

〈太赫兹技术〉

太赫兹及红外吸波超材料研究进展

杨竞帆, 屈绍波, 庞永强, 徐翠莲
(空军工程大学理学院, 陕西 西安 710051)

摘要: 随着超材料研究的不断发展, 基于超材料结构设计的一系列太赫兹及红外吸波体引起了国内外广泛关注。由于具有高效的吸波性能, 太赫兹及红外吸波超材料在现代隐身技术、节能、绝热、生物化学光谱、红外成像、传感和安检等领域具有广泛的应用前景。通过紧密跟踪国内外太赫兹及红外吸波超材料的最新研究进展, 讨论总结了太赫兹及红外吸波超材料的吸波机理。由于材料依靠增强电场强度来实现对电磁波的吸收往往比靠材料本身的损耗吸收电磁波有更高的效率, 与传统吸波材料的工作原理不同, 超材料在太赫兹及红外波段主要依靠亚波长单元结构的设计, 降低其等离子体频率, 从而实现表面等离激元场增强效应(SPPs)。基于此, 总结归纳了太赫兹及红外吸波超材料研究中3种有效降低等离子频率的方法, 分别为金属表面的周期性结构设计、半导体材料的掺杂和新型碳纳米材料的引入, 更加清晰地阐明了表面等离激元场增强效应实现方式。同时, 对太赫兹及红外吸波超材料今后的发展给出了自己的认识。

关键词: 太赫兹; 红外; 吸波超材料; 表面等离激元

中图分类号: TN820 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2017)04-0323-06

Development of THz and Infrared Metamaterial Absorbers

YANG Jingfan, QU Shaobo, PANG Yongqiang, XU Cuilian
(College of Science, Airforce Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Recent years, with gradually development of metamaterial, a series of THz and infrared absorbers based on metamaterial structures have attracted widespread attention all over the world. Due to the highly efficient absorption performance, THz and infrared metamaterial absorbers(MAs) have wide application prospects in many fields, such as modern stealth technology, energy saving project, thermal insulation field, biochemistry spectrum, infrared imaging, THz sensor, security check and so on. By taking a closely tracking on the latest research at home and abroad, this paper discusses and summarizes the basic operating principle of THz and infrared MAs. It's universally accepted that the energy absorption is proportional to the loss of absorbing material and the quadratic of electric field strength. Due to the relatively low loss of nature material, it's more efficient to achieve electromagnetic wave absorption by increasing motivated electric field strength than the material loss itself. Different from the traditional material absorbers largely depending on loss, MAs decreases the plasmon polaritons through the design of sub-wavelength structure in THz and infrared frequency region, which contributes the electric field enhancement of surface plasmon polaritons(SPPs). Based on this, the paper summarized three effective methods to decrease the plasmonic frequency by designing periodic structure of metallic surface, doping semi-conductor periodic array and adding new type carbon nanomaterials. And then, a more detailed description for the methods to achieve surface plasmon polaritons(SPPs) is given out. Furthermore, combined with development tendency of metamaterial, the paper also expounded the perspective for the future development of THz and infrared metamaterial absorbers.

Key words: THz, infrared, metamaterial absorbers, surface plasmon polaritons

收稿日期: 2016-10-07; 修订日期: 2016-11-07。

作者简介: 杨竞帆(1993-), 男, 硕士研究生, 从事红外吸波超材料方面的研究。

基金项目: 国家青年基金: 基于人工表面等离激元的宽带轻质无反射背板吸波材料研究(61501497)。

0 引言

超材料是由亚波长谐振单元所组成的人工材料，具有自然界中材料所不具备的新颖电磁特性，其应用主要包括负折射率^[1-3]、完美透射^[4]和左右手传输线^[5]等。超材料应用的另一重要方面是完美吸收超材料吸波体^[6]，电磁吸波材料是指能有效吸收入射电磁波从而使目标回波强度显著衰减的一类功能材料。电磁吸波材料^[7]由于其在军事和民用方面都有着十分广泛的应用前景，长期以来受到世界各国研究者的关注。完美吸收超材料吸波体是由美国波士顿大学的 Landy^[8]在 2008 年首次提出，随着材料制备水平以及微观结构表征能力的不断改进与提高，吸波材料也从微波频段逐步扩展到太赫兹频段^[9]、红外波段^[10]和光波段^[11]。本文阐述了太赫兹及红外超材料吸波的基本理论，对超材料吸波体的研究进展、最新应用，及未来发展趋势进行了讨论。

1 吸波的基本原理

1.1 材料的吸收率

记 $R(\omega)$ 是反射率， $T(\omega)$ 是透过率，材料的吸收率 $A(\omega)$ 可以表示为：

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad (1)$$

设电磁波从端口 1 入射、从端口 2 出射，则 $R(\omega)$ 、 $T(\omega)$ 可表示为：

$$R(\omega) = |S_{11}|^2 \quad (2)$$

$$T(\omega) = |S_{21}|^2 \quad (3)$$

式中： S 代表散射参数， S_{11} 为输入反射系数， S_{21} 为输入反射系数。对厚度为 d 的材料， S_{21} 主要取决于材料的复折射率 $n = n_1 + i n_2$ 和复阻抗 $Z = Z_1 + i Z_2$ ，可以表示为：

$$S_{21}^{-1} = \left[\sin(nkd) - \frac{i}{2} (Z + \frac{1}{Z}) \cos(nkd) \right] e^{ikd} \quad (4)$$

式中： $k = \omega/c$ ， c 为真空中的光速。

当复合材料与自由空间阻抗匹配 ($Z=1$) 时，则有：

$$S_{21}^{-1} = [\sin(nkd) - i \cos(nkd)] e^{ikd} = e^{-i(n_1-1)kd} e^{n_2 kd} \quad (5)$$

$$T(\omega) = |S_{21}|^2 = e^{-2n_2 kd} \quad (6)$$

$$\lim_{\substack{Z(\omega)=1 \\ n_2 \rightarrow \infty}} T(\omega) = 0 \quad (7)$$

根据以上推导，吸波材料要实现高吸收率，必须满足两个条件：①吸波材料的阻抗必须尽量与自由空间的阻抗相匹配，以便使入射电磁波最大限度地进入

材料内部；②吸波材料应具备很强的电磁波衰减特性，以便使进入材料内部的电磁波最大限度地被损耗掉。当吸波材料实现了理想的阻抗匹配和无穷大的折射率虚部时，吸收率 $A(\omega)=1$ 。

1.2 材料的阻抗匹配特性

要使吸波材料能够有效地吸收电磁波，吸波材料除了具有良好的衰减特性外，还需要与自由空间阻抗匹配，这样才能使电磁波最大限度地进入材料内部。当电磁波由自由空间（阻抗 Z_0 ）入射到吸波材料（输入阻抗为 Z_i ）的界面上时，一部分电磁波被反射、一部分电磁波进入吸波材料内部。吸波材料的反射系数可表示为：

$$R = \frac{Z_0 - Z_i}{Z_0 + Z_i}, \quad (Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}, \quad Z_i = \sqrt{\mu_i / \epsilon_i}) \quad (8)$$

$$\epsilon_i = \epsilon_0 \epsilon_r, \quad \mu_i = \mu_0 \mu_r \quad (9)$$

由式(8)、(9)知，要使反射系数为零，则需要材料的 Z_0 和 Z_i 匹配，即要求材料的相对介电常数 ϵ_r 和相对磁导率 μ_r 相等，而在实际中人们往往尽量使相对介电常数 ϵ_r 和相对磁导率 μ_r 大小接近，从而使材料前表面的反射尽量小。

1.3 表面等离子体激元 (SPPs) 的场增强效应

当电磁波入射到金属与介质分界面时，金属表面的自由电子发生集体振荡，电磁波与金属表面自由电子耦合而形成的一种沿着金属表面传播的近场电磁波，如果电子的振荡频率与入射电磁波的频率一致就会产生共振，在共振状态下电磁场的能量被有效地转变为金属表面自由电子的集体振动能，这时就形成了一种特殊的电磁模式：电磁场被局限在金属表面很小的范围内并发生增强，这种现象就被称为表面等离激元现象。

由于材料吸收的能量与材料的损耗成正比，与激发电场强度的二次方成正比。因此，在红外或太赫兹波段利用超材料激发 SPPs 的场增强效应可以实现完美吸波。

通常金属的介电特性由 Drude 模型描述：

$$\epsilon_m(\omega) = 1 - \omega_p^2 / \omega(\omega + i\omega_c) \quad (10)$$

式中： ω_c 为碰撞频率； ω_p 为等离子角频率；
 $\omega_p = \sqrt{n e^2 / m_0 \epsilon_0}$ (n 为电子浓度； m_0 为电子质量)。

对于普通金属 Cu、Ag、Au 和 Al，其电子浓度 $n \approx 10^{23}$ ，因此决定了该等离子体频率位于可见光和紫外区域，如何才能实现 THz 红外波段的等离子体频率？下面就从如何有效激发 SPPs 的角度阐述红外超材料吸波

器的研究进展。

2 红外超材料吸波器的研究进展

2.1 周期性结构的金属表面

为了将等离子体频率从光频段降低到红外、THz波段, 可以采用周期性结构的金属表面阵列, 增强表面波与微结构的相互作用, 从而获得等效介质中较低的等离子体频率。如图1^[12](a)所示, 这种超材料吸波器由三层“三明治”结构组成, 上层由两个内外径分别为2 μm、3.3 μm的同心金属圆环嵌套而成, 中层用SiO₂作为电介质层将上层结构单元与底层金属背板隔开。通过优化尺寸参数, 金属环之间的谐振频率几乎没有影响, 共同作用形成了两个独立的吸收峰。由于金属背板的存在, 阻断了入射电磁波的透射, 透射率T(ω)几乎为0, 因此只需测量其反射率, 代入式(8)即可。仿真结果如图1(c)所示, 在11.8 THz和17.9 THz有两个近完美吸波峰, 并且与极化角度无关。

除了利用嵌套方法来实现周期性结构的金属表面, 多层谐振层叠加也可以达到同样的效果。这里介绍一种中红外多层电介质层宽带超材料吸波器, 如图2^[13](a)所示, Y₂O₃和Al₂O₃作为电介质层分别位于金

属Al夹层中间, 介电常数分别为 $\epsilon_d=3.06$ (无损耗)和2.28($\tan\delta=0.04$), 自上而下依次为金属Al、介质Y₂O₃、金属Al、介质Al₂O₃、金属Al。利用多层金属-介质-金属谐振堆栈, 激发每层谐振堆栈的磁谐振, 通过设计不同介质层的介电常数来调节吸收峰值波长, 然后叠加成宽带超材料吸波体。经过红外傅里叶变换频谱仪和红外显微镜测量, 这种双层谐振堆栈结构在6.94 μm和6.68 μm处分别有两个吸收率为77.7%和77.2%的吸收峰值, 吸收率大于70%的带宽为0.52 μm; 对于三层谐振堆栈, 在6.88 μm、6.68 μm和6.37 μm处分别有吸收率为82.5%、83.4%和80.7%的吸收峰值, 吸收率大于70%的带宽0.83 μm, 结果如图2(b)所示。这种多层宽带超材料吸波体的谐振堆栈都是相同尺寸, 因此只需要经过一次光刻处理, 这极大简化了微纳加工步骤, 并且可以在不改变结构尺寸的情况下, 通过改变电介质层的介电常数改变谐振峰值, 这在能量采集、灵敏度探测和热调节等方面具有潜在应用价值。

2.2 掺杂半导体材料周期阵列

与普通金属相比, 半导体材料的载流子的浓度远低于金属中自由电子浓度, 其等离子体频率由载流子

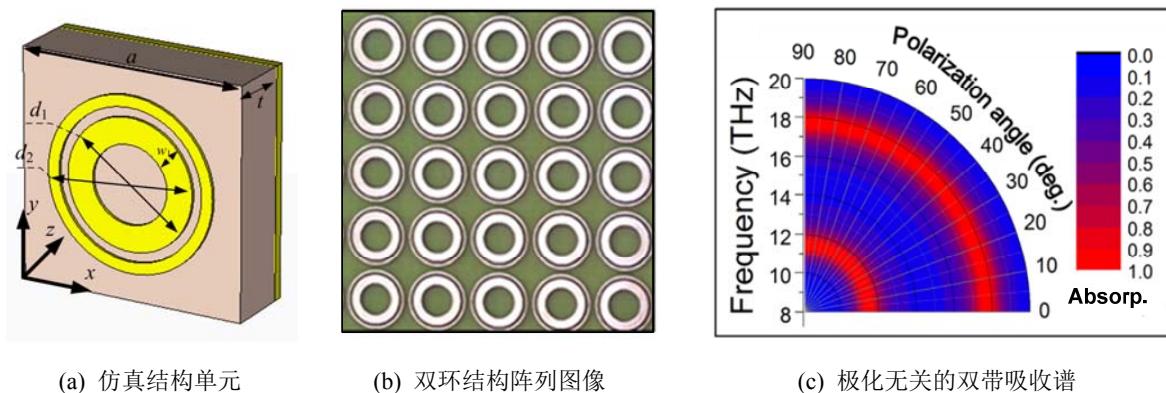


图1 双带吸波超材料

Fig.1 Dual-band metamaterial absorber

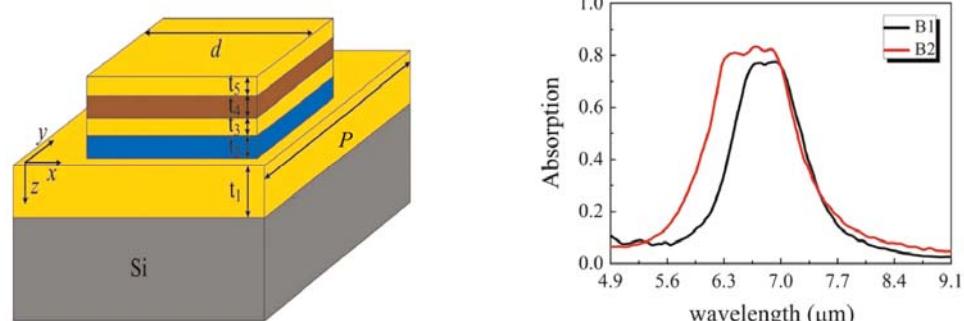
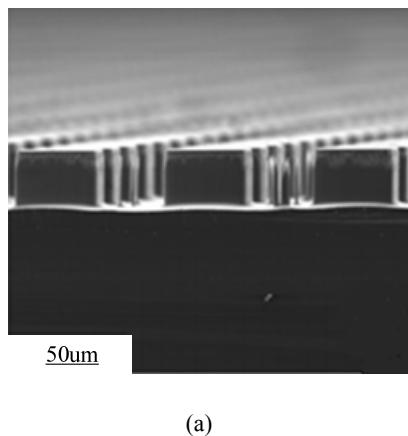


图2 中红外多层电介质层宽带超材料吸波器

Fig.2 Mid-infrared multi-dielectric broadband metamaterial absorber

浓度决定，半导体自由载流子与红外光的相互作用类似于金属，半导体表面 SPPs 特性可通过掺杂、光、热、电等方式激励^[14-16]。

如图 3^[17](a)，是一种高效率宽带极化无关太赫兹吸波体，不同于传统的金属-介质-金属结构，这种宽带近完美吸波体由二维光栅和掺硼硅基板组成。通过利用相消干涉和衍射的完美结合实现了宽带吸波。根据等效介质理论，在低频太赫兹波段，入射的太赫兹波碰到光栅结构后，由光栅上表面和下表面反射的太赫兹波会有一定的相差，通过调节光栅层的厚度使上下表面反射的太赫兹波干涉相消，减小反射波；在高频波段，将光栅视为周期波导阵列，利用光栅衍射减小反射，实现了在 1.17 THz 和 1.73 THz 吸收率接近 100%，1~2 THz 范围内吸收率在 95% 以上，如图 3(b)。



(a)

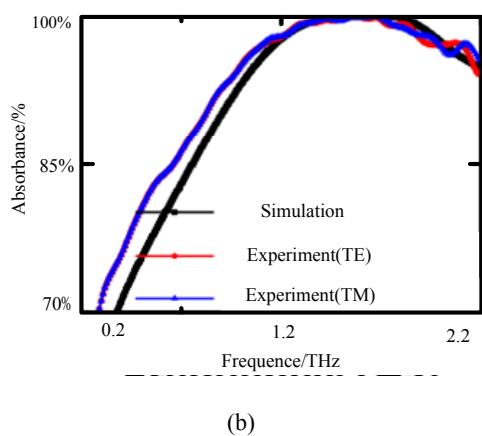
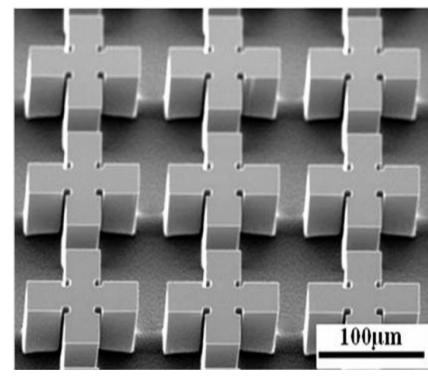


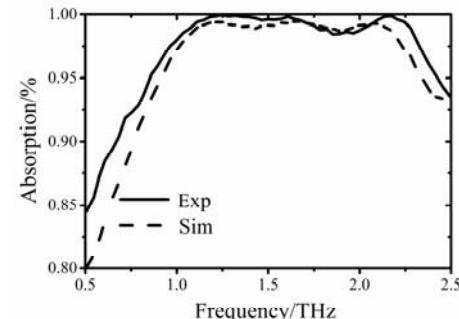
图 3 二维光栅结构(a)及吸收率曲线图(b)

Fig.3 Two dimensional gratings structure(a) and absorption curves(b)

在此结构基础上，对光栅的占空比（光栅面积与基板面积之比）进一步研究，提出了占空比为 0.29 的互相垂直“双哑铃”掺硼硅光栅阵列结构，经过试验测试发现，该结构比原二维光栅具有更宽的吸波带宽，在 0.92~2.4 THz 超宽带频段内吸收率大于 95%，如图 4^[18]所示。



(a)



(b)

图 4 双哑铃结构光栅(a)及吸收特性曲线图(b)

Fig.4 Dumbbell-shaped gratings structure(a) and absorption curves(b)

2.3 石墨烯、碳纳米管等新型纳米材料

石墨烯具有远远超过硅和传统半导体材料的载流子迁移率（目前其载流子迁移率的理论最大值可达 $2 \times 10^6 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ）、优异的光传导性（其每一层的光传导与它的精细结构常数相对应），并且它还具有卓越的力学强度与热力学稳定性，这使它成为了推动光电子学发展的关键材料之一。

在红外和太赫兹频段，石墨烯对电磁波的响应行为类似于金属对电磁波的响应行为，可以激发表面等离激元（SPPs），当光入射到石墨烯上时，石墨烯结构会产生 SPP 响应，导致等离激元吸收增强。如图 5^[19](a) 所示的结构，十字形石墨烯阵列附着在折射率为 3.4 的硅基板上，中间用一层介电常数为 3.9 的薄二氧化硅隔开。采用控制变量法分析该吸收谱，通过控制 $L = 1.25 \mu\text{m}$ 不变，分别改变十字石墨烯的宽长比 w/L 和长周期比 L/a 两个变量参数，仿真发现无论这两个变量参数取何值，吸收谱总会存在一个吸收峰，而吸收率存在差异，如图 5(b)、(c)。

以上研究发现，这种十字形石墨烯结构比传统的石墨烯圆盘结构对吸收峰值波长的调节更加自由，而且吸收效率还可以进一步增强。

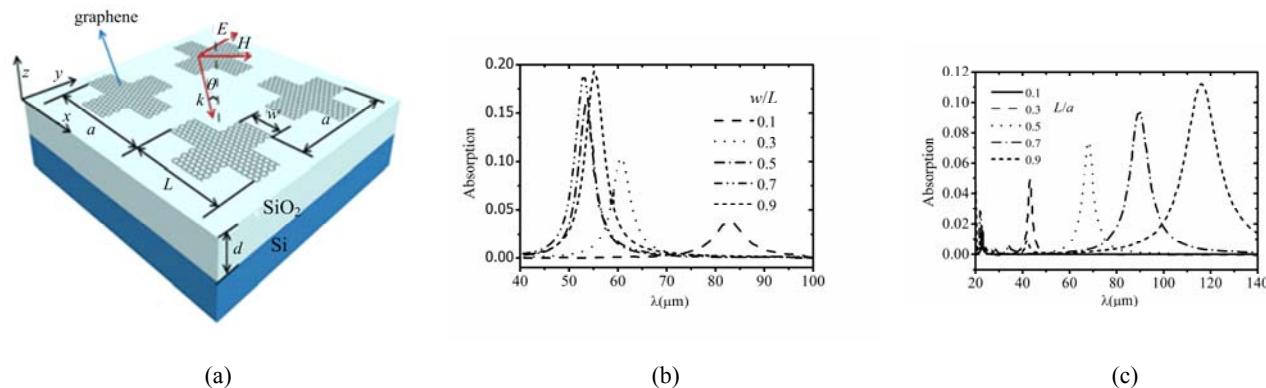


图5 十字形石墨烯结构单元(a), 不同宽度下的吸收谱(b)及不同周期下的吸收谱(c)

Fig.5 Cross-shaped graphene structure(a); absorption curves under different widths(b); absorption curves under different periods(c)

3 超材料完美吸收体的应用

目前完美吸收体很多应用研究都处于初级阶段,一个主要的目标是将其集成于现有的器件中以改善他们的性能。下面将简述其可能存在的主要应用。

3.1 选择发射的应用

超材料是由亚波长人工结构单元构成的复合结构,具有优异的频率选择特性。通过合理设计可以有选择性地吸收、透射或反射电磁波。根据热辐射的Kirchhoff定律,在热平衡的时候,物体的发射率等于它的吸收率。因此,在原则上给出了设计热发射的可能,促进了红外辐射调控技术的发展。在红外烘烤技术^[20]中,不同的被烘烤物对应不同的红外吸收波长,例如大多数无机物、有机高分子材料在8~12 μm处有很强的吸收峰,如果我们设计出吸收波长在9 μm的完美吸收超材料,那么其红外辐射将与烘烤物中的有机高分子的红外吸收相匹配,使能量传播效率提高,起到高效节能的作用。选择发射在飞行器红外隐身中也有重要应用,飞行器蒙皮是重要的红外辐射源^[21],在8~12 μm段贡献率大,因此针对8~12 μm波段的超材料完美吸波体将会大大消减飞行器的红外信号特征,满足飞行器的红外隐身性能。

3.2 传感器的应用

由于大多数物质分子及其分子间相互作用在太赫兹波段存在指纹谱,而且太赫兹辐射所具有的非电离特性,使其非常适合于生物化学物质的传感测量^[22]。相比于X射线等传统光谱分析技术,太赫兹辐射能量低,不足以造成分子的化学损伤,而且太赫兹波对DNA构形和构象的变化非常敏感,因此可以通过太赫兹光谱进行基因分析或无标记探测。实验表明,DNA的序列差异越大,THz的透过率越小,共振频率越低,因此可以利用基于超材料谐振器的传感器对DNA序列进行检测,如Nagel等人^[23]利用超材料谐

振器对聚合态DNA进行了传感检测,灵敏度比传统的时域光谱(TDS)高出1000倍,Driscoll等人^[24]利用SRRs(开口金属环共振器)结构超材料谐振器,通过向表面滴加纳米硅球和酒精混合液,改变SRRs结构周围环境的介电特性,实现了对其谐振频率的高精度调控。任何物质,只要它本身具有一定温度(高于绝对零度),都能辐射红外线,利用超材料完美吸波特性制成的红外线传感器,可以远距离测量人体表面温度,发现温度异常部位;利用人造卫星上的红外线传感器对地球云层进行监视,可实现大范围的天气预报等。

4 结论

如今,太赫兹及红外领域在国内外学术界受到了广泛的关注,而超材料的发展也为太赫兹及红外吸波方面做出了巨大贡献,如宽带吸波、大角度入射吸波、极化无关吸波等等。本文将现阶段太赫兹及红外吸波超材料的吸波原理进行了概括说明,对实现吸波的不同方法进行了分类,并对应举出了实例。但是,红外吸波材料发展到现在仍有巨大的挖掘空间,可以预期未来红外吸波材料的发展趋势:

1) 智能可调超材料: 电磁超材料是由亚波长结构单元组成,通过改变超材料结构单元的尺寸,可以使其工作在不同的波段。而智能可调超材料可以通过施加外部信号来改变超材料的电磁性质,既可以改变和扩展超材料的工作频段,又为各种调制器等有源器件的开发提供了可能。目前可调超材料有热调制、电调制、磁场调制和光调制,但在太赫兹和红外频段对新现象新物理的探索和认识仍然不足,智能可调超材料仍有着广阔的发展前景。

2) 角度选择性: 通过设计不同结构的超材料,可以使超材料具有自然界材料不具备的新颖特性,角度选择性也是其中之一。对于超材料吸波体来说,大

角度入射吸波、极化无关吸波超材料的设计已经发展得十分成熟，而具有强角度选择性超材料的研究还很欠缺，角度选择性超材料可作为角度选择器在方向性探测上有一定的应用前景。

3) 极窄带吸波超材料：以往的吸波超材料都倾向于把频带做宽，却往往忽视了极窄带吸波，如今随着科技的发展，人们对于超高灵敏度传感器的需求愈来愈烈。极窄带吸波超材料因其具有良好的频点选择性，使得其对谐振频点的捕获更加精确，因而可以作为高灵敏度传感器的基石，也有巨大的发展前景。

参考文献：

- [1] LIU R, Degiron A, Mock J J, et al. Negative index material composed of electric and magnetic resonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**: 263504.
- [2] C C H, QU S B, WANG J F, et al. Wide-angle and polarization independent three-dimensional magnetic metamaterials with and without substrates[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, **44**: 135002.
- [3] CHEN C H, QU S B, WANG J F, et al. A planar left-handed metamaterial based on electric resonators[J]. *Chinese Physics B*, 2011, **20**: 034101.
- [4] CHEN H, FANG X, TANG X, et al. Coherent perfect absorption and transmission based on a multi-mode optomechanical system[J]. *Applied Physics*, 2015, **5**(12): 172-180.
- [5] Lai A, Caloz C, Itoh T. Composite right/left-handed transmission line metamaterials[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2004, **5**: 34-50.
- [6] BAI Yang, ZHAO Li, JU Dongquan, et al. Wide-angle, polarization-independent and dual-band infrared perfect absorber based on L-shaped metamaterial[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(7): 8670-8680.
- [7] TAO H, Bingham, Strikwerda A C, et al. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: design, fabrication, and characterization[J]. *Physical Review B*, 2008, **78**: 241103.
- [8] Landy N I, Sajuyigbe, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**: 207402.
- [9] TAO H, Bingham C M, Pilon D, et al. A dual band terahertz metamaterial absorber[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, **43**: 225102.
- [10] FENG R, DING W, LIU L, et al. Dual-band infrared perfect absorber based on asymmetric T-shaped plasmonic array[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(s2): A335-A343.
- [11] LI W, Guler U, Kinsey N, et al. Refractory plasmonics with titanium nitride: broadband metamaterial absorber[J]. *Advanced Materials*, 2014, **26**(47): 7959-7965.
- [12] Tuong P V, Park J W, Rhee J Y, et al. Polarization-insensitive and polarization-controlled dual-band absorption in metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(8): 081122.
- [13] ZHANG N, ZHOU P, WANG S, et al. Broadband absorption in mid-infrared metamaterial absorbers with multiple dielectric layers[J]. *Optics Communications*, 2015, **338**: 388-392.
- [14] 胡海峰. 表面等离子体波导模式耦合及光束调控的分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [15] HU H F. The analysis of modal coupling and beam manipulation in plasmonic waveguide[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [16] 张凯, 刘之景, 王克逸. 光致表面等离子体波技术及其应用[J]. 自然杂志, 2002, **24**(1): 44-47.
- [17] ZHANG K, LIU Z J, WANG K Y. Photochromic surface plasmon wave technique and application[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2002, **24**(1): 44-47.
- [18] 金玉. 表面等离子体增强有机光电电器件效率研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [19] JIN Y. Research on surface-plasmon-polariton-enhanced efficiency in organic optoelectronic devices[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [20] PENG Y, ZANG X F, ZHU Y M, et al. Ultra-broadband terahertz perfect absorber by exciting multi-order diffractions in a double-layered grating structure[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(3): 2032-2039.
- [21] ZANG X F, SHI C, CHEN L, et al. Ultra-broadband terahertz absorption by exciting the orthogonal diffraction in dumbbell-shaped gratings[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 8901.
- [22] KE S, WANG B, HUANG H, et al. Plasmonic absorption enhancement in periodic cross-shaped graphene arrays[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(7): 8888-8900.
- [23] 庞文琴, 徐溯华, 郭晔. 分子筛型选择性红外辐射材料的研究(IV)——4#分子筛的研制及其红外性能[J]. 吉林大学学报理学版, 1983(3): 69-73.
- [24] PANG W Q, XU Y H, GUO Y. The investigation of molecular sieve-zeolite selective IR material(IV)——4#Research of molecular sieve-zeolite and infrared properties[J]. *Journal of Jilin University*, 1983(3): 69-73.
- [25] 冯云松, 路远, 凌永顺. 发射率对飞机蒙皮温度及红外辐射特性的影响[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(2): 294-299.
- [26] FENG Y S, LU Y, LING Y S. Influence of surface emissivity on temperature and infrared radiation characteristics of aircraft skin[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(2): 294-299.
- [27] 李月华. 超材料太赫兹波折射率传感器设计[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014.
- [28] LI Y H. Design of terahertz metamaterials for refractive-index-based sensors[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2014.
- [29] Michael N, Peter H B, Martin B, et al. Integrated planar terahertz resonators for femtomolar sensitivity label-free detection of DNA hybridization[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(10): 2074-2078.
- [30] Driscoll T, Andreev G O, Basov D N, et al. Tuned permeability in terahertz split-ring resonators for devices and sensors[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(6): 062511.