

# 2023年超材料热点回眸

周济, 于相龙

清华大学材料学院, 北京 100084

**摘要** 盘点了2023年超材料学科在应用拓展、新材料研发、制造技术突破、可持续发展以及国际合作方面取得的突破性进展。在光学超材料领域, 光学耗损控制、制备方法以及新功能拓展加快了光学超材料的发展; 在热功能超材料领域, 具有非互易热辐射特性的热学超材料研究有了新进展; 力学超材料领域, 从普适性的功能性表征到新结构、新机制、新功能、新方法的探索都有新突破; 作为超材料家族的新成员, 基于新物理概念的量子及时变超材料也有所进展, 除此之外, 超材料于常规材料的融合在基于二维材料的超表面和可重构超材料表面逐渐成为研究的热点。未来, 超材料应在产业化应用落地、打破技术研究壁垒、抓住人工智能技术提供的新机遇以及挖掘新物理系统构建方面潜力和与常规材料融合发展等方面发力。

**关键词** 超材料; 超表面; 材料设计

酝酿于世纪之交的第四次科技革命催生了一系列新思想、新概念、新原理和新技术, 正在成为改变人类文明的新动能, 其中一个重要的成果便是超材料。超材料是世纪之交出现的一类新型人工材料, 同时也提供了一种全新的材料构筑方法, 为诸多技术领域提供了变革性技术。超材料提供了一种全新的材料构造方法——通过设计人工功能单元, 在不违背物理学基本规律的前提下, 获得与自然物质性质迥然不同的“新物质”, 进而为诸多技术领域提供了变革性技术。2023年, 超材料概念的诞生已近1/4个世纪。回眸2023年超材料领域的发展, 有进展和突破, 但总体上说差强人意: 热点很

多, 但里程碑式的重大突破不多; 研究涉及的新概念很多, 但相比之下新功能的开拓较少; 超材料的花样很多, 但新原理、新机制方面的进展较少; 顶刊论文很多, 但灵光一闪的原始创新相对较少。在此仅对超材料领域较为引人注目的部分热点工作进行盘点。

## 1 光学超材料

自超材料概念提出以来, 光学超材料一直是最具吸引力的研究领域。然而, 由于光学超材料的损耗问题、加工问题等一直困扰着这类超材料的发展。

收稿日期: 2024-01-02; 修回日期: 2024-01-05

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目(2023-XZ-68); 国家自然科学基金重点项目(52332006)

作者简介: 周济, 教授, 中国工程院院士, 研究方向为超材料, 电子信箱: zhouji@tsinghua.edu.cn

引用格式: 周济, 于相龙. 2023年超材料热点回眸[J]. 科技导报, 2024, 42(1): 63-71; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.01.003

近年来,随着电子技术的摩尔定律接近天花板,光子信息技术越来越受到关注,而光学超材料和超表面由于其对光的强大调控能力而任意被人们看好作为光子学技术的理想的材料平台。2023年,光学超材料领域的研究人员在光学损耗控制、制备方法,以及新功能拓展方面开展了一些有意义的探索。

光学损耗一直是困扰光学超材料器件化的关键问题,为克服这些问题,Guan等<sup>[1]</sup>提出多频率组合复频波激发超透镜成像理论机制,通过虚拟增益抵消本征损耗,成功将超透镜成像分辨率提高约一个量级(图1<sup>[1]</sup>),研究引入了合成复频率波(synthetic complex frequency waves, CFW)的概念,实现了同时振荡和放大的波以对抗叠加成像中的光学损失,从而为成像过程提供“提升(效果)”,抵消通常困扰超透镜工作的光学损失。该研究使用由双曲超材料和偏振超材料制成的超透镜进行了实验,取得了较为理想的成像结果。这一研究工作表明,通过组合以各种实频率拍摄的图像,可以在复频率上构建更清晰、更高分辨率的图像。

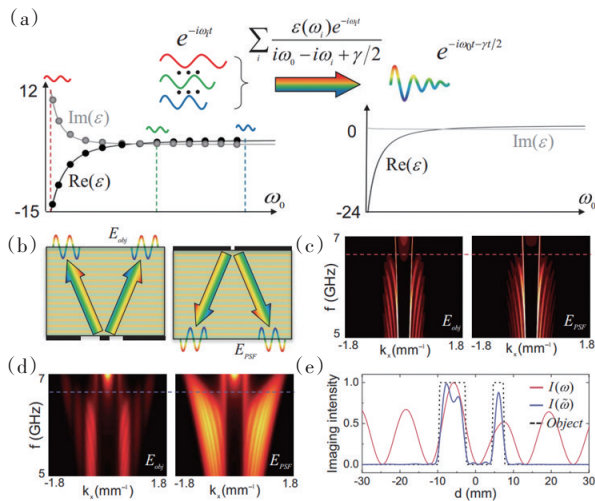


图1 基于合成复频率波超透镜光学损耗补偿示意

光学超材料领域另一项较为引人注目的工作是极紫外超材料的实现。Ossiander等<sup>[2]</sup>通过薄硅膜中精心设计的孔阵列超表面,基于“真空引导”聚焦接近衍射极限的超快极紫外脉冲,首次实现极紫外超透镜(图2<sup>[2]</sup>)。研究人员借助于硅材料与孔内的高折射率反差有效地真空引导波长约为50 nm的光,并通过孔直径调控了纳米尺度的传输相位,

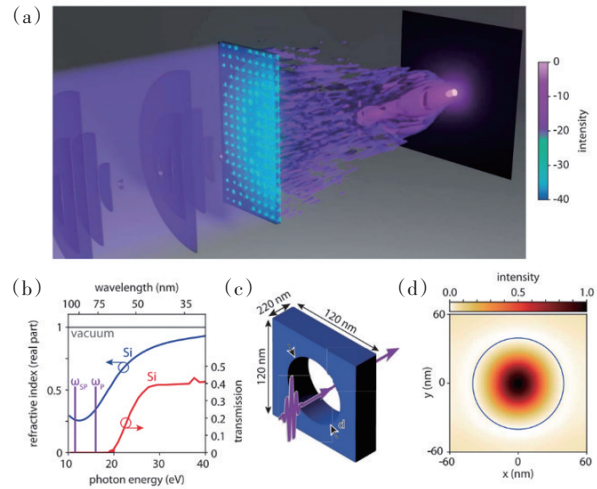


图2 极紫外超透镜设计方案

在此基础上制备了焦距为10 mm的极紫外超透镜,并将高次谐波产生的超短极紫外光脉冲聚焦到0.7 μm。这一工作成功地拓展了透射光学材料的光谱范围。

在光学超材料的规模化制备方面, Kim等<sup>[3]</sup>报道了利用深紫外氟化氩浸没式光刻和晶圆级纳米压印光刻技术,实现了大孔径可见光超透镜的低成本和高通量大规模生产。通过压印了12"主印模,利用涂覆工艺,制备高折射率膜,制造数百厘米级的超透镜。由于增强光约束效应,提高转换效率。利用印刷超透镜制造了超薄虚拟现实器件,可扩展制造超光子器件方面。

在全光调控方面, Francescantonio等<sup>[4]</sup>基于非线性周期超表面,演示了上转换的全光路由。通过源于泵浦脉冲与其倍频模态的相互作用,并调谐这2个泵浦光束之间的相对相位和偏振,通过同时设计超表面的单元尺寸及其间距的非线性发射,获得了90%的调制效率在超表面的衍射级数之间路由上变频信号(图3<sup>[4]</sup>)。

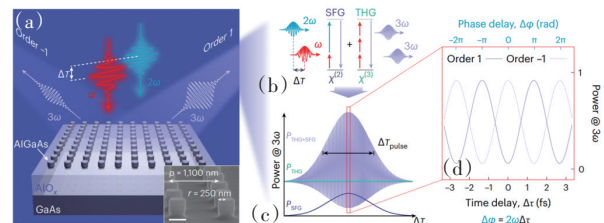


图3 基于介电超表面,上转换的全光路由

在计算光学超材料方面, Cordaro 等<sup>[5]</sup>提出了一个基于超薄硅超表面的模拟计算平台。利用自由空间可见光辐射求解了第二类 Fredholm 积分方程, 通过逆向设计硅基 Si 超表面, 实现了对应于预置的数学问题飞散射矩阵合成。将半透明镜结合到样品中, 以提供足够的反馈, 从而执行所需 Neumann 级数, 在模拟域中以光速求解相应的方程。这一可见光波长操作实现了高度紧凑的超薄设备, 其可以受询问于自由空间, 展现出高处理速度、低能耗和片上集成的模拟计算可能性。

在光信息存储方面, Xiong 等<sup>[6]</sup>发展了一种信息存储超表面技术, 适用于诸如高容量光学显示器、信息加密和数据存储等诸多应用。他们理论演绎并实验证实利用单一超表面成功获得高达 11 个独立偏振通道, 该超表面在不同偏振的单色可见光照下可观测到 11 种独立的全息图像。通过引入光学响应噪声调控, 突破光学超表面偏振复用的容量极限, 增加了存储容量。其原理如图 4<sup>[6]</sup>所示, 通过设计含有多个共振单元的二维纳米结构, 其对琼斯矩阵的对角元和非对角元都可以被独立调控, 实现传统设计中的 3 个独立偏振通道。进一步引入强度可调的非关联噪声, 减弱甚至消除信号串扰(图 4(c)), 并最终实现多通道偏振复用超表面(图 4(d))。

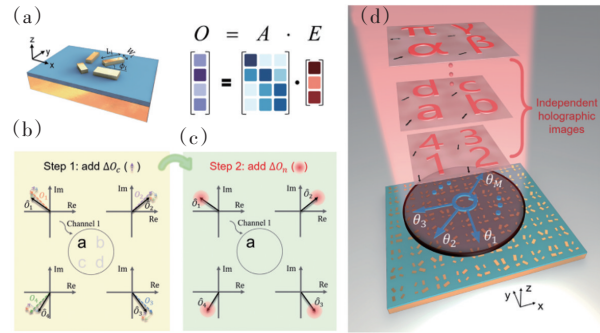


图4 信息存储超表面的设计原理示意

## 2 热功能超材料

在热功能超材料中, 基于超材料辐射制冷技术近年来较受关注, 超材料因其辐射性能的高度可设计性为辐射制冷提供了理想的高性能材料。2023 年的一个热点是具有非互易热辐射特性的热学超材料。

热辐射通常是服从互易性, 其中对于给定的波长和角度通道, 从物体吸收和发射的辐射是相等的。为克服基尔霍夫定律的限制, 开启了热发射器的众多应用和设计。可以利用吸收率和发射率关系的解耦, 以实现新的功能。Shayegan 等<sup>[7]</sup>报道了 InAs 基片加介电光栅结构的非互易吸收/发射特性。在磁光材料砷化铟 InAs 中(图 5<sup>[7]</sup>), 将法向对角介电常数张量修正为非对角介电常数张量的平

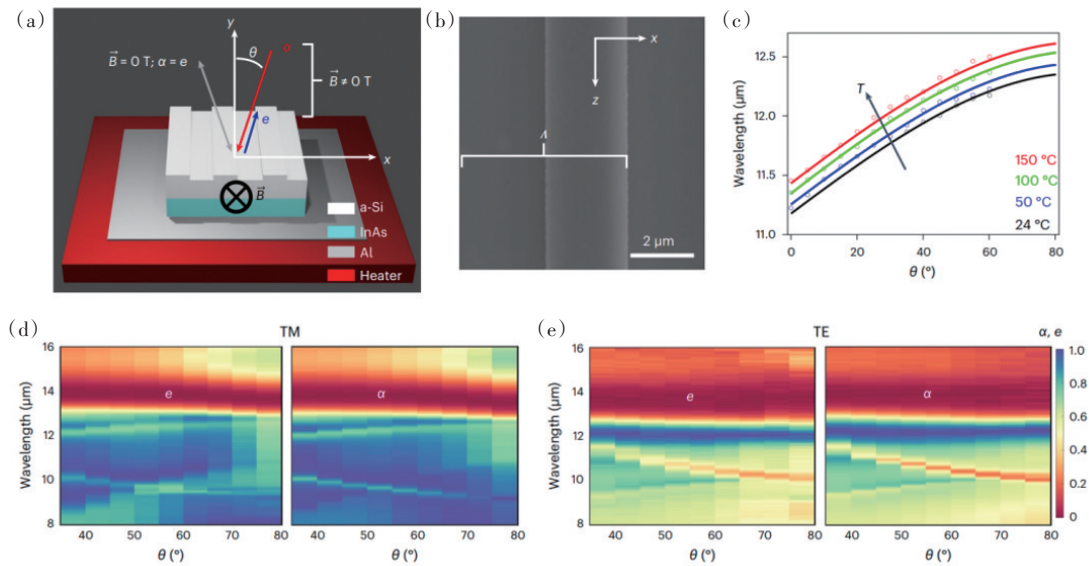


图5 砷化铟导膜共振结构打破了基尔霍夫热辐射定律

面内磁场情况下,出现了发射率和吸收率之间的不等,从而打破基尔霍夫热辐射定律。

非线性是实现非互易辐射的另一条途径。Cotrufu 等<sup>[8]</sup>报道了非磁性的、基于硅热光非线性的超薄光学超表面对自由空间辐射的非互易响应。该超表面结合了平面外的不对称性和平面内的破缺对称性,精细地调节连续域准束缚态的辐射线宽,

通过连续域准束缚态参与的三阶热光非线性,实现超过 10 dB 非互易传输和小于 3 dB 插入损耗(图 6<sup>[8]</sup>)。数值计算表明,非互易响应的建立和弛豫时间,可以接近亚微秒尺度,仅受热耗散的限制。实验演示设备,将非互易性领域与超薄超表面技术相结合,有助于高功率激光腔的信号处理和路由、通信的保护。

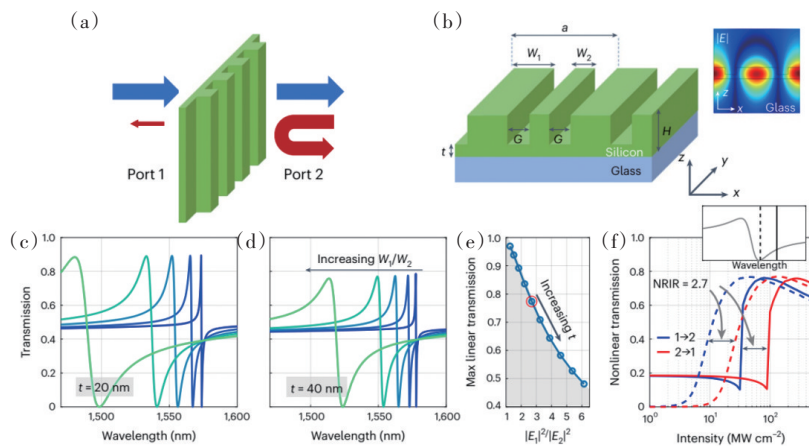


图6 基于硅热光非线性,超薄光学超表面对自由空间辐射的非互易响应

### 3 力学(机械)超材料

力学(机械)超材料不仅功能繁多,可供选择的人工结构单元也非常丰富,近年来一直是一个较为活跃的研究领域。2023年从普适性的性能表征到新结构、新机制、新功能、新方法的探索方面都有一些进展。

力学超材料可针对频率相关特性进行设计剪裁,使其可用于轻质抗冲击、声波导或振动阻尼等多种场景。然而,由于低通量、有损表征、缺乏现成的测试手段,在小尺度上获取其动态特性仍是一个挑战。Kai 等<sup>[9]</sup>报道了一种高通量、非接触式框架,利用超材料内的 MHz 波传播特征,非破坏性地提取动态线性特性、全向弹性信息、阻尼特性和缺陷量化。通过振动响应的频率偏移可以鉴定超材料内部的隐形缺陷(图 7<sup>[9]</sup>),该工作为加速数据驱动的机械超材料的发现提供了一条途径。

在新原理方面,Guo 等<sup>[10]</sup>将弹性理论推广到非定向的序参数丛,提出一种新的拓扑序形式——非

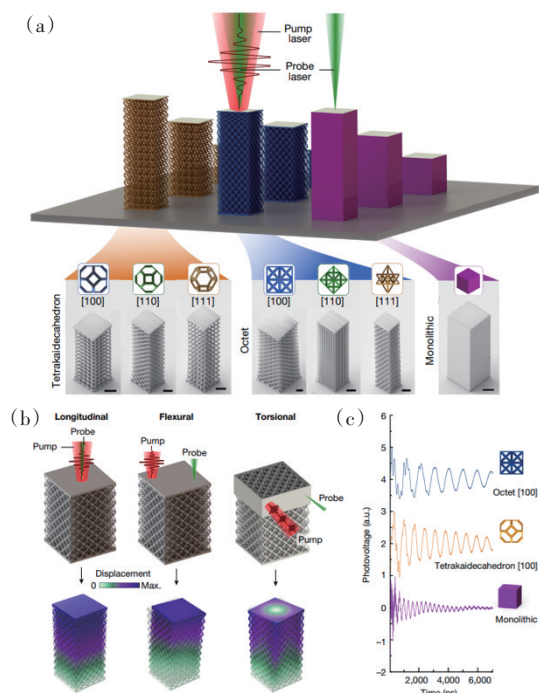


图7 非接触式、激光诱导激发和探测超材料中的弹性波

定向序,研究发现,非定向平衡主要是因为拓扑保护节点和线的任意位置而广泛简并,其中序参量必须为0(图8<sup>[10]</sup>)。非定向序更广泛地适用于本身非定向的物体,如弯曲的莫比乌斯带和克莱因瓶。将与时间相关的局部扰动应用于具有非定向序的超材料,设计拓扑保护的机械存储器,实现了非对易响应,这些超材料携带了负载轨迹编织。

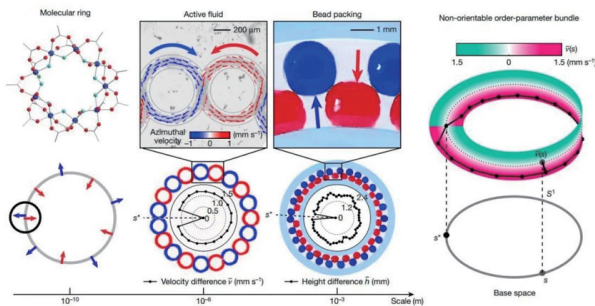


图8 基于阻挫诱导,非定向序的力学超材料

在新结构和新方法方面, Meeussen 等<sup>[11]</sup>报道了基于机械多稳态的折纸超材料形状变形策略,可以克服策略预图案化导致的缺乏内在形状选择和持续激励造成形状不稳定的限制。在波浪形变形片折纸超材料上,以自稳定的折痕模式存储机械刺激记忆,使得其在去除外部刺激后,折痕会持续存在,并迫使折纸超材料转换为既定的弯曲、卷曲和扭曲的形状(图9<sup>[11]</sup>)。适当外力强制,也可以擦除这些

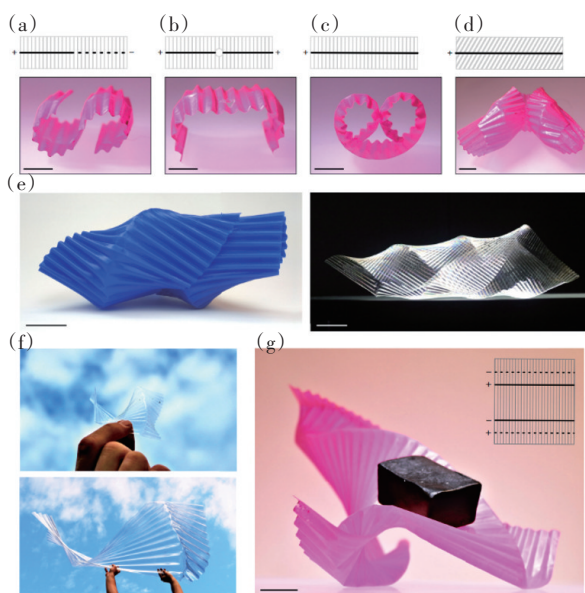


图9 多稳态的折纸超材料形状变形策略

稳定的形状记忆,从而实现了可重写的图案,以及重复且鲁棒致动特性。

在机械超材料的设计方面, Bastek<sup>[12]</sup>提出了一种在周期性随机晶胞结构的全场数据上训练的视频扩散生成模型(图10<sup>[12]</sup>),成功地预测和调整在大应变状态时,压缩的非线性变形和应力响应,包括屈曲和接触。研究人员打破了直接学习从属性到设计映射的常见策略,而是通过估计预期变形路径和全场内部应力分布来调整非线性响应,该工作有望简化和加速具有复杂目标性能的机械超材料设计。

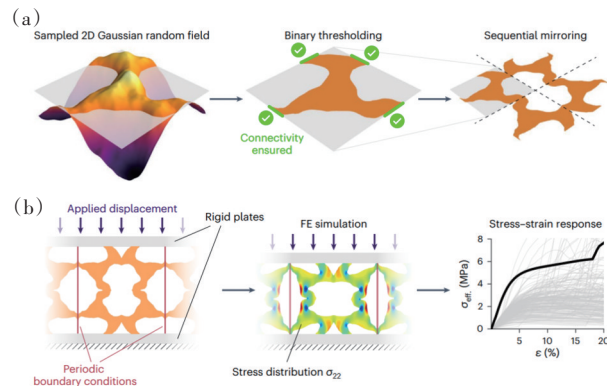


图10 机械超材料设计与生成模型过程

在新机制和新功能方面, Hwang 等<sup>[13]</sup>报道了超材料黏合剂,通过编程切割结构,同时实现强大和可释放的黏合,并具有空间可选择的黏合强度。通过迫使裂纹向后扩展,以独特地抑制裂纹扩展,从而增强了60倍的黏附力,并允许裂纹在相反的方向上生长,以便于释放和重复使用(图11<sup>[13]</sup>)。该项机制在潮湿和干燥条件下,在不同基材上的多种黏合剂中都起作用,并能够在任何位置同时在两个方向上,以独立可编程的黏合强度,实现高度可调的黏合行为。

## 4 量子与时变超材料

作为超材料家族的新成员,基于新物理概念的量子及时变超材料也有所进展<sup>[14]</sup>。

在面向量子信息的超材料方面, Zhang 等<sup>[15]</sup>提出了一种基于超材料的超导量子模拟器,融合超导量子比特与微波光子带隙超材料波导,实现了具有

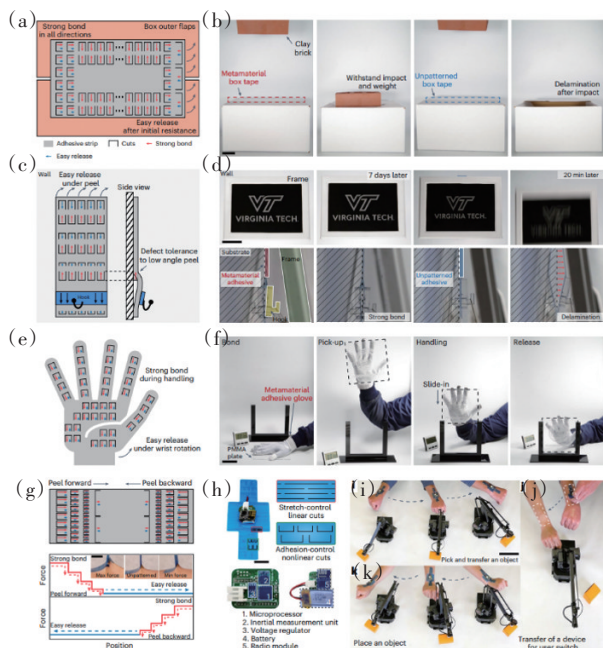


图 11 具有可编程强度和方向的超材料黏合剂

可调跳距和现场相互作用的一维玻色-哈伯德模型。利用单个位点的控制和读出,可描述多体猝灭动力学测量结果的统计特征,从而实现原位哈密顿量学习。研究统计揭示了增加跳跃范围的影响,呈现了从可积性到遍历性的预测渡越。这种混合超导量子比特-超材料方法,是开发大规模量子模拟器平台的新途径,从而将晶格扩展到二维,并容纳更多的量子粒子。

在时变超材料方面,Liu等<sup>[16]</sup>报道了一种经典的超材料纳米结构,这是一种支撑在柔性纳米线上的等离子体人工分子二维阵列,可驱动到具有连续时间晶体的所有关键特征态(图12<sup>[16]</sup>):与人工分子等离子体模式共振的光连续相干照射,触发了自发相变到透射率振荡的类超辐射状态,这是由人工分子之间的多体相互作用引起的,其特征是空间和时

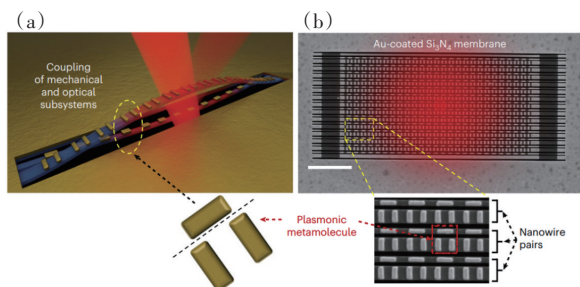


图 12 具有连续时间晶体的时变超材料

间上的长程有序。该项现象,对于研究强关联区域的动态经典多体态,以及在全光调制、频率转换和定时中的应用具有重要意义。

Galiffi等<sup>[17]</sup>报道了支持光子的瞬时非保守散射事件的时间界面,探索这种相干波控制现象的时间模拟。时间界面是一种超材料,其电磁特性可发生突然而巨大的变化。利用超材料实现了光模拟机械碰撞的产生的突变行为,能量可以在光子之间传递,从而根据光子的相对振幅和相位完全传输或吸收能量(图13<sup>[17]</sup>)。这种“相干波控制”可用于创造完美吸收等现象——在波的能量完全耗散时对其进行破坏性干涉,并根据需要调整吸收量。利用适当地调整反向传播信号的幅度和相位,将其应用于擦除、增强和整形任意脉冲。



图 13 时间界面超材料的碰撞光子示意

Moussa等<sup>[18]</sup>则报道了在开关传输线超材料中观察到的光子时间反演和宽带频率相关的转换,其有效电容基于同步开关阵列均匀且突然变化。在这样的时间界面处,输入信号的一部分被时间反演,并且当其动量守恒时,其频谱被均匀地平移,从而形成空间界面的时间对应物。通过时间界面的组合,形成时间超材料和Floquet物质,利用多个时间反射的干涉进行极端的波调控,并利用时间作为额外的自由度。结合一对时间界面,演示时间反射引起的波干涉,实现了Fabry-Pérot腔的时间对应物。建立了实现时间超材料和Floquet光子晶体的基本构件,并提供了在空间和时间中进行极端光子操纵的机会。

## 5 超材料与常规材料的融合

超材料与常规材料的融合作为一种构筑高性能超材料的策略近年来日益为越来越多的研究者所采用。2023年该方向上的热点主要集中在基于二维材料的超表面和可重构超材料方面。

二硫化钨作为一种具有类石墨烯结构、优异光电性质、可调节带隙、稳定的物理化学性质的新型二维材料,在过去一年中颇受关注。Weber等<sup>[19]</sup>报道了基于纳米结构的二硫化钨超表面中连续体束缚态驱动的光与物质强本征强耦合现象,即具有尖锐的、定制的线宽和光-物质相互作用的选择性增强共振。通过改变超表面晶胞,在块体二硫化钨中,实现了激子共振上的连续体束缚态共振调谐,进而实现了与反交叉图案的强耦合和强的拉比分裂。这种自复合超表面有望成为极化激元器件的平台。

利用相变材料构筑可调谐超材料是一种常用的策略。Wan等<sup>[20]</sup>展示了一种用于中波红外区域的电控二氧化钒VO<sub>2</sub>金属超表面,同时充当可调谐光开关、具有可调谐限制阈值的光限制器和具有可调谐工作范围的非线性光隔离器。通过在超表面内直接施加电流,在孔径天线的谐振和非谐振配置之间调制,以实现了高光学传输对比度,并且通过金属层直接结合焦耳加热,从而提供偏置,以限制和非线性隔离功能(图14<sup>[20]</sup>)。

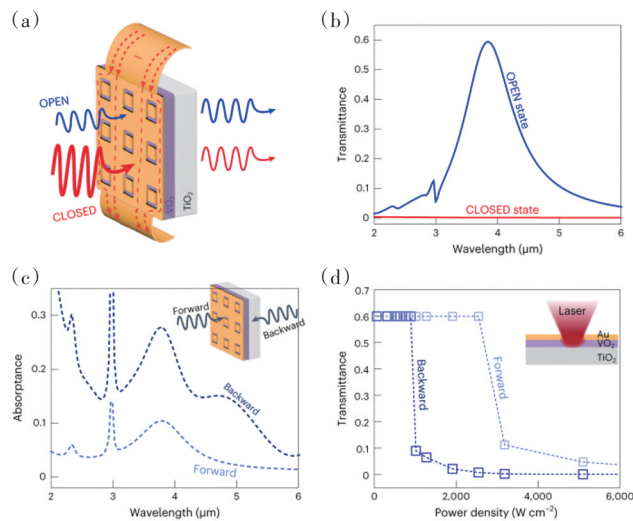


图14 基于相变材料的可调谐超材料

石墨烯超材料领域的一个重要进展是Wei等<sup>[21]</sup>研制了一种基于金属纳米结构与石墨烯集成的超表面中红外圆偏振光电探测器,可通过对称性的等离子体纳米结构阵列合理设计(图15<sup>[21]</sup>),在石墨烯带的辅助下实现圆偏振光探测的几何无滤波光电探测器,以电子方式读取其近场光学信息。

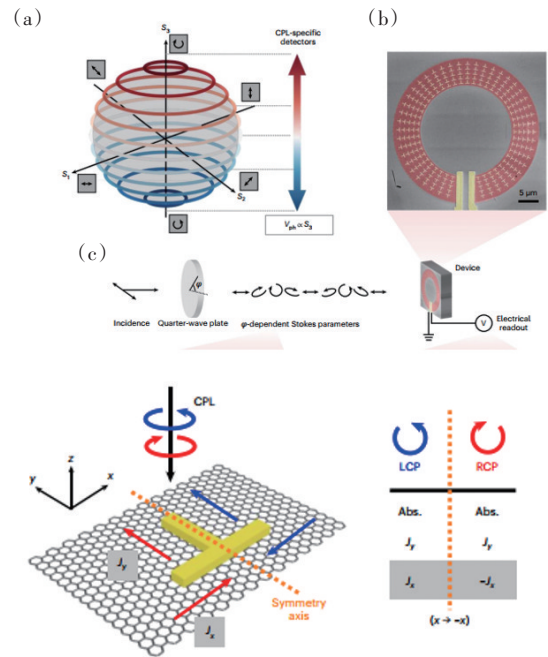


图15 基于金属纳米结构与石墨烯集成的超表面中红外圆偏振光电探测器

在自然光学超材料(受超材料启发的自然材料)方面, Sternbach等<sup>[22]</sup>报道实验观测到了声子极化激元的负折射。在天然晶体之间的界面上,极化激元(红外光子和晶格振动的混合物)形成准直线,当穿过两种双曲范德华材料(氧化钼(MoO<sub>3</sub>)和同位素纯六方氮化硼(h<sub>11</sub>BN))之间的晶面界面时,显示出了负折射现象(图16<sup>[22]</sup>)。Hu等<sup>[23]</sup>则利用近场光学显微镜,通过金属天线作为激发源,成功在实验上实现了面内负折射现象,揭示了极化激元面

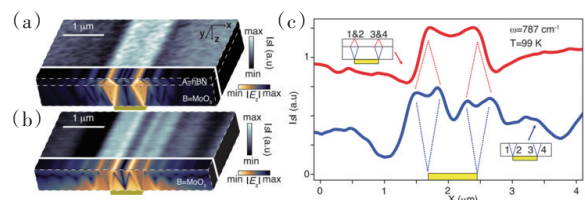


图16 声子极化激元的负折射

内负折射的主要特征。当双曲极化激元在 $\alpha\text{-MoO}_3$ 侧发射并向石墨烯覆盖的 $\alpha\text{-MoO}_3$ 区域传播时,极化激元由于两侧群速度沿 $y$ 方向投影相反,会在界面处发生与正常折射相反的光线偏折现象,即负折射现象。

## 6 展望

1) 超材料概念自提出以来,一直是基础研究十分活跃、应用前景被高度期待的研究领域。然而,超材料的应用却滞后于人们的预期,迄今尚未形成对产业产生重大影响的技术。2022年我们曾与超材料理论的奠基人Pendry教授对超材料的发展方向进行了研判,认为超材料正在从“工程化材料”走向“工程材料”(from engineered materials to engineering materials)<sup>[24]</sup>。近年来,超材料产业化的步伐有所加速,未来若干年,有望在信息技术、能源工程、国防、高端装备、医学检测等领域产生颠覆性技术。

2) 超材料的发展依然面临一些技术上的壁垒。其中最大的壁垒之一就是制备技术。以最受关注的光学超材料为例,尽管这类材料的应用前景清晰、需求强烈,但大量的研究工作仍处于原理阶段,其中的主要原因是缺乏高精度的制备加工手段<sup>[25]</sup>。目前的工作主要集中在制备难度相对低、与半导体工艺兼容度高的超表面领域,理想的实验室结果依然很难获得。此外,在微观尺度测试与表征方面,特别是工作环境下的实施监测方面依然缺乏手段,对于人工结构单元在谐振条件下工作的超材料,其服役行为的研究对于材料走向应用至关重要,应成为未来亟待解决的问题。

3) 人工智能技术的发展为超材料的进一步发展提供了新的机遇。在过去一年中,以Chat-GPT为标志的人工智能技术突飞猛进,在材料研究和设计领域也初露头角<sup>[26-27]</sup>。超材料最为一类最具设计特性的材料系统,应是人工智能技术最先受益者。理论上讲,超材料的所有设计原理和数据可以搭载在人工智能技术上,有望大幅度缩短超材料研发和设计周期。

4) 超材料在新物理系统的构筑方面潜力巨

大,有望推动物理学的发展。超材料提供了一种重构新物理机制与新过程强大的手段,很多新颖的研究集中在利用超材料构建类量子系统、类拓扑系统、非厄米系统、时变系统等一些自然材料难以获得的物理体系,为物理学,特别是实验物理学提供了一种较为理想的平台。正如Pendry教授指出,时间依赖性可以为我们带来重要意义,因为时间反演不变性被打破,拓扑学就会拥有更广阔的空间,同时由于时变系统中光子可以在不同能级之间转换,量子力学就变得极其重要<sup>[28]</sup>。

5) 超材料与常规材料的融合对材料科学的发展有重要意义。超材料的出现为材料研究提供了新的研究范式,为了拓展这种新范式的方法论价值,我们早在十几年前提出了通过超材料与常规材料融合构筑新型功能材料的思想<sup>[29]</sup>。随着研究的演进,这一思想已逐渐为学者所接受并加以利用,开始成为一个新的研究热点。进一步融合应不仅着眼于材料和性能的融合,物理机制的融合也有望成为新型超材料的一个生长点。

## 参考文献 (References)

- [1] Guan F X, Guo X D, Zeng K B, et al. Overcoming losses in superlenses with synthetic waves of complex frequency [J]. *Science*, 2023, 381(6659): 766-771.
- [2] Ossiander M, Meretska M L, Hampel H K, et al. Extreme ultraviolet metalens by vacuum guiding[J]. *Science*, 2023, 380(6640): 59-63.
- [3] Kim J, Seong J, Kim M, et al. Scalable manufacturing of high-index atomic layer-polymer hybrid metasurfaces for metaphotonics in the visible[J]. *Nature Materials*, 2023, 22(4): 474-481.
- [4] Di Francescantonio A, Zilli A, Rocco D, et al. All-optical free-space routing of upconverted light by metasurfaces via nonlinear interferometry[J]. *Nature Nanotechnology*, 2023, 12, doi: 10.1038/s41565-023-01549-2.
- [5] Cordaro A, Edwards B, Nikkhah V, et al. Solving integral equations in free space with inverse-designed ultrathin optical metagratings[J]. *Nature Nanotechnology*, 2023, 18(4): 365-372.
- [6] Xiong B, Liu Y, Xu Y H, et al. Breaking the limitation of polarization multiplexing in optical metasurfaces with engineered noise[J]. *Science*, 2023, 379(6629): 294-299.
- [7] Shayegan K J, Biswas S, Zhao B, et al. Direct observation

- of the violation of Kirchoff's law of thermal radiation[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(10): 891–896.
- [8] Cotrufo M, Cordaro A, Sounas D L, et al. Passive bias-free non-reciprocal metasurfaces based on thermally nonlinear quasi-bound states in the continuum[J]. *Nature Photonics*, 2023, 12, doi: 10.1038/s41566-023-01333-7.
- [9] Kai Y, Dhulipala S, Sun R, et al. Dynamic diagnosis of metamaterials through laser-induced vibrational signatures [J]. *Nature*, 2023, 623(7987): 514–521.
- [10] Guo X F, Guzmán M, Carpentier D, et al. Non-orientable order and non-commutative response in frustrated metamaterials[J]. *Nature*, 2023, 618(7965): 506–512.
- [11] Meeussen A S, van Hecke M. Multistable sheets with rewritable patterns for switchable shape-morphing[J]. *Nature*, 2023, 621(7979): 516–520.
- [12] Bastek J H, Kochmann D M. Inverse design of nonlinear mechanical metamaterials via video denoising diffusion models[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2023, 5(12): 1466–1475.
- [13] Hwang D, Lee C, Yang X W, et al. Metamaterial adhesives for programmable adhesion through reverse crack propagation[J]. *Nature Materials*, 2023, 22(8): 1030–1038.
- [14] Engheta N. Four-dimensional optics using time-varying metamaterials[J]. *Science*, 2023, 379(6638): 1190–1191.
- [15] Zhang X Y, Kim E, Mark D K, et al. A superconducting quantum simulator based on a photonic-bandgap metamaterial[J]. *Science*, 2023, 379(6629): 278–283.
- [16] Liu T J, Ou J Y, MacDonald K F, et al. Photonic metamaterial analogue of a continuous time crystal[J]. *Nature Physics*, 2023, 19(7): 986–991.
- [17] Galiffi E, Xu G Y, Yin S X, et al. Broadband coherent wave control through photonic collisions at time interfaces[J]. *Nature Physics*, 2023, 19(11): 1703–1708.
- [18] Moussa H, Xu G Y, Yin S Y, et al. Observation of temporal reflection and broadband frequency translation at photonic time interfaces[J]. *Nature Physics*, 2023, 19(6): 863–868.
- [19] Weber T, Kühner L, Sortino L, et al. Intrinsic strong light-matter coupling with self-hybridized bound states in the continuum in van der Waals metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2023, 22(8): 970–976.
- [20] King J, Wan C H, Park T J, et al. Electrically tunable VO<sub>2</sub>-metal metasurface for mid-infrared switching, limiting and nonlinear isolation[J]. *Nature Photonics*, 2023, doi: 10.1038/s41566-023-01324-8.
- [21] Wei J X, Chen Y, Li Y, et al. Geometric filterless photodetectors for mid-infrared spin light[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(2): 171–178.
- [22] Sternbach A J, Moore S L, Rikhter A, et al. Negative refraction in hyperbolic hetero-bicrystals[J]. *Science*, 2023, 379(6632): 555–557.
- [23] Hu H, Chen N, Teng H C, et al. Gate-tunable negative refraction of mid-infrared polaritons[J]. *Science*, 2023, 379(6632): 558–561.
- [24] Pendry J, Zhou J, Sun J. Metamaterials: From engineered materials to engineering materials[J]. *Engineering*, 2022, 17(10): 1–2.
- [25] Pitruzzello G. Metaoptics for the consumer market[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(1): 6–7.
- [26] Szymanski N J, Rendy B, Fei Y X, et al. An autonomous laboratory for the accelerated synthesis of novel materials [J]. *Nature*, 2023, 624(7990): 86–91.
- [27] Merchant A, Batzner S, Schoenholz S S, et al. Scaling deep learning for materials discovery[J]. *Nature*, 2023, 624(7990): 80–85.
- [28] Guo C, Luo Y. Light People: Prof. Sir John Pendry, father of metamaterials, spoke about the future of meta[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(1): 45.
- [29] 周济. 超材料与自然材料的融合[M]. 北京: 科学出版社, 2016.

## Hotspots of metamaterials research in 2023

ZHOU Ji, YU Xianglong

School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** Metamaterials are a new class of artificial materials that emerged at the turn of the century, providing a new method of material construction and revolutionary technology for many technical fields. In the past 2023, research on metamaterials made certain progress in multiple aspects. This article attempts to review some of the main research works on metamaterials from several aspects, including optical metamaterials, thermal metamaterials, mechanics (mechanical) metamaterials, quantum and time-varying metamaterials, and the merging of metamaterials with conventional materials. The future research and development trends in the field are also predicted and anticipated.

**Keywords** metamaterial; metasurface; material design ●



(责任编辑 祝叶华)