

〈综述与评论〉

超表面在微测辐射热计中的应用

杨君, 袁俊, 杨春丽, 王文金, 张杰, 李华妮
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 超表面突破了传统自然材料的电磁特性限制, 同时也解决了三维超材料难以加工实现等瓶颈问题, 使器件朝着集成化, 小型化, 低成本, 可调谐的方向不断发展。目前超表面已在许多领域得到了较为广泛的应用, 在探测器领域也越来越受到人们的重视, 通过独特的材料、结构设计, 超表面可有效完成电磁波各项特性的精确调控, 通过超表面的集成, 微测辐射热计在光吸收增强, 器件波段选择改善等方面有了更多的可能性。本文针对超表面及其在微测辐射热计上的应用研究进行了阐述, 展现了超表面在这一领域的发展趋势和广阔前景。

关键词: 超表面; 微测辐射热计; 光吸收增强; 波段选择

中图分类号: TN214 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2024)01-0001-11

Application of Metasurfaces in Microbolometers

YANG Jun, YUAN Jun, YANG Chunli, WANG Wenjin, ZHANG Jie, LI Huani
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Metasurfaces have overcome the electromagnetic limitations of traditional natural materials and solved the bottlenecks of difficult processing and implementation of three-dimensional metamaterials, leading devices to continuously develop towards integration, miniaturization, low cost, and tunability. Metasurfaces are widely used in many fields and are increasingly valued in the field of detectors. Through unique material and structural designs, metasurfaces can effectively achieve precise control of various electromagnetic wave characteristics. Through the integration of metasurfaces, microbolometers are more likely to enhance light absorption and improve the device band selection. This article elaborates on the research on metasurfaces and their applications in microbolometers, demonstrating the development trend and broad prospects of metasurfaces in this field.

Key words: metasurface, microbolometer, enhanced light absorption, waveband selection

0 引言

介电常数和磁导率一定程度上决定了电磁波的传播特性。如图 1(a)所示, 到目前为止自然界中并不存在介电常数和磁导率都为负的物质。但我们是否可以人工的制造出 ε 和 μ 单个为负或者同时为负的人工结构呢?

1967 年苏联科学家 Veselago 从理论上预言这种超常电磁性能结构存在的可能性^[1], 但当时这个预言并没有得到人们的广泛关注, 直到 20 世纪 90 年代末, 超材料的理论被英国伦敦帝国理工学院 Pendry 教

授提出^[2], 并于 21 世纪初由美国杜克大学 Smith 教授在实验室制备出了第一块微波频段电磁超材料^[3], 由此掀起了超材料的研究热潮。

超材料具有可人为设计的电磁属性, 是一种“超自然材料”。通过将金属材料和介质材料按照人为设计的方式在亚波长尺度进行排布, 便可以任意调节这种人工结构的等效介电常数和磁导率, 从而构建出人工“负折射材料”、“零折射材料”、“双曲色散材料”, 同时超材料还是超衍射成像/光刻、高增益天线等应用的基础^[4]。

收稿日期: 2022-12-04; 修订日期: 2023-02-15。

作者简介: 杨君 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向是非制冷探测器超表面结构技术研究。E-mail: yangjun_wulisuo@163.com。

通信作者: 袁俊 (1980-), 男, 正高工, 主要从事红外探测器研究。E-mail: yuanjun5516@tom.com。

杨春丽 (1980-), 女, 正高工, 主要从事红外探测器研究。E-mail: 149578363@qq.com。

然而,超材料在制造上,尤其是高频时较为困难,目前在微米及更小级别的结构上,三维加工技术尚未成熟。为此,学者们从平面超材料结构角度出发,在二维空间上利用已成熟的加工工艺,如光刻、纳米压印等方法进行超材料的设计与实现,这种二维平面超材料即为超表面。超表面的尺寸结构是亚波长级的,它突破了传统“体材料”的限制,解决了超材料由于体积大、损耗高、制造困难等缺陷难以集成到微小系统中的问题。

同时,由于在光学界面上设计时空间的不均匀性提供了自由度,超表面能在亚波长传播距离内实现相

位的突变,可以对电磁波的振幅、相位、偏振、极化方式、传播模式等特性进行灵活调控^[5],关于超表面的研究经历了一个快速发展的过程。事实上由于加工等因素的限制,早期很多关于超材料的研究都是基于二维平面进行的,但我们通常把这些研究归在超材料的范畴。直到2011年,哈佛大学Cappaso团队提出了广义斯涅尔定律^[6],首次给出“超表面”这一概念,为超表面奠定了理论基础,并提出了里程碑式的V型纳米天线超表面结构,由此掀起了超表面研究的浪潮。

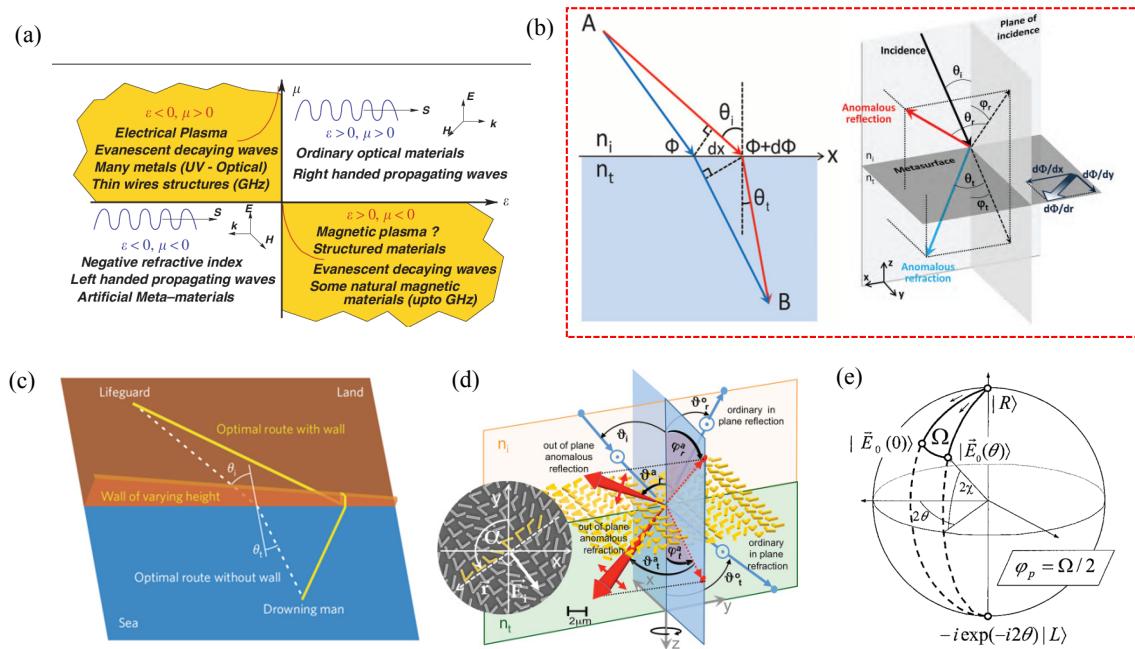


图1 超表面相关理论示意图: (a)磁导率 μ 和介电常数 ϵ 正负分类及其对应材料示意图; (b)广义斯涅尔定律示意图(其中左图为其实维形式,右图为其实维形式)^[6-7]; (c)辅助理解广义斯涅尔定律的溺水者困境示意图^[8]; (d)亚波长V型金属天线超表面阵列实现反常折射和反射示意图^[9]; (e)推导PB相位原理的庞加莱球示意图^[10]

Fig.1 Schematic diagram of metasurface correlation theory: (a) positive and negative classification of magnetic permeability and permittivity and schematic diagram of their corresponding materials; (b) Schematic diagram of Snell's law in a generalized sense (The left image shows its two-dimensional form, and the right image shows its three-dimensional form) [6-7]; (c) Schematic diagram of the drowning person's plight that aids in understanding Snell's law in general^[8]; (d) Schematic diagram of parastatic refraction and reflection of subwavelength V-shaped metal antenna metasurface array^[9]; (e) Schematic diagram of a Poincaré sphere from which the PB phase principle is derived^[10]

1 超表面的设计与实现

根据Cappaso团队最初提出的超表面的概念,超表面通常是通过组装微型各向异性光散射体阵列(即谐振器,如光学天线)来创建的,能使光束的相位、振幅、偏振等在自由空间波长的尺度上产生突变的人工结构。但事实上,近年来的相关文献当中,各种厚度小于波长的电磁表面结构均被归到超表面的范畴。

关于超表面的理论研究,不得不提到Cappaso团队提出的广义斯涅尔定律及对应的天线阵列理论^[6](如图1(b)、(c)、(d)),它的提出,为超表面快速发展奠定了理论基础。此后,Pancharatnam和Berry在早期的研究中探索出了PB相位原理^[10](如图1(e)),为后期圆偏振光调控得以实现打下了理论基础。而由Pfeiffer等人发表的惠更斯超表面为提高超表面器件效率引出了新方向^[11]。同时学者们还提出了许多推动超表面发展的理论,诸如亚波长表面电磁理论^[12],等

效电路和等效阻抗理论^[13], 超表面辅助的衍射理论, 超表面辅助的电磁吸收理论^[4]等。

近年来, 亚波长电磁学的许多领域, 如“超表面”, “表面等离子体”, “超材料”, “光子晶体”等在不断发展的同时又紧密联系, 相互交融, 很难严格地区分开来^[4]。故关于超表面的研究往往需要综合以上领域知识, 比如超材料的许多理论在某些超表面研究过程中仍然适用, 同时超表面的研究还需要结合光学和表面物理的相关知识, 关于此可以参考文献[12]。

器件结构设计在具体实现之前, 通常需要通过仿真来验证设计的可行性。超表面本质是一种电磁微纳结构, 而对于电磁微纳结构的仿真已经比较成熟, 其核心就是通过数值模拟计算的方法, 如时域有限差分法、有限元法和有限积分法等实现超表面对电磁调控的模拟。目前市场上流行的电磁微纳仿真软件都是基于这些计算方法而实现的, 主要有基于有限元法为主的 ansys HFSS、COMSOL Multiphysics, 基于有限积分法为主的 CST Studio Suite, 基于时域有限差分法的 FDTD Solutions 等。每一种仿真软件各有其优缺点, 在设计时通常需要考虑结构用途、实现方式、仿真难度、精度要求等进行选择。

在超表面的制备方面, 目前采用比较多的是光刻和印刷两类技术。光刻类技术通常是利用掩模板把超表面图形转移到所要制备的材料衬底上, 通过沉积, 刻蚀等步骤最终实现超表面结构的制备; 而印刷类技术一般不需要掩模板或者利用已有的掩模板在基板上直接印刷沉积超表面。此外, 还有以电子束直写、蘸笔印刷、聚焦离子束等为代表的直写类技术^[14]。

超表面突破了传统光学和电磁理论的局限, 同时具有易于加工等技术优势, 通过结合 MEMS (Micro-Electro Mechanical System) 工艺, 超表面能实现集成化批量低成本生产, 被认为是下一代集成光子器件的首选技术^[15]。

2 超表面在微测辐射热计中的应用

超表面是最近十多年才发展起来的新兴领域, 但其应用却十分广泛。从超表面的本质出发, 它可以应用到各类需对光的振幅、相位、偏振态等特性进行调控的器件上。目前超表面被广泛应用于超透镜^[16-19]、全息显示^[20-23]、天线技术^[24-27]、微波和太赫兹器件^[28-31]以及隐身技术^[32-35]等领域。近年来, 超表面也被应用到了探测领域, 并展现出其独特的优势。

探测器的电信号都代表了入射光的强度。然而, 探测器本身并不能完全利用光的其他电磁参数, 如相位、频率和偏振状态等。因此, 探测器通常需要与折

射透镜、光谱滤光片、偏振器和其他单独的光学设备配对, 以实现对光波其他特性的利用^[36]。超表面有着“人工原子”的特点, 这意味着我们可以微观地去独立设计每一个单元的结构和排布方式, 从而实现光波电磁参数的独立调控。因此, 超表面为开发探测器件提供了一个通用的平台。与传统调制方法相比, 超表面可以用半导体芯片行业的标准进行大规模制造, 这不仅缩小了器件尺寸, 降低了成本, 也为批量化生产, 提高效率提供了新方案。

测辐射热计又称为电阻热探测器, 是利用热敏电阻对温度的敏感特性对入射的红外辐射进行探测的器件。其种类较多, 包括 VO_x 、a-Si 以及 YBaCuO 等, 其中 VO_x 和 a-Si 属主流产品^[37]。随着微加工技术的发展, 基于 MEMS 微桥结构技术制造的微测辐射热计逐渐成为非制冷红外探测器的主流。

目前一些常见的微测辐射热计超表面结构可以粗略地分为如图 2 的几种结构, 包括: 下凹孔洞型, 如图(a)、(b); 上凸天线型, 如图(c)、(d)、(e)、(f)。其中(a)、(d)为方块型, (b)、(e)为圆柱型, (c)、(f)为其他一些特殊形状。实际上应用到器件上的结构要复杂得多, 且形式多样。

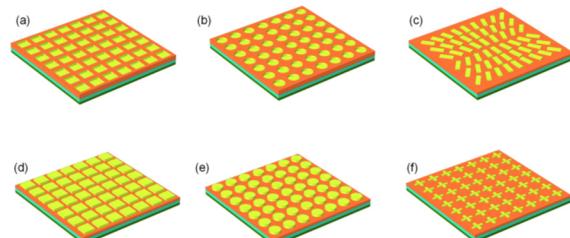


图 2 微测辐射热计超表面结构类型: (a) 方块状孔洞型; (b) 圆柱状孔洞型; (c) 花瓣状天线型; (d) 方块状天线型; (e) 圆柱状天线型; (f) 十字状天线型

Fig.2 Microbolometer metasurface structure type: (a) Square shaped pore type; (b) Cylindrical hole type; (c) Petal shaped antenna type; (d) Square antenna type; (e) Cylindrical antenna type; (f) Cross shaped antenna type

就目前而言, 超表面在探测器上的应用主要是增强光吸收、优化光谱选择、综合提高器件波段选择吸收以及偏振极化等方面。而对于微测辐射热计, 超表面的应用主要可以分为增强光吸收和优化器件波段选择两方面。

2.1 增强光吸收

探测器的响应率可以表示为^[38]:

$$R_v = \frac{V_B \alpha \eta}{4G_{\text{eff}}} \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 + \tau_{\text{th}}^2}} \quad (1)$$

式中: V_B 为偏置电压; α 为电阻温度系数 (Emperature Coefficient of Resistance, TCR); η 为吸收率; G 为热导; ω 为斩波频率; τ_h 为热时间常数。从上式我们可以看出响应率随吸收呈线性增加关系。一般而言, 在设计红外探测器时会增加抗反射层或吸收增强结构来弥补敏感元自身吸收率低的缺陷。传统的红外吸收结构存在体积庞大、灵活性差、吸收不足等诸多问题, 不能满足未来探测器多功能化、集成化、芯片化的发展趋势^[39]。为此我们可以考虑利用微纳结构来达到增强探测器吸收效率的目的, 例如, 减反射层的使用, 表面等离子激元的激发, 表面织状结构的设计, 光栅结构的利用等^[40]。

近年来, 人们逐渐认识到超表面在这一领域上的应用前景, 提出了“超表面完美吸收器”的概念。超表面完美吸收器的实现原理是入射光波与超表面结构单元间的谐振相互作用, 因此可以把它看成一种谐振型吸收器。它们通常是由超表面共振上层、中间电介质消耗层、金属薄膜下反射层组成的三层耦合结构。如果入射光波的趋肤深度远小于金属膜的厚度, 那么光波将无法穿透超表面吸收器, 即实现零透射。通过对超表面共振层的选材、尺寸、结构、排列方式等参数的调节, 可以使结构表面具有相同的有效介电常数和磁导率, 进而在特定波长范围内, 超表面与自由空间的表面阻抗得以匹配, 使得入射光波完全被“约束”在中间电介质消耗层内。通过来回的振荡反射消耗, 使得入射光波的能量被完全吸收, 实现近乎100%的完美吸收^[40]。如果将超表面完美吸收器与测辐射热计集成, 便可显著提高探测器的响应率。

早在2009年, Thomas Maier等人^[41]就提出了一种通过超材料来实现波长可调和吸收可控的高响应率微测辐射热计。2016年, Evan M. Smith等人^[42]设计了一种与氧化钒微测辐射热计集成的长波红外吸收共振超表面。如图3(a)所示, 该结构提供了长波红外的多个重叠共振, 可以实现比通常应用的1/4谐振腔更宽的吸收范围。吸收带在设计上比法布里-珀罗共振腔更容易调谐。实验测量显示, 在3~18 μm波长范围内出现了多个吸收波段。长波红外的平均吸收率为80%。整个短波红外的平均吸收率为45%。大大增强了氧化钒薄膜的吸收。

基于表面等离子体共振效应, Qi Li等人^[43]在2017年提出了一种周期性超表面结构作为额外的吸收层, 增强了中波和长波红外区域的双波段吸收。如图3(b)所示, 该设计为SiN/VO₂/SiN夹层结构, 顶部有周期性金圆柱天线, 增强了双波带吸收。此外, 硅衬底上用作反射器的金镜和光学谐振腔同样起到了

增强吸收的效果。其仿真结果表明, 吸收器在波长λ=4.8 μm和λ=9 μm处有两个吸收峰, 在中波和长波红外区域的吸收量分别大于0.98和0.94。同时, 吸收器在长波红外区域实现了广谱吸收, 通过改变腔的高度、直径和盘的周期性可以实现可调的双波段吸收峰。同年, Joo-Yun Jung等人^[44]的研究证明了低损耗金属超表面可以显著增强微测辐射热计的吸收, 降低其热质量。其设计如图3(c)所示, 实验证明, 即使该超表面吸收面积的填充因子降低到27.75%, 它在长波红外波段也有显著的宽带吸收。

2019年, Omar Alkorjia等人^[45]提出了一种如图3(d)的超表面结构, 该结构设有一层下支撑臂结构用以提高填充系数。在8~14 μm辐射范围内, 通过调整超表面尺寸(盘直径和周期性), 可以实现任意中心波长光谱的选择性完美吸收。结果显示, 与没有使用超表面的器件相比, 其电压噪声降低了一个数量级。

我们可以利用相对简单的人工几何结构来实现入射电磁能量的完美吸收。但由于简单结构的单共振特性, 这些超表面只能实现非常窄的频率带宽。基于许多不同的基本结构组合能够建设性地耦合更多的共振, 并扩大完美吸收的带宽。Dwight W. Swett等人^[46]在2020年提出了一种多耦合超表面吸收器设计。如图3(e), 其结构形状近似一组倒保角轮廓的红玫瑰, 此超表面吸收器具有多重耦合吸收共振特性, 在4.5 μm中心波长上具有100%宽带红外吸收的特性。同时他们将此设计应用到了二氧化钒微测辐射热计上, 该超表面结构的使用使微测辐射热计的吸收率、探测率、噪声等性能指标都有了明显的提升。

2.2 改善器件波段选择

红外光与可见光类似, 在其传播过程中会遭到大气中各种物质的“阻碍”, 通常表现为被大气中的尘埃、颗粒等反射(散射)、吸收和透射。不同波长的光波在大气中传播时被消耗的量是不一样的, 大气对红外线消耗较少的波段, 被形象地称为“大气窗口”。红外波段根据大气窗口不同, 可粗略分为短波红外波段(0.76~3 μm)、中波红外波段(3~5 μm)和长波红外波段(8~14 μm)。在应用中, 对红外探测的具体要求是具有高灵敏度和强识别能力, 能在复杂的背景中分辨识别目标^[37]。要做到高灵敏度, 就需要探测器吸收材料能够与所探测的目标辐射间实现频率匹配, 为了达到这一目的, 需要对入射光谱进行选择过滤。而强识别能力的实现, 很大程度上取决于对探测器背景噪声的控制。

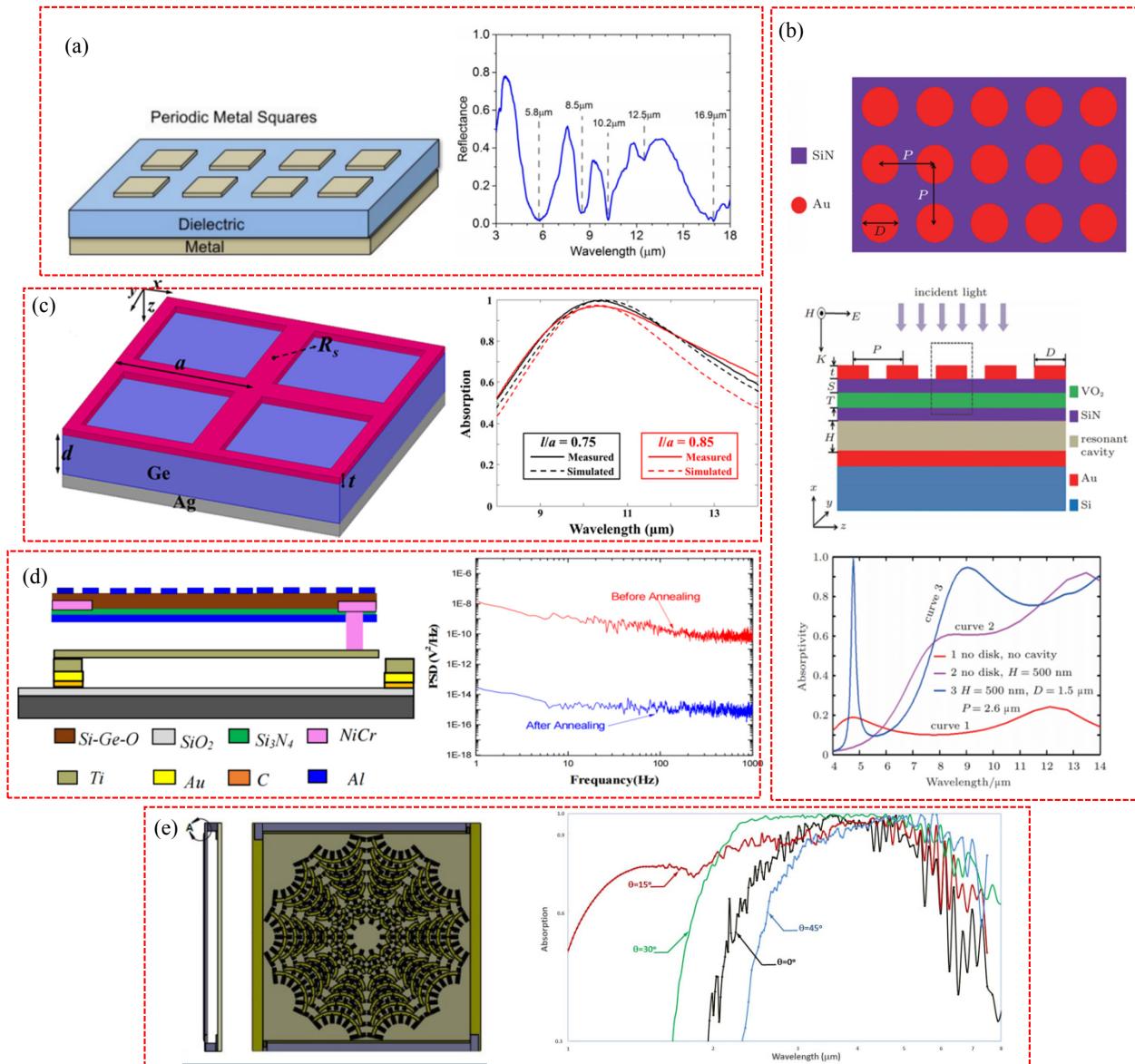


图3 几种超表面吸收结构及其结果: (a)左图为长波红外吸收共振超表面示意图;右图为超表面吸收器的反射光谱图^[42]; (b)上图和中图分别为周期性超表面结构的俯视图和结构示意图;下图为光学谐振腔和表面等离子体对器件吸收的影响示意图^[43]; (c)左图为红外宽带超表面吸收器结构示意图;右图为超表面吸收器测量(实心曲线)和仿真(虚线曲线)的吸收光谱响应图^[44]; (d)左图为结合超表面的微测辐射热计结构示意图;右图为在300℃下进行真空退火前后的电压噪声图^[45]; (e)左图为红玫瑰状超表面吸收器结构示意图;右图为相对于表面法线入射时角度在0°~45°之间变化所对应的吸收光谱图^[46]

Fig.3 Several metasurface absorption structures and their result diagrams: (a) The left figure is a schematic diagram of the long-wave infrared absorption resonance metasurface structure; The right image shows the reflectance spectrum of the metasurface absorber^[42]; (b) The top view and schematic diagram of the periodic metasurface structure are shown in the upper and middle figures, respectively; The figure below shows the influence of optical resonator and surface plasma on device absorption^[43]; (c) The left figure is a schematic diagram of the structure of the infrared broadband metasurface absorber; The right image shows the absorption spectral response diagram of metasurface absorber measurement (solid curve) and simulation (dashed curve)^[44]; (d) Top view and schematic diagram of the microbolometer structure combined with metasurface and middle figures, respectively; The figure on the right shows the voltage noise diagram before and after vacuum annealing at 300 °C^[45]; (e) The left figure is a schematic diagram of the structure of the red rose-shaped metasurface absorber; The right figure is the absorption spectrum corresponding to the change of angle between 0° to 45° relative to the surface normal^[46]

光电探测器的背景噪声来自于从探测器结构中发射或吸收光子数量的波动。相比之下，热探测器的背景噪声和辐射噪声都来源于发射或吸收光子总能量的波动。我们通过对光谱所有区域进行积分的方法来获得黑体的总能量波动^[47]：

$$\overline{\Delta E^2} = \int_0^\infty \overline{\Delta E_v^2} = \int_0^\infty \frac{8\pi h^2 v^4}{c^3} \frac{e^{\frac{hv}{k_B T}} dv}{\left(e^{\frac{hv}{k_B T}} - 1 \right)^2} = \frac{16k_B \sigma T^5}{c} \quad (2)$$

式中： σ 是斯特凡-玻尔兹曼常数。微测辐射热计在室温下工作在长红外波段，对黑体总能量波动的推导是比较噪声的一个很好的度量。同时，对于光谱选择性热探测器，因为入射到探测器上的光子中只有一小部分被吸收。所以我们还需要通过发射率 $\epsilon(v, \theta, \phi)$ 来修正上述表达式^[47]：

$$\overline{\Delta E^2} = \int_0^\infty \overline{\Delta E_v^2} = \int_{v_1}^{v_2} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \frac{2h^2 v^4}{c^3} \frac{e^{\frac{hv}{k_B T}}}{\left(e^{\frac{hv}{k_B T}} - 1 \right)^2} \epsilon(v, \theta, \phi) \sin \theta d\phi d\theta dv \quad (3)$$

从上式可以看出，相比于宽光谱吸收，窄光谱区域吸收能量波动较小，器件热导率低，背景噪声要低得多。

因此光谱选择对于微测辐射热计而言尤为重要。有很多种方法可以实现其光谱选择，目前最常用的方法是在微测辐射热计上配置一个法布里-珀罗过滤器，它通过阻断所需光谱区域以外的光谱传输来实现器件的光谱选择，但它对探测器的背景噪声影响很小。我们当然可以选择制冷的方式降低噪声，但代价是探测器会变得极其笨重且昂贵。波长选择超表面的出现为微测辐射计光谱的选择提供了一条低成本、轻质量、集成化的解决思路。

Thomas Maier 等人^[48]在 2009 年提出通过超材料来实现波长可调和吸收可控的高响应率微测辐射热计后，又于 2010 年提出了^[49]如图 4(a)所示的超材料结构。该设计将金属-介质-金属台面组成的吸收型超材料集成到传统的微测辐射热计上，通过改变超材料的尺寸参数可以使微测辐射热计具有波长选择性，连续屏蔽层能够有效地阻挡除谐振分量以外的所有波长分量传输，展示了它们在带宽调谐方面的潜力。

由于超表面吸收谱非常窄，只能吸收单一谐振频率。所以拓展工作带宽对于超表面在微测辐射热计波长选择上的应用具有十分重要的意义。2013 年，Hoo Kim 等人^[50]提出了一种三维堆叠双带微测辐射热计

的设计。如图 4(b)，他们设计了两种不同图案类型的电阻板层，利用带外传输和反射特性，组合两层结构来提高单个层的吸收效率。着重分析并模拟了双带微测辐射热计每一层对应的吸收机理，使下部腔型层能够有效地吸收长波红外波段能量，而叠加的偶极型层则吸收中波红外波段能量。结果表明，顶部偶极型层在 5 μm 处达到吸收峰值，腔型层和底部的镜面层则在 10 μm 处达到吸收峰值。两种不同类型电阻板层的堆叠组合为高效的波长选择性吸收提供了条件，同时长波红外和中波红外波段的计算吸收效率都接近 100%。

2015 年，Joo-Yun Jung 等人^[51]提出了一种在长波红外波段上的波长选择性超表面吸收器并将其应用于多光谱微测辐射热计上。如图 4(c)，制备的超表面吸收器在长波红外波段显示出了有效的窄带波长选择吸收特性，并证明了使用不同尺寸的超表面结构所表现出的三色光谱响应。显示了波长选择性超表面吸收器在多光谱微测辐射热计应用上的优越性。同年，Kaikai Du 等人^[52]研究了一种如图 5(a)的基于超表面吸收器的微测辐射热计。该微测辐射热计由几层薄层组成，吸收器的总厚度只有 185 nm。仅通过改变金盘的直径，吸收波长就可以从 2.4 μm 调整到 10.2 μm，峰值吸收率约为 90%。在给定的情况下，热敏电阻的温度变化达到 1.3 K，在光热成像系统中显示出了广阔的应用前景。

2016 年，Tao Liu 等人^[53]综合考虑了窄带和宽带红外超表面集成微测辐射计的设计，提出了如图 5(b)所示的六边形封闭圆盘超表面结构，实现了通过长波红外窗口的窄带和宽带吸收。他们将支撑桥腿设置在微测辐射热计的下面从而避免了 1/4 波腔的破坏。同时还将这种结构拓展到多层超表面耦合微辐射热计上，以实现在保持整体高吸收率的同时提供光谱选择性。而后在 2019 年，他们又在此基础上提出了^[54]两种基于超表面的微测辐射热计，以实现长波红外的宽带吸收。如图 5(c)，在第一个设计中，通过超表面的使用，解除了器件对法布里-珀罗 1/4 腔的依赖。同时将桥腿设置在像元下方可以在不牺牲填充系数的情况下增加腿的长度，增大微测辐射热计和基板之间的热阻。第二个设计扩展了该结构，在微测辐射热计上方又增加了第二个微测辐射热计，每个微测辐射热计上的超表面可以被设计为只捕获部分光谱，将其组合便能最大限度地提高整个长波红外波段的总吸收率。在此设计中，超表面使微测辐射热计 TCR 增加了 5% 至 12%，电阻率显著降低，两种微测辐射热计的测量电压响应率和探测灵敏度均在 10³ V/W 和 10⁹ cm·Hz^{1/2}/W 以上。

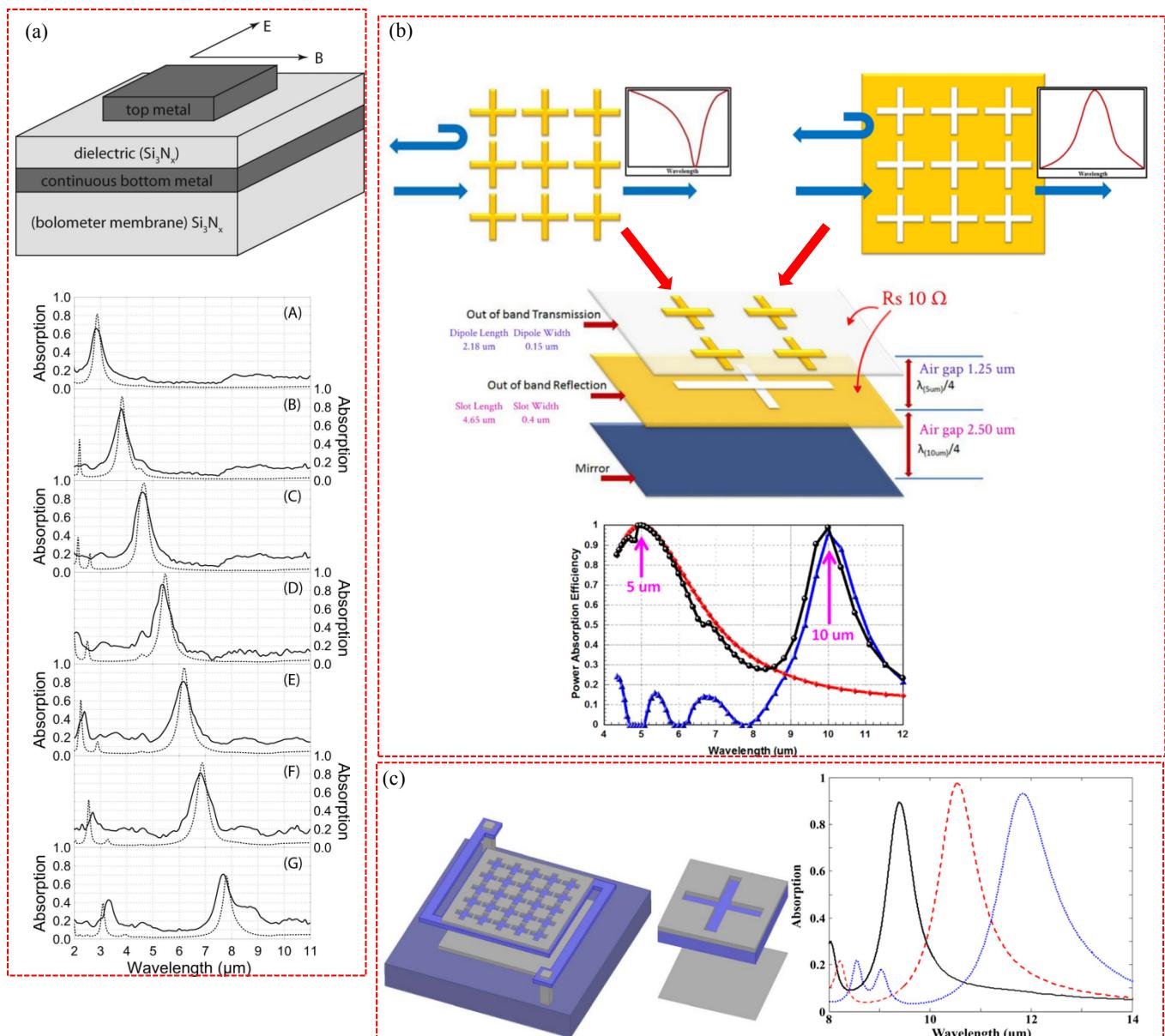


图4 几种超表面波长选择结构及其结果(1): (a)上图为中红外多光谱超表面基本单元结构示意图;下图为宽度不同的超表面吸收器集成到微测辐射热计上的吸收光谱图^[49]; (b)左上、右上、中图分别为偶极型电阻板、槽型电阻板及偶极-槽镜堆叠超表面吸收器结构示意图;下图为偶极型电阻板层(红)、槽型电阻板层(蓝)及偶极-槽镜堆叠结构(黑)的吸收光谱图^[50]; (c)左图为多光谱波长选择性超表面吸收器及超表面单个单元结构示意图;右图为三种不同尺寸的超表面吸收器的光谱响应图^[51]

Fig.4 Several metasurface wavelength selection structures and their results (1) : (a) The above figure is a schematic diagram of the basic unit structure of the mid-infrared multispectral metasurface; The figure below shows the absorption spectrum integrated into the microbolometer with metasurface absorbers of different widths^[49]; (b) The upper left, upper right, and middle figures are the schematic diagram of the structure of dipole type resistance plate, slot type resistance plate and dipole-slot mirror stacked metasurface absorber; The figure below shows the absorption spectra of the dipole resistor plate layer (red), the slot resistor plate layer (blue) and the dipolar-slot mirror stack structure (black)^[50]; (c) The figure on the left is a schematic diagram of the structure of a multispectral wavelength-selective metasurface absorber and a single unit of metasurface; The figure on the right shows the spectral response of three metasurface absorbers of different sizes^[51]

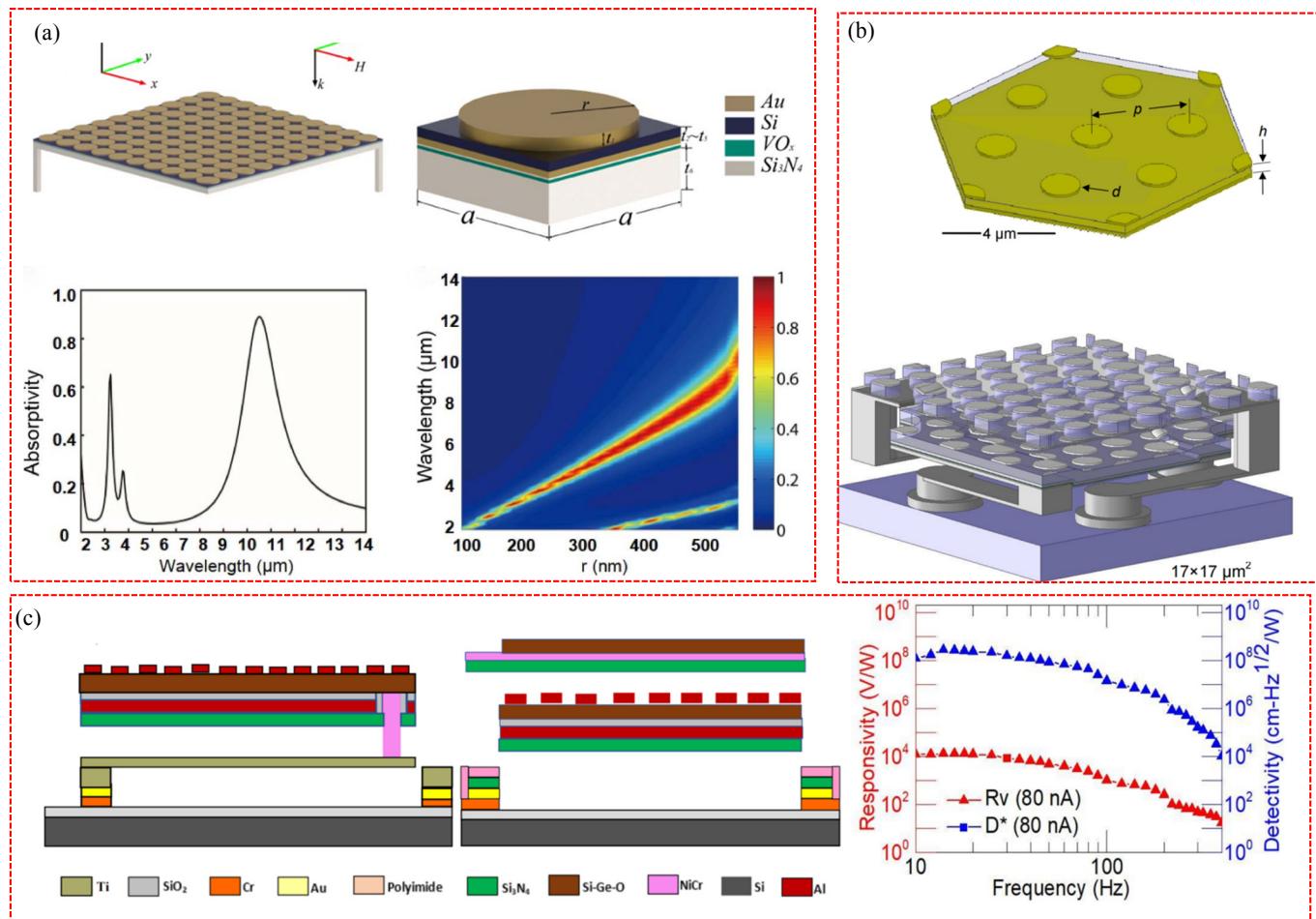


图 5 几种超表面波长选择结构及其结果(2): (a)左上图为超表面结构示意图; 右上图为超表面单个单元结构示意图; 左下图为超表面的光谱响应图; 右下图为吸收峰值波长与超表面顶部金盘半径的关系图^[52]; (b)上图为六边形阵列窄带超表面结构示意图, 下图为集成到微测辐射热计中的宽带超表面结构示意图^[53]; (c)左图为超表面集成到 $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{O}_{1-x-y}$ 红外微测辐射计的装置结构侧视图(左为单腔, 右为双腔); 右图为单腔微测辐射计的响应率和探测率示意图^[54]

Fig.5 Several metasurface wavelength selection structures and their results (2) : (a) The upper left figure is a schematic diagram of the metasurface structure; The upper right figure is a schematic diagram of the metasurface single element structure; The lower left figure shows the spectral response of the metasurface; The figure below on the right shows the relationship between the absorption peak wavelength and the radius of the gold disk at the top of the metasurface^[52]; (b) The figure above is a schematic diagram of the narrowband metasurface structure of a hexagonal array, and the figure below is a schematic diagram of the broadband metasurface structure integrated into a microbolometer^[53]; (c) The figure on the left shows a side view of the metasurface integrated into the $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{O}_{1-x-y}$ infrared microradiometer (single chamber on the left, double chamber on the right); The figure on the right is a schematic diagram of the response rate and detection rate of a single-cavity microradiometer^[54]

为了能够更加灵活地使用超表面进行微测辐射热计的光谱调控, 学者们开始关注其动态调控特性。Timothy A. Creazzo 等人^[55]在 2017 年设计了两种超表面吸收器的调谐方法并使其应用于与微测辐射热计的集成。如图 6(a), 第一种方法是在器件的光栅和背板之间的液晶(LC) 上施加电压, 由于外加电压下液晶折射率的变化, 共振峰从 0 V 时的 11 μm 转移到 6 V 时的 9.6 μm 。另一种方法是改变如图 5(a) 左下图所示结

构的空腔厚度, 这可以通过掺入压电致动器来实现。在光栅和镜子之间留下一个气腔。通过对压电致动器施加电压, 可以改变腔体厚度, 导致峰吸收波长的变化。这种动态调控能力对于微测辐射热计的光谱调控具有十分重要的意义。同年, Kevin Gallacher 等人^[56]设计了一种独立的带有 n-Ge 等离子体天线的 $\text{Si}_{0.25}\text{Ge}_{0.75}$ 微测辐射热计, 为在硅平台上进行化学武器识别和集成中红外传感器提供了启示。

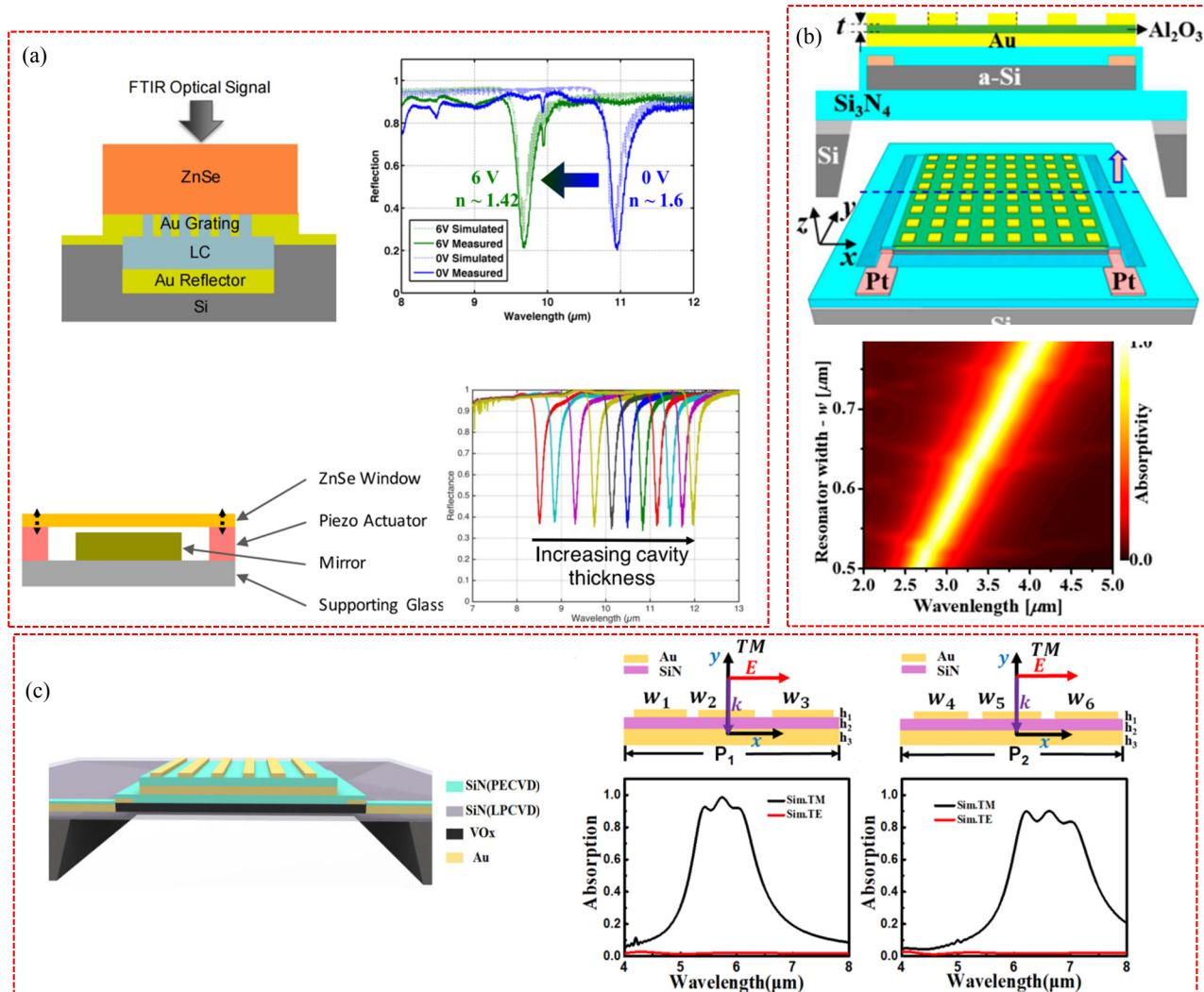


图 6 几种超表面波长选择结构及其结果⁽³⁾: (a)左上, 右上图分别为利用液晶调谐的吸收器截面图和在 0V(蓝色)和 6V(绿色)条件下液晶调谐吸收器的模拟(虚线)、测量(实线)反射光谱图; 左下, 右下图分别为利用吸收腔压电调谐的吸收器截面图和不同腔体厚度值下的反射光谱图^[55]; (b)上图为波长选择性测辐射热计示意图(底部为全视图, 顶部为截面图); 下图为器件谐振波长与谐振器宽度(w)的关系图^[57]; (c)左图为用于光谱和偏振检测的超表面集成微测辐射热计结构图; 右下图为两种天线宽度不同的宽度超表面吸收器截面图及他们所对应的光谱吸收曲线图^[58]

Fig.6 Several metasurface wavelength selection structures and their results⁽³⁾: (a) upper left and upper right figures are respectively the cross-section of the absorber tuned by liquid crystal and the simulation (dashed line) and measurement (solid line) reflection spectrum of the liquid crystal tuned absorber under 0 volt (blue) and 6 volts (green) conditions; The lower left and the lower right figures show the cross-section of the absorber tuned by piezoelectric tuning of the absorption cavity and the reflection spectrum under different cavity thickness values^[55]; (b) Schematic diagram of wavelength-selective bolometer above (full view at the bottom and cross-sectional view at the top); The figure below shows the relationship between the resonant wavelength of the device and the width of the resonator (W)^[57]; (c) The left image shows the structural diagram of a metasurface integrated microbolometer for spectral and polarization detection; The right image shows the cross-sectional view of the metasurface absorber with different widths of the two antennas and their corresponding spectral absorption curves^[58]

2019 年, Thang Duy Dao 等人^[57]提出了如图 6(b) 所示的波长选择性超表面微测辐射热计吸收结构。实验表明, 仅通过改变超表面谐振器的尺寸, 就可以很容易地调谐微测辐射热计的谐振率。当结构周期性和绝缘层等条件不变时, 器件的谐振波长与谐振器的宽

度 w 成正比, 这提供了一种十分便捷的方法来调整微测辐射热计的活动波长。

随着研究的深入, 超表面对光波的其他特性(如偏振)的调控也被应用到了微测辐射热计上。2022 年, Fei Yi 等人^[58]提出了两种基于超表面吸收器的 VO_x 微

测辐射热计，分别在 $5.3\sim6.6\mu\text{m}$ 和 $6.0\sim7.4\mu\text{m}$ 的光谱波段进行光谱和偏振检测。如图6(c)所示，通过调整纳米带天线的尺寸和氮化硅间隔片的厚度，MIM结构的阻抗可以与真空结构的阻抗相匹配，从而产生光谱选择性和偏振选择性光吸收。当光谱带或光的偏振状态所携带的信息不足以区分目标时，结合两种模式信息可以提供关于目标的更完整的图像。

要说明的是，上述关于超表面增强光吸收和优化波段选择的分类只是侧重点不同，事实上以上提到的超表面设计在改善微测辐射热计波段选择的同时也增强了它的吸收，不仅如此，由此带来的诸如响应率增加，噪声减小等正面效应也是我们不容忽视的。

3 结论及展望

超表面受到广泛关注和研究的原因在于它在保留超材料超常特性的同时突破了超材料的限制；同时在调控电磁波振幅、相位、偏振、极化方式等方面显示出了优越性，具有极大的应用前景。

本文首先从超表面的发展及实现方式等角度出发，介绍了超表面的基本概念和发展潜力。接着重点对其在微测辐射热计上的应用进行了归纳阐述，将超表面结构与微测辐射热计结合，可以大幅度提高微测辐射热计的红外吸收，通过优化超表面吸收层的种类、形貌、大小以及排列方式，能够进一步实现对微测辐射热计谐振频率、带宽等的调控^[39]。

可以预见，超表面将朝着更低损耗、更宽频段、更可调谐、更易加工、更高透过率等高要求的方向发展。随着理论基础的完善，加工技术的进一步成熟，大批研究学者的加入，超表面将成为一门独立的学科，受到更多人的重视。同时它也将拓展到更多的领域，对各行各业产生更大的影响。

对于微测辐射热计而言，超表面在改善器件波段选择，增强光吸收方向的优势已被多个团队通过仿真和实验证明。形成了“多光谱窄带完美吸收”的效果，回到超表面的本质，我们可以预见光的诸如偏振，相位等更多电磁属性将被进一步发掘，同时朝着工业化的方向发展。随着人们对高科技产品需求的提高以及微测辐射热计在人们生产生活中的广泛应用，这项技术将会得到快速发展，微测辐射热计的体积重量将越来越小，集成化度和功能密集度将越来越高，成本和价格将越来越低。

超表面的出现，为制备微测辐射热计提供了崭新的途径。随着越来越多学者们的探索，未来超表面将在微测辐射热计领域中产生更多颠覆性的作用。

参考文献：

- [1] Veselago V G. The electrodynamics of substance with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Physics-Uspekhi*, 1968, **10**: 509-514.
- [2] Pendry J B. Negative refraction index makes perfect lens[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**: 3966-3969.
- [3] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(18): 4184-4187.
- [4] 罗先刚. 亚波长电磁学(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 197-232.
LUO Xiangang. *Subwavelength Electromagnetism (Volume 1)*[M]. Beijing: Science Press, 2017: 197-232.
- [5] 李荣真. 基于超表面结构的等离子体偏振器件的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
LI Rongzhen. Study of Plasma Polarization Devices Based on Metasurface Structures[D]. Hefei University of Technology, 2016.
- [6] YU N, Genevet P, Kats M, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *American Association for the Advancement of Science*, 2011, **6054**: 333-337.
- [7] CHEN Houtong, Antoinette J Taylor, YU Nanfang. A review of metasurfaces: physics and applications[J/OL]. *Optics*, 2017, <https://arxiv.org/abs/1605.07672>.
- [8] YU Nanfang, Federico Capasso. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, **13**: 139-150.
- [9] Aieta F, Genevet P, Yu N, et al. Out-of-plane reflection and refraction of light by anisotropic optical antenna metasurfaces with phase discontinuities[J]. *Nano Letters*, 2012, **12**(3): 1702-1706. Doi: 10.1021/nl300204s.
- [10] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, et al. Space-variant Pancharatnam-Berry phase optical elements with computer-generated subwavelength gratings[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(13): 1141-1143.
- [11] Peifer C, Grhic A. Metamaterial huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2013(110): 197401.
- [12] LUO X G. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, **58**(9): 594201-594201.
- [13] PU Mingbo, HU Chenggang, WANG Min, et al. Design principles for infrared wide-angle perfect absorber based on plasmonic structure[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(18):17413-17420.
- [14] 彭华新, 周济, 崔铁军, 等. 超材料[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2020.
PENG Huixin, ZHOU Ji, CUI Tiejun, et al. *Metamaterial*[M]. Beijing: China Railway Press, 2020.
- [15] Meinzer N, Barnes W L, Hooper I R. Plasmonic meta-atoms and metasurfaces[J]. *Nature Publishing Group*, 2014, **8**(12): 889-898.
- [16] 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.
- [17] LIN D, FAN P, Hasman E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, **345**(6194): 298-302.
- [18] Khorasaninejad M, SHI Z, ZHU A Y, et al. Achromatic metalens over 60 nm bandwidth in the visible and metalens with reverse chromatic dispersion[J]. *Nano Letters*, 2017, **17**(3): 1819-1824.
- [19] CHEN K, FENG Y, Monticone F, et al. A reconfigurable active Huygens' metalens[J]. *Advanced Materials*, 2017, **29**(17): 1606422.
- [20] ZHENG G, Muehlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, **10**(4): 308-312.
- [21] LEE G Y, YOON G, LEE S Y, et al. Complete amplitude and phase control of light using broadband holographic metasurfaces[J]. *Nanoscale*, 2018, **10**(9): 4237-4245.
- [22] NI Xingjie, Alexander V Kildishev, Vladimir M Shalaev. Metasurface holograms for visible light[J]. *Nature Communications*, 2013, **4**: 2807.

- [23] Kuznetsov S A, Astafev M A, Beruete M, et al. Planar holographic metasurfaces for Terahertz focusing[J]. *Sci. Rep.*, 2015, **5**: 7738.
- [24] Yuk T I, CHEUNG S W, ZHU H L. Mechanically pattern reconfigurable antenna using metasurface[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2015, **9**(12): 1331-1336.
- [25] ZHU H L, CHEUNG S W, LIU X H, et al. Design of polarization reconfigurable antenna using metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, **62**(6): 2891-2898.
- [26] NI C, CHEN M, ZHANG Z, et al. Design of frequency and polarization reconfigurable antenna based on the polarization conversion metasurface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, **17**(1): 78-81.
- [27] WAN X, ZHANG L, JIA S L, et al. Horn antenna with reconfigurable beam-refraction and polarization based on anisotropic huygens metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, **65**(9): 4427-4434.
- [28] CAI H, CHEN S, ZOU C, et al. Multifunctional hybrid metasurfaces for dynamic tuning of terahertz waves[J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2018, **6**(14): 1800257.
- [29] Tasolamprou A C, Koulouklidis A D, Daskalaki C, et al. Experimental demonstration of ultrafast thz modulation in a graphene-based thin film absorber through negative photoinduced conductivity[J]. *ACS Author Choice*, 2019, **6**(3): 720-727.
- [30] ZHAO X, WANG Y, Schalch J, et al. Optically modulated ultra-broadband all-silicon metamaterial terahertz absorbers[J]. *Acs Photonics*, 2019, **6**(4): 830-837.
- [31] CONG L, Singh R. Spatiotemporal dielectric metasurfaces for unidirectional propagation and reconfigurable steering of terahertz beams[J]. *Advanced Materials*, 2020, **32**(28): 2001418.
- [32] Mousavi S H, Khanikaev A B, Neuner B, et al. Suppression of long-range collective effects in meta-surfaces formed by plasmonic antenna pairs[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(22): 22142-22155.
- [33] ZHANG J, MEI Z, ZHANG W, et al. An ultrathin directional carpet cloak based on generalized snell's law[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(15): 1780.
- [34] LIU S, XU H X, ZHANG H C, et al. Tunable ultrathin mantle cloak via varactor-diode-loaded metasurface[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(11): 13403-13417.
- [35] NI Xingjie, WONG Zijing, Michael M, et al. An ultrathin invisibility skin cloak for visible light[J]. *Science*, 2015, **349**(6254): 1310-1314.
- [36] TAN X, ZHANG H, LI J, et al. Non-dispersive infrared multi-gas sensing via nanoantenna integrated narrowband detectors[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): 5245.
- [37] 苏君红. 红外材料与探测技术[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2015.
- SU Junhong. *Infrared Materials and Detection Technology*[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2015.
- [38] Dereniak L Eustace. *Infrared Detectors and Systems*[M]. Hoboken: Wiley, 1996.
- [39] 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): 13.
- DENG Honglang, ZHOU Shaolin, CEN Guanting. Progress in infrared and THz electromagnetic absorption metasurface[J]. *Photoelectric Engineering*, 2019, **46**(8): 13.
- [40] 徐天宇. 微纳结构超表面增强吸收研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- XU Tianyu. Ultrasurface-Enhanced Absorption Study of Micro-Nano Structures[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- [41] Maier T, Brückl H. Wavelength-tunable microbolometers with metamaterial absorbers[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(19): 3012-3014.
- [42] Smith E M, Nath J, Ginn J, et al. Responsivity improvements for a vanadium oxide microbolometer using subwavelength resonant absorbers[C]// *SPIE Defense + Security*, 2016, Doi: 10.1117/12.2223954.
- [43] LI Q, YU B Q, LI Z F. Surface plasmon-enhanced dual-band infrared absorber for VO_x-based microbolometer application[J]. *Chinese Physics B*, 2017(8): 269-274.
- [44] JUNG J Y, SONG K, Choi J H, et al. Infrared broadband metasurface absorber for reducing the thermal mass of a microbolometer[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 430.
- [45] Alkorjia O, Abdullah A, Koppula A. Metasurface based uncooled microbolometer with high fill factor[C]// *International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors*, XXXIII, 2019: 2126-2129.
- [46] Swett D W. Near zero index perfect metasurface absorber using inverted conformal mapping[J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1): 9731.
- [47] Joseph J Talghader, Anand S Gawarikar, Ryan P Shea. Spectral selectivity in infrared thermal detection[J]. *Light: Science & Applications*, 2012, **1**(8): e24-e24.
- [48] Thomas Maier, Hubert Brückl. Wavelength-tunable microbolometers with metamaterial absorbers[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(19): 3012-3014.
- [49] Maier T, Brueckl H. Multispectral microbolometers for the midinfrared[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(22): 3766-3768.
- [50] Kim H, Neikirk D P, Andresen B F, et al. Three-dimensional dual-band stacked microbolometer design using resistive dipoles and slots[C]// *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2013, **8704**: 19.
- [51] JUNG J Y, LEE J, CHOI D G, et al. Wavelength-selective infrared metasurface absorber for multispectral thermal detection[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(6): 1-11.
- [52] DU K, LI Q, ZHANG W, et al. Wavelength and thermal distribution selectable microbolometers based on metamaterial absorbers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(3): 1-8.
- [53] LIU Tao, QU Chuang, Mahmoud Almasri, et al. Design and analysis of frequency-selective surface enabled microbolometers[C]// *Infrared Technology and Applications XLII*. SPIE, 2016, **9819**: 487-494.
- [54] LIU T, Abdullah A A, Alkorjia O, et al. Device architecture for metasurface integrated Uncooled Si_xGe_yO_{1-x-y} Infrared Microbolometers (Conference Presentation)[C]// *Infrared Technology and Applications XLV*, 2019, **11002**: 372-378.
- [55] Creazzo T A, Zablocki M J, Zaman L, et al. Frequency selective infrared optical filters for micro-bolometers [C]// *SPIE Defense + Security*, 2017, **10194**: 611-618.
- [56] Gallacher K, Millar R W, Giliberti V, et al. Mid-infrared n-Ge on Si plasmonic based microbolometer sensors[C]// *IEEE International Conference on Group IV Photonics*, 2017: 3-4.
- [57] DAO T D, Doan A T, Ishii S, et al. MEMS-based wavelength-selective bolometers[J]. *Micromachines*, 2019, **10**(6): 416.
- [58] JIANG S, LI J, LI J, et al. Metamaterial microbolometers for multispectral infrared polarization imaging[J]. *Optics Express*, 2022, **30**(6): 9065-9087.