏振角的改变并没有产生明显变化,因此吸波体具有偏振不敏感的特性。

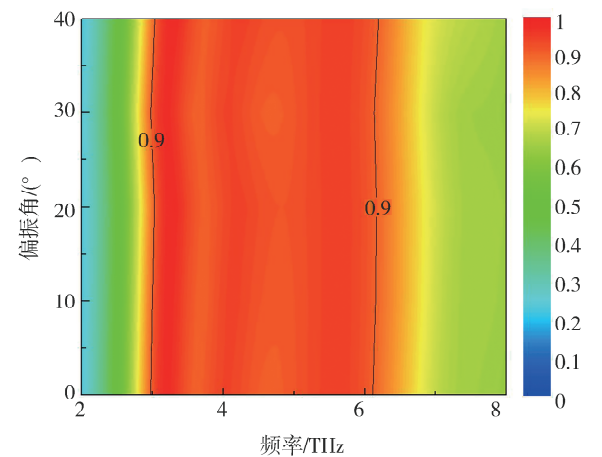


图 4 不同偏振角的吸收谱  
Fig. 4 Absorption spectra of different polarization angles

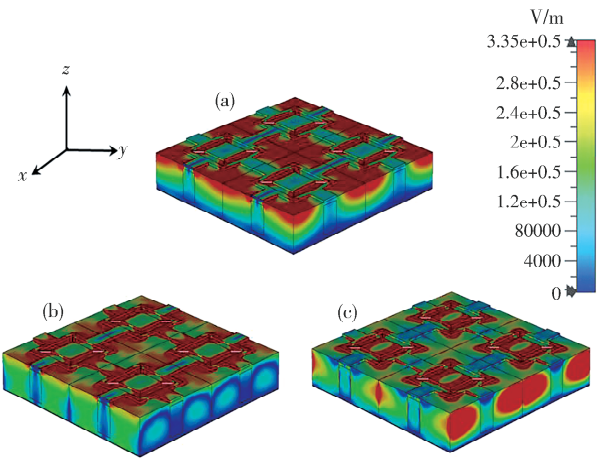


图 5 正常入射不同频率下的电场分布透视图: (a) 3.28 THz; (b) 4.24 THz; (c) 5.60 THz  
Fig. 5 Perspective view of electric field distributions under normal incidence: (a) 3.28 THz; (b) 4.24 THz; (c) 5.60 THz

## 4 结果与讨论

为了进一步了解宽带吸收的物理机制,我们计算了 TE 偏振(电场与  $x$  轴平行)在  $f=3.28$ 、 $4.24$ 、 $5.6$  THz 的电场强度分布,如图 5 所示。由图 5 可以看出,每个频率点的电场主要分布在 BDS 和水层内,这意味着组件中的吸收功率非常强。这是因为功耗密度为:

$$p = \frac{\epsilon_0 \omega}{2} \iiint_V \epsilon''(x,y) |E(x,y)|^2 dV \quad (6)$$

其中  $\epsilon''$  是 BDS 和水的相对介电常数的虚部,

$|E(x, y)|$  是电场强度. 则吸收率可写为:

$$A = \begin{cases} \frac{p}{0.5c_0\epsilon_0 |E_{inc}|^2 S \cos(\theta)}, & \text{for TE} \\ \frac{p}{0.5c_0\epsilon_0 |E_{inc}|^2 S \cos(\theta)}, & \text{for TM} \end{cases} \quad (7)$$

其中分母是在具有入射角  $\theta$  的投影表面积  $S$  上的入射波的功率. 根据式(2)、式(5)~式(7)以及图 5 可以进一步得出结论: BDS 和水有助于增强吸收. 所有这些吸收模式的组合产生出了宽带吸收的特性.

角度相关特性是设计吸波体的重要指标. 本文研究了吸波体的 TE 波和 TM 波的斜角相关性. 图 6 显示了两种极化在不同斜入射角下的吸收图谱. 图 6a 所示为 TM 极化, 随着  $\theta$  从 0 增加到

$60^\circ$ , 吸收带宽变宽, 中心频率呈现蓝移. 图 6b 所示为 TE 极化, 随着入射角  $\theta$  的增加, TE 极化的吸收带宽逐渐减小. 当  $\theta > 5^\circ$  时, 宽带吸收被分为两个吸收峰. 当  $\theta > 15^\circ$  时, 第二吸收带再次被分为两个吸收峰. 此外, 第一吸收带的中心频率随着  $\theta$  的增加几乎保持不变. 然而, 对于第二吸收带的第二吸收峰, 中心频率呈现红移. 吸收带宽的这种波动行为可以用式(7)来解释. 根据式(7), TE 极化的吸收率与  $\cos\theta$  成正比. 然而,  $\cos\theta$  在  $0$  到  $90^\circ$  之间是单调递减函数. 因此, 在其他因素保持不变的情况下, 对于 TE 偏振波, 吸收率与角度  $\theta$  成反比. 对于 TM 偏振波, 类似的分析表明, 吸收率与入射角  $\theta$  成正比.

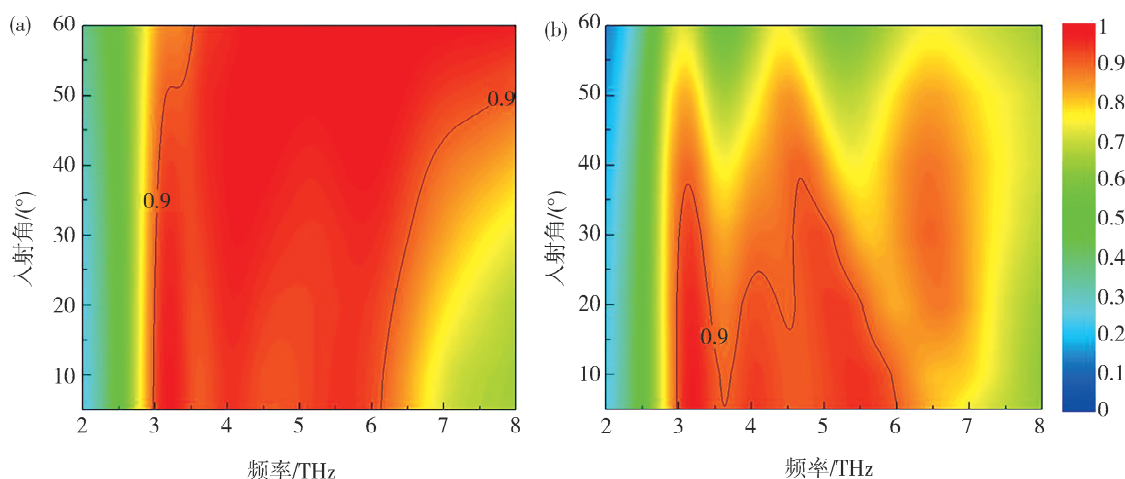


图 6 入射角与吸收率的关系: (a) TM 极化; (b) TE 极化

Fig. 6 The relationship between incident angle  $\theta$  and absorptivity under polarization: (a) TM; (b) TE

实验中 BDS 的费米能级  $E_F$  可以通过偏压或碱性表面掺杂来改变, 从而动态控制 BDS 的介电常数. 但同时, 温度也是一个不可忽视的重要因素. 因此本文研究了不同温度下 BDS 费米能级的改变对吸波体性能的影响, 如图 7 所示. 从图 7a~7f 可以看到, 90% 以上的工作带宽随着  $E_F$  从 10 meV 到 70 meV 的变化逐渐变窄, 当  $E_F > 50$  meV 时变窄的趋势更加明显. 当  $E_F < 26.5$  meV 时, 90% 以上的吸收曲线变得不连续, 且随着温度的上升该范围逐渐变小. 此外, 从图 7e~7f 可以看到当  $E_F = 40$  meV,  $T = 20^\circ\text{C}$  和  $T = 25^\circ\text{C}$  时均出现了一个小区域的低于 90% 的吸收率.

当吸波体处于工作状态时, 吸波体吸收的电

磁能量会在其内部转化为热量, 从而导致吸波体中的水和 BDS 的温度升高. 由于这两类材料的介电常数会随着温度的改变而改变, 因此吸波体的吸收特性也可能发生改变. 所以, 研究温度对吸波体性能的影响是必要的. 因为通常计算 BDS 介电常数的适用公式范围低于常温, 在此只考虑了温度从  $0 \sim 25^\circ\text{C}$  的范围. 图 8 显示了不同费米能级下温度对吸收率的影响. 如图 8a, 8b 所示, 当  $E_F$  分别等于 10 meV 和 20 meV 时, 随着温度的升高, 第一吸收带逐渐变宽. 当  $E_F = 40$  meV,  $T > 15^\circ\text{C}$  时, 90% 以上的吸收曲线变得不连续. 在其他情况下, 工作温度对性能的影响较小.

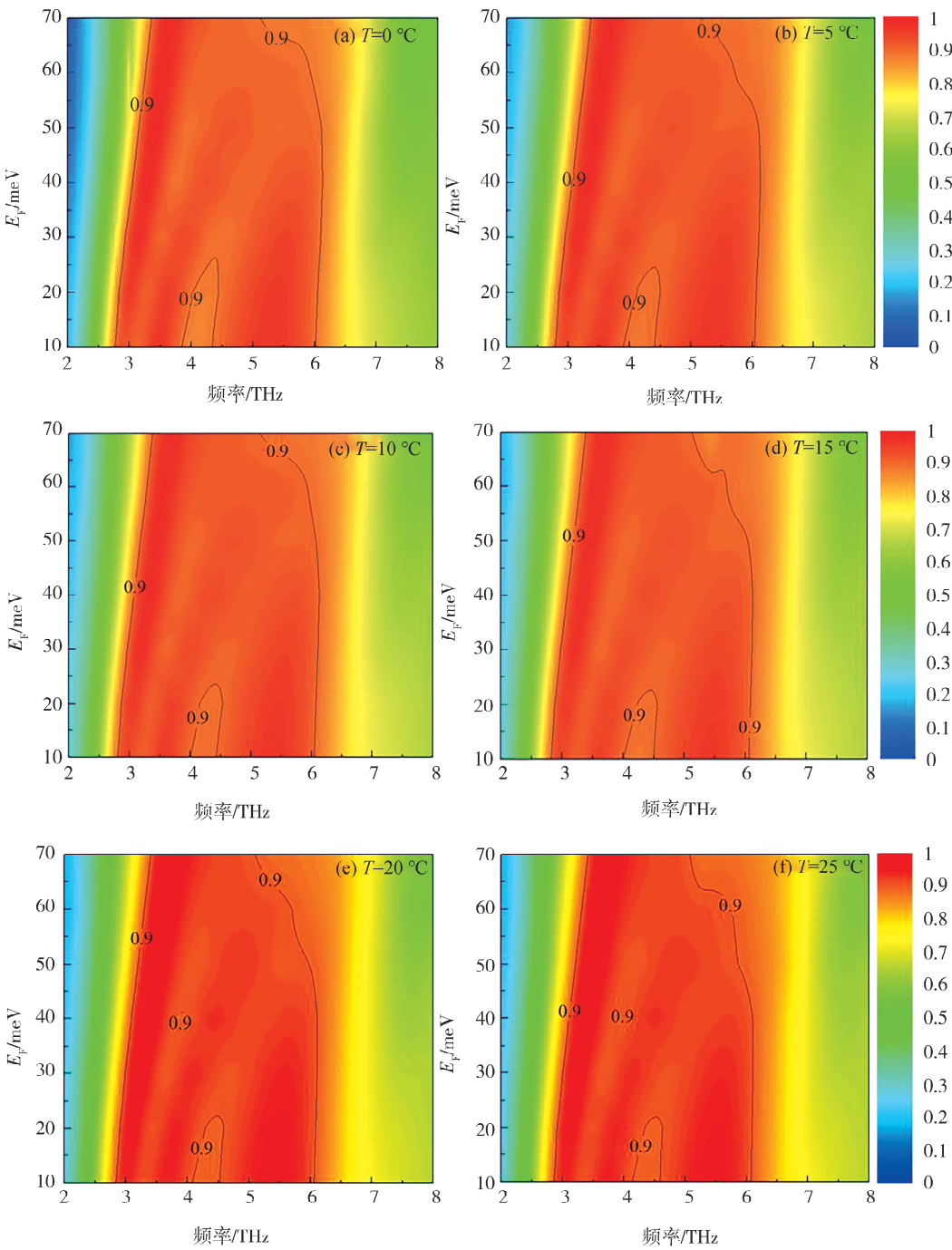


图 7 不同温度下费米能级和频率的吸收图谱  
Fig. 7 Absorption spectra of Fermi level and frequency at different temperatures

为得到理想的吸收曲线，本文研究了不同参数尺寸在其他几何参数保持不变的情况下对吸收率和吸收带宽的影响，以对吸波体几何尺寸进行优化。此处以参数 $a$ 、 $b$ 、 $t$ 和 $d$ 为例进行介绍，如图 9 所示。图 9a 显示了频率和  $a$  的吸收光谱函数，当  $a$  从  $24\text{ }\mu\text{m}$  增加到  $28\text{ }\mu\text{m}$  时，吸收带宽逐步增加；当  $a > 28\text{ }\mu\text{m}$  后，吸收带宽开始减小且不连续。从图 9b 可以看到，随着  $b$  从  $10\text{ }\mu\text{m}$  增加到  $18$

$\mu\text{m}$ ，吸收带宽在开始时增加；当  $b = 14\text{ }\mu\text{m}$  时吸收带宽达到  $3.14\text{ THz}$ ；当  $b$  进一步增加时，大于 90% 的吸收带宽变得不连续，这与  $a$  相似。如图 9c 所示，吸收峰的光谱位置随着  $t$  的增加而呈现红移，吸收带宽首先减小，然后增加，最后减小。图 9d 显示了随着  $d$  的增大，吸收带宽逐渐变窄且不连续。

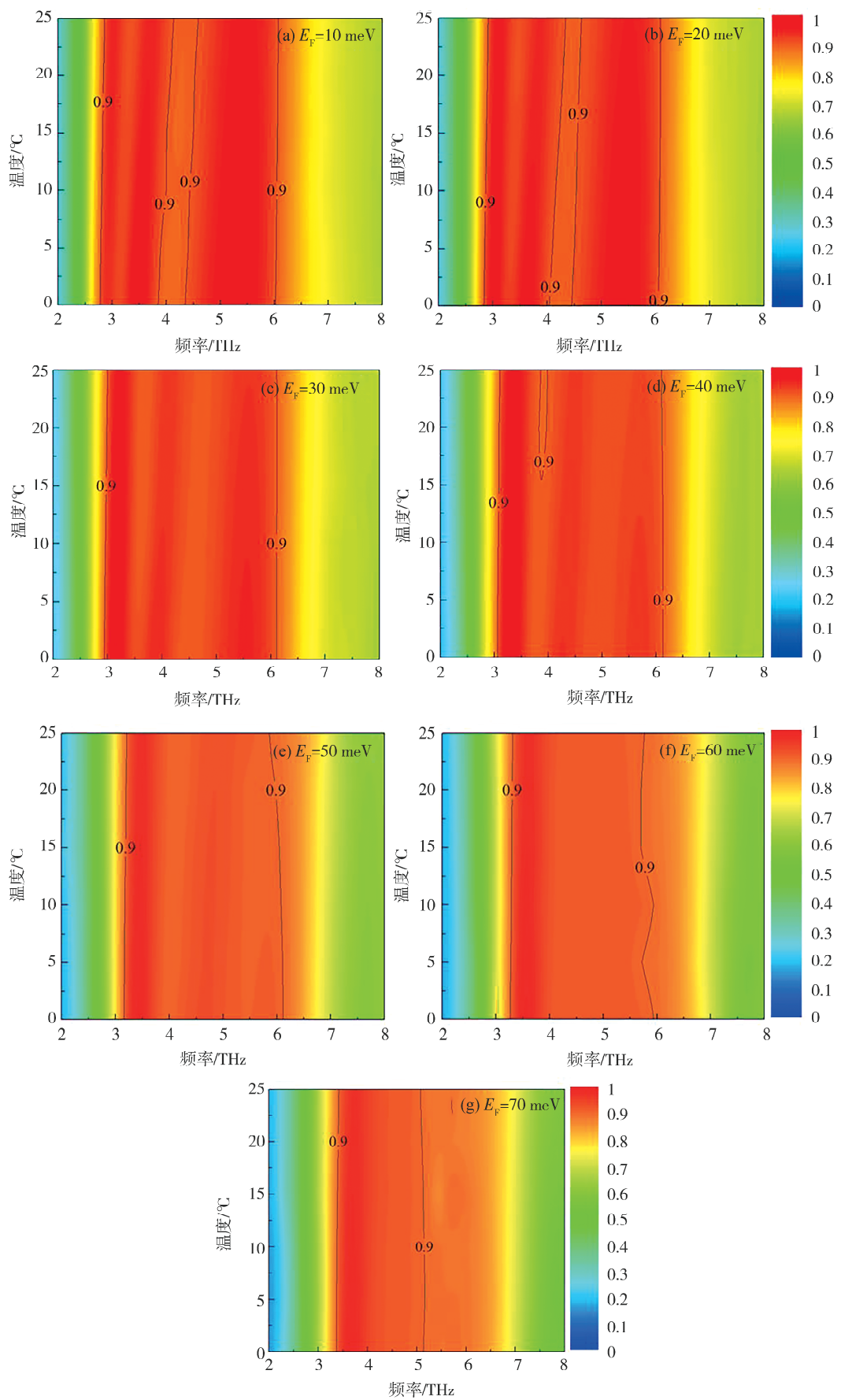


图 8 不同费米能级下温度和频率的吸收图谱  
Fig. 8 Absorption spectra of temperature and frequency at different Fermi levels



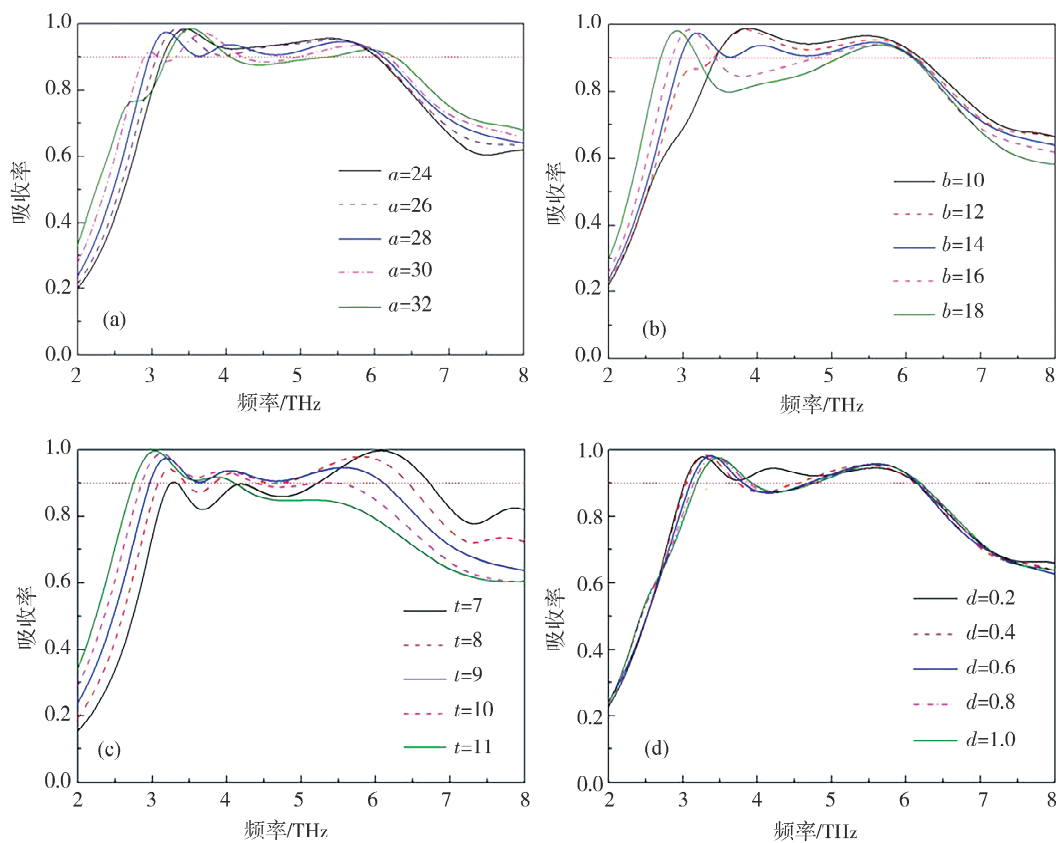


图 9 正常入射下不同  $a$ 、 $b$ 、 $t$  和  $d$  的吸收谱, 其他结构参数不变

Fig. 9 Absorption spectra of different  $a$ ,  $b$ ,  $t$  and  $d$  under normal incidence, other structural parameters unchanged

## 5 结 论

本文介绍了一种基于水与正方形狄拉克半金属结构的可调控太赫兹吸波体, 具体研究了吸波体在三种情况下对 2~8 THz 频率范围的太赫兹波的吸收情况, 吸波体各部分在工作时的功率损耗, 验证了吸波体的偏振相关性, 以及在 TM、TE 极化下的斜角相关性. 本文还展示了吸波体在 3.28 THz、4.24 THz、5.6 THz 频点下的电场分布情况, 分析了不同费米能级和温度下的 BDS 和水对吸波体吸收效率的影响. 最后我们对吸波器结构参数对吸收率的影响进行了研究和分析. 研究结果表明: 吸波体中 BDS 和水对吸收起到了至关重要的作用, 这些吸收模式的组合产生出了宽带吸收的特性. 通过改变该正方形 THz 吸波体中 BDS 的费米能级或水的温度, 可以调节吸波体的工作带宽和强度. 但温度对吸收特性的改变能力相对较弱. 本文所研究的吸波体可为智能太赫兹器件奠定一定的基础.

## 参考文献:

[1] Wang L, Yang Y, Deng L, *et al.* Vanadium dioxide

embedded frequency reconfigurable metasurface for multi-dimensional multiplexing of terahertz communication [J]. J Phys D: Appl Phys, 2021, 54: 255003.

[2] Zhou T, Zhang R, Guo X G, *et al.* THz imaging using a quantum-well photodetector with background limited performance [J]. Chin Phys Lett, 2012, 29: 104202.

[3] Zhang J, Mu N, Liu L, *et al.* Highly sensitive detection of malignant glioma cells using metamaterial-inspired thz biosensor based on electromagnetically induced transparency [J]. Biosens Bioelectron, 2021, 185: 113241.

[4] Xiong H, Ji Q, Bashir T, *et al.* Dual-controlled broadband terahertz absorber based on graphene and Dirac semimetal [J]. Opt Express, 2020, 28: 13884.

[5] Xiong H, Wu Y, Dong J, *et al.* Ultra-thin and broadband tunable metamaterial graphene absorber [J]. Opt Express, 2018, 26: 1681.

[6] Huang J, Li J, Yang Y, *et al.* Active controllable dual broadband terahertz absorber based on hybrid metamaterials with vanadium dioxide [J]. Opt Express, 2020, 28: 7018.

- [7] Wang B, Wang L, Wang G, *et al.* Theoretical Investigation of broadband and wide-angle terahertz metamaterial absorber [J]. *IEEE Photonic Tech L*, 2014, 26: 111.
- [8] Xiong H, Hong J, Luo C, *et al.* An ultrathin and broadband metamaterial absorber using multi-layer structures [J]. *J Appl Phys*, 2013, 114: 064109.
- [9] Xu K, Li J, Zhang A, *et al.* Tunable multi-band terahertz absorber using a single-layer square graphene ring structure with T-shaped graphene strips [J]. *Opt Express*, 2020, 28: 11482.
- [10] Guo T, Argyropoulos C. Tunable and broadband coherent perfect absorption by ultrathin black phosphorus metasurfaces [J]. *J Opt Soc Am B*, 2019, 36: 2962.
- [11] Liang J, Zhang K, Lei D, *et al.* Bandwidth-tunable THz absorber based on diagonally distributed double-sized VO<sub>2</sub> disks [J]. *Appl Optics*, 2021, 60: 3062.
- [12] Yahiaoui R, Chase Z, Kyaw C, *et al.* Dynamically tunable single-layer VO<sub>2</sub>/metasurface based THz cross-polarization converter [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2021, 54: 235101.
- [13] Zhong M. A multi-band metamaterial absorber based on VO<sub>2</sub> layer [J]. *Opt Laser Technol*, 2021, 139: 106930.
- [14] Xiong H, Shen Q. A thermally and electrically dual-tunable absorber based on Dirac semimetal and strontium titanate [J]. *Nanoscale*, 2020, 12: 14598.
- [15] Li W, Cheng Y. Dual-band tunable terahertz perfect metamaterial absorber based on strontium titanate (STO) resonator structure [J]. *Opt Commun*, 2020, 462: 125265.
- [16] Wu T, Shao Y, Ma S, *et al.* Broadband terahertz absorber with tunable frequency and bandwidth by using Dirac semimetal and strontium titanate [J]. *Opt Express*, 2021, 29: 7713.
- [17] Chen H, Zhang H, Liu M, *et al.* Realization of tunable plasmon-induced transparency by bright-bright mode coupling in Dirac semimetals [J]. *Opt Mater Express*, 2017, 7: 3397.
- [18] Shi X, Fang P, Zhai X, *et al.* Large-range, continuously tunable perfect absorbers based on Dirac semimetals [J]. *Opt Express*, 2020, 28: 7350.
- [19] Kotov O V, Lozovik Y E. Dielectric response and novel electromagnetic modes in three-dimensional Dirac semimetal films [J]. *Phys Rev B*, 2016, 93: 235417.
- [20] Liu G D, Zhai X, Meng H Y, *et al.* Dirac semimetals based tunable narrowband absorber at terahertz frequencies [J]. *Opt Express*, 2018, 26: 11471.
- [21] Fang P, Shi X, Liu C, *et al.* Single-and dual-band convertible terahertz absorber based on bulk Dirac semimetal [J]. *Opt Commun*, 2020, 462: 125333.
- [22] Jiang Y, Wan X, Wang J, *et al.* Tunable terahertz absorber based on bulk-Dirac-semimetal metasurface [J]. *IEEE Photon J*, 2018, 10: 4600607.
- [23] Ellison W J. Permittivity of pure water at standard atmospheric pressure, over the frequency range 0~25 THz and the temperature range 0~100 °C [J]. *J Phys Chem Ref Data*, 2007, 36: 1.
- [24] Xie J, Quader S, Xiao F, *et al.* Truly all-dielectric ultrabroadband metamaterial absorber; water-based and ground-free [J]. *IEEE Antenn Wirel Pr*, 2019, 18: 536.
- [25] Zhang H, Ling F, Wang H, *et al.* A water hybrid graphene metamaterial absorber with broadband absorption [J]. *Opt Commun*, 2020, 463: 125394.

#### 引用本文格式:

中 文: 郑斌, 鲁国林, 罗超鸣, 等. 基于 Dirac 半金属和水的宽带太赫兹吸波体[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2022, 59: 014006.

英 文: Zheng B, Lu G L, Luo C M, *et al.* Research on broadband terahertz absorber based on Dirac semi-metal and water mixture [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2022, 59: 014006.