采用铝-锗等离激元滤波器阵列的长波红外多光谱图像传感器系统

Noor E Karishma Shaik[1] (✉), Bryce Widdicombe[1], Dechuan Sun[1], Sam E John[2], Dongryeol Ryu[3], Ampalavanapillai Nirmalathas[1], Ranjith R Unnithan[1] (✉)

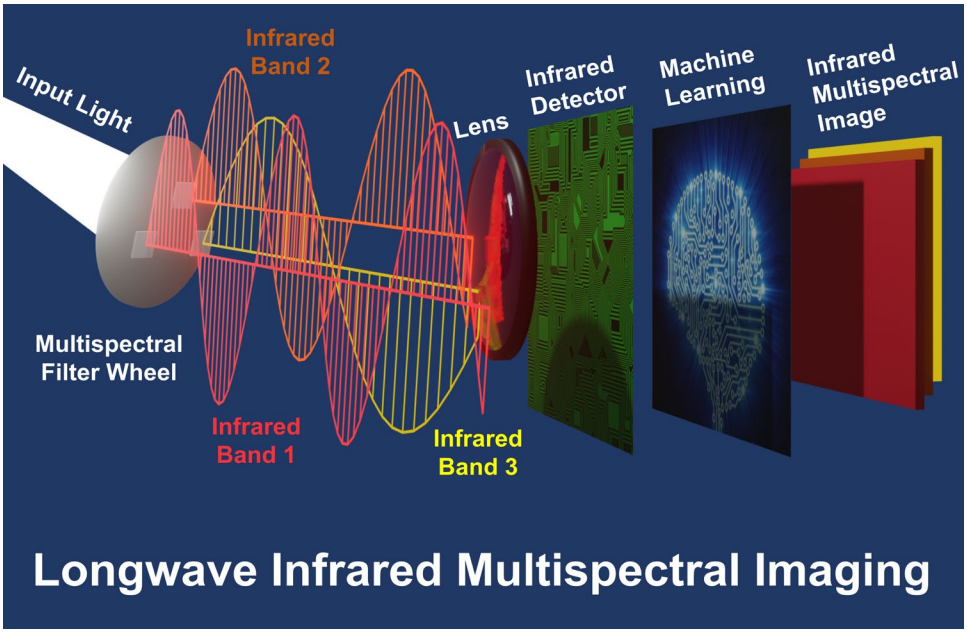
[1] 墨尔本大学电气与电子工程系，澳大利亚维多利亚州帕克维尔，邮编3010 [2] 墨尔本大学生物医学工程系，澳大利亚维多利亚州帕克维尔，邮编3010 [3] 墨尔本大学基础设施工程系，澳大利亚维多利亚州帕克维尔，邮编3010

摘要

多光谱相机可记录电磁波谱中不同波长的图像数据，从而获取传统相机无法捕捉的额外信息。随着高分辨率图像传感器和彩色滤光片技术的发

关键词

红外等离激元学；锗；铝；热光学；长波红外多光谱系统



通信请联系Noor E Karishma Shaik，nshaik@student.unimelb.edu.au；Ranjith R Unnithan，r.ranjith@unimelb.edu.au

1 引言。 长波红外（LWIR）成像相机可用于无损材料研究和光谱分析，应用领域涵盖国防、[1], 化学检测[2]，环境传感 [3], 以及精准农业 [4]。先进的长波红外热成像相机工作在 8 至 14 μm 的波长范围内，在低照度、雾、烟雾及其他受限环境中仍能成像，探测能力超出人眼所及。此类相机大多采用微测辐射热计探测器，将目标场景的热辐射成像为热成像中的灰度（相当于单色）像素强度。灰度热图像传感器记录场景中物体在宽波长范围内的平均发射光谱，因此不同物体的光谱信息会相互重叠。相比之下，多光谱成像仪能够在窄光谱波段内捕获发射光谱，从而部分分辨发射光谱，并获取原本无法获得的物体附加信息。然而，与可见光和近红外成像相比，热波长范围内的多光谱成像仍面临挑战，因为能够响应热波长、可用于制作滤光片或滤光片阵列的材料有限，而且热图像传感器的分辨率较低[5]。近年来，人们对提升光谱分辨率兴趣浓厚，以便让热成像相机成为恢复红外指纹的唯一成像平台[6-8]。对于多光谱和高光谱成像应用，目前先进的商业解决方案采用复杂的滤光轮系统或高精度机械扫描仪，使系统成本高昂、体积庞大且只能在特定条件下便携使用 [9, 10]。因此，人们开始探索新型超表面滤光片和超材料，以制造适用于热波长的滤光片 [11, 12]。

利用金属/介质界面处产生的仿表面等离激元（SSP）共振，可在长波红外区域制作用于滤波的波长滤光片 [13]。金属-介质结构简单、层数少，且其峰值位置可通过横向调节，因此易于集成；对于大面积应用而言，将其制成二维高密度阵列或扩展的单调阵列，作为片上光谱滤光片，具有很大吸引力 [14-17]。据报道，在可见光范围（400–700 nm）工作的、集成于CMOS芯片上的基于孔的等离激元滤光片，具有更高的选择性和结构几何可调性 [18-20]。通过改变孔阵列周期来调节表面等离激元共振波长，从而使相应光谱曲线发生光谱偏移。近期，研究人员利用仿表面等离激元共振，展示了由金（Au）和银（Ag）等贵金属中的周期性微孔阵列构成的等离激元滤光片 [21-23]。Jang等人进一步展示了光谱成像：在砷化镓电介质上，以金膜中的微米级孔方形阵列构成仿表面等离激元结构 [24]。然而，此类研究的范围仅限于开发滤光片或重建光谱指纹。

在这项工作中，我们针对热波长范围内光学材料响应有限的问题，采用铝基等离激元滤光片；针对图像传感器分辨率有限的问题，则采用深度学习技术，提出了一种具有三个波段的热多光谱传感器。我们首先介绍一种铝（Al）红外等离激元滤光片，该滤光片由锗（Ge）衬底上的六边形孔阵列构成，可作为获取热多光谱图像的光学元件。铝是地球上储量第三丰富的元素（成本较低），与互补金属氧化物半导体（CMOS）制造工艺兼容 [25]。Ge 被选作电介质，因为它是一种带隙为 0.66 eV 的半导体，能够在太阳波长范围内吸收并滤除噪声，波长范围为 <1.9 μm，同时透射更长波长，最高可达 16 μm [26]。Ge 具有较强的红外透射能力，并能增强 Al 中等离激元共振的表面局域。采用 COMSOL Multiphysics® Platform 中实现的有限元法，对工作于 10、12 和 14 μm 的三种带通滤波器进行了计算设计与优化。这些滤光片通过单步光刻和金属沉积技术制造。随后，将制成的滤光片集成到 3D 打印轮盘上，再与分辨率为 80×60 像素的 FLIR Lepton 图像传感器组装，制成多光谱传感器。经过辐射定标后，我们展示了利用不同物体进行多光谱成像，并通过定义一个名为归一化温度变化指数的函数，展示了其应用。随后，我们利用基于深度学习的残差密集网络，将光谱图像的分辨率提高了四倍（从 80×60 提高到 320×240 像素）。与传统的高成本多光谱成像系统相比，从实际应用角度来看，我们的工作代表着利用低成本热传感器开发高性能多光谱成像技术的一项重大进展。

2 结果与讨论。由在不透明金属薄膜中周期性铣刻亚波长尺度孔洞而构成的混合二维纳米材料，已能在特定波长下实现光学透射 [27-29]。通过设计周期和直径来控制共振峰和带宽，这些等离激元超材料在宽广的波长范围内具有高度可调性，从而能够制作用于可见光滤波的纳米光子器件 [30-34]。目前，将这项技术拓展至电磁波谱长波红外区域内其他特定光谱波段的相关文献有限 [35-39]。在本研究中，我们开发了长波红外范围内的共振滤波器，可通过设计亚波长几何结构进行横向调谐，以集成到红外光电系统中。图 1(a)-(b) 示意展示了一个周期尺寸为 17 μm（与标准测辐射热计像素尺寸相同）的铝等离激元像素，其六边形孔晶格夹在锗介质层之间。受到照射时，由于金属薄膜中的多模激发和表面等离激元共振，该结构表现出选择性滤波特性。透射峰值波长的理论建模见电子补充材料（ESM）中的图 S1。

为理解所提出等离激元结构中的透射机制，采用 COMSOL Multiphysics® 中的有限元法数值模拟技术。采用变量控制法优化薄膜厚度和横向周期性等结构参数，以增强光正入射时的选择性。仿真结果表明，锗衬底上的铝等离激元阵列具有宽谱透射特性，半峰全宽为 ≥ 2 μm。在顶部添加介质材料（锗）层以实现介质-金属-介质（DMD）设计后，峰的数量减少，透射率得到提高，半峰全宽为 ≤ 1.5 μm。根据所得计算结果，金属薄膜厚度选定为 50 nm，约为趋肤深度的三倍，以确保顶部和底部介质层之间不存在耦合，从而保持金属-介质

界面处的表面等离激元共振。顶部介电层的厚度优化为 300 nm，以便于制造。这使锗薄膜在孔洞和金属薄膜层上方的高度非均匀性降低至 16%。金属孔阵列（MHA）的六边形排列增大了相对孔径面积，从而提高了器件效率。此外，圆形结构比方形或其他多边形孔更易于制造。纵横比（孔径：周期）为 0.6 的六边形 MHA 具有窄线宽和足够的凹陷深度，同时具备高透射率（60%）以及与角度无关的工作特性。

我们系统地分析了六边形 MHA 的几何构型对滤波器光谱响应的影响，考察的参数包括周期尺寸、入射角、纵横比以及构成材料的光学性质。图 1(e) 突出了峰值透射光谱随周期变化呈线性偏移的特点。图 1(f) 显示，入射到 DMD滤波器 上的光线角度不会影响透射光谱。图 1(g) 展示了在周期固定时，随着直径增大（即纵横比增大），透射峰和半峰全宽均会增大。由于更窄、更尖锐的光谱透射滤波器是理想的选择，本研究将纵横比固定为 0.6。构成 DMD滤波器 的电介质也是一个重要因素。图 1(h) 绘出了以铝为金属层时，红外材料的透射峰与折射率之间的关系。图中显示，低折射率材料是更好的电介质选择，有助于提升光谱灵敏度，从而实现滤波器阵列。

根据仿真结果，采用标准光刻、金属沉积和剥离工艺制造滤光片 [40]。通过单次光刻工艺，分别制造周期尺寸为 2.5、3 和 3.5 μm 的三个等离激元滤波器，每个滤波器的面积为 5×5 mm^2；完整的制造细节请参见“方法”部分。为表征滤光片，进行了扫描电子显微镜（SEM）成像和光谱响应度测量，结果分别展示于图 1(c)–(d)。制造完成的滤光片的详细扫描电子显微图见电子补充材料中的图 S2。成像目标场景时，每个制造完成的滤光片将与 FLIR Lepton 相机的硅基透镜和氧化钒微测辐射热计探测器阵列串联放置（80×60 像素，λ_{range} ~8 – 14 μm），如图 2(a) 示意图所示。我们 3D 打印了一个轻质旋转轮和一个支撑底座，用于安装单色相机和三个滤光片，如图 2(b) 所示。旋转轮上每个滤光片槽都是一个延伸至 6×6 mm^2 的穿孔，多光谱相机的尺寸为8×6 cm^2 。实际设备的更多快照以及详细测量结果见图 2(c)–(e)。

我们通过旋转滤轮，依次安装各个滤光片，利用光学系统获取目标场景在 10、12 和 14 μm 三个长波红外波长下的辐射测量数据。对于温度为（t）的光 I 入射到光学系统时所采集信号的光谱辐射通量 F_{xy} ，其滤光片响应度为$S(\lambda)$，探测器响应度为$D(\lambda)$，可表示为

$$F_{xy}(i,t) = n_0 + n_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_n} I(t) \cdot S_i(\lambda) \cdot D(\lambda)\, d\lambda$$

其中，输入信号函数 $I(t)$ 来自选择性波段，而噪声则 n_0 在微测辐射热计探测器的 λ_{range} 范围内采集。表面温度梯度和滤光片偏移会传播至感兴趣参数，从而干扰目标测量值。此外，锗透射率在长波红外中段的λ~11.5 μm 处呈非单调变化，这可能会使辐射测量变得复杂。因此，我们使用暗参考帧对每个像素进行非均匀性校正，以消除由滤光片和光学元件引入的光谱噪声。由于 FLIR Lepton 相机的 80×60 像素分辨率已受到像素化和成像伪影的影响，滤光片导致的任何信号质量进一步下降都将带来新的挑战。为提高信号重建能力和系统灵敏度，我们使用黑体仪器（由 LumaSense technologies 提供）进行了辐射特性表征，以确定滤光片的成像能力。我们使用长波红外多光谱相机，在 50–200摄氏度的温度范围内测量黑体源的辐射测量温度。根据图 2(f) 所示的源温度，生成校准曲线，将滤光片采集的温度映射至相应值。图 2(g) 和图 2(h)-(i) 分别展示了黑体对应的单色图像和多光谱图像。

使用我们的多光谱成像系统原型开展成像实验（图 3）。我们分别在滤轮的单色、波段 1、波段 2 和波段 3 模式下，拍摄了一棵树及其多云背景的四幅光谱图像，如图 3(a)–(d) 所示。将三个波段合成后得到的多光谱图像如图 3(e) 所示，与传统单色图像相比，它呈现出更精细的细节。此外，我们定义了一种新的差分度量函数——归一化温度变化指数（NTVI），其概念类似于近红外领域的归一化差异植被指数（NDVI），用于测量温度变化并从光谱图像中提取更多信息。

$$Normalized\ Temperature\ Variation\ Index\ [NTVI\ (Band\ x, Band\ y)] = \frac{Band\ x - Band\ y}{Band\ x + Band\ y}$$

为解决热图像传感器分辨率低的问题，我们采用基于深度学习的辐射超分辨率技术，以提升光学系统的性能。我们实现了基于深度学习的残差密集网络，以提高图像分辨率。由于热图像数据集数量不足，且现有少数数据集的分辨率较低，因此采用预训练融合网络，先学习如何从低分辨率图像中获取高分辨率 RGB 图像，再利用热成像数据进行学习，从而实现更快速、更优的超分辨率处理。这与 Choi 等人 [41] 的研究一致，他们证明了 RGB 引导网络能够实现良好的增强效果。图 4 展示了使用超分辨率算法所得结果的视觉对比。使用可见光相机采集的代表性图像见电子补充材料中的图 S5。采用无参考图像指标自然图像质量评价器（NIQE） [42]对三个波段的超分辨率图像结果进行了评估。这些图像表明，通过算法增强图像分辨率能够改善信号质量，从而有助于恢复精细细节。需要注意的是，在一名手持咖啡的人体超分辨率图像中，鼻子和手指等人体特征更易于辨识。我们将该算法应用于一台自制电子鼻的多光谱图像，该电子鼻集成了九个安装在印刷电路板上的气体传感器（图 4）。电子鼻的超分辨率图像

增强了对加热至恒定温度的离散传感器的识别可见性。由于锗在室温下具有较高的反射率，即使经过平场校正，这些图像仍存在轻微的镜面噪声。随着温度升高，镜面噪声受到抑制，边缘得以高效重建，像素化现象也有所减轻。通过在热多光谱相机旁配置可见光相机并引入 RGB信息，或使用热光谱相机连续以时间序列采集目标场景（但会牺牲帧率），还可以进一步提高超分辨率效率，以获取更准确的细节。

综合来看，结合等离激元MHA与单色相机的深度学习长波红外多光谱成像仪，是一种实用且经济高效的解决方案。此外，我们能够利用该相机采集场景中目标的精细光谱特征，而这些特征无法通过单色相机观察到。因此，我们验证了采用等离激元滤光片的长波红外多光谱成像仪的概念。这些带有共振六边形MHA的等离激元滤光片易于制造，可通过快速且易于扩展的方法制备：只需进行一次图案化涂覆周期，随后进行金属-介质沉积，即可适用于任意数量的光谱波段。我们这种易于制造的设计降低了复杂性和规模化成本，适用于成像及其他商业大面积应用。我们的设计原理可扩展至热长波红外范围或电磁波谱其他具有大气透射率的区域中的多个波长，从而实现无损光谱分析。如前所述，实现热灵敏度更高的等离激元纳米结构可以提高波长选择性。可采用氟化钡或溴化钾等低折射率介质层替代锗，也可使用铜、镍等其他金属薄膜来实现这一目标。通过改变周期尺寸（横向周期性），将多个光谱滤光片空间复用到单个滤光片阵列中，可进一步提高光谱分辨率；还可采用多种联合去马赛克和超分辨率算法，以更精细的细节恢复缺失信息。因此，可以将纳米光电子学与深度学习相结合，以恢复丰富的热光谱信息。更重要的是，这种低成本高光谱热长波红外相机能够实现先进的成像与光谱学应用。

3 结论。在本研究中，我们展示了将等离激元成像滤光片与低成本非制冷单色热传感器（17 μm 像素技术）及配套的深度成像算法相结合，从而构建多光谱热传感器系统，使其达到先进实际应用所需光学性能的方案。滤光片采用在铝层上制备微米级孔洞，并在锗基底上制作锗盖层的设计，以实现三个不同波长，光谱宽度约为 1.5 μm，透射效率约为 60%。此外，利用黑体对设计的光学装置进行校准，并通过计算机视觉算法增强其热输出，以改善模糊且呈像素化的边缘。采用基于深度学习的残差密集网络，将光谱图像的空间分辨率从 80×60 提高至 320×240，并使用自然图像质量评价器（NIQE）表征其性能。通过定义名为 NTVI 的函数，从多光谱图像中提取不同特征。然而

，

我们认为，这项工作的意义超越了眼前的实际应用，并可为进一步开展有意义的探索奠定基础。所提出的成像方法可扩展至红外传感应用，例如探测云顶过冲。通过在同一超表面上设计亚波长几何结构，利用等离激元学调谐多个波长，这一独特特性有望推动长波红外范围内集成成像与传感解决方案的发展。因此，我们期待这项工作能够促进对非传统光学设计路径的进一步探索，以开发新颖、高性能、低成本的红外成像解决方案。

材料与方法

仿真： 研究中的周期阵列，其单个单元胞在 x-y 平面内建模，并由宽带光源沿 z 方向持续照射，电偏振方向沿 x 方向。仿真模型的俯视图如图 1(a) 所示。图 1(b) 所示的单元仿真模型由铝层构成，铝层上穿有不同厚度的孔，并置于厚度为 500 nm、折射率为 4 的锗基底上。铝在不同波长下的折射率取自 Rakic[43]。在顶部添加一层锗，并使锗填充这些孔，以形成介质-金属-介质（DMD）结构。在锗层顶部添加一层 500 nm 厚的空气层。模型采用对称边界条件，并在顶部和底部设置完美匹配层；单元胞设计中，孔所在区域采用步长为 5 nm 的精细网格。计算结果表明，入射辐射的磁场分量会在顶部和底部金属中产生反向平行电流，从而在共振时形成强场约束。理想情况下，透射可使金属中的欧姆损耗和间隔层中的介质损耗降至最低。当正确的模式被激发时，入射角不会使共振的光谱位置发生偏移。图 1(e)-(f) 绘出了多光谱滤波器阵列的透射参数。

制造： 采用无掩模光刻、多层沉积和剥离工艺，针对每个波段，以 5×5 mm^2 图案制造了三个具有金属孔径阵列结构的锗-铝-锗滤波器（制造布局见 ESM 中的图 S2）。首先，将面积为 1×1 cm^2 的 0.5 mm 厚锗衬底用丙酮和异丙醇（IPA）湿法清洗 120 s，再用蒸馏水（dH_2O）冲洗 15 s。随后在室温下用高压氮气（N_2）吹干样品。将清洁后的锗样品以 3500 rpm 的转速旋涂 AZ1512HS光刻胶 90 s，并在 110 °C 热板上烘烤 60 s。使用直写光刻设备，通过紫外光曝光进行无掩模光刻，在样品上精确制作孔径为 1.8–2.4 μm、间距分别为 3–4 μm 的图案（纵横比：0.6）。随后将样品置于稀释的 AZ726溶液（AZ726:dH_2O = 2:1）中显影，接着用 dH_2O 冲洗，并用 N_2 吹干。通过电子束蒸发沉积 50 nm 厚的铝薄膜，并同时沉积 5 nm 厚的锗覆盖层以实现金属化；随后用丙酮、IPA 和 dH_2O 进行剥离，并在 N_2 气流中吹干，以形成金属孔径阵列结构。覆盖层用作保护涂层，可确保剥离过程中铝不会迅速氧化。再额外沉积 300 nm 锗，以制备半峰全宽较窄的介质-金属-介质阵列，但透射率会因此降低。所制备滤波器的扫描电子显微镜图像见图 S2

在电子补充材料
中。

傅里叶变换红外测量： 使用赛默飞世尔科技 Nicolet is 50 仪器进行傅里叶变换红外（FTIR）光谱测量，测得所制备滤波器阵列在 650–2000 cm^{-1} (5 – 14 μm) 波数范围内的透射光谱。使用可变光阑将采样区域调整为 100×100 μm^2，并通过以空气背景光谱对各滤波器的光谱进行归一化，获得相对透射光谱。图 1(d) 所示的所制备阵列 FTIR 光谱测量结果显示，在峰值透射率达 60% 时，半峰全宽为 1.35 μm。

成像实验： 在本研究中，使用Lepton相机依次采集多光谱热图像，滤光片安装在相机前方的3D打印轮盘上。通过在室内和室外环境中拍摄各种温度敏感物体来创建数据集。每个样本采集后都会获取一帧暗参考帧，用于镜面反射去噪。记录的图像通过内部MATLAB（v2019b）脚本加载。利用目标帧和参考帧进行平场校正，以消除不必要的噪声。对于所有滤光片，逐像素提取相应的透射强度。通过使用LumaSense的Mikron® 红外黑体源测量一组范围为25-200 。C的固定温度值来进行辐射定标，并观察到线性强度响应特性。该光学装置可用于借助光谱滤光片测量各种物体的温度，并根据校准曲线预测真实温度。

超分辨率算法： 为了解决没有真实值情况下的热超分辨率问题，本研究采用了在可见光数据集上预训练的增强型超分辨率生成对抗网络（ESRGAN）[44]。生成对抗网络促使网络倾向于选择更接近自然图像的解。通过使用激活前的特征，感知损失得到改善，从而能够为亮度一致性和纹理恢复提供更强的监督。得益于这些改进，ESRGAN模型被证明能够始终实现更好的视觉质量，并生成更加真实、自然的纹理。完整架构请参见电子补充材料中的图S4。训练时，我们主要使用DIV2K数据集[45], , 该数据集包含800幅高质量（2K分辨率）图像，具有丰富且多样的纹理，可用于图像复原任务。训练时将小批量大小设为16。裁剪后的高分辨率图像块的空间尺寸为 128×128。我们在RGB通道上训练模型，并使用RGB图像和热多光谱图像扩充测试数据集。预训练的ESRGAN能够生成更清晰的人体特征和鼻子纹理。

致谢

数值模拟在澳大利亚堪培拉的NCI国家设施中开展，该设施由澳大利亚联邦政府支持。本研究部分工作在澳大利亚国家制造设施（ANFF）维多利亚节点的墨尔本纳米制造中心（MCN）完成。本项目获得了澳大利亚研究委员会联结资助（LP160101475）的资助。作者感谢Luke Weston先生、Nandakishor Desai博士以及副教授Karim Seghouane提供的宝贵讨论。NKS还要特别感谢墨尔本研究奖学金在攻读博士期间提供的经济支持。

电子补充材料：补充材料（请简要说明，例如退火和氧化工艺、STM测量、AFM成像以及拉曼光谱测量的更多详情）可在本文在线版本中获取，网址为 http://dx.doi.org/10.1007/s12274-***-****-*（由出版商自动插入）。

参考文献

1. Akula, A.; Ghosh, R; Sardana, H. K. 热成像及其在防御系统中的应用。*AIP*会议论文集。**2011**，1391.1。美国物理联合会。

2. Manolakis, D; Steven G; Robert S. D. 化学云团的长波红外高光谱遥感：聚焦于信号处理方法。*IEEE*信号处理杂志 31.4，**2014**，第120–141页。

3. Tratt, D.M.; Buckland, K.N.; Keim, E.R.; Johnson, P.D. 利用机载长波红外高光谱成像监测城市工业排放。第*8*届高光谱图像与信号处理研讨会：遥感领域的发展（*WHISPERS*），IEEE，2016，第1–5页。

4. George, T；Gulati, S；Martin, S；Nozaki, S. 用于精准农业应用的中波红外（MWIR）和长波红外（LWIR）影像的比较。 *IEEE*航空航天会议，2019，第1–15页。IEEE。

5. 适用于红外（IR）应用的正确材料 [在线]。URL：https: //www. edmundoptics. com. au/ knowledge-center/ application-notes/ optics/ the-correct-material-for-infrared-applications/

6. Talghader, J.J.；Gawarikar, A.S.；Shea, R.P. 红外热探测中的光谱选择性。《*Light: Science & Applications*》，*1*(8)，**2012**，e24。

7. Tran, C.D. 红外多光谱成像：原理和仪器技术。**2003**，第133–153页。

8. Manolakis, D.；Pieper, M.；Truslow, E.；Lockwood, R.；Weisner, A.；Jacobson, J.；Cooley, T. 长波红外高光谱成像：原理、进展与挑战。IEEE地球科学与遥感杂志，7(2)，**2019,** 第72–100页。

9. Gagnon, M.A.; Jahjah, K.A.; Marcotte, F.; Tremblay, P.; Farley, V.; Guyot, É.; Chamberland, M. 气体和矿物的时间分辨热红外多光谱成像。载于《电光与红外系统：技术与应用XI》（第9249卷），SPIE，2014年，第268-277页。

10. Schreer, O.; Zettner, J.; Spellenberg, B.; Schmidt, U.; Danner, A.; Peppermueller, C.; Saenz, M.L.; Hierl, T. 多光谱高速中波红外成像系统。载于红外技术与应用*XXX*（第5406卷），SPIE，2004年，第249-257页。

11. Takagawa, Y.; Ogawa, S.; Kimata, M. 使用二维晶格等离激元吸收器控制非制冷热红外传感器的探测波长。《传感器》15(6)，**2015**，第13660-13669页。12. Wang, A.; Dan, Y. 中红外等离激元多光谱滤波器。*Scientific Reports*，*8*(1)，**2018**，第1-7页。13. Genet, C.; Ebbesen, T.W. 微小孔洞中的光。《纳米科学与技术：自然期刊评论集》，**2010,** 第205-212页。14. Meinzer, N.; Barnes, W.L.; Hooper, I.R. 等离激元超原子和超表面。*Nature Photonics*，*8*(12)，**2014**，第889-898页。15. Bouchon, P.; Pardo, F.; Portier, B.; Ferlazzo, L.; Ghenuche, P.; Dagher, G.; Dupuis, C.; Bardou, N.; Haïdar, R.; Pelouard, J.L. 高纵横比等离激元纳米谐振器中的光的完全汇聚。《应用物理快报》，*98*(19)，**2011**，第191109页。

16. Hao, J.、Wang, J.、Liu, X.、Padilla, W.J.、Zhou, L. 和 Qiu, M. 基于等离激元超材料的高

性能光学吸收器。《应用物理快报》, 96(25), 2010, 第251104页。17. Lapray, P.J.；Wang, X.；Thomas, J.B.；Gouton, P. 多光谱滤波器阵列：最新进展与实际实现。《传感器》, 14(11), 2014, 第21626–21659页。18. X. He.；Y. Liu, K. Ganesan.；A. Ahnood.；P. Beckett.；F. Eftekhari.；D. Smith.；M. H. Uddin.；E. Skafidas.；A. Nirmalathas.；以及 R. R. Unnithan. 在单色CMOS图像传感器上集成窄光谱带彩色马赛克的单传感器多光谱成像相机。APL Photonics 5(4), 2020, 第046104页。19. Monno, Y.；Kikuchi, S.；Tanaka, M；Okutomi, M. 使用单个图像传感器的实用单次曝光多光谱成像系统。IEEE图像处理汇刊, 24(10), 2015, 第3048–3059页。20. Burgos, S.P.；Yokogawa, S.；Atwater, H.A.；集成于互补金属氧化物半导体图像传感器上的等离激元彩色滤波器中通过最近邻孔耦合实现彩色成像。ACS Nano, 7(11), 2013, 第10038–10047页。21. Pinton, N.；Grant, J.；Choubey, B.；Cumming, D.；Collins, S. 面向图像传感器和多光谱应用的等离激元彩色滤波器最新进展。Nanophotonics VI, 9884, 2016, 第434–445页。22. Goetz, S.；Bauch, M.；Dimopoulos, T.；Trassl, S.；超薄溅射沉积的等离激元银纳米结构。Nanoscale Advances, 2(2), 2020, 第869–877页。23. Chong, X.；Li, E.；Squire, K.；Wang, A.X. 使用高分辨率等离激元滤波器阵列的片上二氧化碳近红外光谱。《应用物理快报》, 108(22), 2016, 第221106页。24. Jang, W.Y.；Ku, Z.；Jeon, J.；Kim, J.O.；Lee, S.J.；Park, J.；Noyola, M.J.；Urbas, A. 使用等离激元滤光器阵列进行自适应红外多光谱成像的实验演示。Scientific Reports, 6(1), 2016, 第1–9页。25. Park, H.；Crozier, K.B. 基于垂直硅纳米线的多光谱成像。Scientific Reports, 3(1), 2013, 第1–6页。26. Gérard, D.；Gray, S.K. 铝等离激元学。Journal of Physics D: Applied Physics, 48(18), 2014, 第184001页。27. Vetter, K. 锗探测器制造与运行的最新进展。Annual Review of Nuclear and Particle Science, 57, 2007, 第363–404页。28. Stanley, R. 中红外等离激元学。Nature Photonics, 6(7), 2012, 第409–411页。29. Mirnaziry, S.R.；Setayesh, A.；Abrishamian, M.S. 基于短截线的等离激元滤波器设计与分析。JOSA B, 28(5), 2011, 第1300–1307页。30. Shoji, T.；Tsuboi, Y. 面向分子操控的等离激元光镊：定制等离激元纳米结构、光源和共振俘获。《The Journal of Physical Chemistry Letters》, 5(17), 2014, 第2957–2967页。31. Ogawa, S.；Kimata, M. 利用等离激元学和超材料实现多色或偏振成像的波长或偏振选择性热红外探测器。Materials, 10(5), 2017, 第493页。32. Tsakmakidis, K.L.；Boyd, R.W.；Yablonovitch, E.；Zhang, X. 金属纳米结构中的大幅自发辐射增强：朝向速度快于激光器的发光二极管。Optics Express, 24(16), 2016, 第17916–17927页。33. Yu, J.；Ohtera, Y.；Yamada, H. 侧耦合等离激元法布里–珀罗波导滤波器的散射参数模型分析。《Applied Physics A》, 124(7), 2018, 第1–7页。34. Unnithan, R. R.；Sun, M.；He, X.；Balaur, E.；Minovich, A.；Neshev, D.N.；Skafidas, E.；Roberts, A. 基于铝中同轴孔的等离激元彩色滤波器。Materials, 10(4), 2017, 第383页。35. Shaik, N.；Weston, L.；Nirmalathas, A.；Unnithan, R.R. 用于多光谱成像的热波长铝等离激元学。载于 2020 激光与电光学会议（CLEO）（第1–2页）。2020, IEEE。36. Craig, B.；Shrestha, V.R.；Meng, J.；Crozier, K.B. 使用等离激元滤波器阵列进行中红外计算光谱的实验演示。载于 CLEO：应用与技术（第 AF3M–1 页），2018, Optica出版集团。

37. Tittl, A.; Michel, A.K.U.; Schäferling, M.; Yin, X.; Gholipour, B.; Cui, L.; Wuttig, M.; Taubner, T.; Neubrech, F.; Giessen, H. 一种具有多光谱热成像能力的可切换中红外等离激元完美吸收器。《先进材料》, *27*(31), **2015**, 第 4597–4603 页。38. Lee, S.J.; Ku, Z.; Barve, A.; Montoya, J.; Jang, W.Y.; Brueck, S.R.J.; Sundaram, M.; Reisinger, A.; Krishna, S.; Noh, S.K. 单片集成等离激元红外量子点相机。《自然·通讯》, *2*(1), **2011**, 第 1–6 页。39. Dao, T.D.; Ishii, S; Yokoyama, T.; Sawada, T.; Sugavaneshwar, R.P.; Chen, K.; Wada, Y.; Nabatame, T.; Nagao, T. 用于光谱选择性中波红外热释电探测器的孔阵列完美吸收器。《*ACS*光子学》, *3*(7), **2016**, 第1271–1278页。40. Q Dai.; R Rajasekharan.; H Butt.; X Qiu.; G Amaragtunga.; TD Wilkinson. 基于垂直排列碳纳米纤维的超小微透镜阵列。《小型》 8 (16), **2012**, 第2501-2504页。41. Choi, Y.; Kim, N.; Hwang, S.; Kweon, I.S. 使用卷积神经网络增强热图像。发表于*2016*年*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议（*IROS*） **2016**, 第223–230页）。IEEE。42. Mittal, A.; Soundararajan, R.; Bovik, A.C. 构建“完全盲”的图像质量分析器。《*IEEE*信号处理快报》, *20*(3), **2012**, 第209–212页。43. M. Polyanskiy，铝的折射率——光学常数，Rakic, MediaWiki [在线]。网址：https://refractiveindex.info/?shelf=mainbook=Alpage=Rakic，访问于2018年9月13日。44. Wang, X.; Yu, K.; Wu, S.; Gu, J.; Liu, Y.; Dong, C.; Qiao, Y.; Loy, C. ESRGAN：增强型超分辨率生成对抗网络。发表于《欧洲计算机视觉会议（ECCV）论文集》, 2019年。45. Agustsson, E.; Timofte, R. NTIRE 2017单幅图像超分辨率挑战赛：数据集与研究。发表于*IEEE*计算机视觉与模式识别会议研讨会论文集，2017年，第126–135页。46. “高光谱相机 - Telops Hyper-Cam与HC Airborne Mini”。Telops，2022年，https://www.telops.com/products/hyperspectral-cameras/。访问于2022年9月21日。47. “高光谱相机 - Bodkin Design & Engineering, LLC”。Bodkin Design & Engineering, LLC，2022年，
h
t
t
p
s://
w
w
w.
b
odkindesign.co
m/products-page/hyperspectral-imaging/hyperspec tral-products/。访问于2022年9月21日。

图

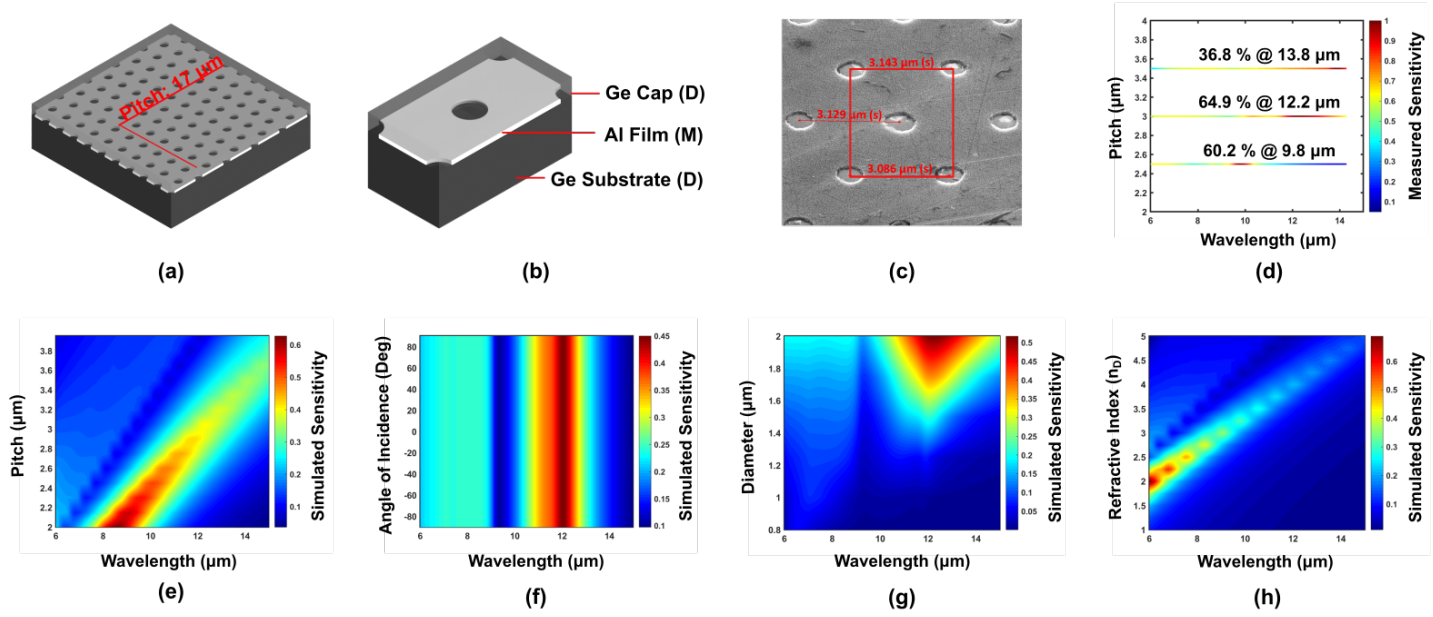


图 1 用于多光谱成像的 Ge-Al-Ge 等离激元滤光器阵列的设计与制造：(a) 热成像相机中覆盖尺寸为 17 μm 像素单元的等离激元滤光器阵列（周期恒定）三维示意图，红色部分为突出显示区域。(b) 微米级孔洞晶格中的单个六边形单元：50 nm 金属薄膜夹在 300 nm 锗盖层与 0.5 mm 锗衬底之间，构成电介质–金属–电介质（DMD）滤光片。(c) 制造出的滤光片扫描电子显微图，周期为 3 μm。比例尺为 2 μm。纵横比（孔径：周期尺寸）为 0.6。详细的扫描电子显微镜图像见电子补充材料中的图 S2。(d) 实验测得的制造滤光片透射率（归一化），其周期尺寸分别为 2.5、3 和 3.5 μm。(e)–(h) 为 COMSOL 仿真结果。如 (e) 所示，对已实现的 DMD 设计进行计算建模，得到周期尺寸在 2–4 μm 扩展范围内的滤光器透射。对于周期固定为 3 μm 的滤光片，(f) 和 (g) 分别展示了其对入射角的光谱不敏感性以及对孔径的灵敏度。仿真还进一步表明，在未来的设计中，通过选择折射率较低的红外材料（如氟化钡或溴化钾等）来调节介质层（D）的折射率，可提高光谱灵敏度，如 (h) 所示。

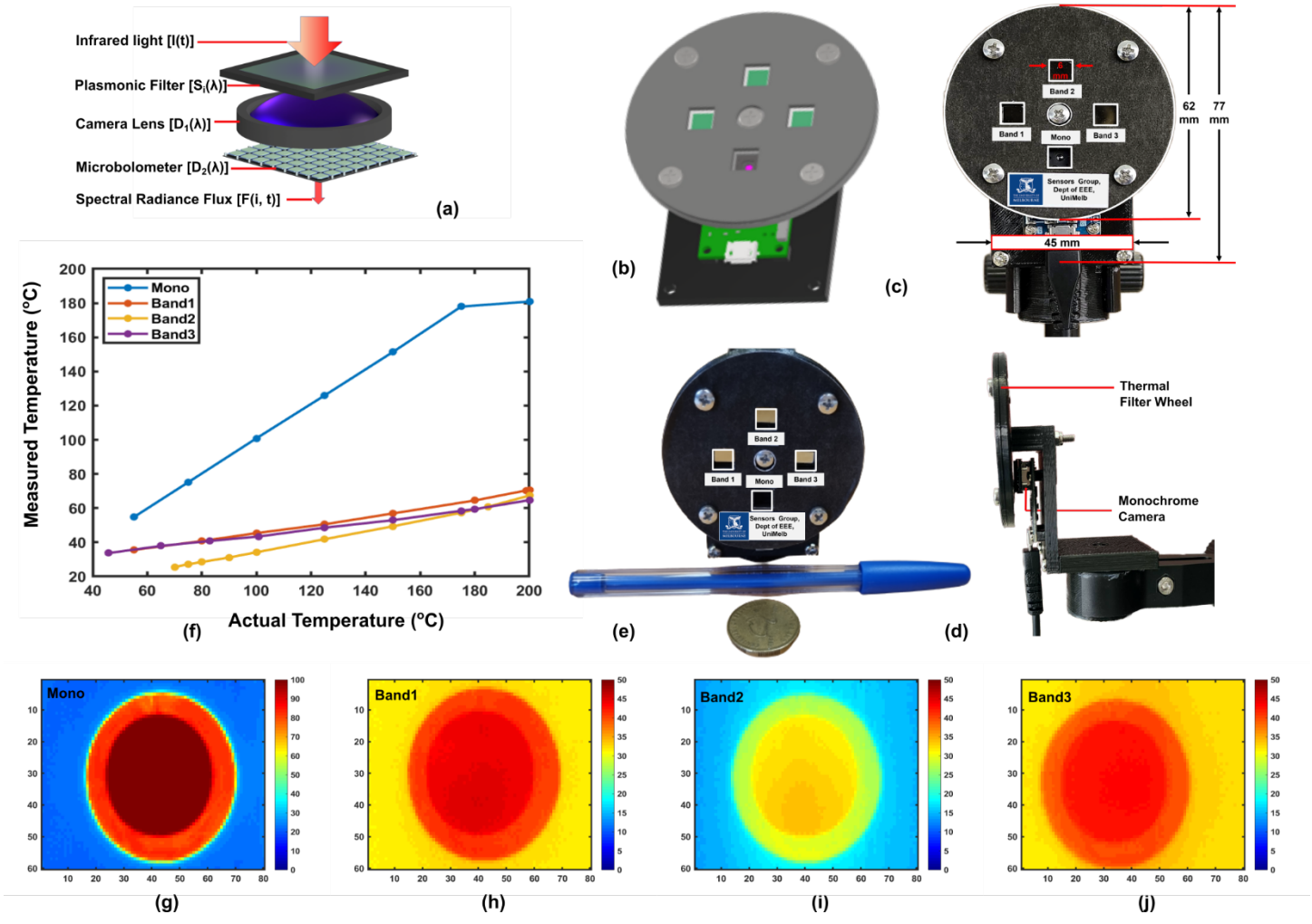


图 2 热多光谱相机的集成与表征： (a) 光路中的光线调控，从上到下依次为：入射红外光、制备的等离激元滤光片、安装在微测辐射热计上的相机镜头 [及探测器响应度 $D(\lambda) = D_1(\lambda)$。$D_2(\lambda)$] 以及滤光后的光线。(b) 集成到商用相机中的热多光谱滤轮示意图。分解示意图见电子补充材料中的图 S3。(c)–(e) 集成到热成像单色相机中的3D打印滤轮，含三片光谱滤光片（每片5×5 mm^2），分别从正面 (c) 和侧面 (d) 展示。(e) 展示了所提出的相机与硬币和钢笔的尺寸对比。(f)–(j) (f) 绘出了相机在工作温度范围内所有波段的黑体校准曲线。展示了温度为100 ₀C的黑体多光谱图像数据：无滤光片（单色）时见 (g)，配备三片光谱滤光片（波段1–3）时分别见 (h)、(i) 和 (j)。

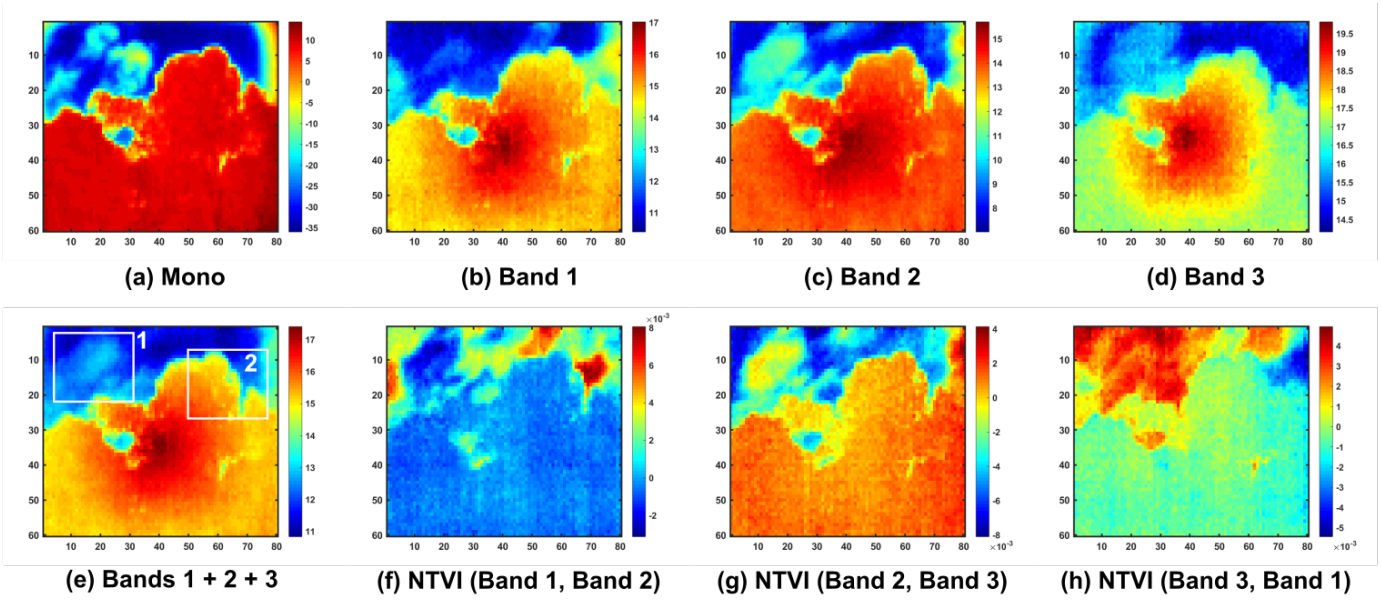


图 3 热长波红外多光谱成像的视觉结果： (a)–(e) 分别展示了以天空背景为背景的树的单色、多光谱（波段 1–3）和融合图像。云层和天空分别在区域 1 和 2 中突出显示。(f)–(h) 两个热波段之间测得的归一化温度变化指数。

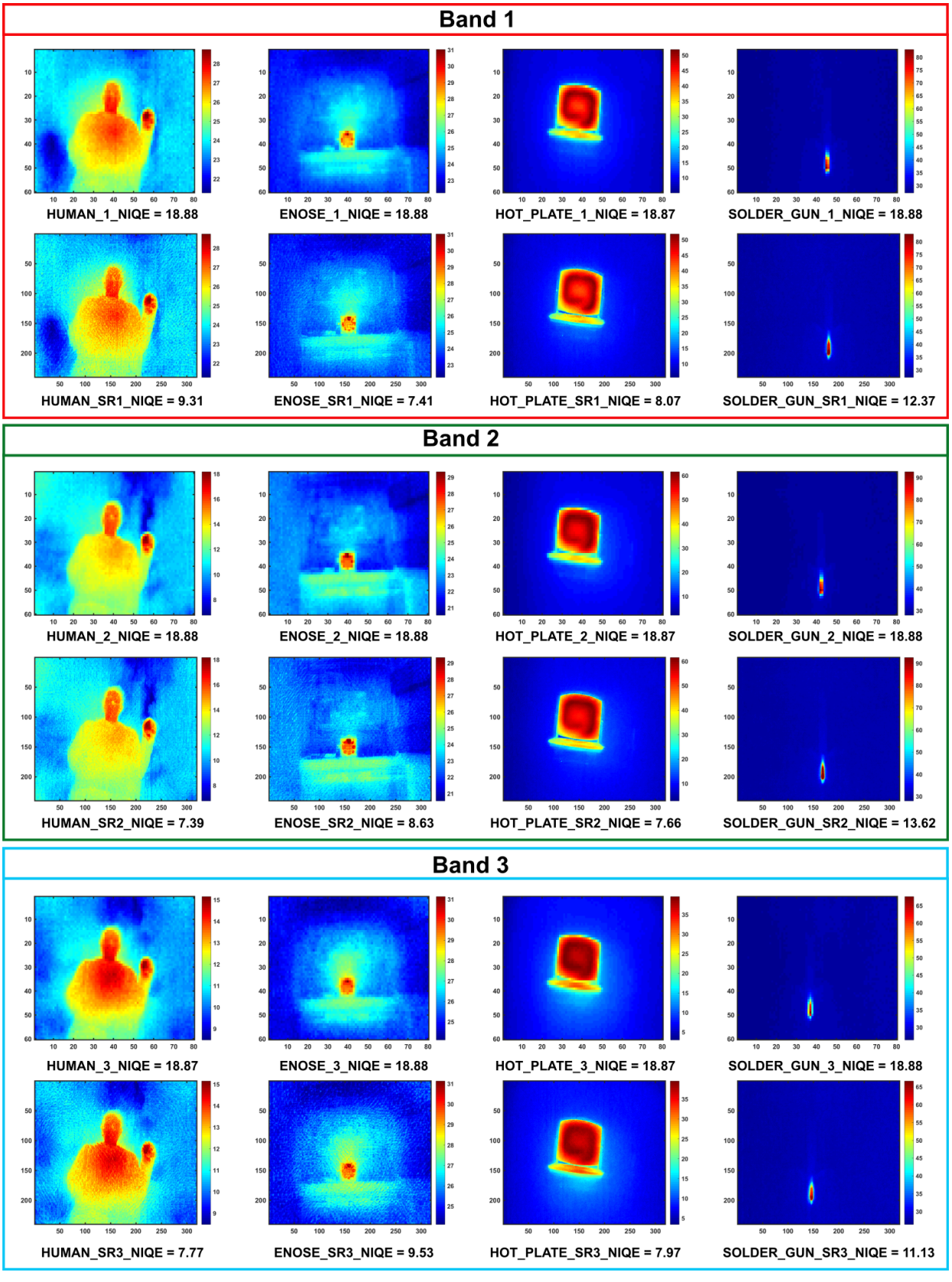


图 4 超分辨率成像的视觉结果：从上到下依次为波段 1–3 的输入图像和输出图像。每幅图像都是按像素阵列排列的光谱数据，色条表示伪温度图（°C）。从左到右依次为：手持咖啡的人（30 °C）、电子鼻（40 °C）、高温烤面包机（150 °C）和焊枪（200 °C）。可见光对应图像见电子补充材料中的图 S5。超分辨率性能通过无参考图像质量评分——自然图像质量评价器（NIQE）来表征。重建图像的评分较低，表明其感知质量更好。

电子补充材料

1. 等离激元微孔阵列的几何调谐

在薄的不透明金属薄膜上制备微小孔洞，且孔洞尺寸小于入射光的波长，这种结构中的红外透射机制可用于透射层，从而显著增强光通过孔洞的透射，并实现波长滤波。工作于透射模式的基于孔阵列的滤光片，其共振峰将主要由微孔（圆柱形）边界处及两个表面上的表面等离激元模式决定。在短波长下，对于金属-介质界面处正入射光，三角形或六边形孔阵列中表面等离激元对应的共振波长关系可表示为：

$$\lambda_{SPP} = \frac{P_{SPP}}{\sqrt{\frac{4}{3}(i^2 + j^2 + ij)}} \sqrt{\frac{\epsilon_M \epsilon_D}{\epsilon_M + \epsilon_D}} \qquad \ldots.(1)$$

其中，λ_{max} 为峰值波长，PSPP为孔阵列的节距或周期，i和j表示阵列的散射级次，金属的介电常数为，电介质的介电常数为；对于第一个透射峰，散射级次为i = 1 和j = 0 。在较长波长下，当时，方程（1）可近似为：

$$\epsilon_M >> \epsilon_D$$

$$\lambda_{SPP} = \frac{\sqrt{3}\, P_{SPP}\, n_D}{2} \qquad \ldots.(2)$$

其中，n_D 表示介质层的折射率。

根据方程 2，图 S1 给出了金属-介质界面处不同金属对应的峰位。根据方程 1 和 2，峰值波长由金属薄膜中孔阵列的周期性确定。然而，孔径（相对孔径面积）和金属薄膜厚度的影响并未纳入其中。因此，利用该方程，可以了解任意目标波长处的大致峰位。砷化镓（GaAs，n_D= 3.3）和锗（Ge，n_D = 4）等红外材料的透射峰会随着孔径增大而在 7 μm 以上增强，而二氧化硅玻璃（SiO_2, n_D = 1.47）的透射范围不会超出近红外（NIR）区域。

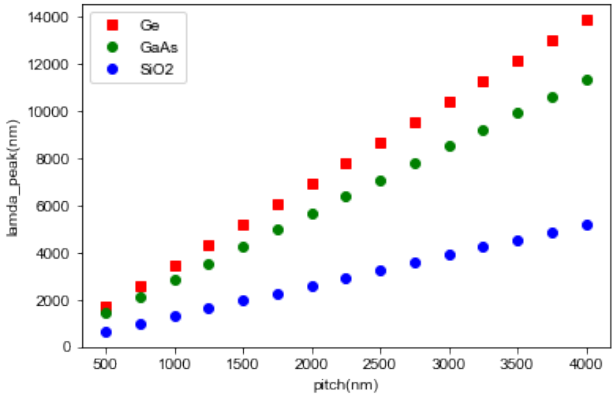


图 S1 采用铝（Al）金属时，不同介电材料在较长波长处的峰值波长

如图 S1a 所示，有多种材料在红外波长范围内具有反射性。金和银一直是利用周期性纳米孔阵列设计表面等离激元传感器的传统金属选择。本研究选择铝作为替代等离激元材料，以保持与标准 CMOS 工艺的兼容性。低成本、天然储量丰富且易于加工等额外优势，使我们的选择在未来研究中颇具前景。

2. 制成的微孔阵列的扫描电子显微镜表征

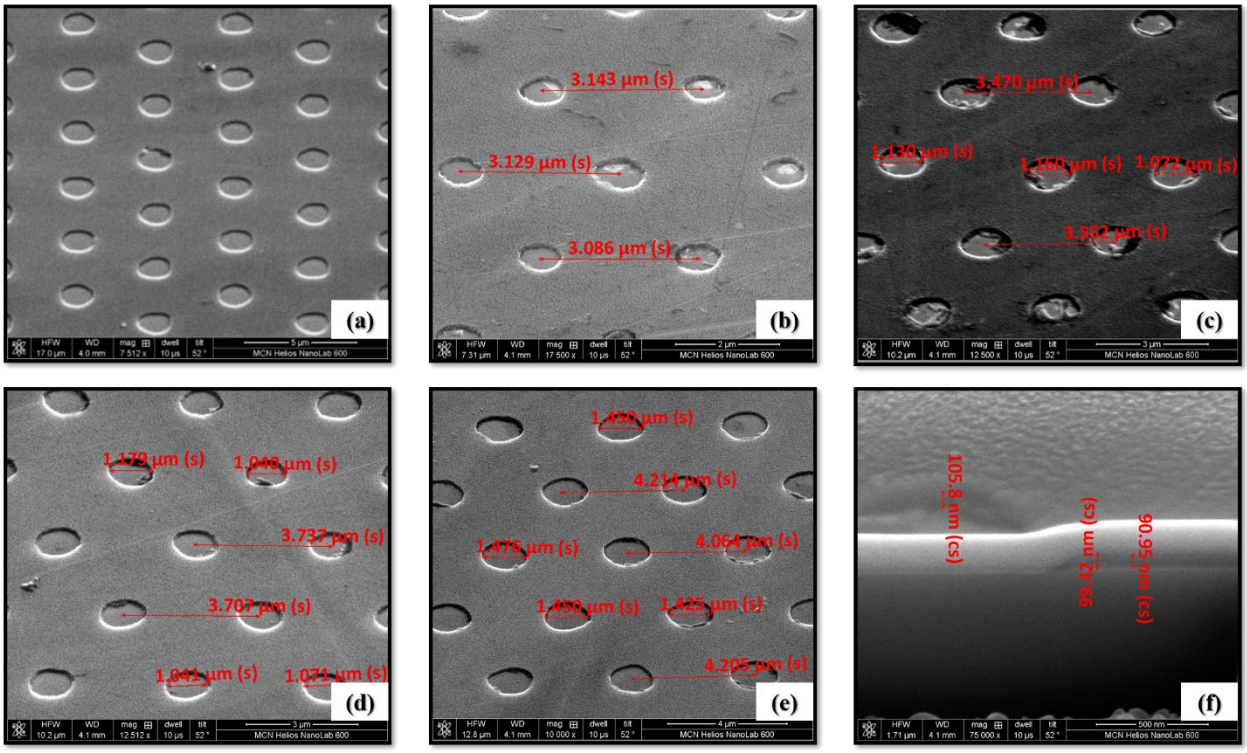


图 S2不同标尺下制成的等离激元多光谱滤波器的扫描电子显微镜表征。(a) 5 µm 标尺下的概览图；(b) 波段 – 1，2 µm 标尺；(c) 波段 – 2，3 µm 标尺；(d) 波段 – 3，3 µm 标尺；(e) 波段 – 4，4 µm 标尺；(f) 锗沉积后滤光片的垂直截面。

3. 热多光谱滤轮的详细视图

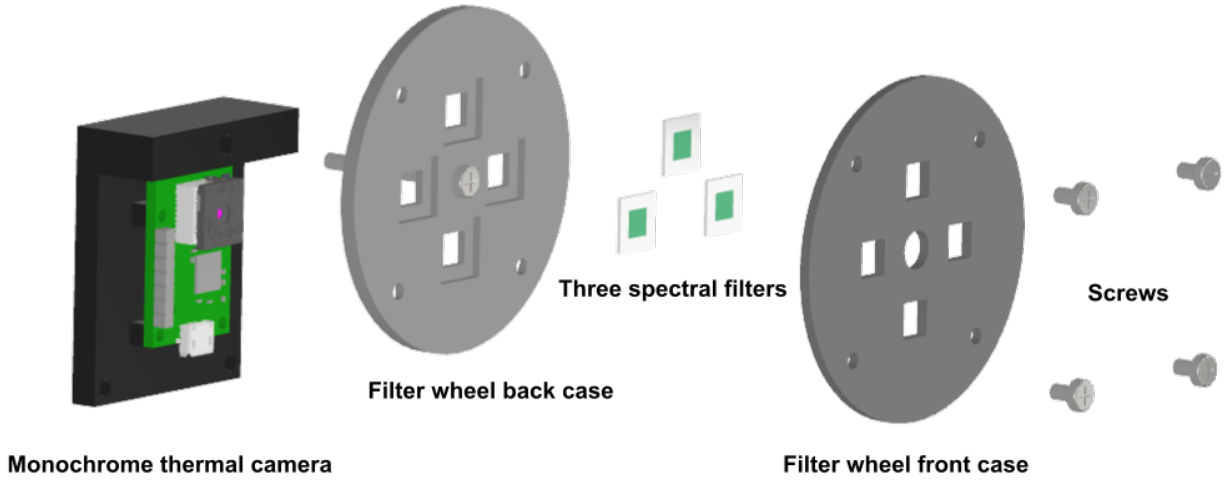


图 S3 热多光谱滤轮的分解示意图。从左到右依次为：单色热成像相机、滤光轮后壳、三个光谱滤光片、滤光轮前壳和螺钉。

4. 超分辨率网络架构

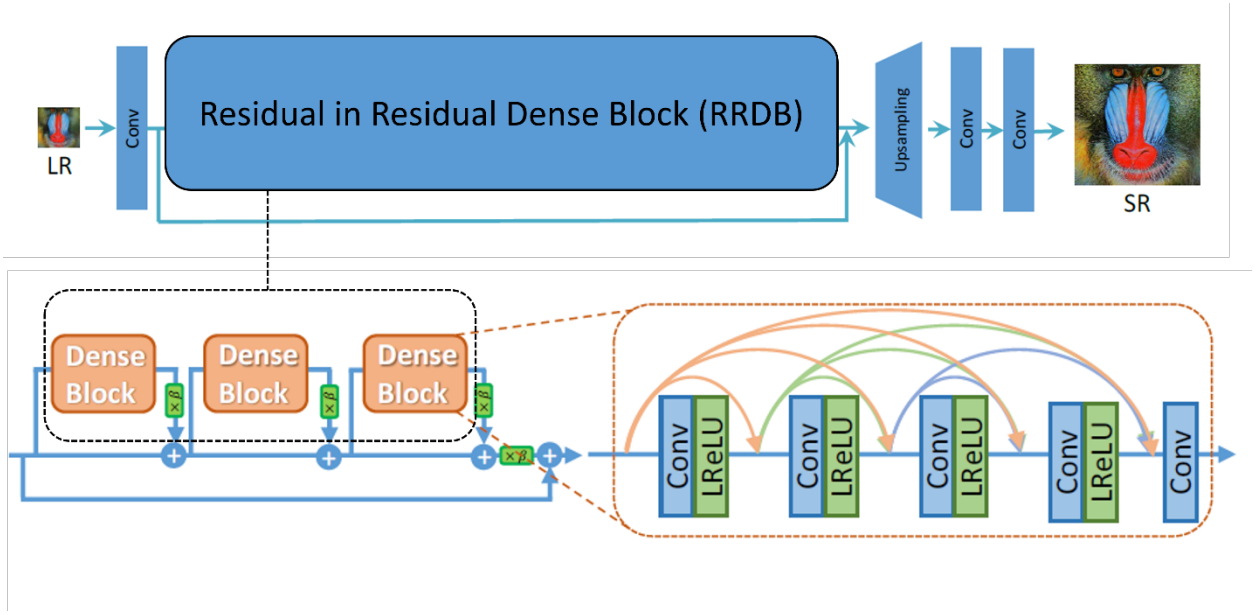


图 S4 用于图像超分辨率的增强型超分辨率生成对抗网络（ESRGAN）网络架构 [44]。深度学习模型采用 RRDB块，β 是残差缩放参数。

5. 测试数据集



图 S5 从左至右：手持咖啡的人（30 ₀C）、电子鼻（40 ₀C）、高温烤面包机（150 ₀C）和焊枪（200 ₀C）。

6. 测试数据集

参数	所提系统	Telops 相机 [46]	Bodkin 相机 [47]
探测器类型	非制冷测辐射热计	制冷型 InSb 或碲镉汞	制冷型
方法	滤光轮	滤光轮	复用
波段数	3	8	62
空间分辨率	80×60 （软件：400 × 300）	640×512	19×15
光谱范围	8-14 μm	7.5-11.5 μm	7.8-10.8 μm
重量	~40 克	~13 千克	~25 千克
包装尺寸	77×62×45 毫米	321×199×176 毫米	406×330×914 毫米

表 S1 将本文所提系统的参数与商业解决方案进行比较，[46] 和[47]