第 40 卷 第 3 期
2023 年 5 月

量 子 电 子 学 报
CHINESE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS

Vol.40 No.3
May 2023

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.03.002

可调谐太赫兹超材料吸波器研究进展

张若雅[1]， 朱巧芬[1*]， 张 岩[2*]

(1 河北工程大学数理科学与工程学院， 河北省计算光学成像与光电检测技术创新中心，
河北省计算光学成像与智能感测国际联合研究中心， 河北 邯郸 056038;
2 首都师范大学物理系， 超材料与器件北京市重点实验室， 太赫兹光电子教育部重点实验室，
北京成像理论与技术创新中心， 北京 100048)

摘 要: 太赫兹超材料吸波器具有吸收强、厚度薄、质量轻等优点, 已被广泛应用于隐身材料、频率选择表面、太赫兹成像、通信传感等方面。但是, 基于金属结构的传统太赫兹超材料吸波器一旦完成加工后, 它的吸收性能是固定不变的。为解决这一问题, 研究人员通过引入活性超材料设计了可调谐太赫兹超材料吸波器。结合可调谐太赫兹超材料吸波器的国内外研究现状, 分类阐述了几类典型的可调谐太赫兹超材料吸波器, 重点对单频带、多频带、宽频带以及可切换双功能太赫兹超材料吸波器的相关研究工作进行了梳理与总结, 并对其未来发展趋势进行了分析。

关 键 词: 光电子学; 可调谐吸波器; 太赫兹波; 活性超材料

中 图 分 类 号 : O441.4　　**文 献 标 识 码 :** A　　**文章编号:** 1007-5461(2023)03-00301-18

Research progress of tunable terahertz metamaterial absorbers

ZHANG Ruoya[1], *ZHU Qiaofen*[1*], *ZHANG Yan*[2*]

(1 Hebei International Joint Research Center for Computational Optical Imaging and Intelligent Sensing, Hebei Computational Optical Imaging and Photoelectric Detection Technology Innovation Center, School of Mathematics and Physics Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
2 Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Theory and Technology, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing Key Laboratory of Metamaterials and Devices, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Terahertz metamaterial absorber has the advantages of strong absorption, thin thickness and light weight, and has been widely used in stealth materials, frequency selective surfaces, terahertz imaging, communication sensing, and so on. However, as for the traditional terahertz metamaterial absorbers based on metal-patch, once they are processed, their absorption performance will be unchangeable. To solve this problem, researchers have designed tunable terahertz absorbers by adding active metamaterials. Combined with the research status of tunable terahertz metamaterial absorbers at

基金项目: 国家自然科学基金(21976049), 邯郸市科学技术研究与发展计划(19422031008-5)
作者简介: 张若雅(1997 -), 女, 河北唐山人, 研究生, 主要从事衍射光学元器件设计方面的研究。E-mail: zh_ang_97@163.com
导师简介: 朱巧芬(1980 -), 女, 河北保定人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事衍射光学元器件设计方面的研究。
E-mail: zhuqiaofen@hebeu.edu.cn
收稿日期: 2022-09-28; **修改日期:** 2022-10-28
*通信作者。 E-mail: zhuqiaofen@hebeu.edu.cn; yzhang@cnu.edu.cn

home and abroad, this paper classifies and expounds several typical of tunable terahertz metamaterial absorbers, focusing on the research work of single-band, multi-band, broadband, and switchable dual-function terahertz metamaterial absorbers, and finally analyzes their future development trends.

Key words: optoelectronics; tunable absorber; terahertz wave; active metamaterial

0 引 言

太赫兹 (THz) 波在20世纪80年代中后期被正式命名, 它是指频率范围在0.1～10 THz之间、波长在0.03～3 mm之间的电磁波。太赫兹频段既不能仅用光学理论来解释, 也不能只用微波理论来研究, 因此形成了太赫兹空隙 (THz gap)[1, 2]。近几十年来, 超快激光技术的发展为太赫兹脉冲提供了可靠、稳定的激发光源, 使得太赫兹技术的应用研究得到迅速发展, 太赫兹技术成为21世纪重要的科学技术之一。随着研究的不断深入, 不断设计制备出许多太赫兹功能器件, 如吸波器[3, 4]、滤波器[5−7]、偏振转换器[8, 9]、超透镜[10, 11]、传感器[12, 13]等, 尤其是超材料吸波器具有吸收强、厚度薄、质量轻等优点, 并且可以 “量需定制”。超材料是根据具体的应用需求, 通过对自然界中常规物质进行合理的人工参数设计来获得与原物质不同的具有超常物理性质的 “新材料”[14−17]。这种通过改变超材料的结构参数来影响整个器件吸收效果的方法, 极大程度上增加了吸波器设计的灵活性。超材料完美吸波器是由Landy等[18]于2008年首次提出, 他们利用开口谐振环、介质层和金属线作为基元实现了在微波频段的完美吸收, 不受传统吸波厚度限制, 尺寸较小。这项开创性工作很快激发了其他频率领域的相关工作, 其中对太赫兹波频段的研究也逐渐开展[19−22], 其经典结构是金属-介质-金属(MDM) 的三明治结构。但是基于金属的吸波器一旦完成结构的加工, 其吸收性能往往是固定不变的。如果有其他频率的吸波需求, 就必须重新进行设计和加工, 很大程度上限制了吸波器的发展和应用。

为解决这一问题, 研究人员设计加工了可调谐太赫兹超材料吸波器, 这类吸波器可以在不改变本身结构参数的基础上, 利用结构中所添加活性材料的可调性质来实现吸收性能的动态调节。例如, 石墨烯的电导率与其费米能级有关, 费米能级可以通过外界电压来控制; VO_2的电导率与温度有关, 可以随着温度变化实现绝缘态向金属态的转变。此外还可以通过电、热、光激发[23−26]等方式调控材料的性质, 从而实现太赫兹超材料吸波器的可调谐特性。可调谐太赫兹超材料吸波器可以广泛应用于隐身材料、频率选择表面、太赫兹成像、通信传感、光学调控等方面。随着国内外研究的不断深入, 为了适用更多更宽的吸波需求, 已从最初的单频带可调谐太赫兹吸波器扩展到多频带和宽频带可调谐太赫兹吸波器。

近年来, 可切换多功能太赫兹吸波器逐渐成为研究的重点方向。本文结合国内外研究现状对可调谐太赫兹超材料吸波器的发展和研究趋势进行分析与探讨。

1 可调谐太赫兹超材料吸波器的发展

2008年, Tao等[27]设计了一种基于三层结构的太赫兹超材料吸波器。如图1(a), 该吸波器最上层是作为谐振单元的金属结构, 中间是介质层, 最下层是金属底板; 图1(b) 表明在TE和TM两种偏振模式下, 该结构都可以在1.6 THz频率处实现高达99.9%的吸收率。对加工后的器件进行实验测试, 实验结果表明在1.6 THz频率处该结构仍具有96%的高吸收率。自此, 太赫兹频段吸波器的研究与设计受到国内外的广泛关注。

2015年, Wang等[28]提出了具有多频带吸收效果的太赫兹超材料吸收器, 由四个尺寸不同的金属方环、

介质层和金属底层组成, 如图 1(c) 所示。该吸波器在 0.777、1.13、1.53、2.06 THz 频率处的吸收率分别达到 99.41%、97.53%、99.06% 和 95.59%。通过对吸波器四个吸收频率处进行电场分析, 得出吸收器的吸收机理是四种不同尺寸金属方环激发共振频率的重叠。所以每一个吸收频率可以通过改变相应金属方环的尺寸来实现灵活调控, 如图 1(d) 所示。这种设计理念可以在多频带吸波器的设计方面进行拓展, 如通过增加金属环实现五频带吸波。

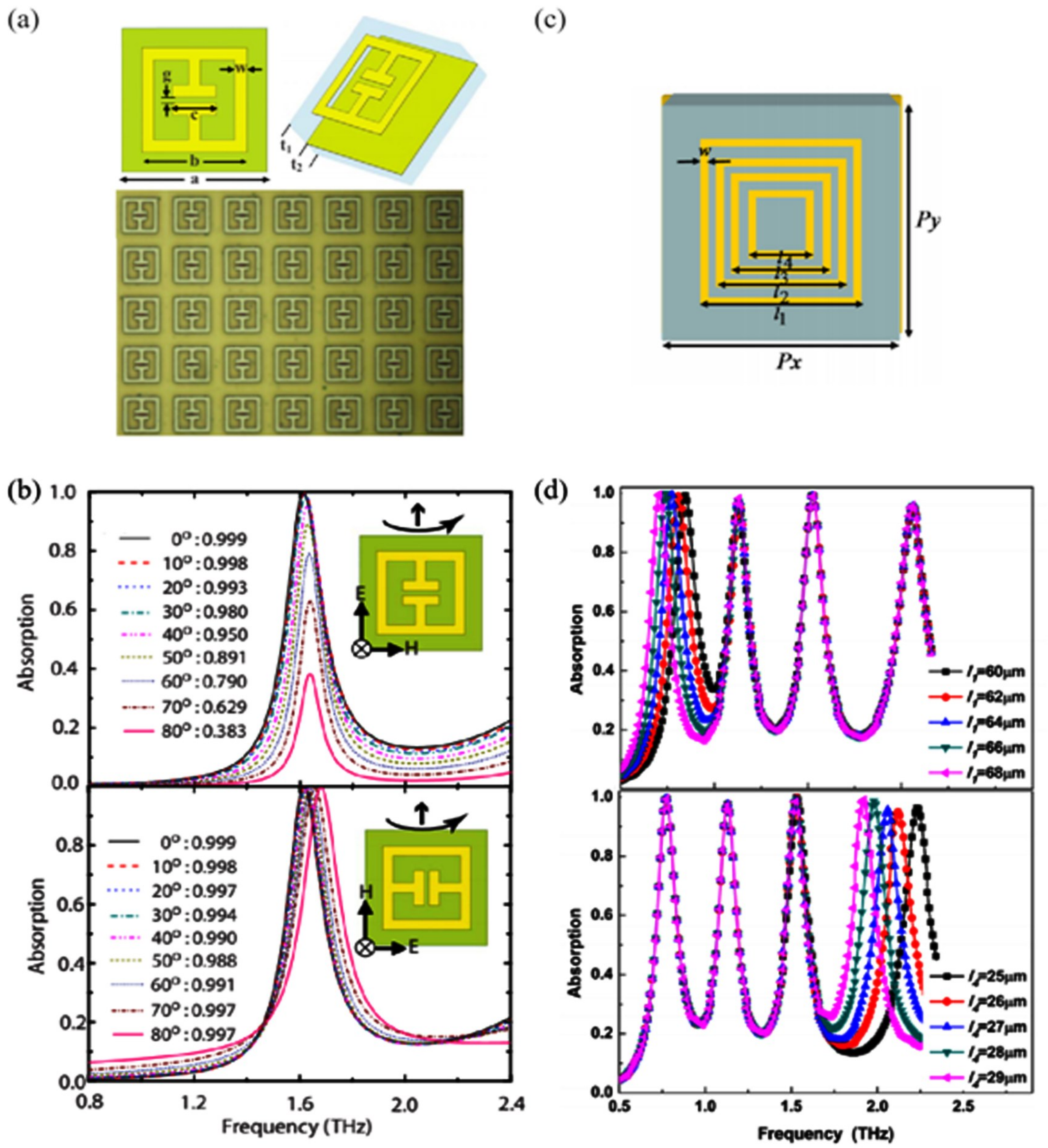

图 1 基于金属贴片的太赫兹吸波器。Tao 等[27]提出的基于三层结构的太赫兹超材料吸波器的 (a) 结构示意图与 (b) 在 TE 和 TM 偏振模式下不同入射角时的吸收曲线; Wang 等[28]提出的具有多频带吸收效果的太赫兹超材料吸收器的 (c) 结构示意图与 (d) 吸收曲线随着长度 l_1 和 l_4 的可调谐变化

Fig. 1 Terahertz absorber based on metal-patch. (a) Schematic diagram of structure and (b) the absorption curve at different incident angles under TE and TM polarization of the terahertz metamaterial absorber based on three-layer structure proposed by Tao *et al* [27]; (c) Schematic diagram of structure and (d) the tunable changes of absorption curves depend on length l_1 and l_4 of the terahertz metamaterial absorber with multiband absorption proposed by Wang *et al* [28]

从仿真设计上来说, 上述基于金属方环的吸波器可以称为吸收频率可调谐的太赫兹超材料吸波器, 它可以通过调整单个金属环的尺寸来实现对应吸收频率的位置移动。但是这类吸波器一旦完成加工制备, 其结构尺寸就固定了, 只能满足固定频率的吸波需求。如果需要改变吸收频率的位置或者强度, 就必须重新进行设计和加工。为解决这一问题, 研究人员引入了活性材料 (如 VO_2、石墨烯、狄拉克半金属等) 来设计可调谐太赫兹超材料吸波器。这类吸波器不需要改变其结构参数, 而是利用组成材料的可调性质来实现吸波器的可调谐特性。图2给出了可调谐太赫兹超材料吸波器的发展历程: 单频带可调谐太赫兹超材料吸波器[34−45], 多频带可调谐太赫兹超材料吸波器[46−63], 宽频带可调谐太赫兹超材料吸波器[64−84] 和可切换双功能太赫兹超材料吸波器[32, 33, 85−101]等。

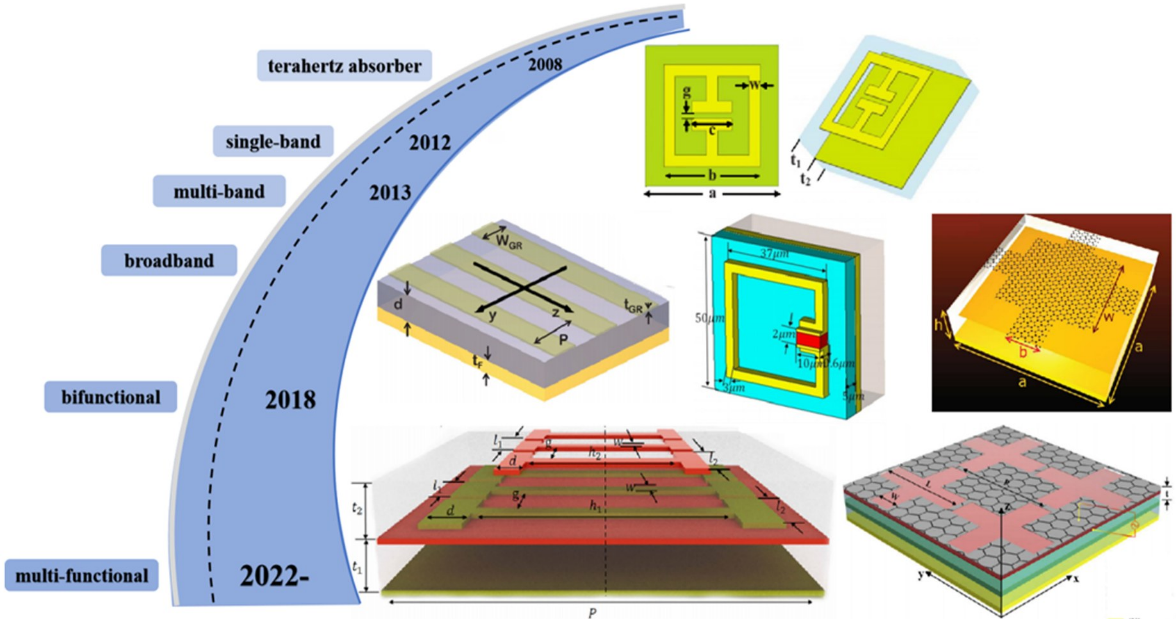

图2 可调谐太赫兹超材料吸波器发展历程图[27, 29−33]

Fig. 2 Research history of tunable terahertz metamaterial absorber[27, 29−33]

1.1 单频带可调谐太赫兹超材料吸波器

单频带可调谐太赫兹超材料吸波器只具有一个近乎完美吸收效果的吸收频率点, 大多用于频率选择表面、通信传感等方面。通过调控组成材料的可调参数, 吸波器实现了多个频率点的选择调谐功能, 拥有较高的灵活性。对于传感方面的应用, 由于金属具有较大的损耗, 研究人员一直致力于提高吸波器的品质因子、灵敏度等指标。

2018年, Liu 等[34]提出一种基于狄拉克半金属的窄带可调谐太赫兹吸波器。如图3(a), 该吸波器由带圆孔的光子晶体板 (折射率为3.416) 和狄拉克半金属板 (BDSs) 组成。由图3(b) 可知, 当狄拉克半金属的费米能级固定为65 meV时, 仿真结果表明该吸波器在 f_0 = 1.3898 THz 频率处实现了完美吸收, 半高全宽 Δf = 1.469× 10^{-2} THz, 品质因子为94.6 ($Q = f_0/\Delta f$); 在狄拉克半金属的费米能级从50 meV变化到80 meV的过程中, 吸收频率可以实现从1.381 THz到1.395 THz频率范围的动态调节, 这个过程中吸收率始终保持在95%以上。与之前的工作相比, 这种设计不仅结构简单, 而且结合狄拉克半金属材料实现了吸收频率的可调。

2019年, Huang 等[35]提出了一种基于混合材料的可调谐太赫兹超材料吸波器。如图3(c), 该吸波器结构从上到下依次是石墨烯层、钛酸锶 (STO) 层、介质层和金属层, 仿真结果表明该吸波器在0.43 THz频率处

实现了完美吸收。通过单独调节石墨烯和STO的相关参数, 这种吸波器能够分别实现吸收率和吸收频率的可调谐变化。在石墨烯的费米能级从0 eV增加到0.7 eV的过程中, 吸波器的吸收率实现了从35%到100%的动态调节, 如图3(d) 所示; 当STO材料的温度从200 K变化到400 K时, 中心频率由0.30 THz移动到0.43 THz, 这个过程中吸收率始终保持在99%以上, 如图3(d) 所示。该吸波器可以扩展到红外和可见光频段, 并在成像、传感和太阳能方面有重要的应用。表1为单频带可调谐太赫兹超材料吸波器的部分研究工作的汇总。

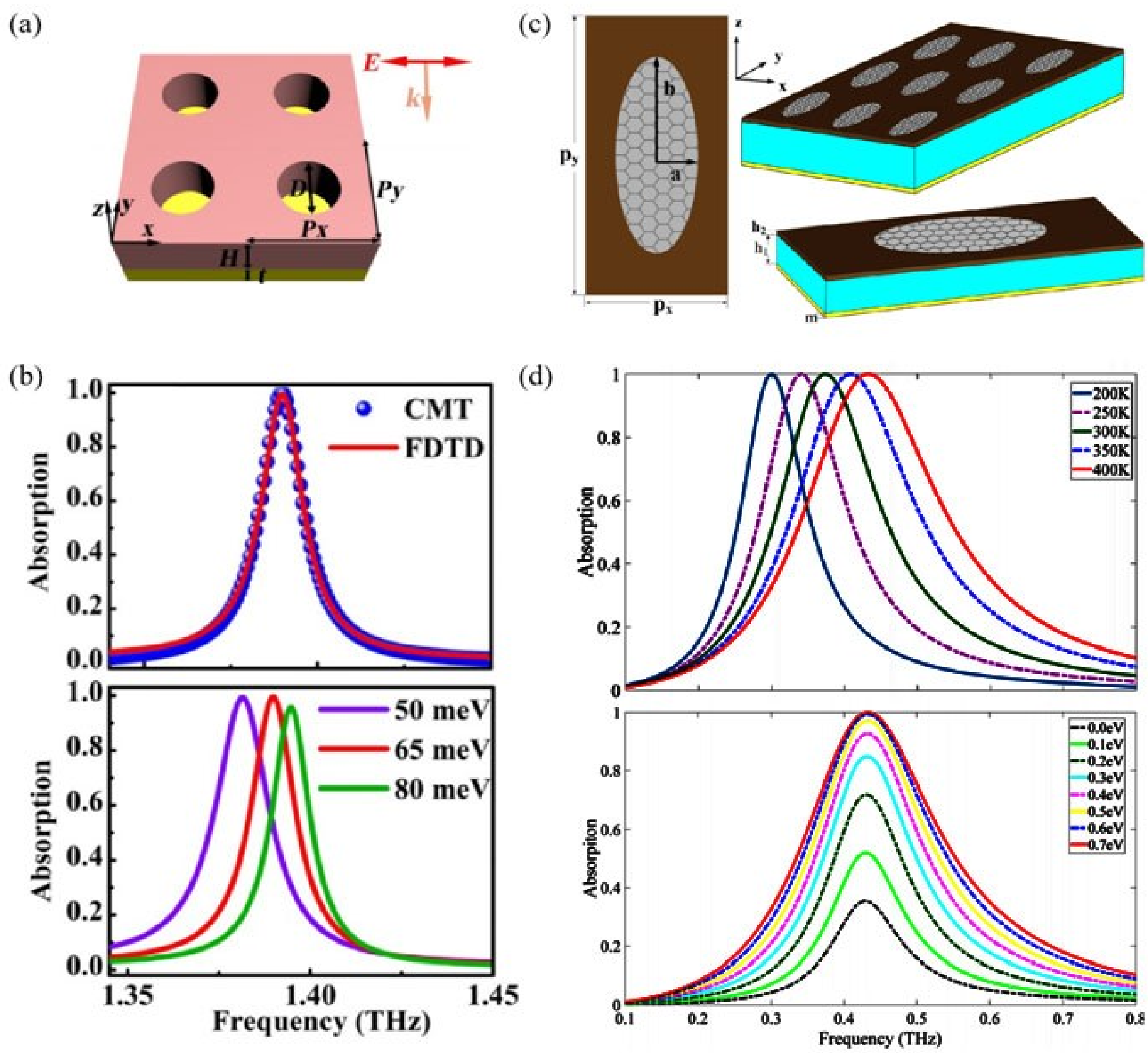

图3　单频带可调谐太赫兹超材料吸波器。Liu等[34]提出的基于狄拉克半金属的窄带可调谐太赫兹吸波器的 (a) 结构示意图与 (b) 吸收曲线随着不同费米能级的可调谐变化; Huang等[35]提出的基于混合材料的可调谐太赫兹超材料吸波器的 (c) 结构示意图与 (d) 吸收曲线随着不同温度和费米能级的可调谐变化

Fig. 3　Single-band tunable terahertz metamaterial absorber. (a) Schematic diagram of structure and (b) the tunable changes of absorption curves depend on different Fermi energy level of the narrow band tunable terahertz absorber based on Dirac semi-metal proposed by Liu *et al* [34]; (c) Schematic diagram of structure and (d) the tunable changes of absorption curves depend on different temperature and Fermi energy level of the tunable terahertz metamaterial absorber based on hybrid materials proposed by Huang *et al* [35]

表1 单频带可调谐太赫兹超材料吸波器汇总

Table 1 Summary of single−band tunable terahertz metamaterial absorber

<table>
<tr><th>Layer</th><th>Material</th><th>Parameter</th><th>Fequency</th><th>Absorptance</th><th>Function</th><th>Reference</th></tr>
<tr><td>3</td><td>Graphene</td><td>E_f: 0～0.6 eV</td><td>0.48~1.579 THz</td><td>>99%</td><td rowspan="9">Single-band tunable terahertz metamaterial absorber</td><td>[36]</td></tr>
<tr><td>3</td><td>Dirac semimetal</td><td>E_f: 65~85 meV</td><td>2.46~3.16 THz</td><td>>95%</td><td>[37]</td></tr>
<tr><td rowspan="2">4</td><td rowspan="2">Dirac semimetal
Strontium titanate</td><td>E_f: 10~80 meV
T: 300 K</td><td>3.265~4.82 THz</td><td>70%～99.9%</td><td rowspan="2">[38]</td></tr>
<tr><td>T: 200~300 K
E_f=40 meV</td><td>2.665~3.69 THz</td><td>>99%</td></tr>
<tr><td>3</td><td>Strontium titanate</td><td>T: 200~400 K</td><td>1.71～2.48 THz</td><td>>99%</td><td>[39]</td></tr>
<tr><td>7</td><td>Liquid crystal</td><td>V: 0～saturation</td><td>red shift</td><td>>90%</td><td>[40]</td></tr>
<tr><td>4</td><td>InSb</td><td>T: 160~350 K</td><td>0.82~1.02 THz</td><td>>88.7%</td><td>[41]</td></tr>
<tr><td>3</td><td>Photoconductive silicon</td><td>σ: 1~1×10^5 S/m</td><td></td><td>0%～100%</td><td>[42]</td></tr>
</table>

notes V: bias voltage; T: temperature; E_f: Fermi energy level; σ: conductivity

1.2 多频带可调谐太赫兹超材料吸波器

多频带吸收的吸波器可以通过两种方法实现, 其一是垂直方向的多层结构叠堆, 每层结构使用不同的谐振单元, 通过合理设计每层结构之间的介质层厚度来达到多频带吸收效果[46, 47]; 其二是水平方向谐振单元组合的方法, 在同一个平面内组合不同材料、不同形状、不同尺寸大小或不同旋转角度的谐振单元, 利用不同谐振单元激发吸收频率的叠加也可以实现多频带吸收效果[48, 49]。多频带可调谐太赫兹超材料吸波器可以同时满足多个吸收频率的工作需求。

2017 年, Chen 等[50]首先设计了一个具有三层结构的单频带可调谐太赫兹超材料吸波器, 该吸波器最上层是石墨烯层, 中间是介质层, 底层为金属层。当石墨烯的费米能级固定为0.9 eV时, 该吸波器在2.71 THz处的吸收率高达99.51%。然后Chen等通过将相同参数的 "石墨烯—介质" 结构重复叠加到原有结构上进而实现了双频带的吸波效果, 如图4(a) 所示。双频带吸波器在1.99 THz和2.69 THz处分别具有98.94%和99.10%的高吸收率。在调整石墨烯的费米能级从0.6 eV 变化到0.9 eV的过程中, 两个吸收频率的位置和吸收强度都发生了显著变化, 如图4(b) 所示。

2019 年, Zhang 等[51]设计了一个基于狄拉克半金属的双频带可调谐太赫兹超材料吸波器。如图4(c), 该吸波器由环形介质层和狄拉克半金属层组成。当狄拉克半金属的费米能级固定为75 meV时, 该吸波器在2.02 THz和2.49 THz处实现完美的吸收效果, 对应的吸收率均大于99%。由图4(d) 可知, 在调整费米能级从55 meV变化到85 meV的过程中, 吸波器的吸收率实现了90%到99%的动态调节。表2为多频带可调谐太赫兹超材料吸波器的部分研究工作的汇总。

表2 多频带可调谐太赫兹超材料吸波器汇总

Table 2 Summary of multi−band tunable terahertz metamaterial absorber

Layer	Material	Parameter	Frequency	Absorptance	Function	Reference
3	Graphene	E_f: 0.6~0.9 eV	7.1~8.7 THz 10.4~12.7 THz	>85%	Dual-band absorption	[52]
3	Dirac semimetal VO_2	σ: 10~10^5 S/m E_f=0.13 eV		6.5%～97.8% 10%～99.27% 9%～99.54%	Triple-band absorption	[53]
		E_f: 0.11~0.15 eV σ=10^5 S/m	blue shift	>90%		
3	Strontium titanate	T: 200~500 K	blue shift	>95%	Dual-band absorption	[54]
7	Liquid crystal	V: 0～12 V	red shift	>80.1%	Dual-band absorption	[55]

notes V：bias voltage；T：temperature；E_f：Fermi energy level；σ：conductivity

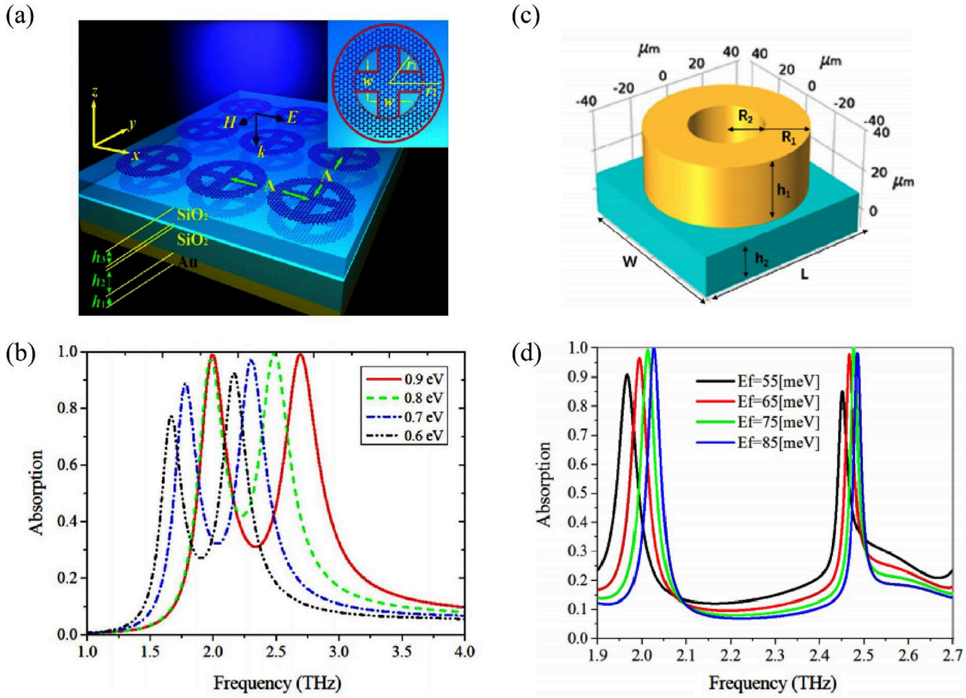

图4 多频带可调谐太赫兹超材料吸波器。Chen 等[50]提出的具有五层结构的双频带可调谐太赫兹超材料吸波器的 (a) 结构示意图与 (b) 吸收曲线随着不同费米能级的可调谐变化; Zhang 等[51]提出的基于狄拉克半金属的双频带可调谐太赫兹超材料吸波器的 (c) 结构示意图与 (d) 吸收曲线随着不同费米能级的可调谐变化

Fig. 4 Multi-band tunable terahertz metamaterial absorber. (a) Schematic diagram of structure and (b) the tunable changes of absorption curves depend on different Fermi energy level of the double band tunable terahertz metamaterial absorber with five layers proposed by Chen *et al* [50]; (c) Schematic diagram of structure and (d) the tunable changes of absorption curves depend on different Fermi energy level of the double band tunable terahertz absorber based on Dirac semi-metal proposed by Zhang *et al* [51]

1.3 宽频带可调谐太赫兹超材料吸波器

与多频带吸波器的实现方法相似, 当不同谐振单元激发的吸收频率之间的距离较远时, 可以实现多个独

立的吸收频率的多频带吸收效果; 而当距离较近时, 多个吸收频率可以通过叠加来实现宽频带的吸收效果。宽频带可调谐太赫兹超材料吸波器目前主要研究的是如何扩展吸收带宽, 以实现宽频带的频率响应。近五年来, 随着研究人员的深入探索, 这类研究成果不断得到突破。例如基于 VO_2 的宽频带可调谐太赫兹吸波器具有 90% 以上吸收率的吸收带宽达到了 4.10 THz[64]。

2018 年, Song 等[65] 提出了一个基于 VO_2 的窄带可调谐太赫兹吸波器。如图 5(a) 所示, 其由十字型金棒、SiO_2 介质层和 VO_2 层组成, SiO_2 作为基底。当 VO_2 的电导率为 $2\times10^3\ \Omega^{-1}\cdot cm^{-1}$ 时, 该吸波器具有 90% 以上吸收率的吸收带宽达到了 0.33 THz。由图 5(b) 可知, 当 VO_2 的电导率从 $10\ \Omega^{-1}\cdot cm^{-1}$ 变化到 $2\times10^3\ \Omega^{-1}\cdot cm^{-1}$ 的过程中, 吸收率可以实现 30% 到 100% 的动态调节。

2018 年, Mou 等[66] 设计了一个基于石墨烯的宽频带可调谐太赫兹吸波器。如图 5(c), 其由单层石墨烯同心双环阵列、SiO_2 介质层和金层组成。当石墨烯的费米能级固定为 0.5 eV 时, 该结构在 1.18 THz 到 1.64 THz 频率范围内的吸收率高达 90% 以上, 吸收带宽达到了 0.46 THz。在石墨烯的费米能级从 0.35 eV 变化到 0.65 eV 的过程中, 保持 80% 以上吸收率的吸收频带从 0.98～1.36 THz 移动到 1.36～1.94 THz, 如图 5(d) 所示。表 3 为宽频带可调谐太赫兹超材料吸波器的部分研究工作的汇总。

表 3 宽频带可调谐太赫兹超材料吸波器汇总

Table 3 Summary of broadband tunable terahertz metamaterial absorber

Layer	Material	Parameter	Frequency	Absorptance	Function	Reference
4	Dirac semimetal Strontium titanate	E_f: 40～0 meV T=300 K	unchanged 1.43～1.58 THz	>80%	BW=0.65 THz (absorptance>80%)	[67]
		T: 250～400 K E_f=45 meV	1.14～1.35 THz 1.51～1.76 THz	>80%		
3	Graphene	E_f: 0～0.7 eV		1%～99%	BW=0.76 THz (absorptance>90%)	[68]
3	Graphene	E_f: 0.6～1.0 eV	3.35～4.15 THz	>70%	BW=1.13 THz (absorptance>90%)	[69]
5	Graphene	E_f: 0.7～1.1 eV	2.86～5.08 THz ～ 3.16～6.01 THz	>85%	BW=2.85 THz (absorptance>90%)	
4	Graphene VO_2	σ: 10～2×10^5 S/m E_f=0.1 eV		28%～99%	BW=1.70 THz (absorptance>90%)	[70]
		E_f: 0.1～0.6 eV σ=2×10^5 S/m	Blue shift	>90%		
3	Dirac semimetal	E_f: 40～80 meV	Blue shift		BW=2.70 THz (absorptance>90%)	[71]

Continued

Layer	Material	Parameter	Frequency	Absorptance	Function	Reference
3	VO_2	σ: 200 ～2×10^5 S/m		4%～100%	BW=4.10 THz (absorptance>90%)	[64]
5	Graphene Dirac semimetal	E_f: 0 ~1.7 eV E_f = 60 meV	5～7.44 THz ～ 4.79～8.99 THz	>80%	BW=4.20 THz (absorptance>90%)	[72]
		E_f: 10~100 meV E_f =1.7 eV	Blue shift			

notes T: temperature; E_f: Fermi energy level; σ: conductivity; BW; bandwidth

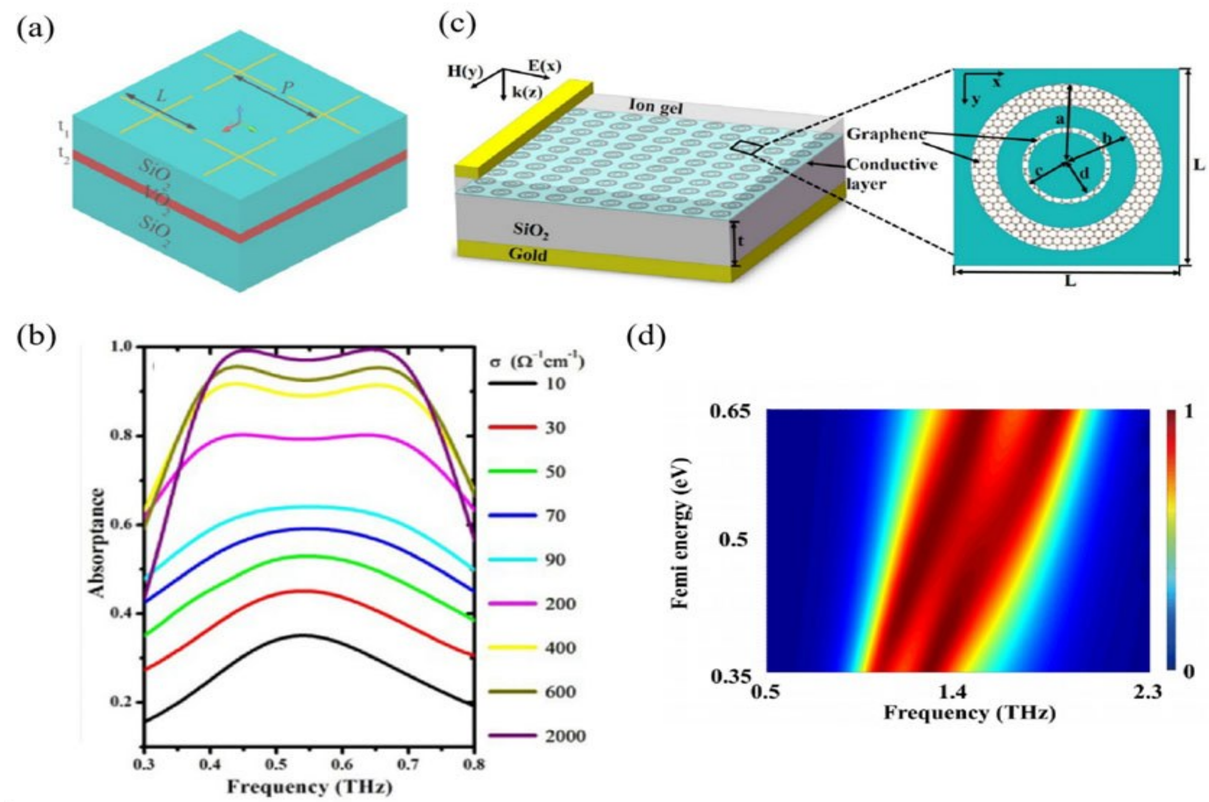

图5　宽频带可调谐太赫兹超材料吸波器。Song 等[65]提出的基于 VO_2 的窄带可调谐太赫兹吸波器的 (a) 结构示意图与 (b) 吸收曲线随着不同电导率的可调谐变化; Mou 等[66]提出的基于石墨烯的宽频带可调谐太赫兹吸波器的 (c) 结构示意图与 (d) 吸收曲线随着不同费米能级的可调谐变化

Fig. 5　Broadband tunable terahertz metamaterial absorber. (a) Schematic diagram of structure and (b) the tunable changes of absorption curves depend on different conductivity of the narrow band tunable terahertz absorber based on vanadium oxide proposed by Song *et al* [65]; (c) Schematic diagram of structure and (d) the tunable changes of absorption curves depend on different Fermi energy level of the wide band tunable terahertz absorber based on graphene proposed by Mou *et al* [66]

1.4　可切换双功能太赫兹超材料吸波器

VO_2 的相变特性为可切换双功能太赫兹吸波器的设计提供了开阔的思路。当 VO_2 处于绝缘态时, 它只起

到介质层的作用; 而当 VO_2 为金属态时, 它可以作为一层金属反射板, 位于 VO_2 下层的结构可以忽略不计, 所以可切换双功能太赫兹超材料吸波器可以看作是两类吸波器结构的堆叠。

2018 年, Zhao 等[32] 提出了一种具有双宽频带可切换的太赫兹超材料吸波器。该团队首先设计了一个基于金属结构的吸波器, 由 I 型金层阵列、介质层和底层金膜组成。仿真结果表明该吸波器在 1.12～1.25 THz 频率范围的吸收率高达 90% 以上。随后基于 VO_2 的相变特性提出了一种具有六层结构的可切换太赫兹吸波器, 如图 6(a), 从上到下依次为 I 型 VO_2 层、介质层 I、I 型金层阵列、VO_2 薄板、介质层 II 和底部金层。当 VO_2 处于绝缘态时, 该器件展现的是一个在 0.76～0.86 THz 频率范围内具有 90% 以上吸收率的宽带吸波器; 随着温度的升高, VO_2 切换为金属态的同时, 吸波器的吸收频带也切换到 1.12～1.25 THz, 此时器件仍是具有 90% 以上吸收率的宽带吸波器, 如图 6(b) 所示。

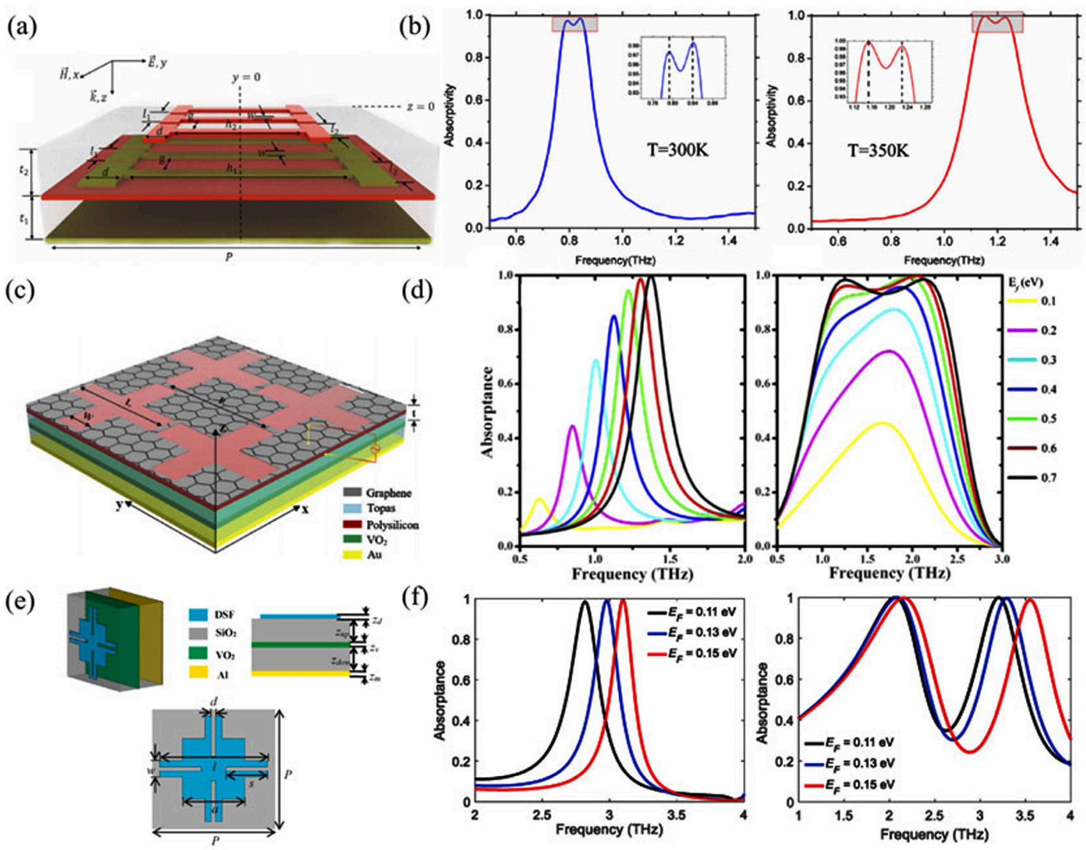

图 6　可切换双功能可调谐太赫兹超材料吸波器。Zhao 等[32]提出的双宽频带可切换的太赫兹超材料吸波器的 (a) 结构示意图与 (b) 吸收曲线随着不同温度的可调谐变化; Zhang 等[33]提出的基于石墨烯和 VO_2 混合材料的宽频带和窄频带可切换双功能太赫兹吸收器的 (c) 结构示意图与 (d) 吸收曲线随着不同费米能级的可调谐变化; Li 等[85]提出的基于狄拉克半金属和 VO_2 混合材料的可切换双功能太赫兹吸波器的 (e) 结构示意图与 (f) 吸收曲线随着不同费米能级的可调谐变化

Fig. 6　Switchable bifunctional terahertz metamaterial absorber. (a) Schematic diagram of structure and (b) the tunable changes of absorption curves depend on different temperature of the double broadband switchable terahertz absorber proposed by Zhao *et al* [32]; (c) Schematic diagram of structure and (d) the tunable changes of absorption curves depend on different Fermi energy level of the wide band and narrow band switchable dual function terahertz absorber based on graphene and vanadium dioxide composite proposed by Zhang *et al* [33]; (e) Schematic diagram of structure and (f) the tunable changes of absorption curves depend on different Fermi energy level of the switchable bifunctional terahertz absorber based on Dirac semi metal and vanadium dioxide proposed by Li *et al* [85]

2020 年, Zhang 等[33]提出了一种基于石墨烯和 VO_2 混合材料的具有宽频带和窄频带的可切换双功能太赫兹吸收器。如图 6(c), 该吸波器由五部分组成: 石墨烯阵列、topas 介质层 I (介电常数为 2.35) 、VO_2 薄膜、topas 介质层 II 和底部金层。当石墨烯的费米能级固定为 0.7 eV 并且 VO_2 处于金属态时, 器件为窄频带吸波器。窄频带吸波器的有效结构由上层石墨烯、topas 介质层 I 和金属态的 VO_2 薄膜组成, 仿真结构表明它在 1.37 THz 处实现了吸收率为 100% 的完美吸收。当 VO_2 转变为绝缘态时, 器件切换为一个具有 1.3 THz 吸收带宽的宽带吸波器, 它在 1.05～2.35 THz 频率范围内具有 90% 以上的高吸收率。由图 6(d) 可知, 在石墨烯的费米能级从 0.1 eV 变化到 0.7 eV 的过程中, 两类吸波器的吸收频率和吸收率都可以实现动态调节。结果表明随着费米能级的增加, 窄频带吸波器的吸收频率向高频率方向移动的同时伴随着吸收率的逐渐增加; 对于宽带吸波器来说, 随着费米能级的增加, 吸波器的吸收率实现了从 45.5% 到 100% 的动态调节。

2021 年, Li 等[85]提出了一种基于狄拉克半金属和 VO_2 混合材料的可切换双功能太赫兹吸波器。如图 6 (e), 该吸波器由五部分组成: 狄拉克半金属层、SiO_2 介质层 I、VO_2 薄膜、SiO_2 介质层 II 和底部金层。假设 VO_2 处于绝缘态和金属态的电导率分别是 10 $S\cdot m^{-1}$ 和 5×10^4 $S\cdot m^{-1}$。仿真结果表明该器件可以通过控制 VO_2 的电导率, 实现单频带吸收器和双频带吸收器之间的功能切换。当狄拉克半金属的费米能级固定为 0.11 eV 并且 VO_2 处于绝缘态时, 器件为在 2.82 THz 处具有 98% 吸收率的单频带吸波器。当 VO_2 切换到金属态时, 器件转变为双频带吸波器, 它在 2.06 THz 和 3.21 THz 处均实现了吸收率为 99.9% 的完美吸收。吸波器的可调谐特性可以通过改变狄拉克半金属的费米能级来实现。在费米能级从 0.11 eV 变化到 0.15 eV 的过程中, 两种类型吸波器的吸收频率都向高频率方向移动, 同时均保持良好的吸收性能, 如图 6(f) 所示。表 4 为可切换双功能太赫兹超材料吸波器的部分研究工作的汇总。

表 4　可切换双功能太赫兹超材料吸波器汇总

Table 4　Summary of switchable bifunctional terahertz metamaterial absorber

Layer	Material	Parameter	Frequency	Absorptance	Function	Reference
6	VO_2	σ: 0 ～10^5 S/m			Narrowband absorption switch to broadband absorption	[86]
5	Graphene VO_2	σ: 40～2×10^5 S/m E_f= 0.7 eV			broadband absorption switch to triple-band absorption	[87]
		E_f: 0～0.7 eV σ= 40 S/m		20%～100%	BW=1.52 THz(absorptance>90%)	
		E_f: 0.5～1.0 eV σ=2×10^5 S/m	1～1.1 THz 2.2 ～2.65 THz 2.55 ～3.16 THz	>90%	triple-band absorption	
6	Graphene VO_2	σ: 200～2×10^5 S/m E_f= 0.9 eV			six-band absorption switch to broadband absorption	[88]
		σ=2×10^5 S/m		>90%	BW=3.83 THz(absorptance>90%)	

Continued

Layer	Material	Parameter	Frequency	Absorptance	Function	Reference
		E_f: 0 eV～1.0 eV σ= 200 S/m	blue shift	>85.1%	six-band absorption	
6	Graphene VO_2	σ: 0 S/m～2×10^5 S/m E_f= 0.7 eV			broadband absorption switch to broadband absorption	[89]
		σ=2×10^5 S/m		>90%	BW=2.25 THz(absorptance>90%)	
		E_f: 0.01 eV～0.7 eV σ= 200 S/m		5.2%～99.8%	bandwidth=1.20 THz(absorptance>90%)	
4	Graphene	E_f: 150 meV～550 meV			broadband absorption switch to triple-band absorption	[90]
3	Photoconductive silicon	σ: 1 S/m～5×10^5 S/m	red shift		dual-band absorption switch to single-band absorption	[91]
5	Photoconductive silicon VO_2	σ(Si): 2.5×10^{-4} S/m $\sigma(VO_2)$: 2×10^5 S/m		>90%	BW=4.66 THz(absorptance>90%)	[92]
		σ(Si): 8×10^4 S/m $\sigma(VO_2)$: 20 S/m		>90%	dual-band absorption	
		σ(Si): 2.5×10^{-4}～3×10^5 S/m $\sigma(VO_2)$ =20 S/m		4%～99%		
		σ(Si): 2.5×10^{-4}～3×10^5 S/m $\sigma(VO_2)$ =2×10^5 S/m		60%～99%		
		$\sigma(VO_2)$: 20～2×10^5 S/m σ(Si) =2.5×10^{-4} S/m		2%～99%		
		$\sigma(VO_2)$: 20～2×10^5 S/m σ(Si) =8×10^4 S/m		69%～99%		

notes T: temperature; E_f: Fermi energy level; σ: conductivity; BW: bandwidth

2 总结和展望

传统的基于金属贴片的太赫兹吸波器由于工作频率固定的局限性, 限制了吸波器的实际应用。近年来, 基于活性超材料的可调谐太赫兹吸波器得到了快速发展, 这类吸波器通过组成材料的可调性质来实现整体结构功能的可调谐。随着研究的不断深入, 相继设计和制备出许多单频带、多频带和宽频带的可调谐太赫兹超材料吸波器, 但仍存在一些需要解决的问题, 未来可调谐太赫兹超材料吸波器的发展趋势主要为: (1) 研究便于集成的可调谐太赫兹超材料吸波器。目前对可调谐太赫兹超材料吸波器的研究主要为单一器件, 与其他功能性太赫兹器件集成将成为其未来发展的重要方向; (2) 研究调谐性能好的太赫兹超材料吸波器。即

在吸波性能好的前提下, 研究具有调谐范围广、调谐频率宽、调谐手段简单、调谐精度高等优势的太赫兹超材料吸波器; (3) 研究调谐方式简单易行的新型活性材料。将调谐方式简单易行的新型活性材料应用于太赫兹超材料吸波器, 将加速太赫兹超材料吸波器的实用化进程; (4) 研究先进的加工手段, 用于制备结构复杂的太赫兹超材料吸波器。目前提出的可调谐太赫兹超材料吸波器大多是基于混合材料的多层结构, 结构较为复杂, 加工难度大, 目前仍处于理论仿真阶段。因此加工制备技术的提高将成为后续研究的重点。

随着新材料的探索、可调谐特性的扩展、加工制备技术的提高, 相信可以设计并制备、应用越来越多的新型可调谐太赫兹超材料吸波器。

参考文献:

[1] Siegel P H. Terahertz technology [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(3): 910-928.

[2] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.

[3] Fang P P, Shi X W, Liu C, *et al*. Single- and dual-band convertible terahertz absorber based on bulk Dirac semimetal [J]. *Optics Communications*, 2020, 462: 125333.

[4] Zhao Y T, Wu B, Huang B J, *et al*. Switchable broadband terahertz absorber/reflector enabled by hybrid graphene-gold metasurface [J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 7161-7169.

[5] Wang J L, Zhang B Z, Wang X, *et al*. Flexible dual-band band-stop metamaterials filter for the terahertz region [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(5): 1656-1665.

[6] Zhou X T, Yin X, Zhang T, *et al*. Ultrabroad terahertz bandpass filter by hyperbolic metamaterial waveguide [J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11657-11664.

[7] Wang J J, Guo K, Guo Z Y. THz filter based on the Si microdisk array [J]. *AIP Advances*, 2019, 9(4): 045106.

[8] Kaveev A K, Kropotov G I, Tsygankova E V, *et al*. Terahertz polarization conversion with quartz waveplate sets [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): B60-B69.

[9] Luo S W, Lin B, Yu A L, *et al*. Broadband tunable terahertz polarization converter based on graphene metamaterial [J]. *Optics Communications*, 2018, 413: 184-189.

[10] Yin Z P, Zheng Q, Wang K Y, *et al*. Tunable dual-band terahertz metalens based on stacked graphene metasurfaces [J]. *Optics Communications*, 2018, 429: 41-45.

[11] Tian S N, Guo H M, Hu J B, *et al*. Dielectric longitudinal bifocal metalens with adjustable intensity and high focusing efficiency [J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 680-688.

[12] Fan F, Zhang X Z, Li S S, *et al*. Terahertz transmission and sensing properties of microstructured PMMA tube waveguide [J]. *Optics Express*, 2015, 23(21): 27204-27212.

[13] He X J, Zhang Q F, Lu G J, *et al*. Tunable ultrasensitive terahertz sensor based on complementary graphene metamaterials [J]. *RSC Advances*, 2016, 6(57): 52212-52218.

[14] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, *et al*. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2075-2084.

[15] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, *et al*. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(18): 4184-4187.

[16] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.

[17] Zhang Y W, Qi L M, Liu C, *et al*. Investigation of asymmetric transmission devices based on metamaterials [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2018, 35(4): 385-394.
张雅雯, 亓丽梅, 刘 畅, 等. 超材料非对称传输器件研究 [J]. 量子电子学报, 2018, 35(4): 385-394.

[18] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, *et al*. Perfect metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.

[19] Tao H, Landy N I, Bingham C M, *et al*. A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization [J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7181-7188.

[20] Pan M, Huang H Z, Fan B D, *et al*. Theoretical design of a triple-band perfect metamaterial absorber based on graphene with wide-angle insensitivity [J]. *Results in Physics*, 2021, 23: 104037.

[21] Zhou W, Chen J, Li H, *et al*. Progress of electromagnetic metamaterial perfect absorber based on terahertz band [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 96-108.
周 维, 陈 骏, 李 豪, 等. 太赫兹电磁超材料完美吸收器的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 96-108.

[22] Chen H T. Interference theory of metamaterial perfect absorbers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7165-7172.

[23] Li J S, Yan D X, Sun J Z. Flexible dual-band all-graphene-dielectric terahertz absorber [J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9 (5): 2067-2075.

[24] Shen N H, Massaouti M, Gokkavas M, *et al*. Optically implemented broadband blueshift switch in the terahertz regime [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(3): 037403.

[25] Choi H S, Ahn J S, Jung J H, *et al*. Mid-infrared properties of a VO_2 film near the metal-insulator transition [J]. *Physical Review B*, 1996, 54(7): 4621-4628.

[26] Fang H M, Tian M, Chang S Q, *et al*. Optical absorption properties in one-dimensional graphene-based photonic crystals [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2018, 35(5): 589-593.
房慧敏, 田 敏, 常诗琦, 等. 一维石墨烯基光子晶体光吸收特性研究 [J]. 量子电子学报, 2018, 35(5): 589-593.

[27] Tao H, Bingham C M, Strikwerda A C, *et al*. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization [J]. *Physical Review B*, 2008, 78(24): 241103.

[28] Wang B X, Zhai X, Wang G Z, *et al*. Design of a four-band and polarization-insensitive terahertz metamaterial absorber [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 7(1): 1-8.

[29] Alaee R, Farhat M, Rockstuhl C, *et al*. A perfect absorber made of a graphene micro-ribbon metamaterial [J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28017-28024.

[30] Shen X P, Cui T J. Photoexcited broadband redshift switch and strength modulation of terahertz metamaterial absorber [J]. *Journal of Optics*, 2012, 14(11): 114012.

[31] Andryieuski A, Lavrinenko A V. Graphene metamaterials based tunable terahertz absorber: Effective surface conductivity approach [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 9144-9155.

[32] Zhao Y, Huang Q P, Cai H L, *et al*. A broadband and switchable VO_2-based perfect absorber at the THz frequency [J]. *Optics Communications*, 2018, 426: 443-449.

[33] Zhang M, Song Z Y. Terahertz bifunctional absorber based on a graphene-spacer-vanadium dioxide-spacer-metal configuration [J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11780-11788.

[34] Liu G D, Zhai X, Meng H Y, *et al*. Dirac semimetals based tunable narrowband absorber at terahertz frequencies [J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11471-11480.

[35] Huang X, Yang F, Gao B, *et al*. Metamaterial absorber with independently tunable amplitude and frequency in the terahertz regime [J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25902-25911.

[36] Yan D X, Li J S. Tunable all-graphene-dielectric single-band terahertz wave absorber [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52(27): 275102.

[37] Chen M, Chen C, Deng S J, *et al*. Dynamically tunable polarization-independent terahertz absorber based on bulk Dirac semimetals [J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(8): 2477-2486.

[38] Xiong H, Shen Q. A thermally and electrically dual-tunable absorber based on Dirac semimetal and strontium titanate [J]. *Nanoscale*, 2020, 12(27): 14598-14604.

[39] Huang X, He W, Yang F, *et al*. Thermally tunable metamaterial absorber based on strontium titanate in the terahertz regime [J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(3): 1377-1385.

[40] Deng G S, Xia T Y, Jing S C, *et al*. A tunable metamaterial absorber based on liquid crystal intended for F frequency band [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2062-2065.

[41] Zheng W, Li W, Chang S J. A thermally tunable terahertz metamaterial absorber [J]. *Optoelectronics Letters*, 2015, 11(1): 18-21.

[42] Cheng Y Z, Gong R Z, Zhao J C. A photoexcited switchable perfect metamaterial absorber/reflector with polarization-independent and wide-angle for terahertz waves [J]. *Optical Materials*, 2016, 62: 28-33.

[43] Wang T L, Cao M Y, Zhang H Y, *et al*. Tunable terahertz metamaterial absorber based on Dirac semimetal films [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(32): 9555-9561.

[44] Xiong H, Peng Y H, Yang F, *et al*. Bi-tunable terahertz absorber based on strontium titanate and Dirac semimetal [J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 15744-15752.

[45] Zhong M, Jiang X T, Zhu X L, *et al*. Design and fabrication of a single metal layer tunable metamaterial absorber in THz range [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 125: 106023.

[46] Xing R, Jian S S. A dual-band THz absorber based on graphene sheet and ribbons [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 100: 129-132.

[47] 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.

[48] Meng W W, Que L C, Lv J, *et al*. A triple-band terahertz metamaterial absorber based on buck Dirac semimetals [J]. *Results in Physics*, 2019, 14: 102461.

[49] Xu K D, Li J X, Zhang A X, *et al*. Tunable multi-band terahertz absorber using a single-layer square graphene ring structure with T-shaped graphene strips [J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11482-11492.

[50] Chen M, Sun W, Cai J J, *et al*. Frequency-tunable terahertz absorbers based on graphene metasurface [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 144-150.

[51] Zhang Y, Lv J, Que L C, *et al*. A double-band tunable perfect terahertz metamaterial absorber based on Dirac semimetals [J]. *Results in Physics*, 2019, 15: 102773.

[52] Wang F L, Huang S, Li L, *et al*. Dual-band tunable perfect metamaterial absorber based on graphene [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(24): 6916-6922.

[53] Li Z X, Wang T L, Qu L F, *et al*. Design of bi-tunable triple-band metamaterial absorber based on Dirac semimetal and vanadium dioxide [J]. *Optical Materials Express*, 2020, 10(8): 1941-1950.

[54] Li W Y, Cheng Y Z. Dual-band tunable terahertz perfect metamaterial absorber based on strontium titanate(STO) resonator structure [J]. *Optics Communications*, 2020, 462: 125265.

[55] Yin Z P, Lu Y J, Xia T Y, *et al*. Electrically tunable terahertz dual-band metamaterial absorber based on a liquid crystal [J]. *RSC Advances*, 2018, 8(8): 4197-4203.

[56] Yao G, Ling F R, Yue J, *et al*. Dual-band tunable perfect metamaterial absorber in the THz range [J]. *Optics Express*, 2016, 24 (2): 1518-1527.

[57] Li J S, Sun J Z. Umbrella-shaped graphene/Si for multi-band tunable terahertz absorber [J]. *Applied Physics B*, 2019, 125 (9): 183.

[58] Fan C Z, Tian Y C, Ren P W, *et al*. Realization of THz dualband absorber with periodic cross-shaped graphene metamaterials [J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(7): 076105.

[59] Luo J, Lin Q, Wang L L, *et al*. Ultrasensitive tunable terahertz sensor based on five-band perfect absorber with Dirac semimetal [J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20165-20176.

[60] Zhang B H, Qi Y P, Zhang T, *et al*. Tunable multi-band terahertz absorber based on composite graphene structures with square ring and Jerusalem cross [J]. *Results in Physics*, 2021, 25: 104233.

[61] Wang R X, Li L, Liu J L, *et al*. Triple-band tunable perfect terahertz metamaterial absorber with liquid crystal [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32280-32289.

[62] Xu Z C, Gao R M, Ding C F, *et al*. Photoexited switchable metamaterial absorber at terahertz frequencies [J]. *Optics Communications*, 2015, 344: 125-128.

[63] Jia Y L, Yin H Y, Yao H W, *et al*. Realization of multi-band perfect absorber in graphene based metal-insulator-metal metamaterials [J]. *Results in Physics*, 2021, 25: 104301.

[64] Zhang R Y, Luo Y H, Xu J K, *et al*. Structured vanadium dioxide metamaterial for tunable broadband terahertz absorption [J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 42989-42998.

[65] Song Z Y, Wang K, Li J W, *et al*. Broadband tunable terahertz absorber based on vanadium dioxide metamaterials [J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 7148-7154.

[66] Mou N L, Sun S L, Dong H X, *et al*. Hybridization-induced broadband terahertz wave absorption with graphene metasurfaces [J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11728-11736.

[67] Wu T, Shao Y B, Ma S, *et al*. Broadband terahertz absorber with tunable frequency and bandwidth by using Dirac semimetal and strontium titanate [J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 7713-7723.

[68] Feng H, Xu Z X, Li K, *et al*. Tunable polarization-independent and angle-insensitive broadband terahertz absorber with graphene metamaterials [J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 7158-7167.

[69] Xiao B G, Gu M Y, Xiao S S. Broadband, wide-angle and tunable terahertz absorber based on cross-shaped graphene arrays [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(19): 5458-5462.

[70] Li H, Yu J. Active dual-tunable broadband absorber based on a hybrid graphene-vanadium dioxide metamaterial [J]. *OSA Continuum*, 2020, 3(8): 2143-2155.

[71] Xiong H, Shen Q, Ji Q. Broadband dynamically tunable terahertz absorber based on a Dirac semimetal [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(16): 4970-4976.

[72] Xiong H, Ji Q, Bashir T, *et al*. Dual-controlled broadband terahertz absorber based on graphene and Dirac semimetal [J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13884-13894.

[73] Wang S X, Cai C F, You M H, *et al*. Vanadium dioxide based broadband THz metamaterial absorbers with high tunability: Simulation study [J]. *Optics Express*, 2019, 27(14): 19436-19447.

[74] Dao R N, Kong X R, Zhang H F, *et al*. A tunable broadband terahertz metamaterial absorber based on the vanadium dioxide [J]. *Optik*, 2019, 180: 619-625.

[75] Bai J J, Zhang S S, Fan F, *et al*. Tunable broadband THz absorber using vanadium dioxide metamaterials [J]. *Optics Communications*, 2019, 452: 292-295.

[76] Ye L F, Chen Y, Cai G X, *et al*. Broadband absorber with periodically sinusoidally-patterned graphene layer in terahertz range [J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11223-11232.

[77] Huang X, He W, Yang F, *et al*. Polarization-independent and angle-insensitive broadband absorber with a target-patterned graphene layer in the terahertz regime [J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 25558-25566.

[78] Xu J, Qin Z J, Chen M, *et al*. Broadband tunable perfect absorber with high absorptivity based on double layer graphene [J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(10): 3398-3410.

[79] Song Z Y, Jiang M W, Deng Y D, *et al*. Wide-angle absorber with tunable intensity and bandwidth realized by a terahertz phase change material [J]. *Optics Communications*, 2020, 464: 125494.

[80] Han J Z, Chen R S. Tunable broadband terahertz absorber based on a single-layer graphene metasurface [J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 30289-30298.

[81] Huang J, Li J N, Yang Y, *et al*. Broadband terahertz absorber with a flexible, reconfigurable performance based on hybrid-patterned vanadium dioxide metasurfaces [J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 17832-17840.

[82] Wu G Z, Jiao X F, Wang Y D, *et al*. Ultra-wideband tunable metamaterial perfect absorber based on vanadium dioxide [J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 2703-2711.

[83] Li Y L, Gao W, Guo L, *et al*. Tunable ultra-broadband terahertz perfect absorber based on vanadium oxide metamaterial [J]. *Optics Express*, 2021, 29(25): 41222-41233.

[84] Huang J, Li J N, Yang Y, *et al*. Active controllable dual broadband terahertz absorber based on hybrid metamaterials with vanadium dioxide [J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7018-7027.

[85] Li Z X, Wang T L, Zhang H Y, *et al*. Tunable bifunctional metamaterial terahertz absorber based on Dirac semimetal and vanadium dioxide [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2021, 155: 106921.

[86] Song Z Y, Chen A P, Zhang J H. Terahertz switching between broadband absorption and narrowband absorption [J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 2037-2044.

[87] Zhu H L, Zhang Y, Ye L F, *et al*. Switchable and tunable terahertz metamaterial absorber with broadband and multi-band absorption [J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 38626-38637.

[88] Zhang M, Song Z Y. Switchable terahertz metamaterial absorber with broadband absorption and multiband absorption [J]. *Optics Express*, 2021, 29(14): 21551-21561.

[89] Liu Y, Huang R, Ouyang Z B. Terahertz absorber with dynamically switchable dual-broadband based on a hybrid metamaterial with vanadium dioxide and graphene [J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 20839-20850.

[90] Chen Z, Chen J J, Tang H W, *et al*. Dynamically switchable broadband and triple-band terahertz absorber based on a metamaterial structure with graphene [J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 6778-6785.

[91] Yuan S, Yang R C, Xu J P, *et al*. Photoexcited switchable single-/ dual-band terahertz metamaterial absorber [J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(7): 075807.

[92] Chen Y, Li J S. Switchable dual-band and ultra-wideband terahertz wave absorber [J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(7): 2197-2205.

[93] Li H, Xu W H, Cui Q, *et al*. Theoretical design of a reconfigurable broadband integrated metamaterial terahertz device [J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 40060-40074.

[94] Ye L F, Chen X E, Zhu C H, *et al*. Switchable broadband terahertz spatial modulators based on patterned graphene and vanadium dioxide [J]. *Optics Express*, 2020, 28(23): 33948-33958.

[95] Wang T L, Zhang H Y, Zhang Y P, *et al*. A bi-tunable switchable polarization-independent dual-band metamaterial terahertz absorber using VO_2 and Dirac semimetal [J]. *Results in Physics*, 2020, 19: 103484.

[96] Lv T T, Dong G H, Qin C H, *et al*. Switchable dual-band to broadband terahertz metamaterial absorber incorporating a VO_2 phase transition [J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 5437-5447.

[97] Li J S, Li X J. Switchable tri-function terahertz metasurface based on polarization vanadium dioxide and photosensitive silicon [J]. *Optics Express*, 2022, 30(8): 12823-12834.

[98] Wang T L, Zhang Y P, Zhang H Y, *et al*. Dual-controlled switchable broadband terahertz absorber based on a graphene-vanadium dioxide metamaterial [J]. *Optical Materials Express*, 2020, 10(2): 369-386.

[99] Li H, Yu J. Bifunctional terahertz absorber with a tunable and switchable property between broadband and dual-band [J]. *Optics Express*, 2020, 28(17): 25225-25237.

[100] Zhang B H, Xu K D. Dynamically switchable terahertz absorber based on a hybrid metamaterial with vanadium dioxide and graphene [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(11): 3425-3434.

[101] Zhang B H, Xu K D. Switchable and tunable bifunctional THz metamaterial absorber [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2022, 39(3): A52-A60.