

基于人工微结构的光谱选择性红外热敏探测器

谈冲^{1,3}, 孙艳¹, 戴宁¹, 郝加明^{1,2*}

- 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083;
- 复旦大学 光电研究院, 上海市智能光电与感知前沿科学研究基地, 上海 200433;
- 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 红外热敏探测器不管是在军事还是在民用领域都有着非常重要的应用。传统的红外热敏探测器主要采用宽光谱吸收的方式, 这虽然赋予了器件宽带响应的特点, 但同时也会因为引入了不必要的辐射热导而增加本底噪声, 从而限制了器件的探测性能极限。研究表明, 具有窄带选择性吸收的热敏探测器在特定的条件下可以突破这一极限。经过精心设计的人工微纳结构不但可以实现波长选择性吸收来降低器件的辐射热导, 而且由于其具有亚波长特性, 还可以大大降低器件的热容, 从而为实现高性能的红外热敏探测器提供了可能性。本文在简单介绍红外探测器基本概念的基础上, 聚焦测辐射热计、温差电偶和热释电探测器件, 回顾总结基于人工微结构体系的光谱选择性红外热敏探测器的相关研究进展。

关键词: 热敏探测器; 光谱选择性; 人工微结构; 超构表面
中图分类号: O436; TN215 **文献标识码:** A

Spectrally selective infrared thermal detectors based on artificially engineered nanostructures

TAN Chong^{1,3}, SUN Yan¹, DAI Ning¹, HAO Jia-Ming^{1,2*}

- State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
- Shanghai Frontiers Science Research Base of Intelligent Optoelectronics and Perception and Institute of Optoelectronics, Fudan University, Shanghai 200433, China;
- University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Infrared thermal detectors are of significant importance in both military and civilian fields. Traditional infrared thermal detectors usually have broadband absorption characteristics, although which brings the detectors featuring broadband responses, it also increases the noise due to the presence of additional radiative thermal conductance, thus limiting the detection performance. Recently, it has been demonstrated that thermal detectors assisted by artificially engineered structures would have performance beyond traditional broadband thermal detectors, since such elaborately designed media can not only reduce the thermal conductance of the detectors by spectrally suppressing the undesirable thermal emission, but also decrease the thermal capacitance due to their subwavelength features, and thus improving the performance of the thermal detectors. In this review, we first give a brief overview of the fundamental concepts of infrared detectors, including bolometric, thermoelectric and pyroelectric detectors, and then summarize the recent developments of spectrally selective infrared thermal detectors based on artificially engineered nanostructures.

Key words: thermal detectors, spectrally selective, artificially engineered nanostructures, metasurfaces

收稿日期: 2023-02-24, 修回日期: 2023-04-07

Received date: 2023-02-24, Revised date: 2023-04-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFA1404701, 2017YFA0205800), 国家自然科学基金项目(62075231), 上海市科委项目(20JC1414603).

Foundation items: Supported by the National Key R&D Program of China (2022YFA1404701, 2017YFA0205800), National Natural Science Foundation of China (62075231), Shanghai Science and Technology Committee (20JC1414603).

作者简介 (Biography): 谈冲(1997-), 男, 湖南常德人, 博士研究生, 主要研究方向为超构表面增强吸收及光电器件集成。Email: tan-chong@mail.sitp.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: jmhao@fudan.edu.cn

引言

光本质上是一种电磁波,具有频率、振幅、相位和偏振等基本属性。将电磁波按频率或者波长划分可以得到电磁波谱(图1(a))^[1]。电磁波谱中波长在0.76~1000 μm范围内的电磁波为红外电磁波。黑体辐射定律表明物体由于温度产生的辐射往往在这个人眼不可见的红外波段。要获得红外波段的信息,需要借助于相应的探测器件,如图1(b, c)所示,红外成像能够显著增强在某些特殊场景(如无光照)中人们对目标的识别和认知能力^[2]。红外探测技术无论是在红外导引、红外预警和夜视侦察等军事安全领域,还是在工业检测、医学诊断和疫情防控等民生经济领域都发挥着重要作用。因此,发展先进的红外探测技术具有十分重要的意义。

红外探测器大体可以分为两大类,一种为光子

型探测器,其工作原理通常是半导体材料在吸收红外光子后产生了光生电子空穴对,光生电子空穴对分离并在电路中产生电信号输出,从而实现对红外电磁波的探测;另一种为热敏探测器,基本工作原理是利用辐射的热效应,即热敏材料吸收红外光后温度产生变化,并导致热敏材料的某一物理性质发生变化,检测该性质的变化即可实现对红外辐射信号的探测。光子型探测器一般具有信噪比高、响应速度快等优点,不过其材料生长工艺较为复杂,并且往往需要冷却到低温才能工作,因此光子型探测器的成本相对较高,系统也相对来说比较复杂。与光子型探测器相比,热敏探测器具有制备工艺相对简单、成本低廉、可在室温条件下工作等优点,相关产品也已在如红外光谱仪和激光功率计等测量设备中得到了广泛的应用^[2]。

传统的热敏探测器的吸收层多采用宽谱吸收

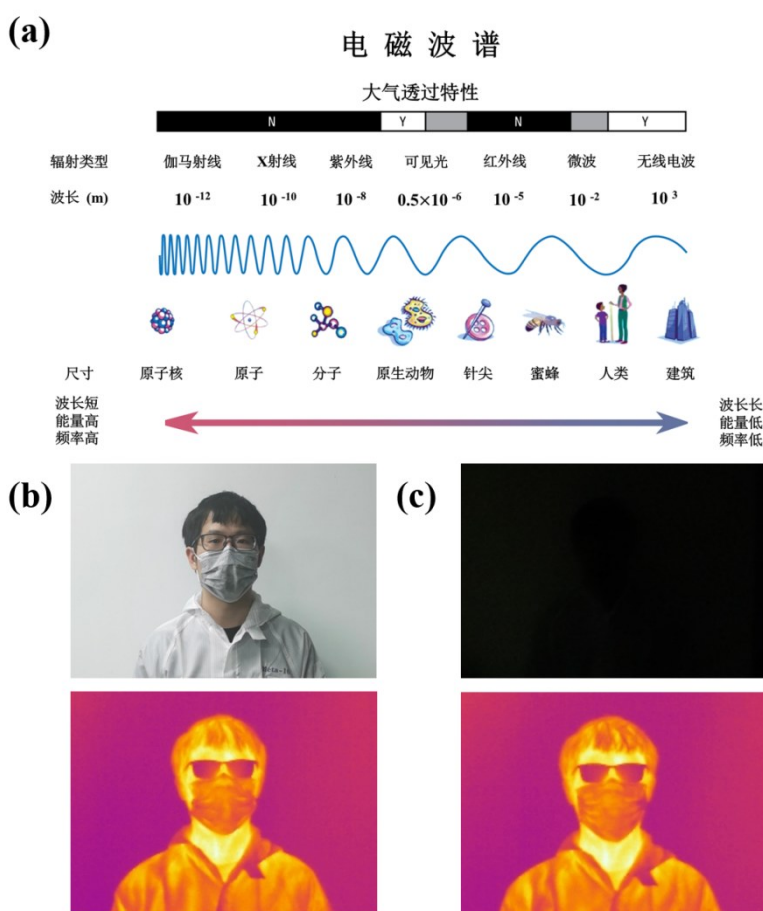


图1 电磁波与红外探测 (a)电磁波谱^[1]; (b)开灯时所拍摄的作者的可见光照片(上图)与红外照片(下图); (c)关灯时作者的可见光照片(上图)和红外照片(下图)

Fig. 1 Electromagnetic wave and infrared photodetection (a) electromagnetic wave spectrum^[1]; (b) visible (top) and infrared images (bottom) of the author captured under illumination; (c) visible (top) and infrared images (bottom) of the author captured in darkness

的材料,不具有光谱选择性。目前,传统的热敏探测器使用了各类微桥结构大幅降低了与周围环境之间直接接触产生的热导。不过,宽谱吸收层通常较厚,质量较大。体系不但具有大的热容量,还要求微桥结构具有足够的支撑强度。因此,很难再通过进一步缩小微桥结构来降低接触的热导,探测器性能的提升有限。另外,吸收层的宽谱高吸收特性还增大了辐射热导,也限制了宽谱响应热敏探测器的性能。近年来,利用人工微结构实现光谱选择性热敏探测器成为了研究的热点。通过设计的人工微结构,一方面,能够通过局域吸收光来缩小结构尺寸,降低器件的质量,从而降低器件的热容,同时还可以进一步缩小支撑结构,降低器件的热容和热导;另一方面,光谱选择性能够抑制所关注波段之外的辐射,从而降低辐射热导。因此,集成合适的人工微结构是一种提升器件性能的有效途径。近年来,红外热敏探测器研究领域蓬勃发展,基于各种新概念新技术的红外热敏探测器件不断涌现。本文在简单介绍红外热敏探测器基本概念的基础上,着重回顾基于人工微结构体系光谱选择性红外热敏探测器的相关研究进展。

1 红外热敏探测器

1.1 红外热敏探测器的分类和基本结构

传统的红外热敏探测器主要包括热敏材料和与其直接接触的吸收器两个部分,通过吸收光产热

来进行探测,其基本结构如图2所示。按照工作原理划分,热敏探测器主要可分为如下三种^[3-5]:温差电偶、测辐射热计和热释电探测器。这三种热敏探测器使用的热敏材料能够将温度变化转化为电信号,不直接依赖于入射的光子。因此,热敏探测器响应的光谱波段范围在很大程度上取决于吸收器的设计。传统的吸收器设计,包括无序金、铝、硅和碳膜等,主要是聚焦在实现从可见到长波红外的超宽带吸收,从而实现了热敏探测器的超宽带响应。

1.2 理想热敏探测器的响应率、噪声与探测率

热敏探测器件吸收光时,其会产生温度变化,这种温度变化可以通过求解热平衡方程得到^[2,6]:

$$C_{th} \frac{d}{dt} \Delta T + G_{th} \Delta T = \eta \Phi, \quad (1)$$

其中, C_{th} 是热容, G_{th} 是热导, η 是热敏探测器的吸收率, $\Phi = \Phi_0 e^{i\omega t}$ 是经过调制后的入射辐射功率。由上式(1)可以得到热敏探测器的温度变化:

$$\Delta T = \Delta T_0 e^{-(G_{th}/C_{th})t} + \frac{\eta \Phi_0 e^{i\omega t}}{G_{th} + i\omega C_{th}}. \quad (2)$$

温度变化的第一项为瞬态项,会随时间指数衰减。在考虑热敏探测器的温度变化时可以忽略,因此热敏探测器温度变化的大小为:

$$\Delta T = \left| \frac{\eta \Phi_0 e^{i\omega t}}{G_{th} + i\omega C_{th}} \right| = \frac{\eta \Phi_0}{(G_{th}^2 + \omega^2 C_{th}^2)^{1/2}}. \quad (3)$$

此温度变化是从热平衡方程出发得到的,因此对不同类型的热敏探测器均适用。可以引入系数

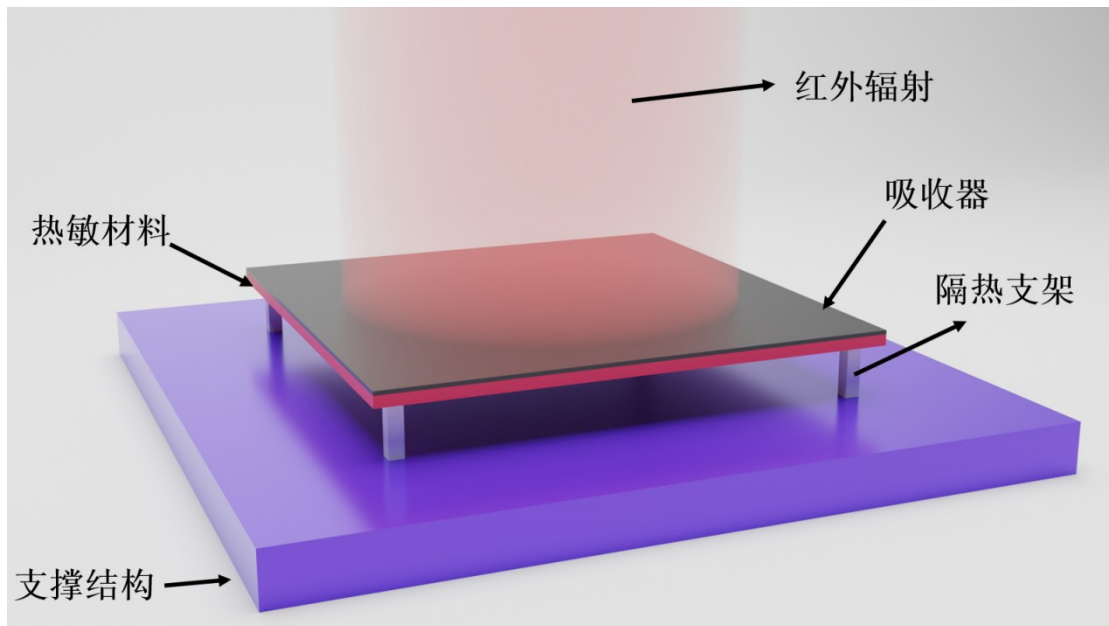


图2 热敏探测器的基本结构^[2]

Fig. 2 Schematic view of the basic structure of a thermal detector^[2]

$K = \Delta V/\Delta T$ 来衡量热敏材料在温度变化时输出电压信号的能力。因此,热敏探测器的电压响应率即为:

$$R_v = \frac{K\eta}{G_{th}(1 + \omega^2\tau_{th}^2)^{1/2}}, \quad (4)$$

其中,热时间常数 $\tau_{th} = C_{th}/G_{th}$ 。

除了响应率外,热敏探测器的性能还依赖于噪声。理想热敏探测器的噪声主要来源是探测器与周围环境发生随机热交换时的温度扰动产生的热扰动噪声(thermal fluctuation noise)^[7]。当探测器与环境达到热平衡时,以热导率 G_{th} 传输到器件上的功率扰动($W/\sqrt{\text{Hz}}$)可以表述为^[8-9]:

$$\langle P_{th} \rangle = \sqrt{4k_b T^2 G_{th}}, \quad (5)$$

其中 k_b 为玻尔兹曼常数, T 为温度, G_{th} 为探测器与环境之间的热导,此即理想热敏探测器的最小可探测功率。热导是热敏探测器的关键参数,描述了探测器与环境热交换的难易程度。从式(5)可知,相同温度下热敏探测器的热导越低,其最小可探测功率越低,即噪声越低。热探测器与周围环境热交换的热导包含三个部分,与空气热交换有关的热导、与支撑结构热交换有关的热导和器件的辐射热导^[6]。假设器件工作在真空环境中,且支撑结构具有完美的热绝缘性质,即与空气和支撑结构有关的热导均为0,则仅需考虑辐射热导。对于理想的宽带响应热敏探测器来说,在热平衡条件下,辐射热导可由斯忒藩-玻耳兹曼(Stefan-Boltzmann)定律给出:

$$G_{rad} = \frac{d}{dT}(A\sigma T^4\eta) = 4A\sigma T^3\eta, \quad (6)$$

其中, G_{rad} 是辐射热导, A 是探测器的面积, σ 是Stefan-Boltzmann常数, η 是探测器的发射率或吸收率。传统的理想热敏探测器理论上通常假设吸收器具有宽光谱吸收特性,且 η 基本不随波长的变化而变化。进一步可得噪声等效功率为:

$$NEP = \frac{\langle P_{th} \rangle}{\eta} = \sqrt{\frac{16k_b T^5 A \sigma}{\eta}}. \quad (7)$$

噪声等效功率是理想热敏探测器在辐射热导产生的噪声背景中能够探测到的最小可探测功率,其为入射在探测器上的辐射产生的电信号恰好等于噪声信号时所对应的辐射功率。

同时可以定义理想热敏探测器的比探测率 D^* :

$$D^* = \frac{\sqrt{A\Delta f}}{NEP} = \sqrt{\frac{\eta\Delta f}{16k_b T^5 \sigma}}, \quad (8)$$

其中, Δf 为噪声等效带宽,是探测器的有效噪声带

宽。 D^* 实际上是将 NEP 按探测器的面积和带宽归一化,使得具有不同面积以及电路的探测器能够进行性能对比,是描述探测器性能的一个重要指标。假设吸收率 $\eta = 1$,工作温度 $T = 300 \text{ K}$, $\Delta f = 1 \text{ Hz}$,通过公式(8)可简单计算得到 $D^* = 1.81 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$,此即为宽谱吸收的热敏探测器在仅考虑辐射热导时性能的理论极限^[6]。

图3展示了不同类型探测器的比探测率及其理论极限,结果显示理想热敏探测器的性能理论极限与光电探测器相比还有一定差距。不过,上述的理想热敏探测器性能理论极限是基于理想的宽谱吸收热敏探测器所得。由基尔霍夫辐射定律可知,物体的辐射率与吸收率有关,宽谱强吸收的特性意味着器件同时具有宽谱强辐射的特性,导致器件具有比较大的辐射热导,增大了器件的噪声,最终影响了探测器的性能上限。

实际上,许多应用场景往往并不需要超宽带的吸收,只需要对特定波长的电磁波强吸收即可。研究表明,具有窄带选择性吸收的热敏探测器,其比探测率可突破宽谱吸收热敏探测器的理论极限,甚至特定情况下可优于光电型探测器^[6]。与宽谱吸收的理想热敏探测器相同,选择性吸收的理想热敏探测器也只需要考虑其与背景的辐射热导产生的噪声,这种噪声来源于探测器发射或吸收的光子能量的涨落。单频光子数涨落的均方值可表示为^[10]:

$$\langle \Delta n^2 \rangle = \langle n \rangle + \langle n \rangle^2, \quad (9)$$

其中, $\langle n \rangle$ 是单频的平均光子数。能量涨落可以通过光子数涨落与光子能量的乘积获得:

$$\langle \Delta E_v^2 \rangle = N(hv)^2 \langle \Delta n^2 \rangle, \quad (10)$$

N 是对应光子频率的单位体积内的光子态数量, h 是普朗克常数, v 是光子频率。玻色爱因斯坦分布给出了单频的平均光子数:

$$\langle n \rangle = \frac{1}{e^{\frac{hv}{k_b T}} - 1}. \quad (11)$$

单位体积内的光子态数量 N ,可以在 k 空间内计算。 k 空间内厚度为 dk 球壳体积为 $4\pi k^2 dk$, $k = \frac{2\pi v}{c}$ 。长度为 L 的立方体,其在一个维度上的共振条件需要满足 $v = m \cdot \frac{\pi}{L}$,即模式间隔为 $\frac{\pi}{L}$,单个模式在 k 空间中对应的体积为 $(\frac{\pi}{L})^3$ 。进一步考虑到光具有两个偏振以及 k 空间内仅有1/8球壳是独立的,因此需要乘以2再除以8。从而得到单位体积内的

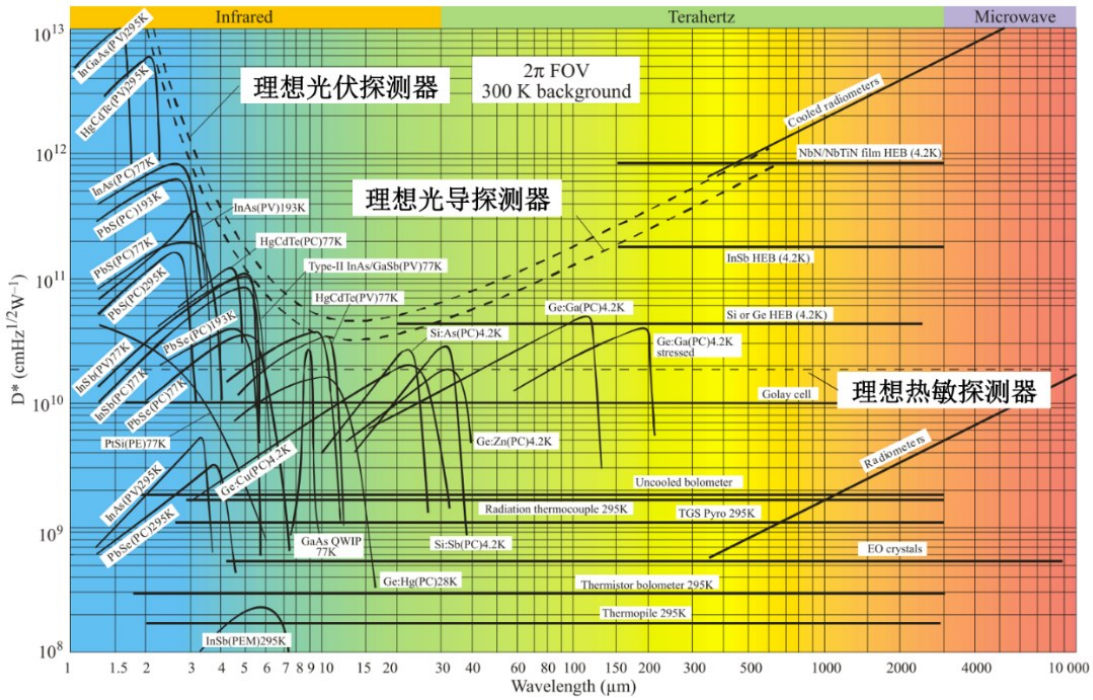


图3 红外探测器比探测率随波长变化关系图^[3]

Fig. 3 Specific detectivity of various infrared detectors as a function of wavelength^[3].

光子态数量为:

$$N = \frac{8\pi\nu^2 d\nu}{c^3}. \quad (12)$$

我们进一步可以计算得到:

$$\langle \Delta E_v^2 \rangle = \frac{8\pi\nu^2 d\nu}{c^3} (h\nu)^2 \frac{e^{\frac{h\nu}{k_n T}}}{\left(e^{\frac{h\nu}{k_n T}} - 1\right)^2} = \frac{8\pi h^2 \nu^4}{c^3} \frac{e^{\frac{h\nu}{k_n T}}}{\left(e^{\frac{h\nu}{k_n T}} - 1\right)^2} d\nu. \quad (13)$$

此即器件的辐射热导带来的能量涨落。在 λ_1 到 λ_2 的波段范围内,能量涨落可以通过积分计算:

$$\langle \Delta E^2 \rangle = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{8\pi h^2 c^2}{\lambda^6} \frac{e^{\frac{hc}{\lambda k_n T}}}{\left(e^{\frac{hc}{\lambda k_n T}} - 1\right)^2} \eta(\lambda) d\lambda. \quad (14)$$

当器件为宽谱全吸收时, $\eta(\lambda) = 1$,上式为:

$$\langle \Delta E^2 \rangle = \int_0^{+\infty} \frac{8\pi h^2 c^2}{\lambda^6} \frac{e^{\frac{hc}{\lambda k_n T}}}{\left(e^{\frac{hc}{\lambda k_n T}} - 1\right)^2} d\lambda = \frac{16k_n T^5 \sigma}{c}. \quad (15)$$

此即为宽谱全吸收的热敏探测器的能量涨落均方值。由此可以定义性能的增强系数 β ,其为具有光谱选择性吸收的热敏探测器与宽谱全吸收的

热敏探测器在面积和噪声带宽相同时比探测率的比值:

$$\beta = \frac{D_n^*}{D_b^*} = \frac{NEP_b}{NEP_n} = \sqrt{\frac{\langle \Delta E^2 \rangle_b}{\langle \Delta E^2 \rangle_n}} = \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\pi h^2 c^3}{2k_n T^5 \sigma \lambda^6} \frac{e^{\frac{hc}{\lambda k_n T}}}{\left(e^{\frac{hc}{\lambda k_n T}} - 1\right)^2} \eta(\lambda) d\lambda \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (16)$$

其中 D_n^* , D_b^* , NEP_n , NEP_b , $\langle \Delta E^2 \rangle_n$, $\langle \Delta E^2 \rangle_b$ 分别为选择性吸收和宽谱全吸收的热敏探测器的比探测率,噪声等效功率和能量涨落的均方值。从(16)式可以计算热敏探测器在300K下几种选择性吸收情况相比于宽谱全吸收的增强:若选择性全吸收3~5 μm ,其余波段完全不吸收,则比探测率增强4.19倍;若选择性全吸收8~14 μm ,其余波段完全不吸收,则比探测率增强1.41倍;若选择性吸收的中心波长为10 μm ,带宽为100 nm,其余波段完全不吸收,则比探测率增强10.21倍。因此,光谱选择性吸收的热敏探测器件性能指标不但远好于宽光谱响应热敏探测器,甚至能够超越长波红外光电探测器的理论极限^[6]。

2 光谱选择性热敏探测器

2.1 光谱选择性热敏探测器的结构类型

以超构表面、纳米微腔为代表的人工微结构光子学器件近年来吸引了人们的广泛关注。人工微结构可在比工作波长更短的尺度上操纵和控制光子,实现对光的选择性强吸收,相关的工作实现了覆盖微波^[11-12]、太赫兹^[13-14]、红外^[15-20]到可见光^[21]等各个波段,被证明具有强大的电磁调控能力^[22-27]。人工微结构理念的出现,为红外探测器的研究发展提供了新的契机。研究表明,将人工微结构引入到光子型红外探测器,能够有效提高探测器的性能^[28-33],包括光导探测器^[34]、光伏探测器^[35-36]、量子阱探测器^[37-38]、超晶格探测器^[25,39]、量子点探测器^[40-42]以及肖特基型热电子探测器^[43-45]等。另外,在热敏探测器方面,研究结果显示,通过精细的光学微结构设计,将人工微结构集成在测辐射热计^[46-54]、温差电偶^[55-59]和热释电探测器^[60-63]中,不但可以实现波长选择性吸收,降低器件的辐射热导,而且由于微结构具有亚波长特性,同时具有局域光的能力,可以通过减薄器件厚度来大大降低器件的热容,从而可实现器件综合性能的提升^[6]。

基于人工微结构光谱选择性增强吸收的红外

热敏探测器主要包括两种类型,一种为法布里珀罗腔结构^[10,64-67],另一种为人工设计的等离激元超构表面结构^[48,68-70]。这两种结构能将光吸收并局域在特定的区域。对于如图4所示的法布里珀罗腔型结构,热敏材料设计在悬浮的反射衬底上,热敏材料与反射衬底之间的间隔决定了共振波长。这种结构能够实现窄带而且可调谐的光谱响应特性。不过,该结构也具有以下局限性^[6]:(1)这种结构依旧要求在探测器上有吸收介质来吸收光并产生温度变化。(2)法布里珀罗腔结构的吸收具有很强的角度相关性,需要使用低数值孔径的成像系统。(3)悬浮结构的热敏探测器下方需要形成法布里珀罗光学腔,无法加入支撑结构,增大了像元的尺寸,降低了焦平面阵列的填充系数。(4)像元的光谱响应由悬浮的法布里珀罗腔的长度决定,邻近像元之间难以精确独立地控制腔长,因此不易实现多光谱响应的探测。(5)由于热敏探测器悬浮在反射衬底上,热探测产生的机械振动会改变法布里珀罗腔的共振波长,也就改变了器件的工作波长,引入了额外的噪声来源。

与法布里珀罗腔结构相比,能够同时具有光谱选择特性和增强吸收特性的人工微结构超构表面

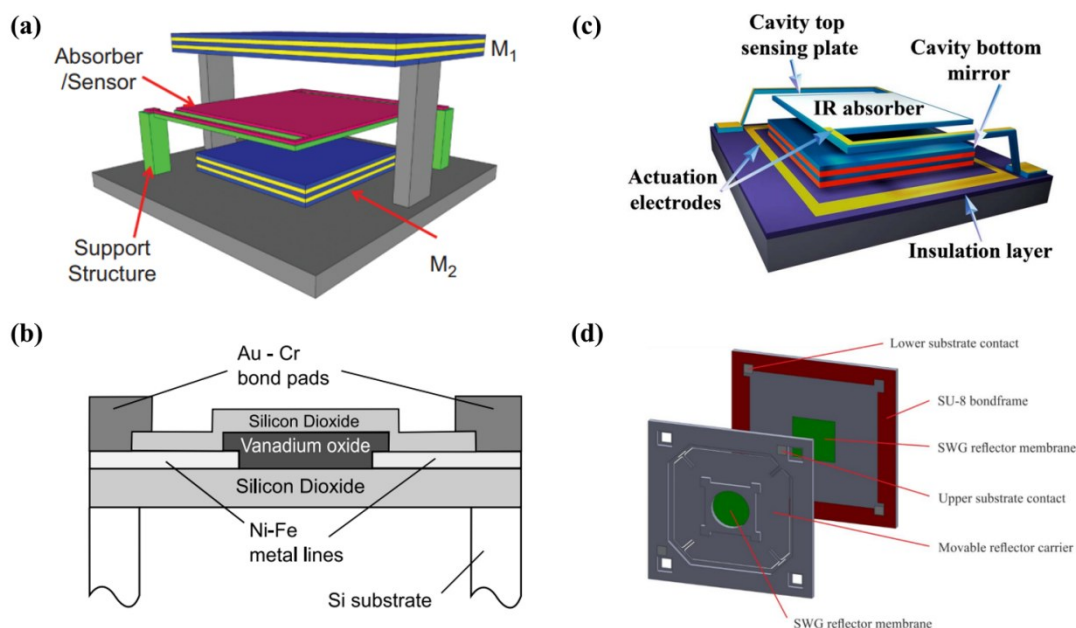


图4 法布里珀罗腔结构的光谱选择性探测器 (a)基本结构示意图^[10]; (b)热敏材料 VO_x 置于腔内的结构^[65]; (c)热敏材料置于顶层的结构^[66]; (d)基于法布里珀罗腔选择性探测的微型光谱仪^[67]

Fig. 4 Spectrally selective infrared thermal detectors achieved using Fabry - Pérot cavity (a)schematic diagram of the fundamental structure^[10]; (b) VO_x inserted into the Fabry - Pérot cavity as a thermal sensitive material^[65]; (c) thermal sensitive material located at the top of cavity^[66]; (d) miniaturized spectrometer based on Fabry - Pérot cavity^[67]

在某些方面具有一定的优势。超构表面是指由亚波长人工原子按某种特定排列方式构建的微结构阵列,因其结构单元及排列方式均可自由设计,展现出对电磁波强大的调控能力,近十多年来一直是光学领域研究的前沿^[23,71-77]。超构表面的电磁响应特性与其结构的几何形状有关,因此可以通过人工设计微结构单元实现所需的电磁响应^[72]。通常,超构表面的特殊电磁响应特性与腔结构类似,是通过共振来实现对特定波长的耦合。与微腔结构中常见的法布里珀罗共振不同,超构表面更多的是基于表面等离子共振模式,实现对特定波长的光强吸收,并转化为热,进而通过热敏材料实现热电转化。等离子共振包括两种类型^[78],一种是表面等离子极化激元(surface plasmon polariton, SPP),是被限制在介质与金属界面上与金属的电子等离子体发生耦合的传输型表面波,其波矢比介质中光子的波矢更大,无法直接激发,且电场在垂直于界面方向上呈指数衰减。另一种是局域表面等离子激元(localized surface plasmon, LSP),是金属纳米颗粒表面上的电子振荡受到几何形状所产生的边界条件限制,被局域在金属纳米颗粒表面的共振模式。上述的两种共振类型可以通过具有微结构的超构表面激发,从而对共振波长位置的光产生强吸收。因此,集成了超构表面的热敏探测器能够通过上述两种共振模式来实现光谱选择性吸收。超构表面吸收器具有不需要额外的微腔结构就能实现增强吸收与光谱选择的特性。因此,超构表面热敏探测器不需要附加的光学结构,从而可以方便地设计和制备支撑结构以实现更好的热绝缘和更大的填充系数。此外,材料的吸收、光谱以及角度特性在很大程度上由所设计微结构单元所决定,从而单片上就能集成不同光谱选择特性的探测器^[79-80]。超构表面还能将光压缩在亚波长的区域范围内,使得吸收器的体积和质量很小,降低器件整体的热容,提高器件的性能。因此,集成人工超构表面微结构的热敏探测器具有更大的优势,接下来,我们简要介绍基于人工微结构材料体系的光谱选择性热敏探测器的相关实例。

2.2 测辐射热计

测辐射热计利用材料的电阻随温度变化而变化的特性来测量吸收到的辐射。实际应用中,在恒定的电流或电压工作模式下,吸收热辐射后温度升高产生的电阻变化可通过测量对应的电压或电流

的变化来获得。对于测辐射热计,衡量其材料性能的一个重要参数是电阻温度系数 α (temperature coefficient of resistance, TCR),其定义为:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}, \quad (17)$$

其中, R 为电阻。电阻温度系数是温度变化时材料电阻变化的百分比,描述了材料的电阻对温度变化的敏感程度。绝大多数材料由于存在热激发载流子和热相关的散射过程,其TCR的值都不会为0。常用的具有电阻随温度变化特性的材料包括非晶硅和氧化钒,其TCR值超过了2%。

当测辐射热计在恒流模式(偏置电流为 I)下工作时,探测器的响应电压 ΔV 与温度变化 ΔT 之间的关系可表示为:

$$\Delta V = I\Delta R = IR\alpha\Delta T. \quad (18)$$

则 $K = \Delta V/\Delta T = IR\alpha$,从而得到了恒流下测辐射热计的电压响应率:

$$R_v = \frac{IR\alpha\eta}{G_{th}(1 + \omega^2\tau_{th}^2)^{1/2}}. \quad (19)$$

金属-介质-金属的三层结构在超构表面吸收器方面已经有了成熟的研究工作,因此可以直接将其利用到测辐射热计上,作为光学吸收结构使用。图5(a)是Thomas Maier等早期提出的金属-介质-金属三层结构作为吸收器的测辐射热计^[81]。Si作为热敏材料位于下层 Si_3N_x 电桥与上层 Si_3N_x 绝缘层之间,在上层 Si_3N_x 绝缘层之上集成了 $\text{Au-Si}_3\text{N}_x\text{-Au/Ti}$ 的结构作为吸收器,通过调节结构的尺寸,吸收峰的位置能够从 $4.8 \mu\text{m}$ 调节到 $7.0 \mu\text{m}$,为光谱选择性测辐射热计的设计提供了新的方法。他们在进一步的研究中发现,引入连续的下金属层结构增大了器件的热导,使得其响应时间从 $4.6 \mu\text{s}$ 降低到 $2.5 \mu\text{s}$ ^[84]。图5(b)为Shun Jiang等人所报道的利用相变材料 VO_x 作为热敏材料,表面集成了 Au-SiN-Au 光栅型微结构的测辐射热计^[68]。该器件的特点是,其结构不仅具有波长选择性,还具有偏振选择性,仅对TM模式实现高吸收,其制备的两个器件分别实现了在 $5.2\sim 6.4 \mu\text{m}$ 和 $5.9\sim 7.5 \mu\text{m}$ 波段0.83和0.77的平均吸收率,其比探测率分别为 $6.94 \times 10^5 \text{ cm}\cdot\sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$ 和 $9.95 \times 10^5 \text{ cm}\cdot\sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$ 。图5(c)所展示的是Thang Duy Dao等人设计的集成了金属-介质-金属($\text{Au-Al}_2\text{O}_3\text{-Au}$)型超构表面吸收器的测辐射热计^[82],器件选取了a-Si作为热敏材料,并在超构表面吸收结构与热敏材料间生长了一层绝缘介质 Al_2O_3 以防漏电。结果显示,超构表面具

有窄带吸收特性,在 $3.75 \mu\text{m}$ 附近吸收率接近于 1, 高效地将光转化为热后传导到 a-Si 上, 输出电信号。器件的总厚度不超过 500 nm , 体积小从而有效降低了器件的热容, 提升了器件的性能。图 5(d) 为 Amjed Abdullah 等人所提出的超构表面集成测辐射热计^[83], 器件利用 $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{O}_{1-x-y}$ 作为热敏材料, 采用单层 Al 方块超构表面阵列作为吸收器, 并设计了支撑结构以实现良好的热绝缘。实验结果显示, 其响应率和比探测率分别达到了 $5.1 \times 10^4 \text{ V/W}$ 和 $5.4 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}} / \text{W}$, 表明了超构表面提供了 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段光谱选择性吸收, 同时金属材料的引入降低了器件的电阻, 从而降低了器件的约翰逊奈奎斯特噪声, 并有效提高了器件的性能。图 5(e) 是 Chunxu Chen 等设计的 Au-SiN_x-Au 结构的超构表面测辐射热计^[70], 顶层的 Au 结构同时作为光学结构和热敏材料, 且底部进行了悬空处理以降低热导。该结构实

现了良好的光谱选择性, 其吸收峰值位于 $8.67 \mu\text{m}$, 半高宽仅有 300 nm 。在 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 的长波波段, 实验测量与计算得到的总响应率为 198 V/W , 在 $9 \mu\text{m}$ 处的峰值响应率为 23 V/W 。通过理论计算热噪声, 最终得到了器件的比探测率为 $6 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}} / \text{W}$ 。

除了上述的金属-介质-金属的三层结构之外, 单层超构表面结构通过合理的结构设计也能实现探测器性能的增强。图 6(a) 左图是 M Mahjouri-Samani 等设计的菱形 Ag 超构表面结构^[85]。他们针对 $10.6 \mu\text{m}$ 波长设计了这种结构, 仿真结果表明对于 $10.6 \mu\text{m}$ 波长的入射光, 菱形块之间的缝隙具有超过 1000 倍的场增强效应。通过使用激光辅助化学气相沉积技术将碳纳米管选择性生长在相邻 Ag 菱形块之间的缝隙里, 一方面实现了菱形块之间的串联导通, 另一方面菱形块缝隙将电场高度局域, 大

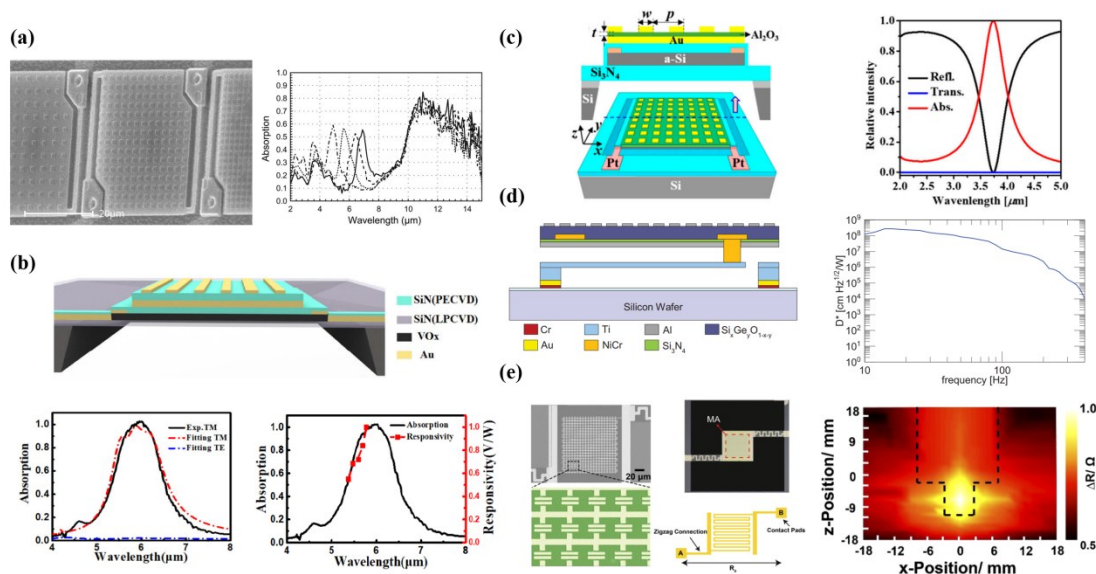


图 5 金属-介质-金属结构超构表面选择性吸收测辐射热计 (a) 集成了 Au-Si₃N₄-Au-Ti 结构的超构表面 Si 测辐射热计 (左图) 及结构宽度为 $1.25 \mu\text{m}$ (点画线), $1.5 \mu\text{m}$ (点线), $1.75 \mu\text{m}$ (虚线) 和 $2.0 \mu\text{m}$ (实线) 时的吸收光谱 (右图)^[81]; (b) 集成有偏振特性超构表面的 VO_x 测辐射热计 (上图), 与其 TE 和 TM 偏振的吸收光谱和电压响应谱 (下图)^[68]。 (c) 集成了 Au-Al₂O₃-Au 超构表面的 a-Si 测辐射热计 (左图) 及其相关的吸收光谱 (右图)^[82]。 (d) 集成了 Al 阵列超构表面的 Si_xGe_yO_{1-x-y} 测辐射热计 (左图), 及其比探测率与调制频率的关系 (右图)^[83]。 (e) 集成有偏振不敏感的 Au-SiN_x-Au 超构表面结构的测辐射热计, 顶层 Au 结构同时作为热敏材料 (左图), 与器件对高温电烙铁扫描成像 (右图)^[70]

Fig. 5 Spectrally selective bolometers based on metal-insulator-metal metasurfaces. (a) Si bolometer integrated with Au-Si₃N₄-Au-Ti metasurface (left) and the absorption spectra (right) for widths of $1.25 \mu\text{m}$ (dash dot line), $1.5 \mu\text{m}$ (dot line), $1.75 \mu\text{m}$ (dash line) and $2.0 \mu\text{m}$ (line), respectively^[81]. (b) VO_x bolometer integrated with polarization sensitive metasurface (top), and the corresponding absorption spectra and voltage spectral responsivity (bottom) under TE and TM polarizations^[68]. (c) a-Si bolometer integrated with Au-Al₂O₃-Au metasurface (left) and the corresponding absorption spectrum (right)^[82]. (d) Si_xGe_yO_{1-x-y} bolometer integrated with Al array metasurface, and the specific detectivity vs. modulation frequency (right)^[83]. (e) Au-SiN_x-Au bolometer integrated with polarization insensitive metasurface, with top Au layer serving as thermal sensitive material (left), and the scanning image of soldering iron by the fabricated single pixel bolometer (right)^[70].

大增强了碳纳米管的吸收,并有一个数量级的响应率增强(图6(a)右图),比探测率达到 $10^7 \text{ cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}} / \text{W}$ 量级。同时,由于超构表面结构产生了表面自由电荷的快速振荡,高效地通过电子一声子散射过程转化为热,并通过局域加热的方式提高碳纳米管的温度,其响应时间仅有25 ms,明显快于非超构表面结构器件的100 ms。图6(b)是Tatsuya Tsubota等人设计的用于近红外波段的Si基测辐射热计^[86]。器件的吸收结构是不同周期和大小的金属光栅结构,并在上层镀膜。通过改变金属光栅的周期使得吸收结构的共振波长在近红外波段内可调,实现了近红外波段可调的选择性吸收。实验结果表明,器件在近红外波段内具有良好的选择性探测能力,并能够通过电阻变化检测低至1%的吸收变化,可用于非制冷且无需分光的近红外波长选择性探测。图6(c)是F. B. P. Niesler等人设计的近红外波段金属测辐射热计^[69]。他们使用了带钩的金属条结构,通过结构的共振实现对近红外光的选择性强吸收,并具有偏振选择性。器件在1550

nm附近的峰值响应率超过3 V/W,热时间常数仅有134 μs 。类似的,这种条状结构在改变尺寸后,其共振波长可以调至中波甚至长波,因而具有进一步拓展到中波和长波探测的能力。Chen Chen等设计了如图6(d)所示的以Ti和Si作为热敏材料的测辐射热计^[87]。他们所使用的悬空薄膜结构厚度仅为220 nm,且单像元尺寸仅为6.2 μm ,从而大大降低了器件的热容。在小尺寸像元下,为了保证足够的吸收,他们设计了具有偏振不敏感特性的金属十字结构,使得器件在12.2 μm 附近具有超过50%的选择性吸收。器件的热时间常数与典型的商用器件相比降低了500倍,仅为16 μs ,峰值响应率为73.5 mA/W。

2.3 温差电偶

温差电偶探测器的结构与测辐射热计类似,但其热电转化的原理是塞贝克效应。塞贝克效应是指两种导体存在温差时,其两端会产生温差电势^[88]。利用塞贝克效应所制成的器件被称为温差电偶探测器。与测辐射热计不同的是,其工作时不

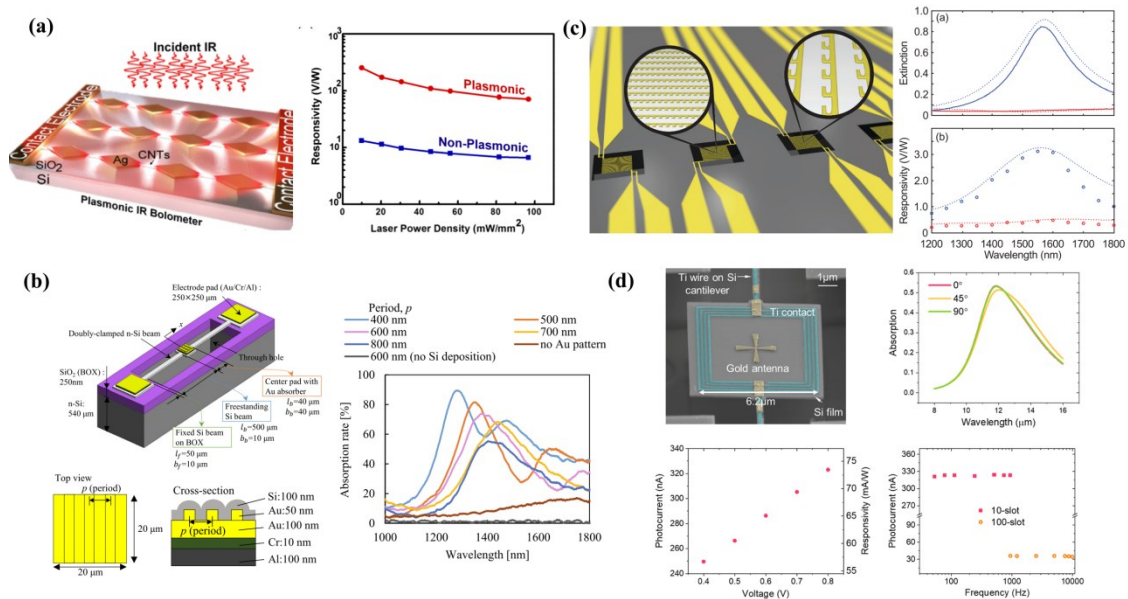


图6 超构表面选择性吸收测辐射热计 (a) 集成了Ag菱形块超构表面阵列的碳纳米管测辐射热计(左图),及其响应率与非超构表面结构对比(右图)^[85]; (b)金属光栅结构超构表面的测辐射热计(左图),与改变结构尺寸在近红外波段调控的光谱(右图)^[86]; (c)金属钩超构表面测辐射热计(左图),与其吸收光谱(右上图)和光电流能谱(右下图)^[69]; (d)金属十字结构的超构表面测辐射热计结构(左上图),与其TCR(右上图),及光电测试得到的响应率(左下图)及其与频率的关系(右下图)^[87]

Fig. 6 Spectrally selective bolometer utilizing metasurfaces (a) carbon nanotube bolometer integrated with rhombic Ag metasurface (left), and the comparison of responsivity between plasmonic and non-plasmonic device (right) ^[85]; (b) bolometer integrated with metallic grating metasurface, and the near infrared spectra of different structure sizes ^[86]; (c) bolometer integrated with hook-like Au metasurface (left), and the corresponding extinction spectra (top right) and voltage spectral responsivity (bottom right) ^[69]; (d) bolometer integrated with metallic cross metasurface (top left), and the measured TCR (top right), photocurrent-voltage characteristic (bottom left), and the measured photocurrent vs. modulation frequency (bottom right) ^[87]

需要额外的恒定电压或电流,且可以通过串联多个结组成温差电堆来增大响应的电压。对于这类型的器件,衡量材料性能的重要参数是塞贝克系数,即温差产生的电势与温差的比值:

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T}. \quad (20)$$

温差电偶通常是利用两种不同塞贝克系数的材料接触形成结来实现的。常用的高塞贝克系数的金属材料包括铋和锑,其单种材料的塞贝克系数约为几十 $\mu\text{V/K}$;半导体材料包括 n 型与 p 型硅,碲化铋,碲化锑等,单种材料的塞贝克系数为一百到两三百 $\mu\text{V/K}$ 。一般而言,半导体材料具有相对更好的性能。

温差电堆的电压响应率可表示为:

$$R_V = \frac{N\eta S}{\sqrt{G_m^2 + \omega^2 C_m^2}}, \quad (21)$$

其中, N 为串联的温差电偶数量。为了得到尽可能高的响应率,需要增强探测器的吸收,并尽可能降低热容和热导。因此,亚波长人工微结构的集成也能够提升温差电偶的性能。

Shinpei Ogawa 等人设计了一种集成了金属孔阵列的温差电探测器(图 7(a))^[89]。这种金属孔阵列能够通过调节几何结构尺寸实现在 $4\sim 7\ \mu\text{m}$ 波段内可调的强吸收,从而实现光谱选择性探测。该器件使用 p 型和 n 型多晶硅形成结来实现温差探测。吸收器在吸收热辐射后升温,使得与吸收器直接相连的热端温度升高,与冷端产生温差,从而输出电信号。器件在特定波长的吸收率接近 1,峰值电压响应率达到 $160\ \text{mV/W}$ 。图 7(b)为 Anand S. Gawarikar 等人所报道的温差电堆探测器^[64],器件采用了由 Ge-NaF-Cr 反射层和 Ge-Ni 吸收层组成的法布里珀罗腔结构,对 $10\ \mu\text{m}$ 附近的红外光实现了类法布里珀罗共振,吸收峰的半高宽约为 $2.5\ \mu\text{m}$ 。通过悬空实现了良好的热绝缘,并选取了高塞贝克系数的 SbTe-BiTe 作为热电偶材料,实现了 $3 \times 10^9\ \text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$ 的峰值比探测率。图 7(c)是 Alexander Lochbaum 等设计的用于针对二氧化碳气体传感的器件^[90]。器件由一个热辐射光源和一个温差电偶探测器组成。热辐射光源与温差电偶探测器均集成了金属十字阵列的结构,以实现特定气体的窄带探测。集成了吸收器结构的温差电偶实现了对 $4.23\ \mu\text{m}$ 的窄带探测, Q 值达到 18。器件的响应率和比探测率分别达到了 $140\ \text{V/W}$ 和 $4 \times$

$10^7\ \text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$,对二氧化碳气体进行探测的灵敏度为 $22.4\ \text{ppm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。图 7(d)是 Aapo Varpula 等人设计的具有网格结构的长波温差电偶探测器^[91]。该器件采用 P 型与 N 型多晶硅作为热电偶材料,并分别集成了 TiW 和 TiN 的网格结构作为吸收器,吸收结构实现了 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段的选择性吸收。对于像元尺寸为 $25\ \mu\text{m}$ 的器件,集成 TiW 和 TiN 吸收结构后,响应率分别为 $179\ \text{V/W}$ 和 $494\ \text{V/W}$,比探测率分别为 $1.5 \times 10^7\ \text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$ 和 $8.7 \times 10^7\ \text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$,热时间常数仅为 $66\ \mu\text{s}$ 和 $190\ \mu\text{s}$ 。

近年来,利用新材料和新方法还进一步制备得到了一些新型温差电偶探测器。Mingyu Zhang 等人制备和测试了如图 8(a)所示的碳纳米管温差电偶探测器^[92]。在将空心环的结构引入到顶层铝电极后,器件的仿真结果表明其在 $4\sim 12\ \mu\text{m}$ 宽波段均具有较高的吸收,覆盖了两个大气窗口,而抑制了其 余波段的吸收。光电测试的结果则进一步表明,在集成了超构表面结构后,器件的比探测率提高了 6 倍。图 8(b)是 Alireza Safaei 设计的基于塞贝克效应的长波热探测器^[93]。与传统的温差电偶探测器不同,这种热电子机制的探测器依赖于非平衡态下电子的温度梯度而非晶格,因此具有非常快的响应速度。由于石墨烯中的电子-声子相互作用很弱,热电子不会迅速将能量传递给晶格,因此能够通过热电子机制形成塞贝克电压。他们将石墨烯的一半引入六角密排的孔结构,通过等离子激元效应增强吸收,实现对 $8\ \mu\text{m}$ 附近的选择性强吸收,半高宽约为 $2\ \mu\text{m}$ 。无结构区域吸收弱,从而在整层石墨烯中形成载流子的温度梯度,实现探测。他们制备的器件响应率达到 $2900\ \text{V/W}$,比探测率达到 $1.1 \times 10^9\ \text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$,且响应时间仅为 $100\ \text{ns}$ 。图 8(c)为 Mahdiyeh Abbasi 等人所提出的新型温差电偶探测器^[94]。与传统温差电偶探测器通常使用的两种塞贝克系数不同的材料成结的方法不同,该器件基于单一材料,并采用了非对称结构设计。在纳米尺寸下,材料的塞贝克系数依赖于几何形状。因此,仅使用一种材料,通过设计几何尺寸,能得到不同的塞贝克系数。然而,在纳米尺寸下为了实现光的强吸收,需要进一步结合超构表面的光学吸收设计。通过改变纳米线的宽度可以实现对不同波长的强共振选择性吸收。对于特定波长的入射光,纳米线的上下两端的宽度不同,仅有一端实现强吸收成为热端,另一端则没有共振则成为冷端,实现了温差。

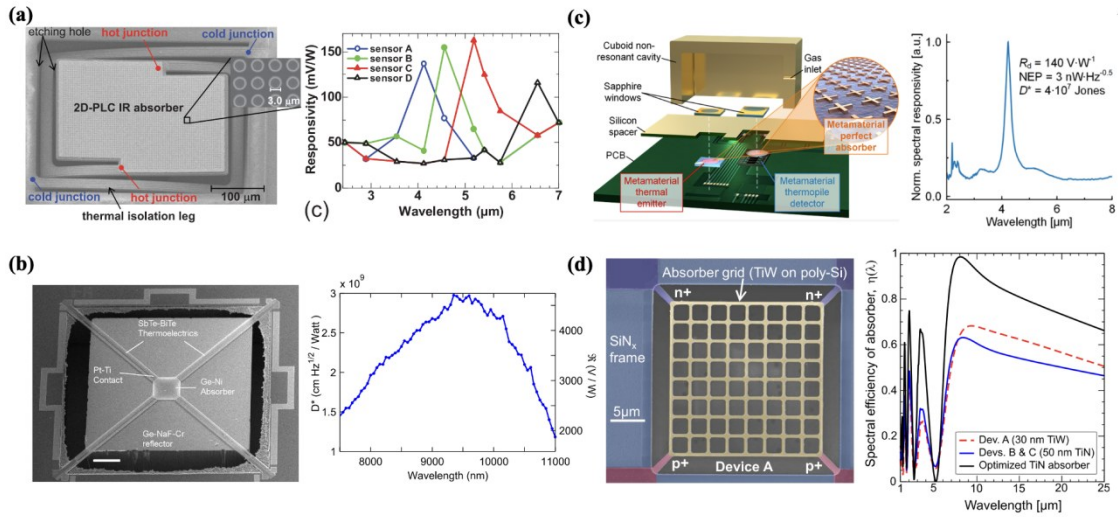


图7 基于塞贝克效应的光谱选择性热敏探测器 (a)集成金属孔阵列吸收器的光谱选择性探测器(左图),与不同几何参数的吸收器对应的响应率与波长的关系(右图)^[89]; (b)法布里珀罗腔结构的光谱选择性温差电偶探测器(左图),及其比探测率与波长的关系(右图)^[64]; (c)用于气体探测的具有表面金属十字超构表面阵列的温差电偶探测器(左图),与其归一化电压响应率谱(右图)^[90]; (d)集成有网格结构的多晶硅温差电偶探测器(左图),与其几种不同尺寸吸收结构的吸收光谱(右图)^[91]

Fig. 7 Spectrally selective thermal detector utilizing Seebeck effect (a) spectrally selective thermal detector integrated with metallic holes array metasurface (left), and the responsivity of varying geometrical parameters vs. wavelength (right)^[89]; (b) spectrally selective thermal couple detector with Fabry - Pérot cavity (left), and specific detectivity vs. wavelength (right)^[64]; (c) thermal couple detector integrated metallic cross metasurface for gas sensing (left), and the normalized voltage spectral responsivity (right)^[90]; (d) poly-Si thermal couple detector integrated with mesh grid metasurface (left), and the absorption spectra for the nanostructures with different geometric sizes (right)^[91]

因此,此器件结合了这两种因素设计了合理的非对称结构,实现单一材料两种塞贝克系数以及对光的非对称吸收。当器件被光照射时,非对称性结构可产生光电压的净输出。

2.4 热释电探测器

热敏探测器的另一种类型是热释电探测器。热释电探测器利用了热释电效应,即温度变化时,晶体内的极化发生变化,从而在表面产生电荷。与其他两种热探测器不同,热释电探测器是一种交流器件,探测的是温度的变化^[2]。大部分热释电材料也是铁电材料,其电位移矢量 D 是自发极化(P_s)和场致极化($\epsilon_o \epsilon_r E$)的贡献之和^[2]:

$$D = P_s(T) + \epsilon_o \int_0^E \epsilon_r(E', T) dE'. \quad (22)$$

衡量热释电材料在温度变化下的极化变化的物理量为热释电系数。热释电系数 p 定义为电位移 D 随温度 T 的变化,且在大多数情况下电场较弱,场致极化项可以忽略:

$$p = \frac{dD}{dT} = \frac{dP_s}{dT} + \epsilon_o \int_0^E \frac{d\epsilon_r}{dT} dE' \approx \frac{dP_s}{dT}. \quad (23)$$

热释电探测器在工作时,温度变化引起极化变化,从而在表面产生电荷,并在外电路形成电流,其信号的大小取决于材料温度的变化大小以及热释电系数的大小。铁电材料的热释电系数相对较高,约为一两百 $\mu\text{C}/\text{m}^2\text{K}$,如钛酸钡,铌酸锂等;而非铁电材料的热释电系数普遍较低,在十 $\mu\text{C}/\text{m}^2\text{K}$ 以下,其中硫酸锂的系数相对高,总热释电系数为 $86.3 \mu\text{C}/\text{m}^2\text{K}$ 。将热力学给出的温度变化即式(3)代入,可得温度变化产生的光电流为:

$$I_{ph} = \frac{dQ}{dt} = A \frac{dP_s}{dt} = Ap \frac{dT}{dt} = Ap \frac{\omega \eta \Phi_o}{(G_{th}^2 + \omega^2 C_{th}^2)^{1/2}}, \quad (24)$$

其中, Q 为热释电电荷, A 为探测器的面积, p 为热释电系数垂直于电极方向的分量, dT/dt 为温度随时间的变化率。则可得热释电探测器的响应率:

$$R_i = \frac{I_{ph}}{\Phi_o} = pA \frac{\omega \eta}{G_{th} \sqrt{1 + \omega^2 \tau_{th}^2}}. \quad (25)$$

从上式(25)可知,在低频区域($\omega \ll 1/\tau_{th}$)的响应率与频率成正比。在高频区域的响应率为常数。因此,热释电探测器的响应率在高频下的衰减比测辐射热计和温差电偶更慢,因而具有更高的截止频

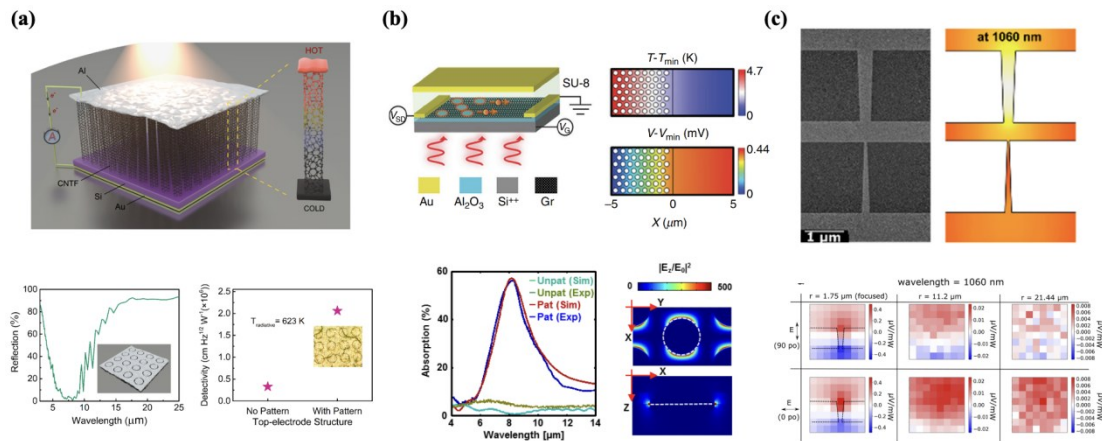


图8 超构表面选择性吸收新型温差电偶探测器 (a) Al空心环结构的超构表面阵列的碳纳米管温差电偶探测器(上图),及其反射光谱(左下图),和比探测率与非超构表面结构对比(右下图)^[92]; (b)热电子机制的密排圆孔非对称结构石墨烯温差电偶探测器(上图),及其吸收光谱与场分布(下图)^[93]; (c)单种金属材料非对称结构的温差电偶探测器(上图),及光电流随光斑位置的空间分布(下图)^[94]

Fig. 8 New types of spectrally selective thermal couple detector utilizing metasurfaces (a) Carbon nanotube integrated with Al hollow ring metasurface (top), and the corresponding reflection spectrum (bottom left), and comparison of detectivity between patterned and unpatterned devices (bottom right)^[92]; (b) graphene hot-carrier Seebeck detector integrated with \square asymmetric hexagonal holes array metasurface (top), and absorption spectra and electric field distributions (bottom)^[93]; (c) \square asymmetric single metal thermal couple detector (top) and the spatial distribution of photocurrent with spot position (bottom)^[94]

率和更快的响应速度。然而,受限于光吸收后的热扩散过程,实际传统宽谱吸收结构的热释电探测器的响应时间约为 ns 到 μ s 量级^[6]。人工微结构由于具有深亚波长的特性,能够缩小吸收结构的尺度,降低热从吸收结构扩散到热释电材料的时间,从而加快器件的响应。

对于短波与中波波段的热释电探测器,近期的研究工作通过引入随机分布的结构以及周期性的金属-介质-金属阵列结构已经实现了良好的超构表面集成。Jon W. Stewart 等使用随机分布的 Ag 纳米方块结构制备了超构表面集成的热释电探测器(图9(a))^[95],热释电材料为 AlN。制备的器件可以在可见到近红外波段实现选择性的高吸收,并通过改变 Ag 纳米方块的几何尺寸能够调节吸收的峰值波长。由于结构深亚波长的特性大大降低了从吸收到导热过程所需的时间,其响应速度非常快,响应时间半高宽低于 1.7 ns,上升沿仅有 700 ps。仿真计算结果表明其响应时间半高宽经过优化能达到 25 ps,上升沿仅有 6 ps。器件的响应率为 0.18 V/W,比探测率为 $3.9 \times 10^5 \text{ cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}} / \text{W}$ 。Kaisheng Zhang 等设计了如图9(b)所示的超构表面钽酸锂热释电探测器^[96]。他们使用金属-介质-金属三层结构作为吸收结构,其中顶层金属为十字阵列结构,

实现了在 $3.16 \mu\text{m}$ 处 95% 的窄带高吸收,其半高宽为 $0.7 \mu\text{m}$ 。器件的光电测试结果表明,器件的响应率达到了 2200 V/W,在 26.3 Hz 调制频率下的比探测率为 $3.2 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}} / \text{W}$ 。Anh Tung Doan 等设计并制备了如图9(c)所示的 Al-Al₂O₃-Al 圆柱的吸收结构^[79],同时底层 Al 作为器件的上电极,其下则为 ZnO 热释电材料。通过改变顶层 Al 圆柱的几何尺寸,可以在整个中波波段范围内进行调节,实现对不同波长的高吸收。此器件实现了中波波段 100~140 mV/W 的响应率,其半高宽为 900~1200 nm。

在更长的波段上,超构表面结构集成的热释电探测器也能够实现针对气体吸收的 5~8 μm 波段,和长波大气窗口增强探测。Xiaochao Tan 等设计了如图10(a)所示的一种用于多种气体检测的超构表面钽酸锂热释电探测器^[80]。由于不同的气体在红外波段具有不同的特征吸收峰,因此要求探测器具有光谱选择性。具有超构表面吸收结构的热释电探测器可以灵活设计结构的几何尺寸,从而成功设计和制备了针对 2~8 μm 共 8 种气体的特征吸收峰的窄带超构表面吸收结构。不同的超构表面吸收结构能够集成在同一片材料上,同时进行多波段、多种气体检测。器件在 5 Hz 调制下的电压响应率

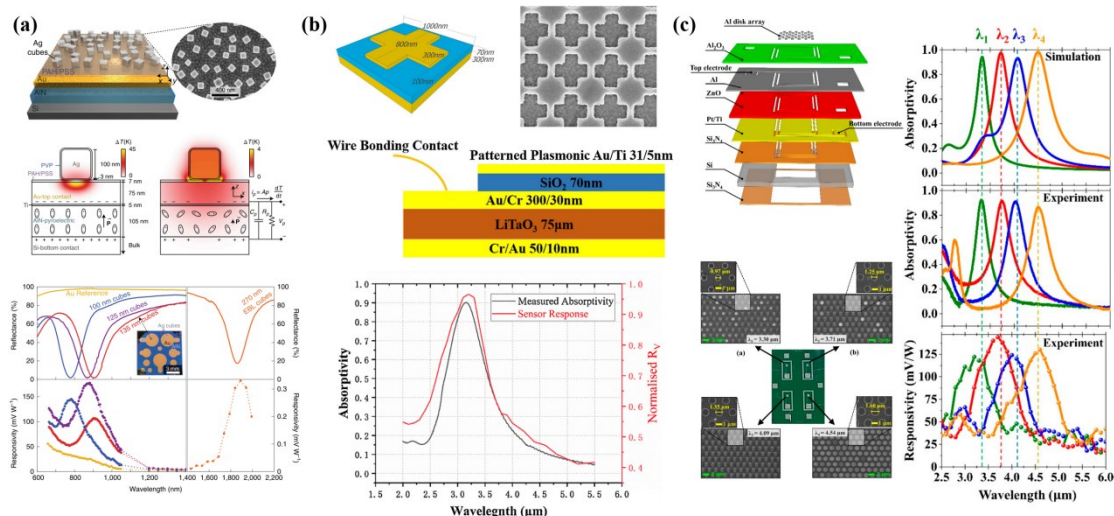


图9 超构表面集成的短波及中波热释电探测器 (a)随机分布的Ag方块集成的热释电探测器示意图与仿真得到的温度分布(上图)^[95],及其不同尺寸方块的反射光谱与光电流能谱(下图);(b)金属-介质-金属十字阵列结构的超构表面热释电探测器(上图),及其吸收光谱与光电压响应率谱(下图)^[96];(c)多波长探测的Al-Al₂O₃-Al圆柱结构器件的示意图(左图),与吸收光谱及光电压响应率谱(右图)^[79]

Fig. 9 Near-infrared and mid-infrared pyroelectric detectors integrated with metasurfaces (a) pyroelectric detectors integrated with random Ag cube and the simulated thermal impulse response (top), and the reflection spectra and photovoltage spectra of several different detectors (bottom) ^[95]; (b) pyroelectric detectors integrated with metal-insulator-metal cross metasurface (top), and the absorption and photovoltage spectra (bottom) ^[96]; (c) pyroelectric detectors for multi-wavelength detection integrated with Al-Al₂O₃-Al cylinder metasurface (left), and the absorption and photovoltage spectra (right) ^[79]

为90 V/W,噪声等效功率 $1.9 \times 10^{-8} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。图10(b)是Kansho Yamamoto等人设计的超构表面光谱选择性热释电探测器^[97]。他们使用AlN作为热释电材料,并在上电极引入金属圆孔阵列的结构。通过调节上表面金属孔阵列的周期,可以调节共振波长,实现不同波段的高吸收,吸收峰半高宽约 $1 \mu\text{m}$ 。光电测试的结果表明,使用Si窗片的情况下,上电极的结构能够将响应增大2.3倍。Jonathan Y. Suen等设计了如图10(c)的上电极结构^[98],这种结构同时还作为光吸收层,在长波波段实现共振强吸收。通过吸收器吸收的热传导到其下的仅有575 nm厚度的LiNbO₃热释电材料上,最终产生电信号。此器件实现了在长波 $10.73 \mu\text{m}$ 处仅有560 nm半高宽的窄带选择性高吸收,吸收率达到86%,室温下的时间常数为28.9 ms,比探测率在 $10^7 \text{ cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$ 量级。光电流能谱与吸收光谱符合,证明了光学设计对于光电转化的有效性。

3 总结与展望

传统的宽谱响应热敏探测器由于具有相对比较大的辐射热导,因此也就会具有相对比较大的本底噪声,最终限制了器件性能的上限。研究表明,

窄带光谱选择性吸收的热敏探测器可以突破这一限制。人工微结构材料体系可在亚波长尺度范围内操控光子,实现光谱选择性吸收。集成人工微结构超构表面的光谱选择性热敏探测器可降低辐射热导,降低器件的本底噪声,提升了器件的性能。此外,超构表面的深亚波长特性和强局域效应还能够减小器件及其支撑结构的质量,从而降低器件热容,缩短器件的响应时间和增大响应率。对于仅需要在特定波段进行探测的应用,如大气窗口波段内的探测、气体红外传感等,集成具有光谱选择性的人工微结构是提高热敏探测器性能的有效途径。尽管理论分析表明光谱选择性热敏探测器的比探测率能够达到 $10^{11} \text{ cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$ 量级,但现有报导的实际器件性能与理论极限还有很大距离,还有很大的上升空间。目前的相关研究工作依然有限,未来仍需要更加深入地开展相关研究,包括建立与实际更加符合的理论模型以及进行更多与光谱选择性热敏探测器相关的实验,以期达到或接近理论预测的极限。现有的工作所达到的最高性能是基于法布里珀罗腔结构的光谱选择性热探测器(图7(b)),其比探测率达到了 $10^9 \text{ cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$ 。如前文所述,尽管超构表面结构相比于法布里珀罗腔结构具有

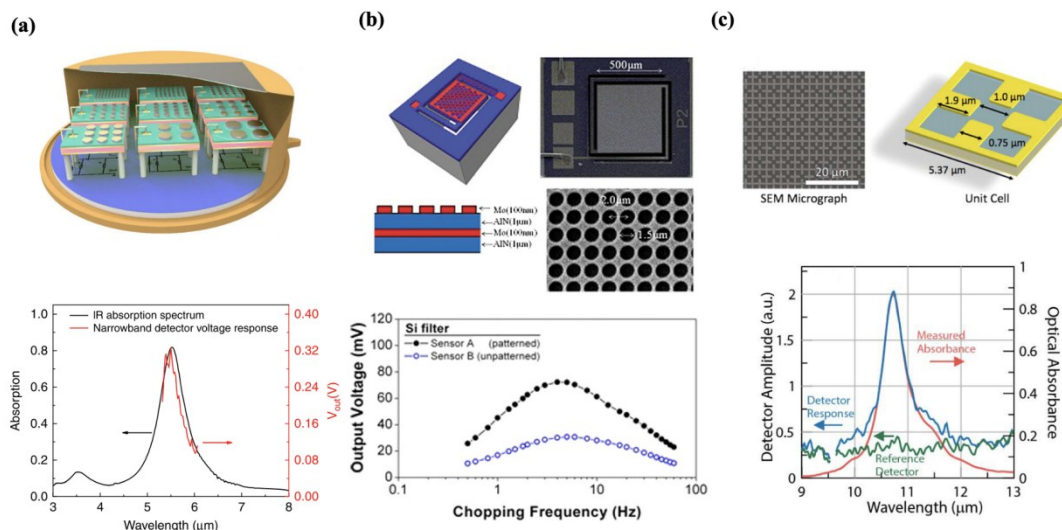


图 10 超构表面集成的气体探测与长波热释电探测器 (a) 可用于多种气体探测的光谱选择性圆盘阵列结构超构表面热释电探测器 (上图), 及其吸收光谱 (下图)^[80]; (b) 金属圆孔阵列结构的超构表面热释电探测器 (上图), 与 Si 窗片下超表面与无超表面的性能对比 (下图)^[97]; (c) 超构表面的电子显微镜照片和微结构单元示意图 (上图), 吸收光谱与光电压响应谱 (下图)^[98]

Fig. 10 pyroelectric detectors integrated with metasurfaces for gas sensing and long-wave infrared detection (a) spectrally selective pyroelectric detectors integrated with disk array metasurface (top), and the absorption spectrum (bottom)^[80]; (b) pyroelectric detector integrated with holes array metasurface (top), and the comparison of output voltage between patterned and unpatterned device (bottom)^[97]; (c) a scanning electron microscope image and unit cell of metasurface (top), and absorption and photovoltage spectra (bottom)^[98]

众多优势, 集成超构表面结构的相关实验工作尚未充分挖掘其潜力, 其性能仍未超过法布里珀罗腔结构的热敏探测器。因此, 未来的工作还应继续利用好超构表面结构的波长选择性和结构尺寸深亚波长的特性, 借鉴超构表面调控电磁波的相关工作, 设计具有更小尺寸和更强局域效应的超构表面结构, 集成在热敏探测器上进一步减小器件的热容和热导, 实现更高的比探测率。总之, 人工微结构微纳光子学的发展为研发下一代更高性能的红外探测器提供了新的机遇。

References

- [1] NASA Langley Research Center, National Aeronautics and Space Administration. Electromagnetic Spectrum Diagram [EB/OL]. <https://myasadata.larc.nasa.gov/basic-page/electromagnetic-spectrum-diagram>.
- [2] Rogalski A. Infrared Detectors [M]. Second edition. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [3] Rogalski A. History of Infrared Detectors [J]. *Opto-Electronics Review*, 2012, **20**(3): 279 - 308.
- [4] Yadav P V K, Yadav I, Ajitha B, *et al*. Advancements of Uncooled Infrared Microbolometer Materials: A Review [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, **342**: 113611.
- [5] Yu L, Tang L, Yang W, *et al*. Research progress of uncooled infrared detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, **50**(1): 20211013 (余黎静, 唐利斌, 杨文运, 等 非制冷红外探测器研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2021, **50**(1): 20211013).
- [6] Stewart J W, Wilson N C, Mikkelsen M H. Nanophotonic Engineering: A New Paradigm for Spectrally Sensitive Thermal Photodetectors [J]. *ACS Photonics*, 2021, **8**(1): 71 - 84.
- [7] Hoervers H F C, Bento A C, Bruijn M P, *et al*. Thermal Fluctuation Noise in a Voltage Biased Superconducting Transition Edge Thermometer [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, **77**(26): 4422 - 4424.
- [8] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-Generation Infrared Photodetector Arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105**: 091101.
- [9] Rogalski A. Infrared Detectors: An Overview [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2002, **43**(3 - 5): 187 - 210.
- [10] Talghader J J, Gawarikar A S, Shea R P. Spectral Selectivity in Infrared Thermal Detection [J]. *Light: Science and Applications*, 2012, **1**: e24.
- [11] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, *et al*. Perfect Metamaterial Absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**: 207402.
- [12] Ding F, Cui Y, Ge X, *et al*. Ultra-Broadband Microwave Metamaterial Absorber [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**: 103506.
- [13] 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**: 241103.
- [14] Pan X, Xu H, Yu W, *et al*. Flexible metasurface-based Terahertz super-absorber [J]. *Journal of Infrared and Mil-*

- limeter Waves, 2019, **38**(1): 50 - 54.(潘晓航, 许昊, 俞伟伟, 等. 柔性可弯曲人工超构材料太赫兹波超吸收研究[J]. 红外与毫米波学报), 2019, **38**(1): 50 - 54.
- [15] Liu N, Mesch M, Weiss T, *et al.* Infrared Perfect Absorber and Its Application as Plasmonic Sensor[J]. *Nano Letters*, 2010, **10**(7): 2342 - 2348.
- [16] Hao J, Wang J, Liu X, *et al.* High Performance Optical Absorber Based on a Plasmonic Metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**: 251104.
- [17] Liu X, Starr T, Starr A F, *et al.* Infrared Spatial and Frequency Selective Metamaterial with Near-Unity Absorbance[J]. *Physical Review Letters*, 2010, **104**: 207403.
- [18] Lu J, Yu W, Zhang X, *et al.* Large-area high-performance near-infrared absorber based on plasmonic nanostructures[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2018, **37**(6): 740 - 745.(陆加良, 俞伟伟, 张晓东, 等. 基于人工微结构的大面积高效率近红外吸收器[J]. 红外与毫米波学报), 2018, **37**(6): 740 - 745.
- [19] Lu Y, Xu H, Li X, *et al.* Visible-near infrared light superabsorption of aluminum-based planar metamaterial[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2021, **40**(3): 314 - 320.(卢玥, 许昊, 李晓温, 等. 铝基平面超构材料可见-近红外光超吸收研究[J]. 红外与毫米波学报), 2021, **40**(3): 314 - 320.
- [20] Yu W, Lu Y, Peng F, *et al.* Localized surface plasmon resonance based tunable dual-band absorber within 1-10 μm [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2019, **38**(6): 790 - 797.(俞伟伟, 卢玥, 彭芳, 等. 基于等离子体共振1-10 μm 波段内可调节的双波段超吸收研究[J]. 红外与毫米波学报), 2019, **38**(6): 790 - 797.
- [21] Moreau A, Ciraci C, Mock J J, *et al.* Controlled-Reflectance Surfaces with Film-Coupled Colloidal Nanoantennas[J]. *Nature*, 2012, **492**: 86 - 89.
- [22] Ekmel Ozbay. Plasmonics: Merging Photonics and Electronics at Nanoscale Dimensions[J]. *Science*, 2006, **311**: 189 - 194.
- [23] Sun S, He Q, Hao J, *et al.* Electromagnetic Metasurfaces: Physics and Applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2019, **11**(2): 380.
- [24] Genevet P, Capasso F, Aieta F, *et al.* Recent Advances in Planar Optics: From Plasmonic to Dielectric Metasurfaces[J]. *Optica*, 2017, **4**(1): 139.
- [25] Chen H T, Taylor A J, Yu N. A Review of Metasurfaces: Physics and Applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2016, **79**: 076401.
- [26] Wei J, Ren Z, Lee C. Metamaterial Technologies for Miniaturized Infrared Spectroscopy: Light Sources, Sensors, Filters, Detectors, and Integration[J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, **128**: 240901.
- [27] Watts C M, Liu X, Padilla W J. Metamaterial Electromagnetic Wave Absorbers[J]. *Advanced Materials*, 2012, **24**: OP98 - OP120.
- [28] Tong J C, Suo F, Ma J H Z, *et al.* Surface Plasmon Enhanced Infrared Photodetection[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2019, **2**(1): 180026.
- [29] Dorodnyy A, Salamin Y, Ma P, *et al.* Plasmonic Photodetectors[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, **24**(6): 4600313.
- [30] Zhu Y, Xu H, Yu P, *et al.* Engineering Plasmonic Hot Carrier Dynamics toward Efficient Photodetection[J]. *Applied Physics Reviews*, 2021, **8**: 021305.
- [31] Brongersma M L, Halas N J, Nordlander P. Plasmon-Induced Hot Carrier Science and Technology[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, **10**(1): 25 - 34.
- [32] Li W, Valentine J G. Harvesting the Loss: Surface Plasmon-Based Hot Electron Photodetection[J]. *Nanophotonics*, 2017, **6**(1): 177 - 191.
- [33] Chen H, Liu H, Zhang Z, *et al.* Nanostructured Photodetectors: From Ultraviolet to Terahertz[J]. *Advanced Materials*, 2016, **28**(3): 403 - 433.
- [34] Yao Y, Shankar R, Rauter P, *et al.* Mid-Infrared Graphene Detectors with Antenna Enhanced Light Absorption and Photo-Carrier Collection[J]. *Nano Letters*, 2014, **14**: 3749 - 3754.
- [35] Tong J, Tobing L Y M, Qiu S, *et al.* Room Temperature Plasmon-Enhanced InAs_{0.91}Sb_{0.09}-Based Heterojunction n-i-p Mid-Wave Infrared Photodetector[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, **113**: 011110.
- [36] Zhou Z, Lin H, Pan X, *et al.* Surface plasmon enhanced InAs-based mid-wavelength infrared photodetector[J]. *Applied Physics Letters*, 2023, **122**(9): 091105.
- [37] Wu W, Bonakdar A, Mohseni H. Plasmonic Enhanced Quantum Well Infrared Photodetector with High Detectivity[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**: 161107.
- [38] Miyazaki H T, Mano T, Kasaya T, *et al.* Synchronously Wired Infrared Antennas for Resonant Single-Quantum-Well Photodetection up to Room Temperature[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**: 565.
- [39] Nordin L, Petluru P, Kamboj A, *et al.* Ultra-Thin Plasmonic Detectors[J]. *Optica*, 2021, **8**(12): 1545.
- [40] Lee S J, Ku Z, Barve A, *et al.* A Monolithically Integrated Plasmonic Infrared Quantum Dot Camera[J]. *Nature Communications*, 2011, **2**: 286.
- [41] Dang T H, Abadie C, Khalili A, *et al.* Broadband Enhancement of Mid-Wave Infrared Absorption in a Multi-Resonant Nanocrystal-Based Device[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, **10**: 2200297.
- [42] Chen M, Shao L, Kershaw S V., *et al.* Photocurrent Enhancement of HgTe Quantum Dot Photodiodes by Plasmonic Gold Nanorod Structures[J]. *ACS Nano*, 2014, **8**(8): 8208 - 8216.
- [43] Knight M W, Sobhani H, Nordlander P, *et al.* Photodetection with Active Optical Antennas[J]. *Science*, 2011, **332**: 702 - 704.
- [44] Chalabi H, Schoen D, Brongersma M L. Hot-Electron Photodetection with a Plasmonic Nanostripe Antenna[J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(3): 1374 - 1380.
- [45] Hoang C V., Hayashi K, Ito Y, *et al.* Interplay of Hot Electrons from Localized and Propagating Plasmons[J]. *Nature Communications*, 2017, **8**: 771.
- [46] Ma W, Jia D, Wen Y, *et al.* Diode-Based Microbolometer with Performance Enhanced by Broadband Metamaterial Absorber[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(13): 2974.
- [47] Khan M W, Sullivan J M, Lee J, *et al.* High Sensitivity Long-Wave Infrared Detector Design Based on Integrated Plasmonic Absorber and VO Nanobeam[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2021, **57**(4): 4000211.

- [48] Smith E M, Nath J, Ginn J, *et al.* Responsivity Improvements for a Vanadium Oxide Microbolometer Using Sub-wavelength Resonant Absorbers [J]. *Infrared Technology and Applications XLII*, 2016, **9819**: 98191Q.
- [49] Erturk O, Battal E, Kucuk S E, *et al.* A Plasmonically Enhanced Pixel Structure for Uncooled Microbolometer Detectors [J]. *Infrared Technology and Applications XXX-IX*, 2013, **8704**: 87041E.
- [50] Wu Y, Qu Z, Osman A, *et al.* Mid-Infrared Nanometallic Antenna Assisted Silicon Waveguide Based Bolometers [J]. *ACS Photonics*, 2019, **6**(12): 3253 - 3260.
- [51] Safaei A, Modak S, Lee J, *et al.* Multi-Spectral Frequency Selective Mid-Infrared Microbolometers [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(25): 32931 - 32940.
- [52] Yeh T-H, Tsai C-K, Chu S-Y, *et al.* Performance Improvement of Y-Doped VO_x Microbolometers with Nanomesh Antireflection Layer [J]. *Optics Express*, 2020, **28**(5): 6433.
- [53] Hyun J K, Ahn C W, Kim W C, *et al.* Broadband Enhancement of Infrared Absorption in Microbolometers Using Ag Nanocrystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **107**: 253102.
- [54] Xu Q, Zhou Z, Tan C, *et al.* Spectrally selective visible microbolometer based on planar subwavelength thin films [J]. *Nanoscale Advances*, 2023, **5**: 2054.
- [55] Lee J, Kwak M, Kim K, *et al.* CMOS-Compatible Mid-Infrared MEMS Thermopile Integrated with an RTD for Flame Sensing in IoT Application [J]. *2019 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS and MOEMS*, DTIP 2019, **2019**: 1 - 5.
- [56] Ogawa S, Takagawa Y, Kimata M. Broadband Polarization-Selective Uncooled Infrared Sensors Using Tapered Plasmonic Micrograting Absorbers [J]. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2018, **269**: 563 - 568.
- [57] He Y, Wang Y, Li T. Simultaneously Controlling Heat Conduction and Infrared Absorption with a Textured Dielectric Film to Enhance the Performance of Thermopiles [J]. *Microsystems and Nanoengineering*, 2021, **7**: 36.
- [58] Lu F, Lee J, Jiang A, *et al.* Thermopile Detector of Light Ellipticity [J]. *Nature Communications*, 2016, **7**: 12994.
- [59] Zolotavin P, Evans C, Natelson D. Photothermoelectric Effects and Large Photovoltages in Plasmonic Au Nanowires with Nanogaps [J]. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2017, **8**(8): 1739 - 1744.
- [60] Dao T D, Ishii S, Yokoyama T, *et al.* Hole Array Perfect Absorbers for Spectrally Selective Midwavelength Infrared Pyroelectric Detectors [J]. *ACS Photonics*, 2016, **3**(7): 1271 - 1278.
- [61] Goldsmith J H, Vangala S, Hendrickson J R, *et al.* Long-Wave Infrared Selective Pyroelectric Detector Using Plasmonic near-Perfect Absorbers and Highly Oriented Aluminum Nitride [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, **34**(9): 1965.
- [62] Zhu Y, Wang B, Deng C, *et al.* Photothermal-Pyroelectric-Plasmonic Coupling for High Performance and Tunable Band-Selective Photodetector [J]. *Nano Energy*, 2021, **83**: 105801.
- [63] Wei L, Monshat H, Qian J, *et al.* Tunable Resonant-Photopyroelectric Detector Using Chalcogenide-Metal-Fluoropolymer Nanograting [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, **9**: 2101147.
- [64] Gawarikar A S, Shea R P, Talghader J J. High Detectivity Uncooled Thermal Detectors with Resonant Cavity Coupled Absorption in the Long-Wave Infrared [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, **60**(8): 2586 - 2591.
- [65] Gawarikar A S, Shea R P, Mehdaoui A, *et al.* Radiation Heat Transfer Dominated Microbolometers [J]. *2008 IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics*, OPT MEMS, 2008: 178 - 179.
- [66] Wang Y, Potter B J, Talghader J J. Coupled Absorption Filters for Thermal Detectors [J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(13): 1945 - 1947.
- [67] Meinig M, Kurth S, Seifert M, *et al.* Tunable Fabry-Pérot Interferometer with Subwavelength Grating Reflectors for MWIR Microspectrometers [J]. *Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics IX*, 2016, **9759**: 97590W.
- [68] Jiang S, Li J, Li J, *et al.* Metamaterial Microbolometers for Multi-Spectral Infrared Polarization Imaging [J]. *Optics Express*, 2022, **30**(6): 9065.
- [69] Niesler F B P, Gansel J K, Fischbach S, *et al.* Metamaterial Metal-Based Bolometers [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**: 203508.
- [70] Chen C, Huang Y, Wu K, *et al.* Polarization Insensitive, Metamaterial Absorber-Enhanced Long-Wave Infrared Detector [J]. *Optics Express*, 2020, **28**(20): 28843.
- [71] Meinzer N, Barnes W L, Hooper I R. Plasmonic Meta-Atoms and Metasurfaces [J]. *Nature Photonics*, 2014, **8**(12): 889 - 898.
- [72] Chen H T, Taylor A J, Yu N. A Review of Metasurfaces: Physics and Applications [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2016, **79**: 076401.
- [73] Ding F, Pors A, Bozhevolnyi S I. Gradient Metasurfaces: A Review of Fundamentals and Applications [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2018, **81**: 026401.
- [74] Yang J, Gurung S, Bej S, *et al.* Active Optical Metasurfaces: Comprehensive Review on Physics, Mechanisms, and Prospective Applications [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2022, **85**: 036101.
- [75] Qin J, Jiang S, Wang Z, *et al.* Metasurface Micro/Nano-Optical Sensors: Principles and Applications [J]. *ACS Nano*, 2022, **16**(8): 11598 - 11618.
- [76] Zheludev N I, Kivshar Y S. From Metamaterials to Metadevices [J]. *Nature Materials*, 2012, **11**(11): 917 - 924.
- [77] Glybovski S B, Tretyakov S A, Belov P A, *et al.* Metasurfaces: From Microwaves to Visible [J]. *Physics Reports*, 2016, **634**: 1 - 72.
- [78] Maier S A. Plasmonics: Fundamentals and Applications [M]. New York: Springer, 2007.
- [79] Doan A T, Yokoyama T, Dao T D, *et al.* A MEMS-Based Quad-Wavelength Hybrid Plasmonic-Pyroelectric Infrared Detector [J]. *Micromachines*, 2019, **10**.
- [80] Tan X, Zhang H, Li J, *et al.* Non-Dispersive Infrared Multi-Gas Sensing via Nanoantenna Integrated Narrowband Detectors [J]. *Nature Communications*, 2020, **11**: 5245.

- [81] Maier T, Brückl H. Wavelength-Tunable Microbolometers with Metamaterial Absorbers [J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(19): 3012.
- [82] Dao T D, Doan A T, Ishii S, *et al.* MEMS-Based Wavelength-Selective Bolometers [J]. *Micromachines*, 2019, **10**(6): 416.
- [83] Abdullah A, Koppula A, Alkorjia O, *et al.* Metasurface Integrated Microbolometers [J]. *2019 IEEE Research and Applications of Photonics in Defense Conference, RAPID 2019 - Proceedings*, 2019: 9 - 10.
- [84] Maier T, Brueckl H. Multispectral Microbolometers for the Midinfrared [J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(22): 3766 - 3768.
- [85] Mahjouri-Samani M, Zhou Y S, He X N, *et al.* Plasmonic-Enhanced Carbon Nanotube Infrared Bolometers [J]. *Nanotechnology*, 2013, **24**: 035502.
- [86] Tsubota T, Uesugi A, Sugano K, *et al.* Wavelength-Dependent near-Infrared Microbolometer for Short-Wavelength Infrared Light with Gold Nanowire Grating Optical Absorber [J]. *Microsystem Technologies*, 2021, **27**(3): 997 - 1005.
- [87] Chen C, Li C, Min S, *et al.* Ultrafast Silicon Nanomembrane Microbolometer for Long-Wavelength Infrared Light Detection [J]. *Nano Letters*, 2021, **21**(19): 8385 - 8392.
- [88] Goldsmid H J. Introduction to Thermoelectricity [M]. Second edition. Heidelberg: Springer, 2016.
- [89] Ogawa S, Okada K, Fukushima N, *et al.* Wavelength Selective Uncooled Infrared Sensor by Plasmonics [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**: 021111.
- [90] Lochbaum A, Dorodnyy A, Koch U, *et al.* Compact Mid-Infrared Gas Sensing Enabled by an All-Metamaterial Design [J]. *Nano Letters*, 2020, **20**(6): 4169 - 4176.
- [91] Varpula A, Tappura K, Tiira J, *et al.* Nano-Thermoelectric Infrared Bolometers [J]. *APL Photonics*, 2021, **6**: 036111.
- [92] Zhang M, Ban D, Xu C, *et al.* Large-Area and Broadband Thermoelectric Infrared Detection in a Carbon Nanotube Black-Body Absorber [J]. *ACS Nano*, 2019, **13**(11): 13285 - 13292.
- [93] Safaei A, Chandra S, Shabbir M W, *et al.* Dirac Plasmon-Assisted Asymmetric Hot Carrier Generation for Room-Temperature Infrared Detection [J]. *Nature Communications*, 2019, **10**: 3498.
- [94] Abbasi M, Evans C I, Chen L, *et al.* Single Metal Photodetectors Using Plasmonically-Active Asymmetric Gold Nanostructures [J]. *ACS Nano*, 2020, **14**(12): 17535 - 17542.
- [95] Stewart J W, Vella J H, Li W, *et al.* Ultrafast Pyroelectric Photodetection with On-Chip Spectral Filters [J]. *Nature Materials*, 2020, **19**(2): 158 - 162.
- [96] Zhang K, Luo W, Huang S, *et al.* Wavelength-Selective Infrared Detector Fabricated by Integrating LiTaO₃ with a Metamaterial Perfect Absorber [J]. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2020, **313**: 112186.
- [97] Yamamoto K, Goericke F, Guedes A, *et al.* Pyroelectric Aluminum Nitride Micro Electromechanical Systems Infrared Sensor with Wavelength-Selective Infrared Absorber [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(11): 111111.
- [98] Suen J Y, Fan K, Montoya J, *et al.* Multifunctional Metamaterial Pyroelectric Infrared Detectors [J]. *Optica*, 2017, **4**(2): 276.