



DOI: 10.12086/oe.2019.180666

## 红外和太赫兹电磁吸收超表面研究进展

邓洪朗<sup>1</sup>, 周绍林<sup>1\*</sup>, 岑冠廷<sup>2</sup><sup>1</sup>华南理工大学电子与信息学院, 广东 广州 510640;<sup>2</sup>华南农业大学工程学院, 广东 广州 510642

**摘要:** 超表面是一种可实现多功能超常电磁调控的超薄型二维阵列平面。它由超材料结构单元组成, 可以灵活有效地操控电磁波的相位、极化方式、传播模式等特性, 因而在可控智能表面、新型波导结构、电磁波吸收和小型谐振器件等方面展现了广阔的应用前景。本文介绍了超表面的基本概念和背景, 同时总结论述了红外和太赫兹波段下, 实现完美吸收表面、宽带吸收以及可调吸收等几种超表面器件的设计与发展思路, 最后对其潜在问题以及未来趋势进行讨论。

**关键词:** 超表面; 完美吸收; 宽带吸收; 可调谐超表面

**中图分类号:** O436

**文献标志码:** A

**引用格式:** 邓洪朗, 周绍林, 岑冠廷. 红外和太赫兹电磁吸收超表面研究进展[J]. 光电工程, 2019, 46(8): 180666

## Progress on infrared and terahertz electro-magnetic absorptive metasurface

Deng Honglang<sup>1</sup>, Zhou Shaolin<sup>1\*</sup>, Cen Guanting<sup>2</sup><sup>1</sup>School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;<sup>2</sup>School of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China

**Abstract:** The metasurface is an ultra-thin two-dimensional planar array that enables multi-functional and extraordinary electro-magnetic control. It consists of structural units of metamaterials which can flexibly and effectively control the phase, polarization mode and propagation mode of electromagnetic waves. Therefore, it shows great potentials and prospects in various applications including the controllable “smart” surfaces, novel waveguide structures, electromagnetic wave absorption and the miniaturized cavity resonators. In this review, we first introduce basic concepts and background of metasurfaces, and then summarize the design and development of several absorptive metasurface devices in the infrared & terahertz (THz) bands and finally discuss its potential problems and prospective in future.

**Keywords:** metasurface; perfect absorption; broadband absorption; tunable metasurface

**Citation:** Deng H L, Zhou S L, Cen G T. Progress on infrared and terahertz electro-magnetic absorptive metasurface[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(8): 180666

收稿日期: 2018-12-19; 收到修改稿日期: 2019-05-27

基金项目: 广州市科技计划珠江科技新星专题项目(201710010058); 华南理工大学中央高校基本科研业务费项目(2018MS16)

作者简介: 邓洪朗(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事红外和太赫兹器件的研究。E-mail: 286032596@qq.com

通信作者: 周绍林(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事微纳光子器件及工艺研究。E-mail: eeslzhou@scut.edu.cn

## 1 引言

多年来,随着无线电通讯设备的广泛应用和密集配置,使得在有限的波谱空间充斥着多个波段、不同频率的电磁波信号,电磁干扰或污染情况越发严重<sup>[1]</sup>。作为应对这一现实的主要手段,电磁防干扰技术也“与时俱进”地面临着持续的挑战与新型应用需求。其基本思路是,通过吸波材料或结构设计,实现能量吸收与转化的最大化,如将入射的电磁波能量转化为焦耳热消耗掉。

其次,电子技术的发展给军事应用带来翻天覆地的变化,在侦查系统、精确打击系统等相关技术应用领域层出不穷,如各种新型雷达、先进的制导武器等。因此,为了提高作战平台的生存能力,隐身技术成为多年以来的研究与应用热点<sup>[2]</sup>。作为一项至关重要的关键技术,隐身的意义就在于降低目标与环境背景的差异性,减小目标暴露的可能性,主要分为材料隐身和外观隐身两种。其中,材料隐身是指在目标表面设计一层吸波材料降低目标回波强度从而大幅降低其雷达散射截面,实现隐身。

在这种情况下,吸波材料作为电磁波防干扰技术和隐身技术的主要载体,成为了世界各地同行的研究热点。但是,传统的吸波材料往往存在重量大、结构厚、带宽窄、效率低等诸多问题。本世纪以来,人们在不断改进传统吸波材料结构的同时,也在不停地探索新的材料或结构设计。其中,作为人工介质的超材料因为众多新颖、非传统的特性而受到研究人员的广泛关注<sup>[3]</sup>。通过在亚波长尺度下的单元阵列结构合成,例如开口谐振环结构模型<sup>[4]</sup>,超材料可实现自然界不存在的负折射率<sup>[5]</sup>、超强透射及完美吸收特性等<sup>[6]</sup>。随着研究的深入,研究人员开始不断拓展超材料应用领域,提出不同的演化模型,如超表面开关、超器件<sup>[7-8]</sup>等。通常按照一定规律排布的三维结构散射体或者通孔,为超材料。相比之下,近几年出现的超表面概念,则是在此基础上演化而来的二维版本,即亚波长平面周期结构阵列<sup>[9]</sup>。

从三维到二维的演进,超表面也有利于紧凑度要求较高的集成光电子应用,如片上光子器件、硅基光探测器、光波导等。其中,作为实现光电转换的重要载体,光探测器不仅是半导体光电子学的重要组成部分,还在军事、国防、医疗、光通信<sup>[10-12]</sup>等广泛应用领域中起着举足轻重的作用,属于核心技术领域及战略制高点。其中,高吸收率对探测器的信号响应极其

重要。例如在红外窗口波段( $4\ \mu\text{m}\sim 6\ \mu\text{m}$ ),作为衡量探测器的指标之一,超宽带与超高的吸收率指标意义重大。通常情况下,红外探测器敏感元的自身吸收特性不足,需要特别设计抗反射层或吸收增强结构予以辅助。传统的红外吸收结构主要分为黑化层、薄金属吸收层和共振吸收<sup>[13]</sup>三类。但是,这几种结构存在体积庞大、灵活性差、吸收效果差等诸多问题,不能满足越来越严格的探测器性能指标需求,以及未来探测器多功能化、集成化、芯片化的发展趋势。可见,将超表面结构与探测器结合,可以在亚波长尺寸下大幅度增强探测器的红外吸收,并通过优化吸收层表面贵金属颗粒的种类、形貌、大小以及排列方式等参数,进一步实现谐振工作频率、带宽等多功能调控。

综上所述,超表面的出现极大地拓展了吸波、红外探测等技术潜力,在国防、医疗及通信多个领域展现出广阔的前景。随着电磁吸收超表面的研究深入,在实现多波段电磁波的多样化、轻量化调控的同时,有利于促进多样化、高性能的光电集成器件发展,以及特定应用下片上集成光电子技术走向成熟。本文将从这一角度出发,首先引入早期的完美吸收超表面概念,然后重点介绍近几年在宽带吸收超表面与可调吸收超表面的研究进展。

在单个频率下,以特定入射角度入射,可吸收将近100%入射波能量的单层超表面结构,称为完美吸收超表面,也叫窄带吸收超表面。近年来,完美吸收超表面由于可以高效地实现电磁波的吸收而获得了极大的关注<sup>[14]</sup>。从微波、太赫兹波段、红外波段到近光学波段范围内都有超表面的相关应用<sup>[15-16]</sup>。

Chen等<sup>[17]</sup>学者在红外波段设计了一种基于金纳米结构的双带完美吸收表面,实现了在 $2700\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1300\ \text{cm}^{-1}$ 两个频率处94%的吸收率。

随后,Astorino等<sup>[18]</sup>学者则提出了一种太赫兹波段下的超薄窄带吸收超表面,它的一个单元结构由三层组成,第一层是一个金属开口谐振环,底层是一个接地平面,两者均由270 nm厚的金所制成,中间介质层为介电常数为2.5,厚度为 $5.8\ \mu\text{m}$ 的苯并环丁烷,整个超表面结构如图1(a)所示,黄色部分为金,灰色部分为介质层,该超表面的结构尺寸是 $a=80\ \mu\text{m}$   $g=3.5\ \mu\text{m}$ ,  $L_1=26\ \mu\text{m}$ ,  $L_2=48\ \mu\text{m}$ 和 $L_3=70\ \mu\text{m}$ 。仿真后得到的吸收、透射及反射曲线谱图如图1(b)。由于底层是一层较厚的金属接地板,在设定的频段内透射为零。因此,频率为1.15 THz处,吸收率可达到99.13%。

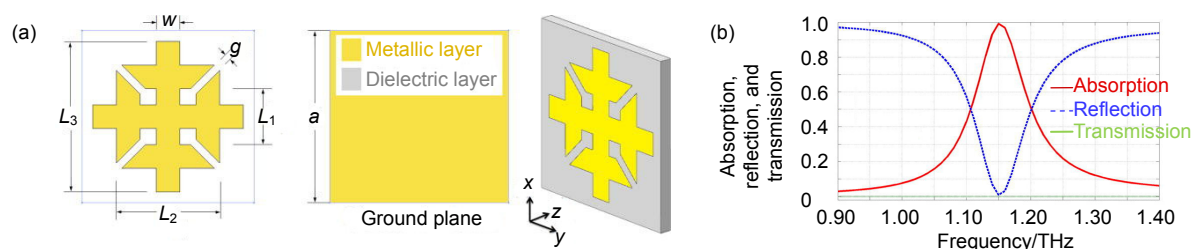


图 1 (a) 吸收器单元结构图; (b) 吸收、透射和反射曲线图<sup>[18]</sup>

Fig. 1 (a) Geometry of the ultra-thin narrow-band metasurface absorbers with dimensions; (b) Absorption, transmission, and reflection of the narrow-band metasurface absorbers<sup>[18]</sup>

## 2 宽带吸收超表面

尽管前述超表面设计在光电探测器件应用中展现出巨大潜力,但目前仍存在一些局限性,如带宽问题。超表面本身是依赖于谐振吸收,所以吸收谱非常窄,可以说是只能针对单一谐振频率吸收,一旦远离谐振频率,吸收率迅速衰减。

因此,在滤波、光探测等应用中,拓展工作带宽一直是超表面器件的重要关注点。无论是自然界,还是各种人工环境中,宽谱的波源都占据着较大比重,相应超宽带探测器件的应用现实意义突出。

### 2.1 宽带中远红外波段吸收超表面

Feng 等<sup>[19]</sup>学者提出一种利用超表面的频率色散来模拟理想的吸收板的宽带红外吸收器。吸收器表面是一层薄的镍铬合金,在 20 THz~45 THz 的频率范围内,实现了超过 97% 的吸收率。

随后,东南大学的 Guo 等人<sup>[20]</sup>基于平面设计的思想(在一个周期内设计一个母单元,每个母单元中又包含多个尺寸不一的子单元)设计了一个远红外波段的宽带梯度吸收器,图 2(a)是一个子单元的谐振结构图,图 2(b)是整个吸收器的基本结构图。从图 2(d)中可看出,在  $7.8 \mu\text{m}$ ~ $12.1 \mu\text{m}$  波段内吸收率超过 90%,半高全宽为  $7.54 \mu\text{m}$ ~ $12.54 \mu\text{m}$ 。

在此基础上,Guo 等继续探究了双层谐振器的可行性,通过不断对参数进行调优,获得了最优的几何参数,即  $w_1=1.91 \mu\text{m}$ ,  $L_1=0.8 \mu\text{m}$ ,  $w_2=1.94 \mu\text{m}$ ,  $L_2=0.85 \mu\text{m}$ ,  $w_3=2.3 \mu\text{m}$ ,  $L_3=1.2 \mu\text{m}$ ,  $w_4=2.76 \mu\text{m}$ ,  $L_4=1.21 \mu\text{m}$ 。最终优化结构和吸收谱图如图 2(e), 2(f)。可以看到,双层超表面谐振器的有效带宽进一步拓展,半高全宽达到 95%。

### 2.2 宽带可见光红外波段吸收超表面

由于过去十年中纳米加工和表征技术的发展,基于各种纳米结构的宽带吸收超表面开始层出不穷,增

强光吸收的一种有效方法是根据吸收频率设计各种纳米结构,如纳米线<sup>[21]</sup>、纳米锥<sup>[22]</sup>以及纳米圆顶<sup>[23]</sup>结构等。

来自中国科学院的 Pu 等<sup>[24]</sup>学者设计了基于六边形纳米结构的超表面完美吸收器,并通过表面等离子体与自由空间的阻抗匹配,在 100 THz 和 280 THz 的频率下获得了接近 100% 的吸收率。因此,他认为在描述超表面吸收体的电磁特性时,有效阻抗比有效介质更具有物理意义和有益性。而 Habib\_Ullah<sup>[25]</sup>课题组提出了一种简单而新颖的多宽带等离子体吸收器,它由介质/金属衬底上的薄金方环结构的平面阵列组成。为了实现近乎完美的吸收,提出了几种超表面设计模型,分别是单个纳米(model I)、单个开口纳米(model II)、纳米内部开口环(model III)和双开口纳米(model IV)谐振器结构,如图 3 所示。在这四种超表面设计模型中,单开口纳米环和双开口环谐振器经过模拟仿真后在吸收光谱中表现出多宽带共振。其中,Model III 吸收了 90% 以上的宽带宽(93 nm),而 Model IV 吸收器几乎覆盖了 50% 以上电磁波谱的所有可见范围。因此,他们认为该设计的吸收特性可用于光学成像和检测应用。

Li 等<sup>[26]</sup>学者则将纳米级超表面应用到太阳能热光电系统上,提出了一个基于 TiN 方环阵列的宽带吸收结构,提升太阳能的光吸收率。然而, TiN 纳米盘超表面的吸收带不够宽,不足以覆盖太阳辐射光谱。在此基础上,来自哈尔滨工业大学的 Huo 等人<sup>[27]</sup>研究了基于 TiN 纳米锥阵列的宽带超表面完美吸收器。所提出的三层超表面吸收器结构,如图 4(a)所示,最顶层由 TiN 纳米锥阵列组成,排列成方形格子,周期为  $p$ 。纳米锥有两个主要参数:高度  $h$  和基本直径  $D$ ,同时引入厚度为  $t$  的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  间隔层。他们选择 TiN 作为基板,厚度为 500 nm,防止入射光的透射。

模拟仿真后的调优参数为:  $D=100 \text{ nm}$ ,  $h=300 \text{ nm}$ ,  $t=25 \text{ nm}$ ,最终得到的吸收谱图如图 4(b)。不难看出,从 400 nm 到 1500 nm 的可见光红外波段都实现了比



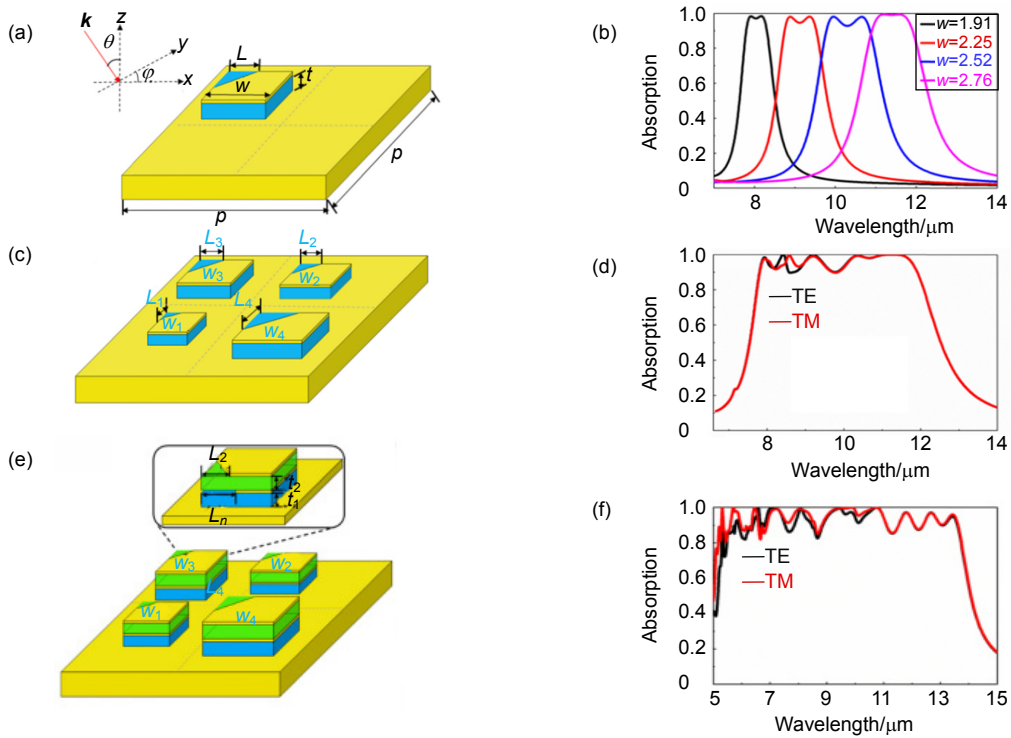


图 2 (a) 单个谐振器结构图; (b) 垂直入射时单个谐振器结构的吸收光谱; (c) 吸收器基本结构图; (d) 吸收器的吸收光谱; (e) 双层宽带超表面结构图; (f) 双层吸收谱图<sup>[20]</sup>

Fig. 2 (a) Schematic of the single resonator; (b) Simulated absorption spectra of the single resonator at the normal incidence; (c) Schematic of the single-layered GMBA (gradient-metasurface-based absorber); (d) Simulated absorption spectra of the single-layered GMBA; (e) Schematic of the dual-layered GMBA; (f) Simulated absorption spectra of the dual-layered GMBA for TE (black) and TM (red) polarizations

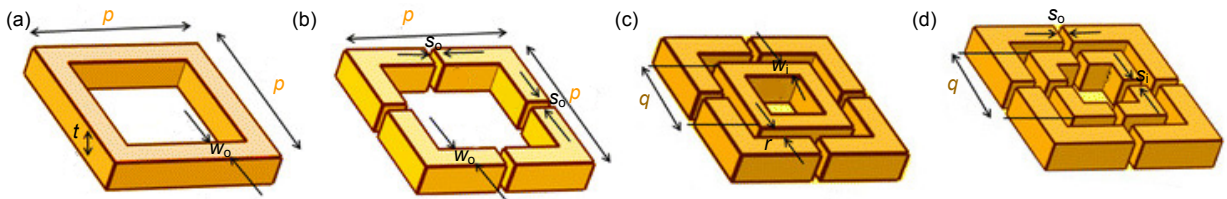


图 3 四种超表面结构示意图<sup>[25]</sup>。(a) Model I (SR); (b) Model II (SSR); (c) Model III(RSR); (d) Model IV(DSR)

Fig. 3 Schematics of (a) model I (SR); (b) Model II (SSR); (c) Model III(RSR) and (d) model IV (DSR) metasurfaces<sup>[25]</sup>

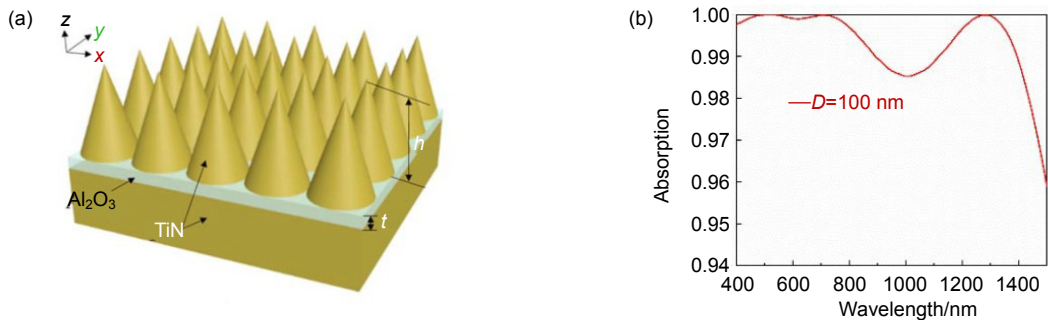


图 4 (a) 单个谐振器的基本结构; (b) 谐振器的吸收谱图<sup>[27]</sup>

Fig. 4 The schematic of the absorber (a) and top view of a unit cell; (b) Absorption spectrum of the TiN nanocone MPA (metasurface perfect absorber)<sup>[27]</sup>

较高的吸收(平均吸收率为 98.5%)。除此之外, Huo 等还研究了该结构的偏振性能, 在垂直入射时表现出对偏振不敏感, 并且在倾斜入射角高达 50°时仍具有良好的吸收能力。

尽管关于宽带吸收器的吸收性能以及宽谱特性的研究都取得了不错的成果, 但目前的宽带吸收器的量产实用还有一定距离。微加工工艺的成本高、时间周期长, 是器件量产的主要障碍。随后, 人们研究发现通过添加金属-绝缘体(metal-insulator, MI)对的数量可以实现无光刻拓展带宽。Deng 等<sup>[28]</sup>在 2015 年使用 SiO<sub>2</sub>-Cr 对设计了一个无光刻的宽带吸收器并实现在 0.4 μm~1.4 μm 波长范围内的完美吸收。而 Chirumamilla<sup>[29]</sup>则是使用 W-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对来实现低成本的宽带吸收, 并且通过改变结构厚度调整中心频率。遗憾的是, 这几个研究中的 MI 叠层吸收器在其结构中具有至少四层(两个 MI 对), 且实际加工还需退火工序。在此基础上, 土耳其比尔肯特大学的 Aalizadeh 等<sup>[30]</sup>在吸收器中引入了 Mn 这种廉价金属进行改善, 设计的三层结构图如图 5。

该 MIM 结构形成的不对称法布里-珀罗腔的共振模式遵循的等式:

$$2\left(\frac{2\pi}{\lambda_{res}}\right)n_1d_1 + \phi_b + \phi_t = 2\pi m \quad (1)$$

其中:  $\lambda_{res}$  谐振波长,  $n_1$  和  $d_1$  分别是绝缘体层的折射率和厚度,  $m$  是确定腔模阶数的整数。可以从等式(1)推导出更高阶腔模在较小波长处谐振。 $\phi_b$  和  $\phi_t$  分别是底部和顶部金属层的反射获得的相移。可以看出, 通过增加  $n_1$  或  $d_1$ ,  $\lambda_{res}$  也增加。换句话说, 通过增加作为  $n_1d_1$  的光束路径, 谐振波长是变大的。因此, 为了改变吸收带的中心, 可以使用具有不同折射率的电介质或根据所需的吸收带调节其厚度。为了达到宽带吸收效果, 腔模的品质因数应该足够低, 这可以通过选择合适的金属来实现。

### 2.3 宽带太赫兹吸收超表面

在太赫兹波段范围内, 由于其光子能量低、穿透性强, 对介质内部载流子浓度变化十分敏感。因此, 在安防<sup>[31]</sup>、医学<sup>[32]</sup>和军事<sup>[33]</sup>等场合中太赫兹得到了广泛的应用。然而, 使用传统的微波传感器无法轻易检测和测量太赫兹辐射, 这引起人们对太赫兹传感器技术的深入研究。太赫兹吸收表面是太赫兹探测中必不可少的传感装置<sup>[34]</sup>。最近, 石墨烯因其高 THz 吸收和表面电导率的可调性而被证明是实现太赫兹吸收超表面的可行替代方案<sup>[35]</sup>。曼彻斯特大学的 Huang<sup>[36]</sup>的课题组提出了一种利用等效电路模型方法对石墨烯基(THz)吸收器进行建模、分析和设计, 基于该方法的计算公式, 并通过全波电磁模拟验证, 设计了由石墨烯超表面和金属支撑的介质层组成的宽带和可调吸收器。通过合理地构造石墨烯超表面, 实现了超过 70% 的带宽的宽带吸收, 表明石墨烯可以在低 THz 光谱中提供宽带吸收。

Li 等<sup>[37]</sup>学者则是提出了一种垂直级联结构的太赫兹宽带吸收超表面, 在频率范围 2.6 THz 到 5.7 THz 内吸收率超过 90%, 并且入射角度小于 50°时, 仍能保持较好的吸收。不足的是, 垂直级联结构具有大尺寸、耗时的结构优化等问题, 不利于设计简单、紧凑、快速优化、易于制造的趋势。针对这个问题, Pu 等<sup>[38]</sup>学者提出了一个基于高掺杂硅的太赫兹宽带吸收超表面结构, 通过利用高掺杂硅的衍射特性实现宽带吸收的效果, 该超表面结构参数主要是周期  $p$ 、沟槽宽度  $w$ 、沟槽深度  $t$ 。

由图 6(a)、6(b)可知, 当光栅的周期小于掺杂硅中的波长时, 由于存在零阶衍射, 该超表面结构可以完全吸收衬底的透射。并随着频率的增加, 硅衬底中产生了一阶衍射, 同时零级衍射仍然存在, 因为此时掺杂硅的折射率仍然大于自由空间的折射率。为了利用一阶衍射, 光栅的周期应该大于硅中的波长, 但仍

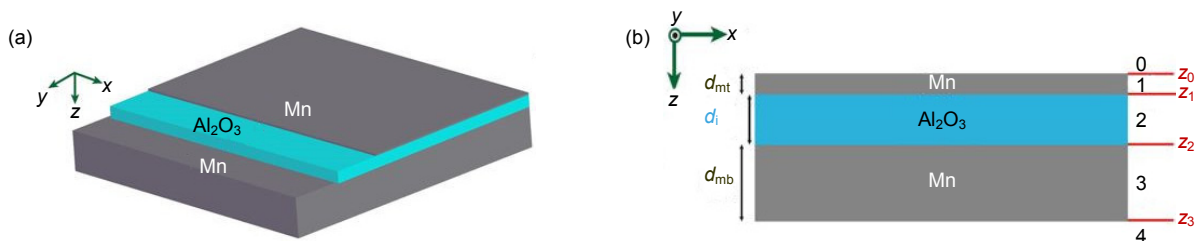


图 5 (a) MIM 结构三维图形示意图; (b) xz 平面上的二维横截面图<sup>[30]</sup>

Fig. 5 (a) 3D schematic of the proposed MIM structure; (b) Cross section of the structure in xz plane<sup>[30]</sup>

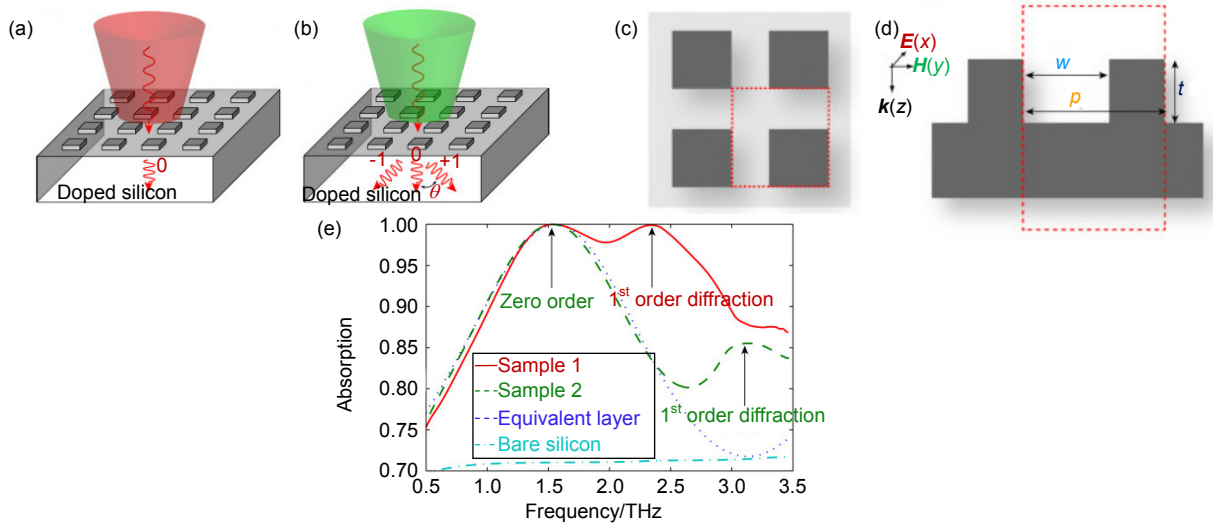


图 6 两种不同频率下的衍射示意图。(a) 在衬底中只发生低频零阶衍射；(b) 高频率下同时发生零阶衍射和一阶衍射；(c)，(d) 为该吸波器单元结构的正面及侧面图；(e) 不同周期样品、裸掺杂硅片以及四分之一波长抗反射层的吸收谱图<sup>[38]</sup>

Fig. 6 Schematic of diffraction when illuminated at two different frequencies. (a) Only zeroorder diffraction occurs in the substrate at low frequency; (b) First order diffraction in the substrate occurs at higher frequency; (c) and (d) are the front and side views of the structure; (e) Absorption spectra of samples with different periods. The cases for a bare doped silicon slab and an absorber based on quarter-wavelength antireflection layer are also shown<sup>[38]</sup>

然小于自由空间中的波长。因此，Pu 认为通过适当地选择周期和其他几何参数，可以组合两个吸收峰并增强吸收带宽。图 6(e)为两种不同的周期参数结构的对比。Sample1 中的几何参数为  $p=63 \mu\text{m}$  ,  $w=25 \mu\text{m}$  ,  $t=30 \mu\text{m}$ 。在 1.5 THz 和 2.3 THz 处有两个吸收峰，分别对应零阶衍射和一阶衍射，并且 -10 dB 带宽大于 2 THz，相对吸收带宽大于 100%。Sample2 中的几何参数为  $p=30 \mu\text{m}$  ,  $w=8 \mu\text{m}$  ,  $t=26 \mu\text{m}$ 。零阶衍射没有发生变化，一阶衍射峰对应频率增加到 3.2 THz 处，并且吸收率下降到 0.85。此外，还给出了用四分之一波长厚度的等效层代替光栅的情况。显然，等效层不是一个好的选择，因为它的吸收带宽只有 Sample1 的一半。因此，选择合适的周期是该类宽带吸收超表面设计的关键。

除了上述提到的利用石墨烯、硅的衍射效应来实

现太赫兹波段的宽带吸收外，近几年来，悬链线电磁学、光学的概念相继被提出<sup>[39-41]</sup>，为宽带电磁吸收乃至一般的波前调控超表面设计，提供了快速有效的途径。悬链线是自由悬挂的绳或链在重力作用下表现出来的一种曲线，该结构最早被用来建造各种桥和拱门，用以消除变形力矩并保持建筑稳固。而“光学悬链线”可被用作一种基本构成单元来构建光学超表面，实现传统光学器件和系统的小型化、轻量化和集成化。通过严格的理论推导，得到曲线各点切向导数沿坐标轴方向连续线性变化的悬链线结构可实现宽带连续的几何相位调控<sup>[41]</sup>，如图 7。

随后，Zhang 等<sup>[42]</sup>学者提出了一个基于悬链线的双层超表面太赫兹吸波器。图 8 是该吸波器的结构原理图及仿真结果。



图 7 (a) 悬链线超单元示意图；(b) 悬链线相位调控特性<sup>[39]</sup>

Fig. 7 (a) Sketch map of a catenary aperture illuminated at normal incidence by CPL(circularly polarized light); (b) Phase distributions of the catenary slab and an absorber based on quarter-wavelength antireflection layer are also shown<sup>[39]</sup>



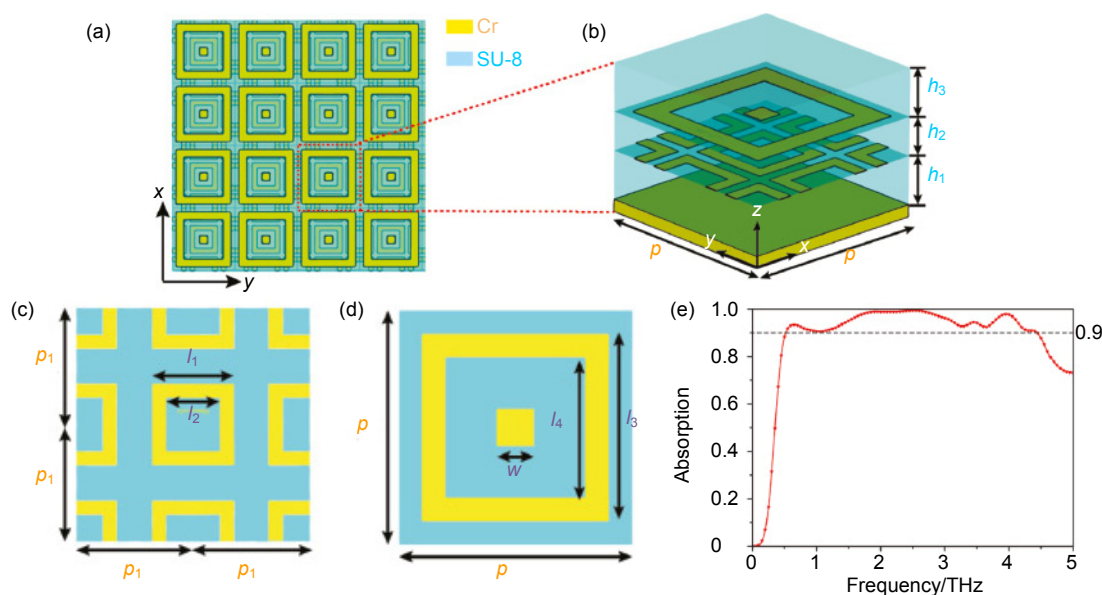


图 8 宽带 THz 吸收器原理图及仿真结果。(a) 俯视图; (b) 三维示意图; (c), (d) 超表面 1 和超表面 2 的几何视图参数; (e) 正常入射下的模拟吸收谱<sup>[42]</sup>

Fig. 8 Schematic structure of the broadband THz absorber and the simulated results. (a) Top view of the arrays; (b) Three-dimensional schematic diagram; Top views of (c) metasurface 1 and (d) metasurface 2 with geometric parameters; (e) Simulated absorption spectra at normal incidence in the frequency range from 0 to 5 THz. The analytical catenary field model of dual-metasurface<sup>[42]</sup>

从吸收光谱中可以看到，在 0.8 THz 到 4 THz 范围内吸波率超过 90%的，具有良好的超宽带和高吸光度。除此之外，Zhang 等学者还提取了谐振结构的两个金属臂和相邻谐振结构金属臂发生共振时的电场振幅(图 9 所示)。有趣的是，间隙中的所有剖面的电场振幅都可以通过悬链线来描述。Zhang 认为这是由于 THz 频率范围的限制，金属可以作为理想的导体，表面等离子体极化子是不存在的。因此，利用悬链线函数可以拟合电场沿间隙中心的振幅，得到极好的一致性。当改变超表面的几何形状时，悬链线场分布也将被改变，导致在相应的表面上有效阻抗改变。通过适当地优化悬链场的分布并在结构中耦合不同的悬链场，可以获得所需的超表面有效阻抗，从而实现宽带吸收。与色散调控相似，Zhang 认为这种悬链线电场模型提供了一种新的理论来解释基于共振的超表面背后的物理特性。基于以上分析，悬链线结构的超表面具有实现宽带吸收的潜力。

### 3 可调谐吸收超表面

为了进一步扩大吸收超表面的适用范围，除了宽带吸收外，其动态调控特性，如开关、调制等，成为另一个引起广泛关注的研究点。最早的研究体现于半导体—超表面结构的复合体系，如 2008 年 Chen 等<sup>[43]</sup>

人设计的硅基可调超表面器件，利用金属结构阵列实现超表面谐振工作的同时，改变输入偏压(或功率)调节整体的载流子浓度、电导率，从而实现谐振特性、透过率等动态调节，如谐振频率可从 1.06 THz 调至 0.86 THz,透射率由 0.19 提高到 0.4,调频范围约 20%，不足之处是输入偏压或功率较大。此后，相继出现了超表面-液晶、超表面-石墨烯以及超表面-相变介质等几种调节方式。相比之下，尽管液晶调控在灵活性、低功耗等方面的优势，但在 CMOS 工艺兼容性与光电集成调控实现方面，不如后面两者的应用潜力。本文主要介绍基于相变材料、石墨烯的两种动态调控超表面研究进展。

#### 3.1 基于相变材料的可调谐吸收超表面

由于相变材料的介电特性在相态转变期间变化很大，并且它可以通过电脉冲或光脉冲有效地转变。美国的 Dicken<sup>[44]</sup>便在超表面结构中加入 VO<sub>2</sub> 相变材料，利用其具有可调光电特性的特点来调控超表面结构中的谐振响应。VO<sub>2</sub> 有绝缘体态和金属态两种相态，并且它的相变可以通过热、光学或电来诱导。由于绝缘体到金属的转变，导电率增加了四个数量级，并且近红外光的透射率显著降低。因此，通过转变 VO<sub>2</sub> 的状态可以获得调谐的效果。遗憾的是，该结构实现的调频范围只有 4%。

尽管如此, Dicken 的这一设计仍为后来的学者提供了宝贵的思路, 即可以通过相变材料来实现调谐的效果。大连理工的 Cao 等<sup>[45]</sup>在 2013 年将双层超表面结构与相变材料  $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$  的可调性结合起来, 通过切换  $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$  的相态, 产生可在超宽中红外波段上调谐的超表面吸波器。

图 10(a)、10(b)是 Cao 等设计的超表面的基本结构图, 其中晶格常数  $L=1000\text{ nm}$ , 方格的边长是  $d_x=d_y=900\text{ nm}$ , 顶部 Au 层的厚度为  $40\text{ nm}$ ,  $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$  层为  $40\text{ nm}$ , 最后包括  $80\text{ nm}$  厚的底部 Au 层以防止入射波透过该结构。图 11 是该超表面的反射和吸收谱图, 虚线是非晶态的, 实线是晶态的  $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$ 。不难

看出, 当  $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$  的相位从非晶态转换为晶态时, 在 M-IR 系统中获得了强吸光度, 而吸光度峰值则向更长的波长( $2230\text{ nm}$  到  $2460\text{ nm}$ )转变, 实现了 10% 的频率调谐。非晶态的  $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$  在  $2230\text{ nm}$  处吸收率最高达 0.96; 晶态的  $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$  最大吸收率(0.80)出现在  $2460\text{ nm}$  处。

随后, 为了进一步提高超表面的调谐性能, Cao<sup>[46]</sup>课题组在原来设计上做了改进, 选用  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  作为结构的中介质层。基本结构(如图 12(a)所示)与前一个设计相似, 底层衬底采用 BK7 玻璃。除此之外, Cao 等还设计了一个只有放置在 BK7 衬底上的  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  介质层作为对比, 如图 12(d)。

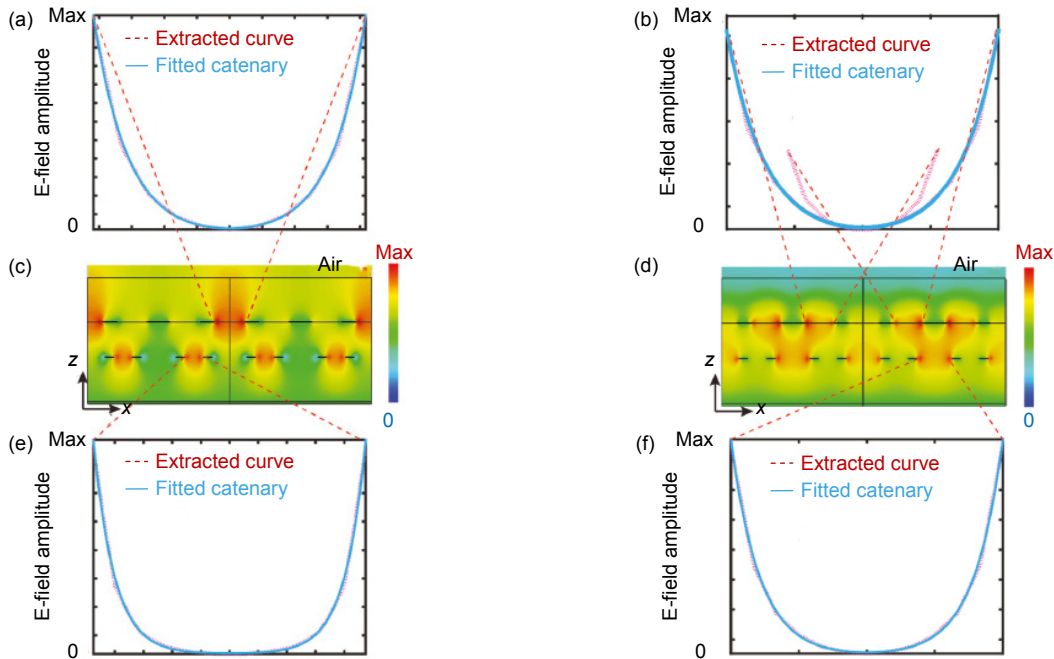


图 9 提取超表面谐振腔和相邻谐振腔两臂之间的电场振幅(红色虚线), 拟合悬链线曲线(蓝色实线), 分别为  $0.6\text{ THz}$ ((a), (e))和  $2.5\text{ THz}$  ((b), (f)); (c), (d) 在两个共振频率下的  $x\text{-}z$  平面中的电场分布<sup>[42]</sup>

Fig. 9 Extracted electric field amplitude (red dotted line) and fitting catenary curve (blue solid line) between two arms of the resonator and adjacent resonators for the dual metasurface at  $0.6\text{ THz}$  (a), (e) and  $2.5\text{ THz}$  (b), (f); (c), (d) Electric field distribution in the  $x\text{-}z$  plane at two resonant frequencies<sup>[42]</sup>

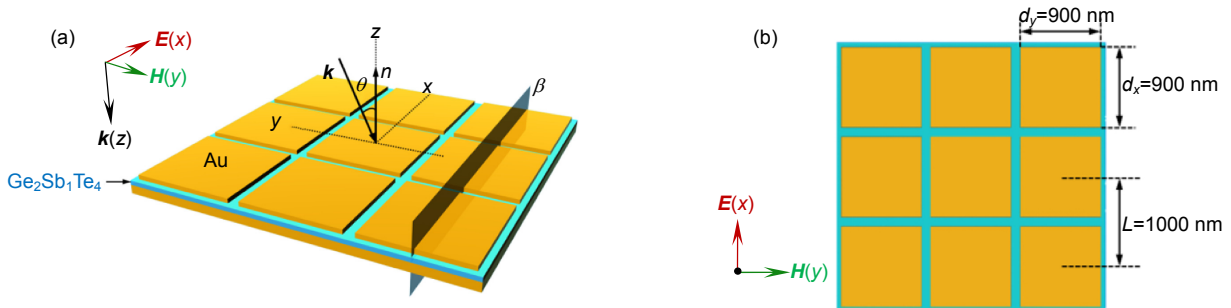


图 10 (a) 吸收超表面示意图; (b) 方格点阵图<sup>[44]</sup>

Fig. 10 (a) Schematic of the MM absorber showing the incident light polarization configuration; (b) Illustration of absorber's square lattice pattern<sup>[44]</sup>



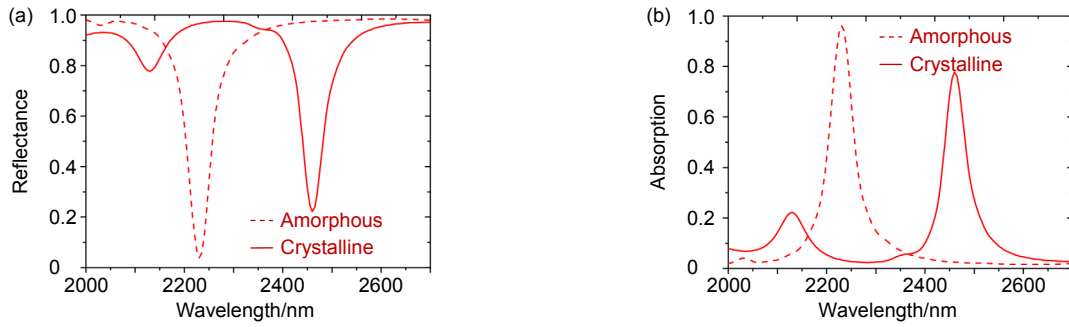


图 11 3D-FDTD 模拟(a)反射光谱和(b)正常入射时  $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$  不同相的吸光度<sup>[44]</sup>

Fig. 11 3D-FDTD simulation of spectrum of (a) reflectance and (b) absorbance for different phases of  $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$  at normal incidence<sup>[44]</sup>

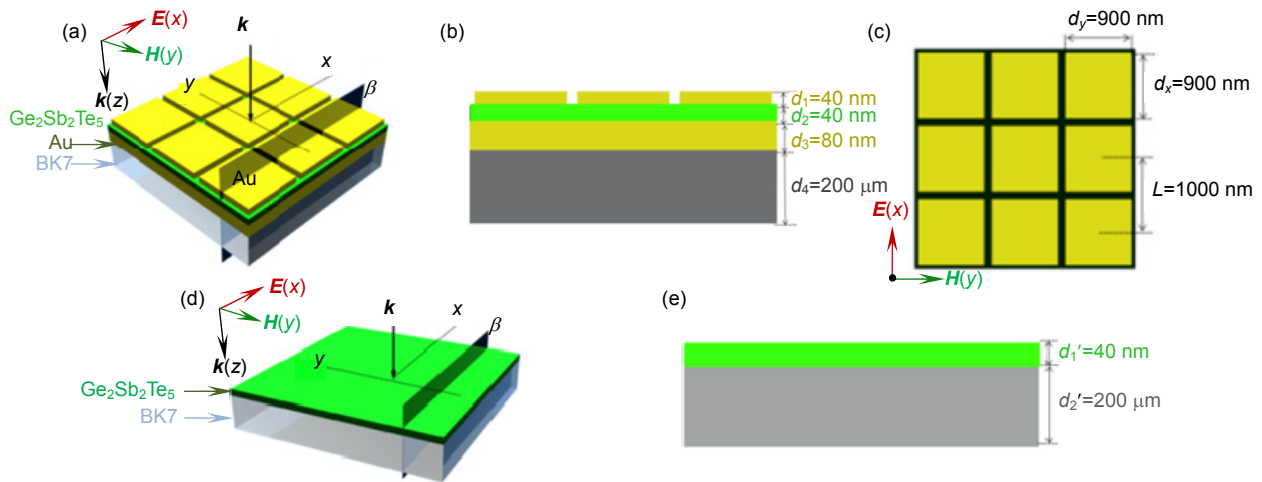


图 12 (a) 超表面结构示意图; (b) 超表面结构侧视图; (c) 超表面结构俯视图; (d) 单层  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  介质层结构示意图; (e) 单层  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  介质层结构侧视图<sup>[46]</sup>

Fig. 12 (a) Schematic of the metamaterial absorber and the incident light polarization configuration; (b) Side view of the absorber; (c) Top view of the absorber; (d) Schematic of the single  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  dielectric layer of  $1000 \text{ nm} \times 1000 \text{ nm} \times 40 \text{ nm}$  deposited on a BK7 silica glass and the incident light polarization configuration<sup>[46]</sup>

图 13(a)、13(b)是  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  在不同相态下的反射光谱和吸收光谱。从图中可以看到，当  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  的状态从非结晶态转换为结晶态时，吸收率峰值转移到了更高的波段处(从 2300 nm 到 2680 nm)，大概是 16% 调谐范围，调谐性能比  $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$  更好。因此，通过转换  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  的非结晶态和结晶态，可以实现宽谱可调谐的吸收器。并且 Cao 认为如果能够控制相变材料的结晶化进程，就可以控制吸收率峰值在波长从 2300 nm 到 2680 nm 的变化。

### 3.2 基于石墨烯的可调吸收超表面

除了相变材料以外，石墨烯作为一种二维(2D)单层碳原子材料，由于其奇异的特性也引起了强烈的关注<sup>[47-50]</sup>。人们发现通过化学掺杂或外部偏压将石墨烯化学势从 -1 eV 变为 1 eV，可以连续地调节石墨烯片的

电导率<sup>[51]</sup>。因此，Cao 等<sup>[52]</sup>认为使用石墨烯来设计可调谐吸收超表面是一个不错的选择。

图 14(a)、14(b)表示 Cao 课题组所设计的石墨烯超表面吸波器，由 Ag/SiO<sub>2</sub>/石墨烯/聚环氧乙烷(PEO)/Ag 纳米带组成。对应的几何参数是  $p=500 \text{ nm}$ ， $w=100 \text{ nm}$ ， $d_1=100 \text{ nm}$ ， $d_2=230 \text{ nm}$ ， $d_3=20 \text{ nm}$ ， $d_4=10 \text{ nm}$ 。图 14(c)是不同化学势下的 GMA 的吸收光谱，由图可知，化学势的变化对吸收峰和谐振波长有着不同的影响。化学势增大，谐振波长逐渐变小，最多可实现 26% 的调频。对于吸收，当化学势从 1.0 eV 到 1.7 eV 时，吸收从 76.4% 增加到 100%。然而，当化学势进一步增加到 2.0 eV 时，吸收会减少到 97.5%。基于该结构优异的调节谐振频率和调控吸收率的表现，Cao 认为未来石墨烯必定能在红外范围内的等离子吸波器和光通信的应用中大放异彩。

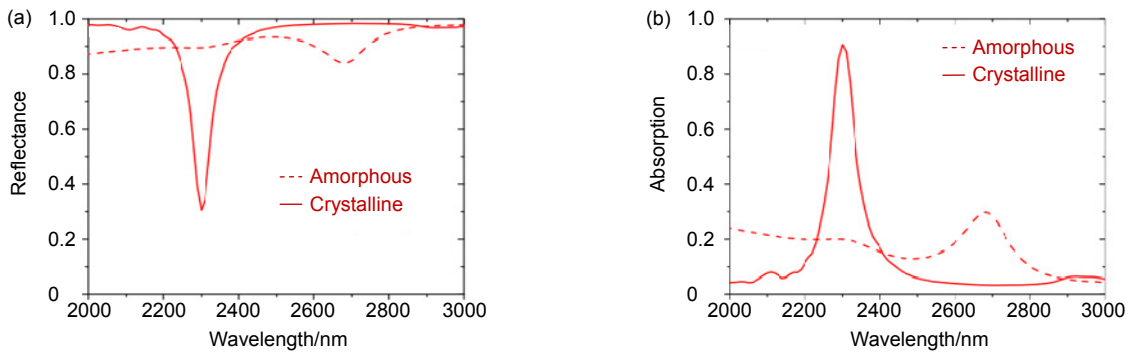


图 13 3D-FDTD 模拟(a)反射光谱和(b)正常入射时  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  不同相的吸光度<sup>[46]</sup>

Fig. 13 3D-FDTD simulation of spectrum of (a) reflectance, (b) absorbance of both a metamaterial absorber and a single  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  layer for the amorphous state at normal incidence<sup>[46]</sup>

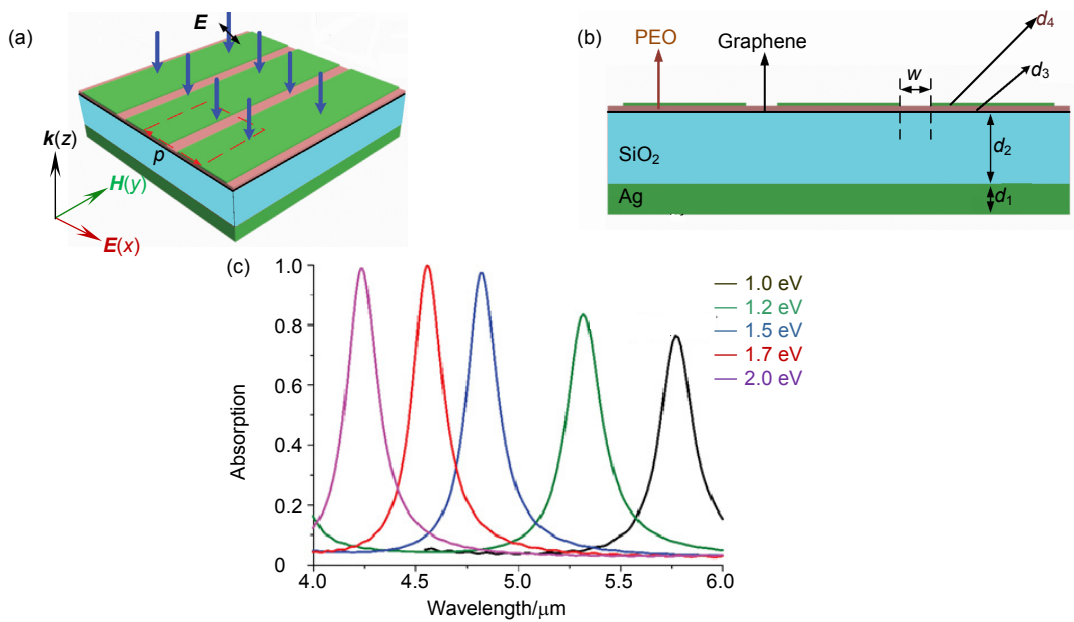


图 14 基于石墨烯的超表面吸收器的原理图。(a) 透视图; (b) 横截面图; (c) 不同化学势下的 GMA 的吸收光谱<sup>[52]</sup>  
 Fig. 14 The schematic diagram of the graphene-based metamaterial absorber. (a) The perspective view; (b) The cross sectional view of the GMA(graphene-based metamaterial absorber); (c) The effect of different chemical potential of GMA on the absorption spectra<sup>[52]</sup>

## 4 结束语

超材料的优势在于突破传统材料的束缚,构造出功能新颖、现有技术更容易制备的电磁功能结构<sup>[53]</sup>。而超表面的出现,提供了一种代替结构较复杂的三维超材料器件的设计思路。相比之下,其优势就在于突破了超材料的束缚,设计出利用现有技术兼容的工艺,在微波段、太赫兹波段以及光波段有更大的应用潜力。本文从完美吸收超表面的概念出发,详细介绍了可调谐吸收超表面和宽带吸收超表面在常见波段的应用。不过,本文介绍的仅仅是超表面广阔应用的冰山一角。纵观超表面的发展,它一直是朝着应用面不断扩大、多元化甚至结构简单化方向发展。以下是不久将来或可期待的一些发展趋势总结,简单叙述如下。

### 1) 一维超材料

从最初的窄带吸收到可调、宽带吸收,再到同时实现宽带和可调吸收<sup>[54]</sup>,从三维超材料到二维超材料(超表面)的实现。近期,更简化的一维超材料概念出现:只使用一个线性单元格或一个亚波长的共振结构来获得更加优异的性能。事实上,我们已经看到了关于这一概念的初步应用:例如在小型天线中应用单元格<sup>[55]</sup>实现传输线与自由空间相匹配;另一个例子就是使用一维单元格作为平面传输线的调优结构<sup>[56]</sup>。

### 2) 相干吸收超表面

相干吸收超表面<sup>[57]</sup>的原理是将两束相干信号波作为入射波相向传播,垂直入射到薄的超表面,通过调节相干波之间的相位差可以改变超表面位于驻波中的位置,从而改变其对电磁波的吸收效果。当两束电磁

波的强度相同,超表面放置在驻波的波腹位置,进入超表面的电磁波将会被完全吸收。Pu 等<sup>[58]</sup>人通过重掺杂超薄硅膜设计了宽带相干完美吸收表面,并且在在工作频率和带宽方面都表现出很好的灵活性。

### 3) 悬链线超表面

“光学悬链线”可被用作一种基本构成单元来构建光学超表面,实现传统光学器件和系统的小型化、轻量化和集成化。除了产生完美轨道角动量以外,悬链线超表面可用于制备诸如平面透镜、平面分束镜等光学器件<sup>[59]</sup>。与传统的超表面相比,悬链线结构实现了相位在二维平面内的连续调控,可以大幅提高器件的效率并降低噪声。基于悬链线的光学超表面不受磁谐振的限制,因而工作带宽可以拓展到包括微波、太赫兹、红外在内的整个电磁频谱。

### 4) 三维彩色全息超表面

全息光学是近代光学领域的一个重要分支。全息技术充分利用完整的电磁场振幅和位相信息实现对电磁场的重构。*Science Advances* 报导了一种基于超表面的全息技术。全息图制备在一层厚度仅为几十到百纳米的金属薄膜上,其像元尺寸最小仅为 200 nm×200 nm,因此其投影全息的视场角可以在整个投射空间成像。另外,利用超表面亚波长尺寸的结构特点,通过合理的设计将传统彩色计算全息技术存在的伴生像移至倏逝波区域,得到无杂散像的彩色全息图,使得色域提高 39%<sup>[60]</sup>。

未来,随着对超表面的不断深入研究,其结构会越来越简单,电磁特性也会不断优化,应用也将涉及到电磁学、光子学、化学、生物医学等各个领域。

## 参考文献

- [1] Zhang J, Zhang W Y, Xi Z P. Development of stealth radarwave absorbing materials[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, **37**(S4): 504–508.  
张健, 张文彦, 奚正平. 隐身吸波材料的研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, **37**(S4): 504–508.
- [2] Yang C S, Cheng H F, Li X D, et al. Present status of intelligent stealth material[J]. *Journal of Functional Materials*, 2005, **36**(5): 643–647.  
杨长胜, 程海峰, 李效东, 等. 智能隐身材料的研究现状[J]. *功能材料*, 2005, **36**(5): 643–647.
- [3] Nematı A, Wang Q, Hong M H, et al. Tunable and reconfigurable metasurfaces and metadevices[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2018, **1**(5): 180009.
- [4] 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.
- [5] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electro-magnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, **314**(5801): 977–980.
- [6] Karvounis A, Gholipour B, MacDonald K F, et al. All-dielectric phase-change reconfigurable metasurface[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, **109**(5): 051103.
- [7] Aieta F, Genevet P, Kats M A, et al. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, **12**(9): 4932–4936.
- [8] West P R, Stewart J L, Kildishev A V, et al. All-dielectric sub-wavelength metasurface focusing lens[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(21): 26212–26221.
- [9] Holloway C L, Kuester E F, Gordon J A, et al. An overview of the theory and applications of metasurfaces: the two-dimensional equivalents of metamaterials[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2012, **54**(2): 10–35.
- [10] Caniou J. *Passive Infrared Detection: Theory and Applications*[M]. New York: Springer, 1999: 225.
- [11] Jiang X D, Itzler M A, Ben-Michael R, et al. InGaAsP-InP avalanche photodiodes for single photon detection[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, **13**(4): 895–905.
- [12] Wang J L, Fang H H, Wang X D, et al. Recent progress on localized field enhanced two - dimensional material photodetectors from ultraviolet—visible to infrared[J]. *Small*, 2017, **13**(35): 1700894.
- [13] Wu G A, Luo L B. Development and application of near infrared photodetectors[J]. *Physics*, 2018, **47**(3): 137–142.  
吴国安, 罗林保. 近红外光电探测器的发展与应用[J]. *物理*, 2018, **47**(3): 137–142.
- [14] Yu H Y, Zhang Q, Fu S F, et al. Research advances of absorption properties of metasurfaces[J]. *Natural Science Journal of Harbin Normal University*, 2017, **33**(6): 33–38.  
于宏岩, 张强, 付淑芳, 等. 超表面吸收特性的研究进展[J]. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 2017, **33**(6): 33–38.
- [15] Yoon G, So S, Kim M, et al. Electrically tunable metasurface perfect absorber for infrared frequencies[J]. *Nano Convergence*, 2017, **4**(1): 36.
- [16] Chen H T, Taylor A J, Yu N F. A review of metasurfaces: physics and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2016, **79**(7): 076401.
- [17] Chen K, Adato R, Altug H. Dual-band perfect absorber for multispectral plasmon-enhanced infrared spectroscopy[J]. *ACS Nano*, 2012, **6**(9): 7998–8006.
- [18] Astorino M D, Frezza F, Tedeschi N. Ultra-thin narrow-band, complementary narrow-band, and dual-band metamaterial absorbers for applications in the THz regime[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, **121**(6): 063103.
- [19] Feng Q, Pu M B, Hu C G, et al. Engineering the dispersion of metamaterial surface for broadband infrared absorption[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(11): 2133–2135.
- [20] Guo W L, Liu Y X, Han T C. Ultra-broadband infrared metasurface absorber[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(18): 20586–20592.
- [21] Garnett E, Yang P D. Light trapping in silicon nanowire solar cells[J]. *Nano Letters*, 2010, **10**(3): 1082–1087.
- [22] Jeong S, McDowell M T, Cui Y. Low-temperature self-catalytic growth of tin oxide nanocones over large areas[J]. *ACS Nano*, 2011, **5**(7): 5800–5807.
- [23] Zhu J, Hsu C M, Yu Z F, et al. Nanodome solar cells with efficient light management and self-cleaning[J]. *Nano Letters*, 2010, **10**(6): 1979–1984.



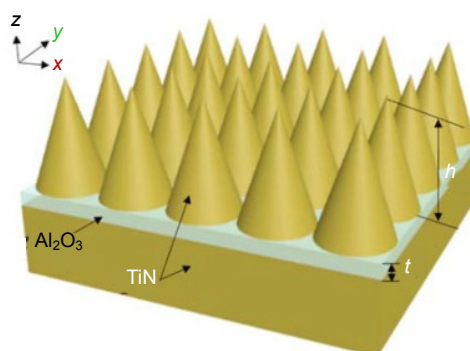
- [24] Pu M B, Hu C G, Wang M, *et al.* Design principles for infrared wide-angle perfect absorber based on plasmonic structure[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(18): 17413–17420.
- [25] Ullah H, Khan A D, Noman M, *et al.* Novel multi-broadband plasmonic absorber based on a metal-dielectric-metal square ring array[J]. *Plasmonics*, 2018, **13**(2): 591–597.
- [26] Li W, Guler U, Kinsey N, *et al.* Refractory plasmonics with titanium nitride: broadband metamaterial absorber[J]. *Advanced Materials*, 2014, **26**(47): 7959–7965.
- [27] Huo D W, Zhang J W, Wang Y C, *et al.* Broadband perfect absorber based on tin-nanocone metasurface[J]. *Nanomaterials*, 2018, **8**(7): 485.
- [28] Deng H X, Li Z G, Stan L, *et al.* Broadband perfect absorber based on one ultrathin layer of refractory metal[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(11): 2592–2595.
- [29] Chirumamilla M, Roberts A S, Ding F, *et al.* Multilayer tungsten-alumina-based broadband light absorbers for high-temperature applications[J]. *Optical Materials Express*, 2016, **6**(8): 2704–2714.
- [30] Aalizadeh M, Khavasi A, Butun B, *et al.* Large-area, cost-effective, ultra-broadband perfect absorber utilizing manganese in metal-insulator-metal structure[J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1): 9162.
- [31] Liu H W, Lu J P, Wang X R. Metamaterials based on the phase transition of VO<sub>2</sub>[J]. *Nanotechnology*, 2017, **29**(2): 024002.
- [32] Tabata H. Application of terahertz wave technology in the biomedical field[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, **5**(6): 1146–1153.
- [33] Davies A G, Burnett A D, Fan W H, *et al.* Terahertz spectroscopy of explosives and drugs[J]. *Materialstoday*, 2008, **11**(3): 18–26.
- [34] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(2): 97–105.
- [35] Sensale-Rodriguez B, Yan R S, Kelly M M, *et al.* Broadband graphene terahertz modulators enabled by intraband transitions[J]. *Nature Communications*, 2012, **3**: 780.
- [36] Huang X J, Zhang X, Hu Z R, *et al.* Design of broadband and tunable terahertz absorbers based on graphene metasurface: equivalent circuit model approach[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2015, **9**(4): 307–312.
- [37] Li X W, Liu H J, Sun Q B, *et al.* Ultra-broadband and polarization-insensitive wide-angle terahertz metamaterial absorber[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2015, **15**: 81–88.
- [38] Pu M B, Wang M, Hu C G, *et al.* Engineering heavily doped silicon for broadband absorber in the terahertz regime[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(23): 25513–25519.
- [39] Pu M B, Li X, Ma X L, *et al.* Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum[J]. *Science Advances*, 2015, **1**(9): e1500396.
- [40] Huang Y J, Luo J, Pu M B, *et al.* Catenary electromagnetics for ultra-broadband lightweight absorbers and large-scale flat antennas[J]. *Advanced Science*, 2019, **6**(7): 1801691.
- [41] Li X, Ma X L, Luo X G. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(3): 255–275.  
李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. *光电工程*, 2017, **44**(3): 255–275.
- [42] Zhang M, Zhang F, Ou Y, *et al.* Broadband terahertz absorber based on dispersion-engineered catenary coupling in dual metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2018, **8**(1): 117–125.
- [43] Chen H T, O'Hara J F, Azad A K, *et al.* Experimental demonstration of frequency-agile terahertz metamaterials[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(5): 295–298.
- [44] Dicken M J, Aydin K, Pryce I M, *et al.* Frequency tunable near-infrared metamaterials based on VO<sub>2</sub> phase transition[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(20): 18330–18339.
- [45] Cao T, Zhang L, Simpson R E, *et al.* Mid-infrared tunable polarization-independent perfect absorber using a phase-change metamaterial[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, **30**(6): 1580–1585.
- [46] Cao T, Wei C W, Simpson R E, *et al.* Rapid phase transition of a phase-change metamaterial perfect absorber[J]. *Optical Materials Express*, 2013, **3**(8): 1101–1110.
- [47] Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene[J]. *Nature Materials*, 2007, **6**(3): 183–191.
- [48] Xiao S Y, Wang T, Liu Y B, *et al.* Tunable light trapping and absorption enhancement with graphene ring arrays[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2016, **18**(38): 26661–26669.
- [49] Liu T T, Yi Z, Xiao S Y. Active control of near-field coupling in a terahertz metal-graphene metamaterial[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, **29**(22): 1998–2001.
- [50] Xiao S Y, Wang T, Liu T T, *et al.* Active modulation of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz hybrid metal-graphene metamaterials[J]. *Carbon*, 2018, **126**: 271–278.
- [51] Neto A H C, Guinea F, Peres N, *et al.* The electronic properties of graphene[J]. *Review of Modern Physics*, 2009, **81**(5934): 109.
- [52] Cao S, Wang T S, Sun Q, *et al.* Graphene-silver hybrid metamaterial for tunable and high absorption at mid-infrared waveband[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, **30**(5): 475–478.
- [53] Tian X Y, Yin L X, Li D C. Current situation and trend of fabrication technologies for three-dimensional metamaterials[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(1): 69–76.  
田小永, 尹丽仙, 李涤尘. 三维超材料制造技术现状与趋势[J]. *光电工程*, 2017, **44**(1): 69–76.
- [54] Chen M, Chang L Z, Gao X, *et al.* Wideband tunable cross polarization converter based on a graphene metasurface with a hollow-carved “H” array[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **9**(5): 4601011.
- [55] Ziolkowski R W, Jin P, Lin C C. Metamaterial-inspired engineering of antennas[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, **99**(10): 1720–1731.
- [56] Ibraheem I A, Koch M. Coplanar waveguide metamaterials: the role of bandwidth modifying slots[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(11): 113517.
- [57] Fang X, MacDonald K F, Zheludev N I. Controlling light with light using coherent metadevices: all-optical transistor, sum-mator and inverter[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, **4**(5): e292.
- [58] Pu M B, Feng Q, Wang M, *et al.* Ultrathin broadband nearly perfect absorber with symmetrical coherent illumination[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(3): 2246–2254.
- [59] Luo X G. Subwavelength optical engineering with metasurface waves[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, **6**(7): 1701201.
- [60] Li X, Chen L W, Li Y, *et al.* Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(1): 2.  
Li X, Chen L W, Li Y, 等. 超表面三维彩色全息[J]. *光电工程*, 2017, **44**(1): 2.

# Progress on infrared and terahertz electro-magnetic absorptive metasurface

Deng Honglang<sup>1</sup>, Zhou Shaolin<sup>1\*</sup>, Cen Guanting<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

<sup>2</sup>School of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China



Top view of a unit cell

**Overview:** Infrared photodetectors have been widely used in the fields of military and national economy including aeronautics and astronautics, optical communication, industrial control and so on. The high infrared absorption rate is extremely important for the signal response of the photodetectors. However, the sensitive element of the infrared photodetector does not have good infrared absorption characteristics, so it needs a material that can improve the infrared absorption rate. Among them, metamaterials are widely concerned by researchers because of their novel and non-traditional properties. Metamaterials are typically engineered by arranging a set of small scatterers in a regular array throughout a region of space, thus obtaining some desirable bulk electromagnetic behaviors. The desired property is often the one that is not normally found in nature (negative refractive index, near-zero index, and so on). With the deepening of research, researchers began to expand in the application of metamaterials, and proposed different models, such as metasurfaces, metadevices.

For many applications, metasurfaces can be used take place of metamaterials. Compared to three-dimensional metamaterial structures, metasurfaces have the advantage of taking up less physical space. Consequently, metasurfaces offer the possibility of realizing less-lossy structures.

In this review, we describe the research progress of several common absorption metasurfaces in recent years. The first one is the perfect metasurfaces absorber, which has the ability to absorb all incident waves at a single frequency. By optimizing the structural model, the perfect metasurface absorbers achieve impedance matching with free space, and use the dielectric loss and ohmic loss of the structural unit to achieve strong absorption of electromagnetic waves. However, as the result of relying on resonance absorption, the absorption spectrum of perfect metasurface absorbers is very narrow. Then, the metasurfaces of broadband absorption in the infrared, terahertz and visible light bands are reviewed in detail. And the most common way to achieve broadband absorption of metasurfaces is to use a vertically cascaded structure. In addition, metasurfaces can also achieve broadband absorption by combining graphene or catenary optics. Finally, tunability of the PCM metasurface absorber has also been investigated.

**Citation:** Deng H L, Zhou S L, Cen G T. Progress on infrared and terahertz electro-magnetic absorptive metasurface[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, **46**(8): 180666

Supported by the Pearl River Nova Program of Guangzhou (201710010058) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of South China University of Technology (2018MS16)

\* E-mail: eeslzhou@scut.edu.cn