

双曲声子极化激元的近场调控综述

马磊^{1,2}, 孙聊新^{2*}, 刘锋^{1*}

(1. 上海师范大学数理学院物理系, 上海 200233;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外科学与技术全国重点实验室, 上海 200083)

摘要:在实际应用中,有效的操控极化激元给纳米光子器件、亚波长成像、异常折射等领域带来了巨大的发展前景从而广受关注,但传统介质材料中的极化激元的调控灵活度相对较低,不能满足现实的广阔需要,成为具有挑战性的难题。然而,声子极化激元作为一种光子——声子强耦合的新型准粒子,与其他的极化激元相比,具有更强的束缚光的能力、更长的寿命以及更低的损耗,在亚波长尺度红外光调控领域能够发挥举足轻重的作用。近年来,随着对二维范德瓦尔斯晶体的相关研究及报道,能够承载双曲声子极化激元的介质材料步入大众视野,并且在具有超高分辨率的纳米成像技术的支持下,很多新颖的近场红外光学现象在多种操控手段下被发掘,这极大地丰富了人们对于极化激元的认知。此综述首先从双曲声子极化激元的机理入手,介绍了声子极化激元的概念、色散关系和近期被广泛关注的双曲介质(h-BN、 α -MoO₃)。随后,总结了双曲声子极化激元在上述介质中的不同传播特性以及多种维度调控下的近场成像分析,例如改变范德华晶体的周围介质环境、谐振腔、金属天线的面内调控等等。最后,我们对声子极化激元的研究进行了展望。多样的调控手段展现了声子极化激元的丰富应用,这对纳米成像、集成光路、纳米透镜等红外纳米光子器件提供可借鉴的途径,同时在未来可能还会衍生出更多新兴领域。

关键词:双曲声子极化激元; 纳米成像; 近场调控; 红外纳米光子器件

中图分类号: O469

文献标识码: A

The review of near field regulation of hyperbolic phonon polaritons

MA Lei^{1,2}, SUN Liao-Xin^{2*}, LIU Feng^{1*}

(1. Department of Physics, College of Mathematics and Physics, Shanghai Normal University, Shanghai 200233, China;

2. National Key Laboratory of Infrared Science and Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: In practical applications, effective manipulation of polaritons brings great prospect for nanophotonic devices, subwavelength imaging, anomalous refraction and other fields of interest. But the modulation flexibility of polaritons in conventional dielectric materials is relatively low and cannot meet the broad needs of reality, and it becomes a challenging problem. However, phonon polaritons, as a new type of quasiparticle with strong photon-phonon coupling, have stronger light-binding ability, longer lifetime and lower loss than other polaritons, and can play a crucial role in the field of subwavelength-scale infrared light modulation. In recent years, with the research and reports on two-dimensional van der Waals crystals, dielectric materials capable of hosting hyperbolic phonon polaritons have come into the public eye, and with the support of ultra-high resolution nano-imaging technology, many novel near-field infrared optical phenomena have been explored by various manipulation methods, which greatly enriches the knowledge of polarization excitations. This review starts with the mechanism of hyperbolic phonon polaritons, introducing the concept of phonon polaritons, the dispersion relation and the hyperbolic media (h-BN and α -MoO₃) that have recently received much attention.

收稿日期: 2023-03-07, Received date: 2023-03-07,

基金项目: 中国科学院战略重点研究计划项目(XDB43010200); 国家重点研发计划项目(2022YFA1404603); 国家自然科学基金项目(11991063, 12141303, 12073018); 上海市科学技术委员会项目(19ZR1479700, 21JC1406200, 22JC1403300); 上海市学术带头人计划项目(22XD1422100); 上海市人才发展基金项目(2020041)

Foundation items: Supported by Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDB43010200), Supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFA1404603), National Natural Science Foundation of China (11991063, 12141303 and 12073018), Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (19ZR1479700, 21JC1406200 and 22JC1403300), Program of Shanghai Academic Research Leader (22XD1422100) and Development Fund for Shanghai Talents (2020041).

作者简介(Biography): 马磊(1997-), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要研究领域为声子极化激元的红外近场成像及调控等, E-mail: 595711975@qq.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: sunlx@mail.sitp.ac.cn

Subsequently, the different propagation properties of hyperbolic phonon polaritons in the above mentioned media and the analysis of near-field imaging under various dimensional modulations, such as changing the surrounding dielectric environment of van der Waals crystals, resonant cavities, in-plane modulation of metallic antennas, etc., are summarized. Finally, we give an outlook on the study of phonon polaritons. The diverse modulation tools show the rich applications of phonon polaritons, which provide avenues for infrared nanophotonic devices such as nano-imaging, integrated optical circuits, and nano-lenses, and may also lead to more emerging fields in the future.

Key words: hyperbolic phonon polaritons, nano-image, Near-field modulation, Infrared Nanophotonic devices

引言

光与物质的耦合效应研究在推动科学技术发展尤其是光物理学发展上有着重要作用。随着微纳加工技术的成熟以及近场探测水平的提高,致力于在纳米尺度探测、发现、并精准调控的极化激元学应运而生。极化激元^[1-3]作为光-物质强耦合的集体振荡模式,包括光子与物质表面自由电子耦合而成的表面等离子激元^[4-8],光子与极性晶格振动耦合形成的声子极化激元^[9-11],光子与半导体中电子-空穴对耦合形成的激子极化激元^[12-16]以及磁性介质中与磁子耦合而成的磁子极化激元^[17]等。在范德瓦尔斯力联结的层状二维材料,范德瓦尔斯晶体提供了大面积、原子层级外延光滑平面的同时也能够支持上述存在的各种极化激元,这主要是由于二维材料本身的晶体结构以及原子层间的堆叠。人们通过机械剥离可以获得面积不同、厚度各异的介质平面,这为极化激元腔^[18]、光波导^[19-20]、光子晶体、摩尔扭角^[21-22]等研究创造了理想平台。层状范德瓦尔斯材料中极化激元的研究主要集中于层状结构、外部因素对极化激元的影响以及定向引导设计结构调控极化激元等,例如在小尺度的区域汇聚更强的光场可以定制出纳米开关^[23-24]、聚焦透镜^[25-26]等。对于光通信而言,损耗越低、传播越长的极化激元是实现光传导的理想配置^[27],但在多功能的微纳组件中,表面等离子激元的散射速度过快成为了器件应用的一大难题,另外在红外波段,传统的金属和半导体对于表面光场控制的灵活性通常也很低^[28]。然而,这些问题都能够在支持声子极化激元的范德瓦尔斯晶体中得到解决。存在于独特范德瓦尔斯介质材料中的极化激元——声子极化激元显现出光明的应用前景,其在宽红外光谱频段的极强的亚波长特性正引领着先进微纳光子器件的发展,新型的范德瓦尔斯材料(例如 h-BN^[29-34]、 α -MoO₃^[35-40]等)所展现出的双曲型传播的声子极化激元为面内光场的调控提供了广阔的平台和更高的自由度^[41-43]。

本文聚焦于范德瓦尔斯体系中的独特传播模式——双曲声子极化激元,并且重点关注支持双曲传播的介质材料,如支持面外双曲传播的单轴极性晶体 h-BN、支持面内各向异性双曲传播的双轴极性晶体 α -MoO₃ 等,并对近些年基于该特殊传播模式下的近场调控工作进行论述。文章最后,对于声子极化激元的探究以及近场调控的潜在发展做出了前瞻性的讨论。

1 声子极化激元

1.1 声子极化激元的概念

在光的吸收与反射过程中,人们常常关注的是电子态的跃迁。然而,在半导体中,入射的电磁波能够与晶体中的晶格振动耦合,从而产生光学模式下的声子极化激元^[44-45]。但需要注意的是,并非所有晶体中的晶格振动都可以在外场作用下实现耦合,只有振动模式带动体系中电偶极矩变化的极性材料才可以实现,特别的,由于通常情况下的入射光场具有横波特性,只能够与晶体中的横向声子耦合,而不会与纵模相互作用,因此,外场与极性晶体中声子耦合存在一定的频率范围,在该范围内光子-声子会产生强的相互作用,并且具有极高的反射率(通常是 100%),此范围就称为晶体的剩余射线带。黄(黄昆)方程将光子-声子的耦合量子化,并且定义为一种新型的准粒子,而后又被国外科学研究人员惯称为声子极化激元(Phonon Polaritons)。近年来,大量的研究证明声子极化激元存在于各种不同结构的极性晶体中,并且声子极化激元因晶体的结构以及面内色散等特征而显示出复杂多样的传播形式,在此主要介绍存在于双曲介质中的双曲声子极化激元。

1.2 声子极化激元的色散关系

介电常数常常反映声子极化激元的物理特性,通常情况下,耦合体系下晶体的光学响应取决于声子的吸收而不是电子的跃迁,极化激元的介电方程如下^[46]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} \left(1 + \frac{\omega_{LO}^2 - \omega_{TO}^2}{\omega_{LO}^2 - \omega^2 - i\omega\Gamma} \right), \quad (1)$$

其中 ε_{∞} 表示高频率下的介电常数, ω_{LO} 、 ω_{TO} 分别为纵向声子频率和横向声子频率。 Γ 为材料本身的阻尼系数。由式(1)可知,在横向声子频率和纵向声子频率之间,介质的介电常数的实部为负值,由此光与晶格振动的耦合(声子极化激元)就可以在此频率范围内产生,并且其耦合后的传播行为依据其传播的色散规律。声子极化激元在范德瓦尔斯介质中的传播的动量分布可描述为^[47]:

$$\frac{k_x^2 + k_y^2}{\varepsilon_z^2} + \frac{k_z^2}{\varepsilon_x^2} = \frac{\omega^2}{c^2}, \quad (2)$$

在直角坐标系中, k_x 、 k_y 、 k_z 分别代表耦合电磁波在范德瓦尔斯介质的各个方向的动量, ε_z 、 ε_x 分别为沿 z 、 x 方向传播的介电常数, c 为真空中的光速。由式(2)明显可以看出,声子极化激元的传播(色散)与晶体各个方向的介电常数的数值有关,下面我们就来讨论一下不同情况下的传播:首先当面内介电常数 $\varepsilon_x = \varepsilon_y > 0$ 时,呈现出面内各项同性传播的圆形等频曲线,当 $\varepsilon_x \neq \varepsilon_y > 0$ 时,呈现出椭圆形的等频曲线,而当面内的介电常数 $\varepsilon_x \cdot \varepsilon_z < 0$ 或者 $\varepsilon_y \cdot \varepsilon_z < 0$ 时,会呈现出双曲形状的等频曲线。范德瓦尔斯介质中的声子极化激元的多种传播模式通常不受限,表现出高度的光场束缚能力并且存在理论上无限大的动量条件,并且色散曲线角度对能量流动的导向分析为光场调控提供了前所未有的机会。

基于这些原子层架构的范德瓦尔斯纳米材料,调控极化激元的物理特性,正在成长为一个充满活力的研究领域,并在近些年探索出许多先进的纳米光子器件及光电子应用。2014年, Dai 等人发现存在于 h-BN 中的双曲声子极化激元^[30]。然而,该双曲声子极化激元的存在主要是由于面内介电常数与面外不一致所产生,因此在面外方向上存在双曲现象,在面内, x 、 y 分量保持一致,产生了各向同性的传播特征,然而,面内的各向同性传播不能满足多模式调控的需求,于是, Li 等人通过外部介入的方式制备了人工超表面,构建出以 h-BN 为基底的光栅分布,从而顺利实现了 h-BN 超表面的面内各向异性双曲传播,突破了人们对于面内传播的认知^[48]。尽管如此,超表面并不是万能的解决方案,这主要是由于超表面结构的自身约束限制;例如:结构过大、表面不平整等。因此,寻找更加合适的面内双曲传播材料就成为了解决这一关键性难题的目标之一。在 2018 年, Ma 等人利用近场成像技

术在 α -MoO₃ 表面探测到了各项异性传播的双曲声子极化激元,揭示了 α -MoO₃ 作为一种斜方晶系的天然层状范德瓦尔斯材料,由于其各个方向晶格常数的不同从而支持平面内极化激元的各向异性传播,并且在自然晶体中发现的双曲声子极化激元在传播损耗以及寿命上都有显著提高,这无疑成为面内调控的重要平台^[37]。接下来,我们将对双曲介质材料中声子极化激元的近场传播及相关应用研究进行归纳论述。

2 双曲声子极化激元的近场传播与调控

2.1 双曲声子极化激元谐振腔

自构型纳米谐振腔的探究是增强光-物质相互作用的有效手段,设计并制备成各种不同尺寸和外形微纳腔体可以限制局域光场,从而获得更强的光学响应^[18,53-55],这样类似的方法同样可以用来研究声子极化激元体系。图 1(a)所示, Hillenbran 团队通过红外近场成像手段揭示 h-BN 纳米带可同时支持表面束缚和体积束缚的多种声子极化激元模式,有趣的是,传播的模式能够通过纳米带的厚度来调控,从而能够进一步观察到体积束缚下的对称以及反对称的声子极化激元模式,对声子极化激元线性谐振腔的理解从面内转向了体积内^[49]。如图 1b 所示, Hillenbran 该团队通过红外亚衍射光谱及成像技术揭示了 h-BN 纳米天线中质量因子很高的耦合共振,且在此体积束缚下的共振模式表现出与纳米天线长度的关联,是一种非典型的近场模式^[50]。该模式源于沿 h-BN 波导边缘传播的表面双曲声子极化激元的杂交。

各种外形的 α -MoO₃ 谐振腔(圆形、多边形、不同角度等腰三角形等)也陆续被研究发现,由于 α -MoO₃ 的各向异性传播,以及面内存在的双曲声子极化激元,这就使得纳米腔与极化激元的相互作用就更加显著,如图 1c-f 所示,在这里, Bao 等人通过刻蚀技术调整纳腔边界从而调控声子极化激元在面内的反射与衍射,可以明显看到,三角纳米腔边界的角度变化对于调控腔内声子极化激元的衍射具有明显效果,这就说明双曲型声子极化激元对于介质材料边缘角度的强烈依赖,与 h-BN 等面内各项同性介质有着显著不同^[52]。总的来说,各种模式下的极化激元结合纳米谐振腔中的高度受限特性能够推动谐振器、光子电路等片上光子器件的发展。

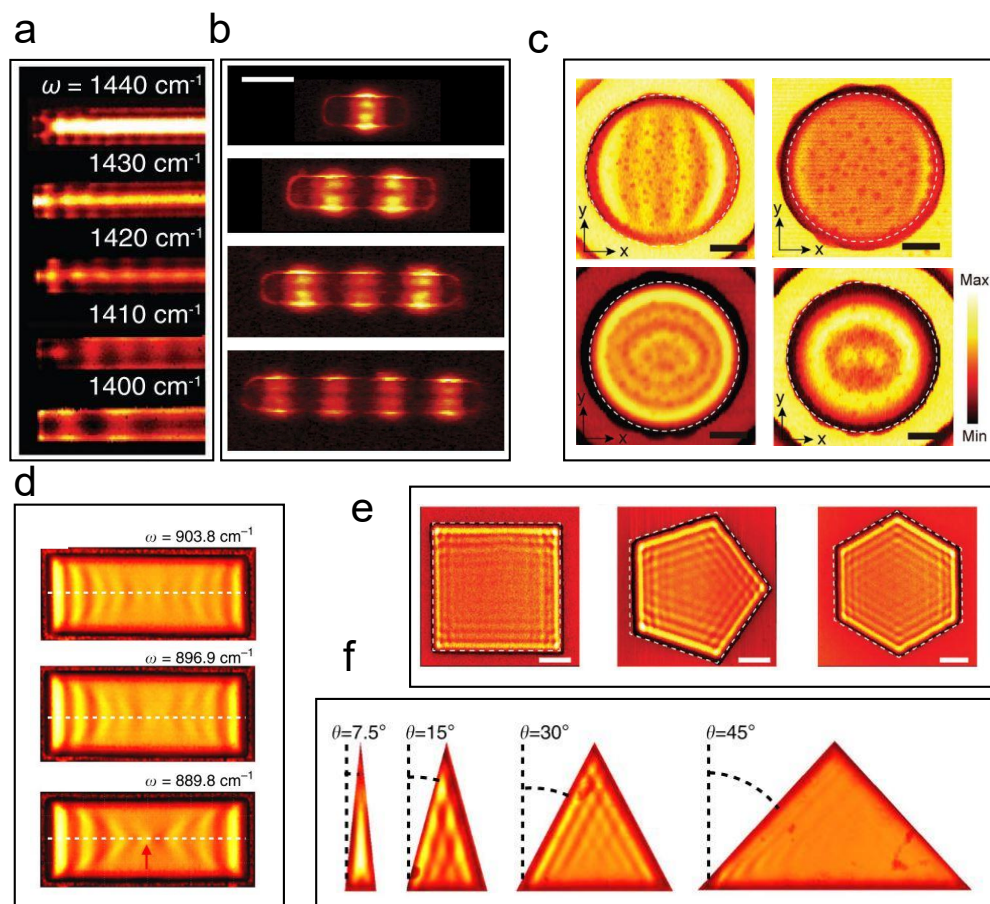


图1 双曲介质自构型声子极化激元谐振腔的近场成像:(a)氮化硼纳米带在不同入射频率下的近场成像^[49]; (b)不同长度氮化硼天线的近场光谱成像^[50],比例尺:500nm; (c)圆形氧化钼谐振腔^[51],比例尺:500nm; (d)长方形氧化钼谐振腔^[52]; (e)多边形氧化钼谐振腔^[51],比例尺:1 μ m; (f)不同角度的等腰三角形氧化钼谐振腔^[52]

Fig. 1 Near-field imaging of a hyperbolic dielectric self-structured phonon polaritons resonant cavity: (a) Near-field imaging of boron nitride nanoribbons at different incident frequencies; (b) Near-field spectral imaging of boron nitride antennas of different lengths, Scale bars: 500nm; (c) Circular molybdenum oxide resonant cavity, Scale bars: 500nm; (d) Rectangular molybdenum oxide resonant cavity; (e) Polygonal molybdenum oxide resonant cavity, Scale bars: 1 μ m; (f) Various angles of isosceles triangular molybdenum oxide resonant cavity

2.2 双曲介质的掺杂对于声子极化激元的调制

声子极化激元的精准调制是制成纳米光子器件的关键所在,然而,复杂的微纳加工技术会大大影响器件的制备效率,同时可能会引入大量的杂质,影响声子极化激元的传播。为此,Wang等研究人员发现,对双曲介质层掺杂可以调制声子极化激元的传播,影响条纹的间隔以及传播的距离,并且不会对晶体的形貌产生影响。如图2(a)所示,Li等人研究了常规h-BN晶体和11B同位素富集的h-BN晶体在尖端和边缘所激发的双曲声子极化激元。与天然介质相比,在99.2% 11B的掺杂下激发的本征双曲声子极化激元具有更低的阻尼率和更长的传播长度。在相同的测量条件下,99.2% 11B h-BN中边缘激发的声子极化激元的近场电场强度(NEFI)比天然h-BN提高了10%。证明掺杂同位素

是降低声子极化激元阻尼和控制声子极化激元激发成为有效的方法,这有利于基于声子极化激元的纳米光子应用的迅速发展^[56]。如图2b所示,Pablo等人发现在面内双曲介质五氧化二钒中掺杂可以使其剩余射线带发生几个波数的红移,并且掺杂后的极化激元依旧呈现出低损耗的亚波长特征,这意味着具有亚衍射特性的超长寿命的声子极化激元能够存在于大量掺杂的范德瓦尔斯晶体内部,并且显示出原子掺杂手段对于极化激元的传播的开关作用^[57]。

近些年,Zheng等人发现在金属粒子掺杂下同样可以实现双曲声子极化激元的切换,该工作分别对 α -MoO₃薄片的非掺杂区域和掺杂区域进行了近场成像以及分析比对。如图2c所示,掺杂后的区域近场强度变弱,几乎没有亮条纹;非掺杂区不仅在

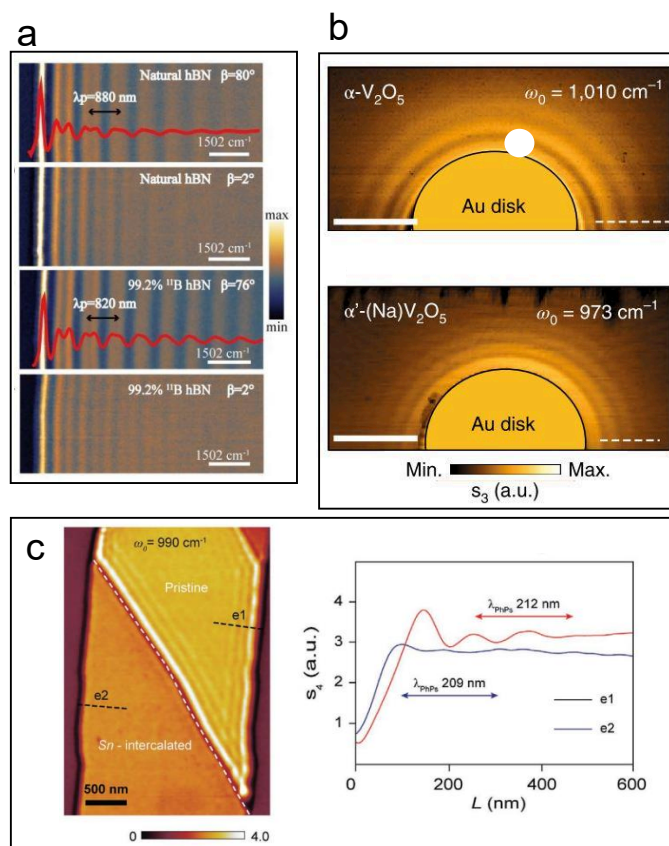


图2 掺杂双曲介质下声子极化激元的近场成像:(a) 硼同位素掺杂^[56]; (b) 钠原子掺杂^[57]; (c) Sn元素掺杂^[58]

Fig. 2 Near-field imaging of phonon polarized excitons in doped hyperbolic media: (a) Boron isotope doping; (b) Sodium atomic doping; (c) Sn element doping

样品边缘处,而且在非掺杂区域与掺杂区域之间的边界处也有强烈的亮条纹,这些结果清楚地揭示了金属Sn离子掺杂对双曲声子极化激元的强度和波长的调节能力。出现上述情况的原因主要是由于Sn离子会导致 $\alpha\text{-MoO}_3$ 化学键的膨胀以及晶体晶格发生畸变,从而改变声子频率^[58]。上述的结果进一步表明,利用晶体声子响应依赖晶格的结构特点,掺杂介质层可以作为面内声子极化激元的“阀门”——来调控以优化声子极化激元的面内传播。总体来讲,掺杂双曲介质调控面内电磁场已经成为红外光电器件优化的思路之一。

2.3 周围介质环境变化对双曲声子极化激元的调制

双曲介质周围的环境变化是影响声子极化激元传播的条件之一,基于双曲介质对附近介电常数的敏感性,Andrea等人对硅超表面/ $\alpha\text{-MoO}_3$ 体系进行实空间成像和傅里叶分析,确定了 $\alpha\text{-MoO}_3$ 在不同基底下的传播特点,如图3a所示, $\alpha\text{-MoO}_3$ 薄膜覆盖在大片的硅-空气的超表面区域,通过对比空气

层上方悬浮区和硅接触区的声子极化激元的传播特征发现:悬浮区的声子极化激元的传播距离更长,对光场的束缚能力更强,约等于硅接触区的1.5倍左右,并且寿命为硅接触区的两倍。体现出层状双曲材料中的基板对于声子极化激元调控的潜力^[59]。然而,对于纳米结构的精细把控要求极化激元具有更高的束缚能力以及高品质因子,这对于介质环境的操控提出了更高的要求。在这里,Yang等人探究了空间受限的悬浮 $\alpha\text{-MoO}_3$ 的近场光学成像(图3b),通过将 $\alpha\text{-MoO}_3$ 放置在宽度远小于入射波长的沟槽上,研究了 $\alpha\text{-MoO}_3$ 在不同波段的亚微米悬浮成像,发现狭窄衬底的束缚区域内的声子极化激元显现出超强压缩光场的能力,其具有高达40的品质因子^[60]。高品质因子的声子极化激元主要归因于衬底的尺度限制,这也说明,合理化的设计声子极化激元材料周围的介质环境,有利于发现更具潜力的传导方式,并且引导方式的转变可以潜在地用于未来的片上光路以及纳米光子器件。

借助极化激元体系在纳米尺度上实现新奇的

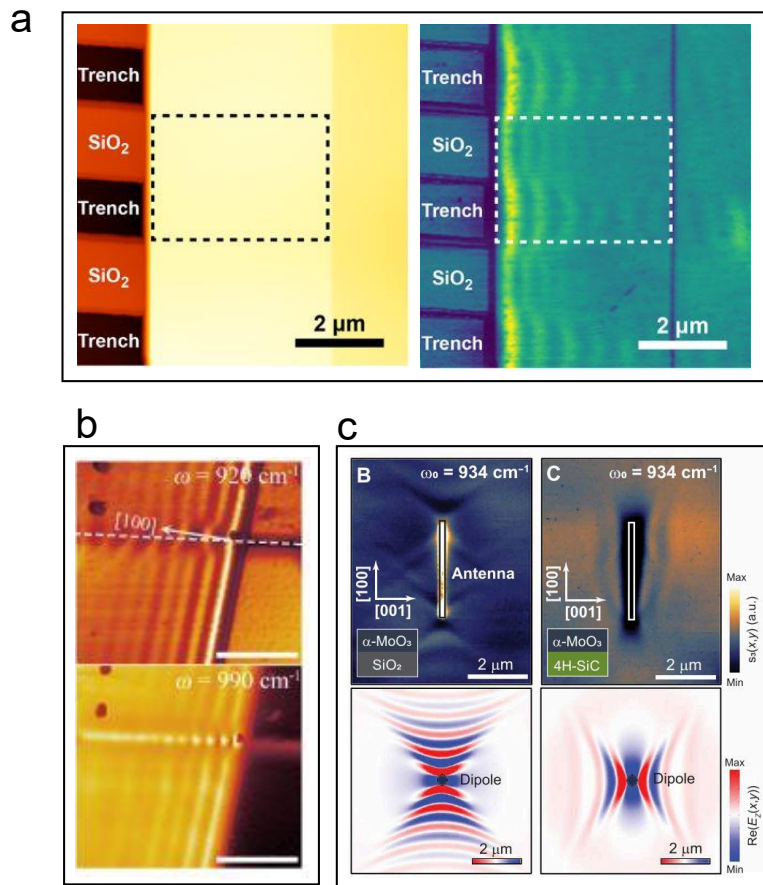


图3 不同类型衬底对于双曲极化激元的近场成像:(a) Si/SiO₂ 超表面基底的氧化钼近场成像^[59]; (b) 氧化钼在窄沟槽硅衬底的近场成像^[60]; (c) 氧化钼分别在SiO₂、4H-SiC衬底上的近场成像^[61]

Fig. 3 Near-field imaging of hyperbolic polarized excitations with different types of substrates: (a) Near-field imaging of molybdenum oxide on Si/SiO₂ supersurface substrates; (b) Near-field imaging of molybdenum oxide on narrow trench silicon substrates; (c) Near-field imaging of molybdenum oxide on SiO₂ and 4H-SiC substrates, respectively

光操纵是人们感兴趣的方向之一,但极化激元材料的面内色散的本质是与其晶体结构为导向,因此面内传播的传播方向会受到限制。对此,如图3c所示,Duan等人 α -MoO₃中的定向极化激元可以通过放置负介电常数的衬底来诱导声子极化激元沿此前禁止的方向传播,将 α -MoO₃平板放置在硅衬底上时,双曲声子极化激元沿着[100]方向传播,然而当 α -MoO₃平板放置在4H-碳化硅衬底上时,声子极化激元沿[001]方向传播,这主要是由于衬底的改变导致等频曲线间隙的开关从而导致动量空间中的极化色散变换,产生了拓扑化的跃迁^[61]。这项研究为低损耗的范德瓦尔斯晶体中光学拓扑跃迁的出现提供了理论参考的同时也为低维材料拓扑器件的发展提供了宝贵的借鉴。

2.4 声子极化激元的面内拓扑变换

与传统体材料相比较,二维材料的厚度能够通过机械剥离选择并且实现原子级别的平整度,这就

给复合叠加的体系的构建提供了天然的契机,并且二维材料之间的拼接或堆叠不仅不存在晶格失配的问题,并且还会出现类似超晶格等层间物理现象。因此,探究二维材料的层间配置(如同异质结、扭角等)成为探究复杂体系受限电磁场调控机制的重要思路之一。

最近,关于双曲介质中声子极化激元的面内拓扑变换的研究被揭示,如图4a所示,Qiu等人首次通过组装双层各向异性的 α -MoO₃材料,通过改变层间结合的角度使得声子极化激元的色散拓扑化——表现出从双曲向闭合的色散轮廓的变换,这归因于声子极化激元间的相互作用。注意图4a中的点缺陷用PD来表示。在变换过程中,色散的轮廓变平的同时表现出低损耗的声子极化激元通道化,且亚波长的属性十分显著。此工作是声子体系下摩尔物理向微纳光子学拓展的重要进展之一。复杂体系中的层间极化激元的杂化对于光场的调制

远不止于此,在2022年,Dai团队开创性的将石墨烯与面内双曲介质结合,并通过化学手段改变石墨烯的费米能级,使石墨烯等离子体极化激元与双曲声子极化激元的耦合拓扑化,面内光场的色散由双曲变成闭合,实现了异质结构下声子极化激元的动态调控。总的来说,声子极化激元色散的层间拓扑化研究为调控范德瓦尔斯体系下的光分布提供了光明前景,在纳米成像、自发辐射控制方面具有潜在应用。

2.5 复合体系下杂化声子极化激元的光学调控

亚波长尺度下的光场能量的传输的可控性有利于微纳光子器件在低维体系支配下集成化发展。复合体系中的结构在受到红外激发源的影响时能够将不同二维介质中的极化激元耦合起来,在提供多重操作可能的同时也能够最大限度的保留面内的平整度,这就为复合结构面内光场的调控提供可能。如图5a所示,中科院物理所陈佳宁团队制备出石墨烯/金属圆盘/ α - MoO_3 的复合结构^[64],该结构的可调谐性以及聚焦性能可以有效的管理面内耦合

场的能量传输,并且在该具有面内聚焦特性的复合结构下, α - MoO_3 中各向异性声子极化激元与石墨烯中等离子体极化激元相互作用,耦合后的表面波在石墨烯的费米能的调整下(0 eV-0.2 eV)而发生传播特性的变化,聚焦焦距实现了1.86微米的生长,可以明显看出,聚焦器件的原位动态调控在复合结构下实现优化的同时,成为聚焦纳米透镜调制的又一巧妙方式。

如图5b,D. N. Basov等人将 α - MoO_3 与h-BN相结合,发现了一种混合的准直模式,并且在复合体系的交界处发现了负折射现象,这证明异质双曲介质界面具有强耦合以及负折射等局域特殊光学现象,能够成为折射光学的完美选项。然而,负折射的传播模式存在于该体系的空腔中,损耗的补偿问题仍然存在。负折射为分子传感和热辐射应用中操纵中红外和太赫兹辐射提供了一个有吸引力的平台^[65]。如图5c所示,Dai等人利用纳米成像技术在部分用石墨烯/ α - MoO_3 薄膜的局域复合结构上观察到表面声子极化激元的异常负折射现象,并且

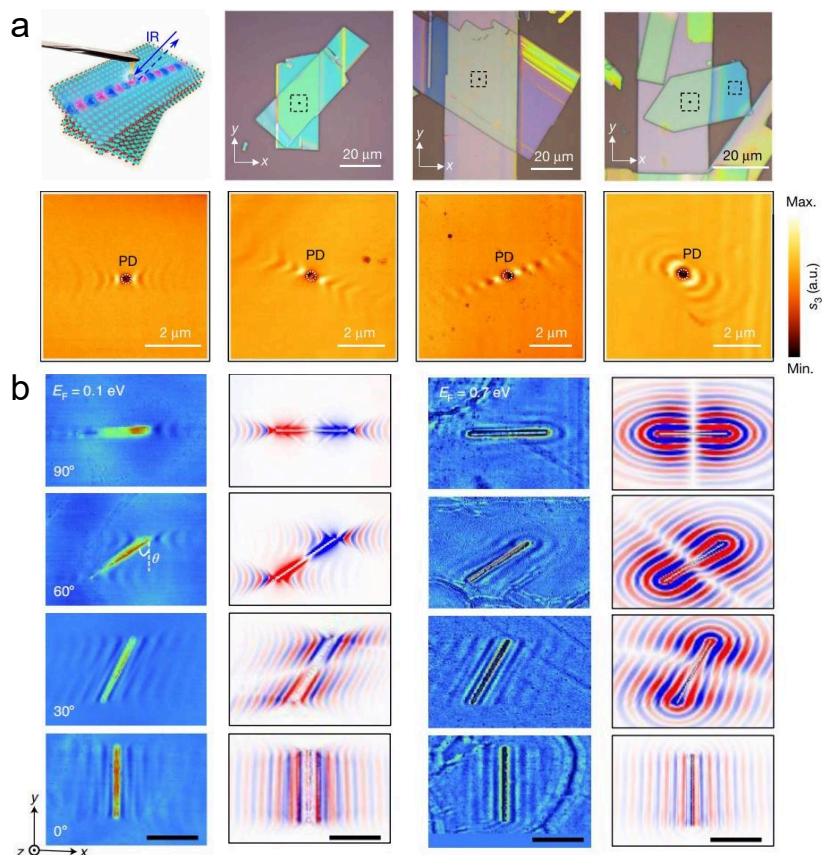


图4 声子极化激元面内拓扑变换的近场成像:(a) 双层氧化钼体系^[62]; (b) 石墨烯/氧化钼体系^[63]

Fig. 4 Near-field imaging of the in-plane topological transformation of phonon polaritons: (a) Double-layer molybdenum oxide system; (b) Graphene/molybdenum oxide system

折射界面的散射损失可以通过电学手段调谐。与此同时,负折射下的亚波长焦点的高度压缩尺寸小于相应照明波长的 60 倍,同时存在 10 倍的强度增强。通过电学手段主动调谐复合界面的负折射现象,从而获得原位控制极化激元波前并改变焦点及其相关纳米级光学场的独特能力^[66]。

2.6 金属天线对于声子极化激元的面内调控

通过定制几何形貌的金属天线来作为面内光学场调制的纳米工具是近些年来极化激元学的研究手段之一,通过利用金属天线的局域场以及外形的引导来制成纳米光子器件,这标志着面内定点激发下的声子极化激元也成为可能。在这里,我们总结了双曲声子极化激元在不同金属天线下的可调谐行为。首先,如图 6a 所示,Pablo 等人开发了凸面几何形状的金属纳米天线,用于高效发射和聚焦双曲声子极化激元,与平面内各向同性的传统聚焦不同,凸面金属天线间产生的近场焦点强度显著增加,且焦点的尺寸也可以缩短到入射光波长的五十分之一,这也是首次通过金属天线实现面内双曲声子极化激元的聚焦,为双曲介质下的场约束提供了技术支持^[67]。

如图 6b 所示,Sun 等人通过研究发现,利用应变工程弯曲一维纳米器件——银纳米线,并且转移到

双曲介质表面是耦合光场实现面内调控的又一重要方式,有趣的是,在弯曲金属纳米线的支持和引导下,双曲表面波同样实现了亚波长尺度的聚焦,并且由于纳米线的低维特性,调控面内的偏振方向与纳米线的轴向间的夹角能够有效控制聚焦耦合场两侧的相对强度,在一定程度上说明偏振成为了调控极化激元传播的重要方式之一^[68]。如图 6c 所示,中山大学 Chen 等人通过实验设计出一种具有末端曲率的金属天线,首次证明了双曲声子极化激元聚焦的多个影响因素,如弯曲金属天线的曲率、入射光的频率等,最终实现了亚波长尺度的聚焦,其尺寸仅为原始波长的三十分之一,这成为金属天线调制下面内近场增强的又一例证^[69]。总而言之,通过微纳金属结构与双曲介质相结合,能够实现类似面内纳米透镜、片上光子电路等微纳器件,并且在金属的局域场下得到进一步的增强,并且相关的方法也能很好的应用于其他的二维介质表面。

3 总结与展望

随着基于低维体系下高束缚的极化激元的纳米光子学在近年来的飞速发展,在新兴技术加持下,已经收获了不少备受关注的研究成果,这将极大地利于相关学科的发展。本文综述了低维范德瓦

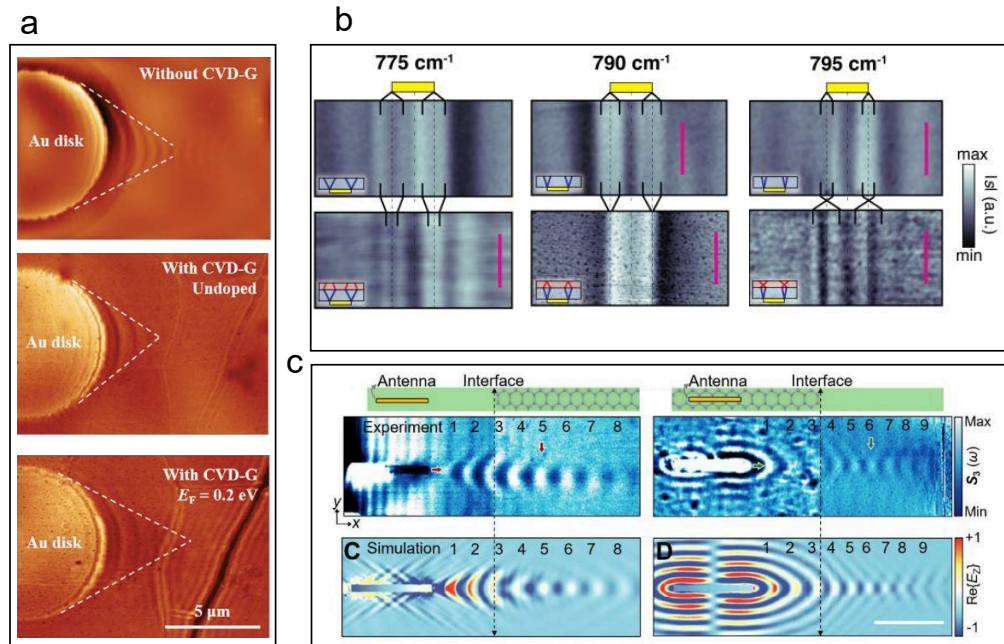


图 5 复合体系下声子极化激元的近场光学成像:(a) 石墨烯/金属圆盘/氧化钼复合结构^[64]; (b) 氮化硼/氧化钼复合结构^[65]; (c) 石墨烯/氧化钼局域复合结构^[66]

Fig. 5 Near-field optical imaging of phonon polaritons in the composite system: (a) Composite structure of graphene/metal disc/molybdenum oxide; (b) Composite structure of boron nitride/molybdenum oxide; (c) Local composite structure of graphene/molybdenum oxide

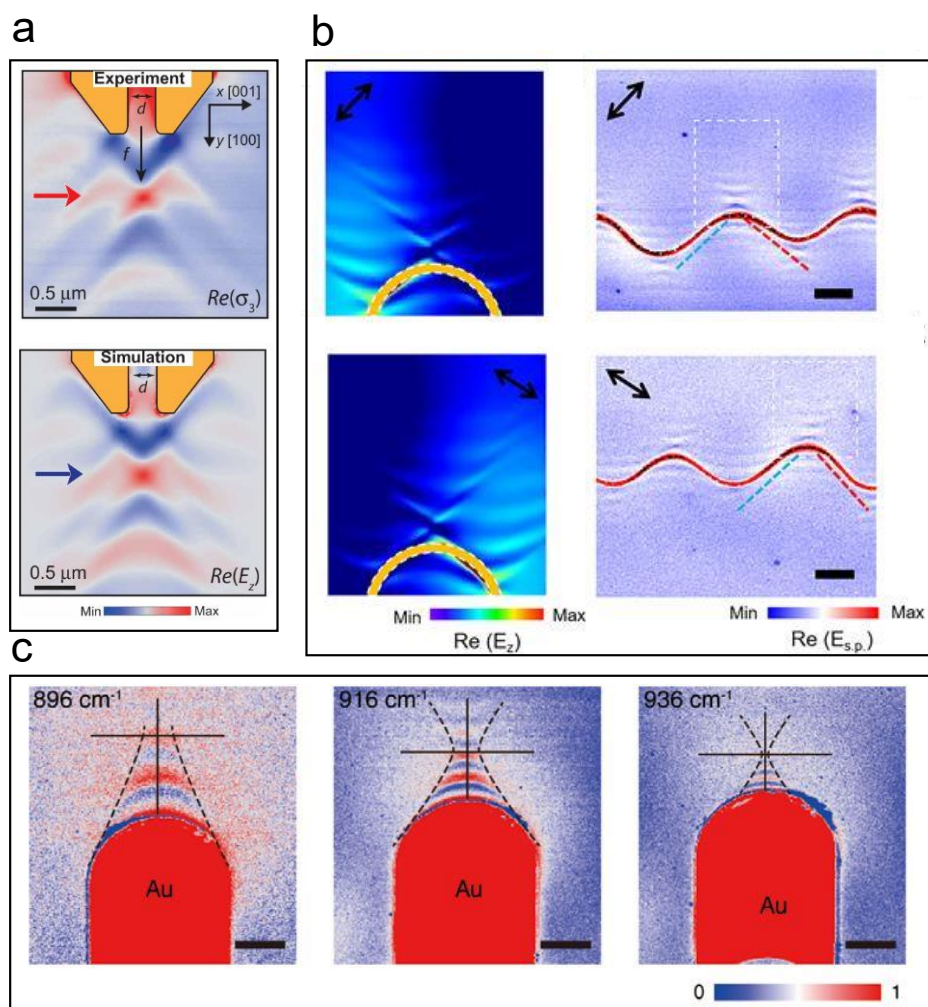


图6 金属天线调控下双曲介质的近场光学成像:(a)凸面尖端金属天线^[70];(b)弯曲金属纳米天线^[68];(c)末端弧状金属纳米天线^[69]
 Fig. 6 Near-field optical imaging of hyperbolic media under metal antenna modulation: (a) Convex-tip metal antenna; (b) Bent metal nanowires; (c) End-arc metal nano-antenna

尔体系下双曲声子极化激元的耦合传播特性,并对该体系下的近场调控手段汇总分析,总结了纳米谐振腔、介质环境调制、拓扑变换、几何金属的面内调控等多种手段,对于纳米光子学及其拓展的应用型器件具有很好的指示作用。

尽管随着双曲声子极化激元的发展,多种微纳光子器件大量涌现,但样品制备流程仍需要更优解,这主要是因为目前的生长技术以及剥离手段都无法保证得到质量好且面积大的范德瓦尔斯薄膜,这对于制作大面积集成化的功能性器件仍然是挑战。此外双曲声子极化激元的调控手段仍需被发掘,我们注意到,近期利用面内光栅与各向异性材料结合,使得双曲声子极化激元可以被定向化引导,转向型极化激元场的发现成为光栅调控面内光场的典范^[71]。可以预见,入射光角度、偏振、棱镜等

都可能成为调控声子极化激元的新维度。双曲声子极化激元介质和调控体系的联动是面内光学的巨大优势之一,在此基础上,声子与激子、磁子或其他局域场的耦合也将成为期待,相信在不断的探索下未来会有越来越多基于声子极化激元器件应运而生,从而推动光学成果从实验走向现实应用。

Reference

- [1] Basov D N, Fogler M M, Garcia De Abajo F J. Polaritons in van der Waals materials[J]. *Science*, 2016, **354**(6309).
- [2] Hillenbrand R, Taubner T, Keilmann F. Phonon-enhanced light-matter interaction at the nanometre scale[J]. *Nature*, 2002, **418**(6894): 159-162.
- [3] Rivera N, Kaminer I. Light - matter interactions with photonic quasiparticles [J]. *Nature Reviews Physics*, 2020, **2**(10): 538-561.
- [4] Fei Z, Goldflam M D, Wu J S, et al. Edge and Surface Plasmons in Graphene Nanoribbons [J]. *Nano Lett*, 2015,

- 15(12): 8271–8276.
- [5] Fei Z, Rodin A S, Andreev G O, *et al.* Gate-tuning of graphene plasmons revealed by infrared nano-imaging[J]. *Nature*, 2012, **487**(7405): 82–85.
- [6] Gerber J A, Berweger S, O'callahan B T, *et al.* Phase-resolved surface plasmon interferometry of graphene[J]. *Phys Rev Lett*, 2014, **113**(5): 055502.
- [7] Koppens F H L, Chang D E, De Abajo F J G. Graphene Plasmonics: A Platform for Strong Light–Matter Interactions [J]. *Nano Letters*, 2011, **11**(8): 3370–3377.
- [8] Nikitin A Y, Alonso-González P, Vélez S, *et al.* Real-space mapping of tailored sheet and edge plasmons in graphene nanoresonators[J]. *Nature Photonics*, 2016, **10**(4): 239–243.
- [9] Li P, Dolado I, Alfaro-Mozaz F J, *et al.* Optical Nanoimaging of Hyperbolic Surface Polaritons at the Edges of van der Waals Materials[J]. *Nano Lett*, 2017, **17**(1): 228–235.
- [10] Folland T G, Fali A, White S T, *et al.* Reconfigurable infrared hyperbolic metasurfaces using phase change materials[J]. *Nat Commun*, 2018, **9**(1): 4371.
- [11] Zheng Z, Sun F, Xu N, *et al.* Tunable Hyperbolic Phonon Polaritons in a Suspended van der Waals α -MoO₃ with Gradient Gaps[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, **10**(5): 2102057.
- [12] Tang J, Zhang J, Lv Y, *et al.* Room temperature exciton-polariton Bose–Einstein condensation in organic single-crystal microribbon cavities[J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 3265.
- [13] Zhang L, Gogna R, Burg W, *et al.* Photonic-crystal exciton-polaritons in monolayer semiconductors[J]. *Nat Commun*, 2018, **9**(1): 713.
- [14] Lundt N, Klembt S, Cherotchenko E, *et al.* Room-temperature Tamm-plasmon exciton-polaritons with a WSe₂ monolayer[J]. *Nat Commun*, 2016, **7**: 13328.
- [15] Jin C, Regan E C, Yan A, *et al.* Observation of moire excitons in WSe₂/WS₂ heterostructure superlattices [J]. *Nature*, 2019, **567**(7746): 76–80.
- [16] Seyler K L, Rivera P, Yu H, *et al.* Signatures of moire-trapped valley excitons in MoSe₂/WSe₂ heterobilayers[J]. *Nature*, 2019, **567**(7746): 66–70.
- [17] Park I K, Gong C, Kim K, *et al.* Controlling interlayer magnetic coupling in the two-dimensional magnet Fe₃GeTe₂[J]. *Physical Review B*, 2022, **105**(1).
- [18] Barra-Burillo M, Muniain U, Catalano S, *et al.* Microcavity phonon polaritons from the weak to the ultrastrong phonon-photon coupling regime[J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 6206.
- [19] Lee I H, He M, Zhang X, *et al.* Image polaritons in boron nitride for extreme polariton confinement with low losses [J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1): 3649.
- [20] Li Z, Bao K, Fang Y, *et al.* Correlation between incident and emission polarization in nanowire surface plasmon waveguides[J]. *Nano Lett*, 2010, **10**(5): 1831–1835.
- [21] Lu X B, Stepanov P, Yang W, *et al.* Superconductors, orbital magnets and correlated states in magic-angle bilayer graphene[J]. *Nature*, 2019, **574**(7780): 653.
- [22] Faure-Vincent J, Bellouard C T, Popova E, *et al.* Inter-layer magnetic coupling interactions of two ferromagnetic layers by spin polarized tunneling [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **89**(10): 107206.
- [23] Hu G, Shen J, Qiu C W, *et al.* Phonon Polaritons and Hyperbolic Response in van der Waals Materials [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, **8**(5): 191393.
- [24] Hu J, Xie W, Chen J, *et al.* Strong hyperbolic-magnetic polaritons coupling in an hBN/Ag-grating heterostructure [J]. *Opt Express*, 2020, **28**(15): 22095–22104.
- [25] Dai S, Ma Q, Andersen T, *et al.* Subdiffractive focusing and guiding of polaritonic rays in a natural hyperbolic material[J]. *Nat Commun*, 2015, **6**: 6963.
- [26] Duan J, Alvarez-Perez G, Tresguerres-Mata A I F, *et al.* Planar refraction and lensing of highly confined polaritons in anisotropic media [J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 4325.
- [27] Zheng Z B, Li J T, Ma T, *et al.* Tailoring of electromagnetic field localizations by two-dimensional graphene nanostructures[J]. *Light Sci Appl*, 2017, **6**(10): e17057.
- [28] Bensmann S, Gaussmann F, Lewin M, *et al.* Near-field imaging and spectroscopy of locally strained GaN using an IR broadband laser [J]. *Opt Express*, 2014, **22**(19): 22369–22381.
- [29] Autore M, Li P, Dolado I, *et al.* Boron nitride nanoresonators for phonon-enhanced molecular vibrational spectroscopy at the strong coupling limit [J]. *Light Sci Appl*, 2018, **7**: 17172.
- [30] Dai S, Fei Z, Ma Q, *et al.* Tunable phonon polaritons in atomically thin van der Waals crystals of boron nitride[J]. *Science*, 2014, **343**(6175): 1125–1129.
- [31] Giles A J, Dai S, Glembocki O J, *et al.* Imaging of Anomalous Internal Reflections of Hyperbolic Phonon-Polaritons in Hexagonal Boron Nitride[J]. *Nano Lett*, 2016, **16**(6): 3858–3865.
- [32] Lyu B, Li H, Jiang L, *et al.* Phonon Polariton-assisted Infrared Nanoimaging of Local Strain in Hexagonal Boron Nitride[J]. *Nano Lett*, 2019, **19**(3): 1982–1989.
- [33] Shi Z, Bechtel H A, Berweger S, *et al.* Amplitude- and Phase-Resolved Nanospectral Imaging of Phonon Polaritons in Hexagonal Boron Nitride [J]. *ACS Photonics*, 2015, **2**(7): 790–796.
- [34] Yoxall E, Schnell M, Nikitin A Y, *et al.* Direct observation of ultraslow hyperbolic polariton propagation with negative phase velocity[J]. *Nature Photonics*, 2015, **9**(10): 674–678.
- [35] De Oliveira T, Norenberg T, Alvarez-Perez G, *et al.* Nanoscale-Confined Terahertz Polaritons in a van der Waals Crystal[J]. *Adv Mater*, 2021, **33**(2): e2005777.
- [36] Ni G, McLeod A S, Sun Z, *et al.* Long-Lived Phonon Polaritons in Hyperbolic Materials[J]. *Nano Lett*, 2021, **21**(13): 5767–5773.
- [37] Ma W, Alonso-Gonzalez P, Li S, *et al.* In-plane anisotropic and ultra-low-loss polaritons in a natural van der Waals crystal[J]. *Nature*, 2018, **562**(7728): 557–562.
- [38] Abedini Dereshgi S, Folland T G, Murthy A A, *et al.* Lithography-free IR polarization converters via orthogonal in-plane phonons in alpha-MoO₃ flakes [J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1): 5771.
- [39] Zhang Q, Ou Q, Hu G, *et al.* Hybridized Hyperbolic Surface Phonon Polaritons at alpha-MoO₃ and Polar Dielectric Interfaces[J]. *Nano Lett*, 2021, **21**(7): 3112–3119.

- [40] Wu B, Wang M, Wu F, *et al.* Strong extrinsic chirality in biaxial hyperbolic material α -MoO₃ with in-plane anisotropy[J]. *Appl Opt*, 2021, **60**(16): 4599–4605.
- [41] Low T, Chaves A, Caldwell J D, *et al.* Polaritons in layered two-dimensional materials[J]. *Nat Mater*, 2017, **16**(2): 182–194.
- [42] Wu Y, Duan J, Ma W, *et al.* Manipulating polaritons at the extreme scale in van der Waals materials[J]. *Nature Reviews Physics*, 2022, **4**(9): 578–594.
- [43] Zhang Q, Hu G, Ma W, *et al.* Interface nano-optics with van der Waals polaritons[J]. *Nature*, 2021, **597**(7875): 187–195.
- [44] Giles A J, Dai S, Vurgaftman I, *et al.* Ultralow-loss polaritons in isotopically pure boron nitride[J]. *Nat Mater*, 2018, **17**(2): 134–139.
- [45] Zheng Z, Xu N, Oscurato S L, *et al.* A mid-infrared biaxial hyperbolic van der Waals crystal[J]. *Sci Adv*, 2019, **5**(5): eaav8690.
- [46] Alvarez-Perez G, Folland T G, Errea I, *et al.* Infrared Permittivity of the Biaxial van der Waals Semiconductor α -MoO₃ from Near- and Far-Field Correlative Studies[J]. *Adv Mater*, 2020, **32**(29): e1908176.
- [47] Álvarez-Pérez G, Voronin K V, Volkov V S, *et al.* Analytical approximations for the dispersion of electromagnetic modes in slabs of biaxial crystals[J]. *Physical Review B*, 2019, **100**(23).
- [48] Peining Li, Irene Dolado, Francisco Javier Alfaro-Mozaz, *et al.* Infrared hyperbolic metasurface based on nanostructured van der Waals materials[J]. *Science*, 2018, **359**: 892–896.
- [49] Dolado I, Alfaro-Mozaz F J, Li P, *et al.* Nanoscale Guiding of Infrared Light with Hyperbolic Volume and Surface Polaritons in van der Waals Material Ribbons[J]. *Adv Mater*, 2020, **32**(9): e1906530.
- [50] Alfaro-Mozaz F J, Alonso-Gonzalez P, Velez S, *et al.* Nanoimaging of resonating hyperbolic polaritons in linear boron nitride antennas[J]. *Nat Commun*, 2017, **8**: 15624.
- [51] Huang W, Sun F, Zheng Z, *et al.* Van der Waals Phonon Polariton Microstructures for Configurable Infrared Electromagnetic Field Localizations[J]. *Advanced Science*, 2021, **8**(13).
- [52] Dai Z, Hu G, Si G, *et al.* Edge-oriented and steerable hyperbolic polaritons in anisotropic van der Waals nanocavities[J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1): 6086.
- [53] Barcelos I D, Canassa T A, Mayer R A, *et al.* Ultrabroadband Nanocavity of Hyperbolic Phonon - Polaritons in 1D-Like α -MoO₃[J]. *ACS Photonics*, 2021, **8**(10): 3017–3026.
- [54] Song X, Dereshgi S A, Palacios E, *et al.* Enhanced Interaction of Optical Phonons in h-BN with Plasmonic Lattice and Cavity Modes[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, **13**(21): 25224–25233.
- [55] Yang S, Lu X, Zhang J, *et al.* Reversible tuning from multi-mode laser to single-mode laser in coupled nanoribbon cavity[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, **118**(17).
- [56] Wang L, Chen R, Xue M, *et al.* Manipulating phonon polaritons in low loss (11)B enriched hexagonal boron nitride with polarization control[J]. *Nanoscale*, 2020, **12**(15): 8188–8193.
- [57] Taboada-Gutierrez J, Alvarez-Perez G, Duan J, *et al.* Broad spectral tuning of ultra-low-loss polaritons in a van der Waals crystal by intercalation[J]. *Nat Mater*, 2020, **19**(9): 964–968.
- [58] Zheng Z, Chen J, Wang Y, *et al.* Highly Confined and Tunable Hyperbolic Phonon Polaritons in Van Der Waals Semiconducting Transition Metal Oxides[J]. *Adv Mater*, 2018, **30**(13): e1705318.
- [59] Schwartz J J, Le S T, Krylyuk S, *et al.* Substrate-mediated hyperbolic phonon polaritons in MoO₃[J]. *Nanophotonics*, 2021, **10**(5): 1517–1527.
- [60] Yang J, Tang J, Ghasemian M B, *et al.* High-Q Phonon-polaritons in Spatially Confined Freestanding α -MoO₃[J]. *ACS Photonics*, 2022, **9**(3): 905–913.
- [61] Duan J, Alvarez-Perez G, Voronin K V, *et al.* Enabling propagation of anisotropic polaritons along forbidden directions via a topological transition[J]. *Sci Adv*, 2021, **7**(14).
- [62] Hu G, Ou Q, Si G, *et al.* Topological polaritons and photonic magic angles in twisted α -MoO₃ bilayers[J]. *Nature*, 2020, **582**(7811): 209–213.
- [63] Hu H, Chen N, Teng H, *et al.* Doping-driven topological polaritons in graphene/ α -MoO₃ (3) heterostructures[J]. *Nat Nanotechnol*, 2022, **17**(9): 940–946.
- [64] Qu Y, Chen N, Teng H, *et al.* Tunable Planar Focusing Based on Hyperbolic Phonon Polaritons in α -MoO₃[J]. *Adv Mater*, 2022: e2105590.
- [65] Sternbach. A J, Moore. S L, Rikhter. A, *et al.* Negative refraction in hyperbolic hetero-bicrystals[J]. *Science*, 2023, **379**(6632): 555–557.
- [66] Hu. H, Chen. N, Teng. H, *et al.* Gate-tunable negative refraction of mid-infrared polaritons[J]. *Science*, 2023, **379**(6632): 558–561.
- [67] Martín-Sánchez J, Duan J, Taboada-Gutierrez J, *et al.* Focusing of in-plane hyperbolic polaritons in van der Waals crystals with tailored infrared nanoantennas[J]. *Sci Adv*, 2021, **7**(41): eabj0127.
- [68] Ma L, Ge A, Sun L, *et al.* Focusing of Hyperbolic Phonon Polaritons by Bent Metal Nanowires and Their Polarization Dependence[J]. *ACS Photonics*, 2023.
- [69] Zheng Z, Jiang J, Xu N, *et al.* Controlling and Focusing In-Plane Hyperbolic Phonon Polaritons in α -MoO₃ with a Curved Plasmonic Antenna[J]. *Adv Mater*, 2022, **34**(6): e2104164.
- [70] Javier Martín-Sánchez J D, Javier Taboada-Gutiérrez, Gonzalo Álvarez-Pérez, Kirill V. Voronin, Iván Prieto, Weiliang Ma, Qiaoliang Bao, Valentyn S. Volkov, Rainer Hillenbrand, Alexey Y. Nikitin, Pablo Alonso-González. Focusing of in-plane hyperbolic polaritons in van der Waals crystals with tailored infrared nanoantennas[J]. *Science advanced*, 2021, **41**(7).
- [71] Qing Zhang, Qingdong Ou, Guangyuan Si, *et al.* Unidirectionally excited phonon polaritons in high-symmetry orthorhombic crystals[J]. *Science Advances*, 2022, **8**, No. eabn9774.