中国光学
Chinese Optics
核心期刊

范德华尔斯材料在转角光学中的研究进展

郑嘉璐 戴志高 胡光维 欧清东 张津瑞 甘雪涛 仇成伟 鲍桥梁

Twisted van der Waals materials for photonics

ZHENG Jia-lu, DAI Zhi-gao, HU Guang-wei, OU Qing-dong, ZHANG Jin-rui, GAN Xue-tao, QIU Cheng-wei, BAO Qiao-liang

引用本文:
郑嘉璐, 戴志高, 胡光维, 欧清东, 张津瑞, 甘雪涛, 仇成伟, 鲍桥梁. 范德华尔斯材料在转角光学中的研究进展[J]. 中国光学, 2021, 14(4): 812–822. doi: 10.37188/CO.2021–0023
ZHENG Jia-lu, DAI Zhi-gao, HU Guang-wei, OU Qing-dong, ZHANG Jin-rui, GAN Xue-tao, QIU Cheng-wei, BAO Qiao-liang. Twisted van der Waals materials for photonics[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 812-822. doi: 10.37188/CO.2021-0023

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2021–0023

文章编号 2095-1531(2021)04-0812-11

范德华尔斯材料在转角光学中的研究进展

郑嘉璐[1*],戴志高[2],胡光维[3],欧清东[4],张津瑞[1],甘雪涛[5],仇成伟[3*],鲍桥梁[4,6*]
(1. 西安石油大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710065;
2. 中国地质大学(武汉)材料与化学学院,湖北 武汉 430074;
3. 新加坡国立大学 电子与计算机工程系,新加坡 117583;
4. 蒙纳士大学 材料科学与工程学院,维多利亚 墨尔本 3800;
5. 西北工业大学 物理科学与技术学院,陕西 西安 710072;
6. 香港理工大学 应用物理系,香港 999077)

摘要:极化激元是光与不同极化子相互作用形成的半光半物质的准粒子,可用于亚波长尺度的光场调控,在光学成像、非线性效应增强及新型超构材料设计等领域扮演着举足重轻的角色。近年来,随着人们对转角范德华尔斯材料体系的制备工艺和物性研究的不断深入,其中许多新奇的极化激元现象也被揭示。本文综述了近年来转角范德华尔斯材料在光学领域的研究进展,包含转角石墨烯体系中的等离极化激元,转角二维过渡金属硫化物中的激子极化激元与六方氮化硼(h-BN)与 α-MoO_3 体系中的声子极化激元等。最后展望转角二维范德华尔斯材料中的极化激元在纳米尺度下光与物质相互作用的有效控制方面所展现的巨大潜力。

关 键 词:转角电子学;二维材料;范德华尔斯材料;极化激元
中图分类号:O472+.3 **文献标志码:**A **doi:**10.37188/CO.2021-0023

Twisted van der Waals materials for photonics

ZHENG Jia-lu[1*], DAI Zhi-gao[2], HU Guang-wei[3], OU Qing-dong[4], ZHANG Jin-rui[1], GAN Xue-tao[5], QIU Cheng-wei[3*], BAO Qiao-liang[4,6*]
(1. *School of Materials Science and Engineering*, *Xi'an Shiyou University*, *Xi'an* 710065, *China*;
2. *Faculty of Materials Science and Chemistry*, *China University of Geosciences*, *Wuhan* 430074, *China*;
3. *Department of Electrical and Computer Engineering*, *National University of Singapore*, *Singapore* 117583, *Singapore*;
4. *Department of Materials Science and Engineering*, *Monash University*, *Melbourne* 3800, *Australia*;
5. *School of Physical Science and Technology*, *Northwestern Polytechnical University*, *Xi'an* 710072, *China*;
6. *Department of Applied Physics*, *The Hong Kong Polytechnic University*, *Hong Kong* 999077, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *zhengjialu_xsy*@163.*com*; *chengwei.qiu@nus.edu.sg*; *qiaoliang.bao@gmail.com*

Abstract: Polaritons are half-light, half-matter quasi-particles formed by the interaction of light and different

收稿日期:2021-01-25; **修订日期:**2021-02-26
基金项目:深圳市南山区"领航计划"(No. LHTD20170006);陕西省自然科学基础研究计划 (No. 2021JQ-603)
Supported by Shenzhen Nanshan District Pilotage Team Program (No. LHTD20170006); the Natural Science Foundation Research Project of Shaanxi Province (No. 2021JQ-603)

polarons. They can be applied for light-control at sub-wavelength scales and have shown intriguing potential for optical imaging, enhanced nonlinear optics and novel metamaterial design. Recent advances in the twistronics of two-dimensional van der Waals materials have enabled a vast variety of extraordinary phenomena associated with moiré physics, which also inspired new direction for the research of polaritons. In this article, we briefly review the rise of "twist-photonics", including plasmon polaritons in twisted graphene system, exciton polaritons in a twisted transition-metal dichalcogenide system and phonon polaritons in a twisted h-BN and α-MoO_3 system. Twist van der Waals materials may offer new directions to manipulate light-matter interactions at nanoscale.

Key words: twistronics; two-dimensional materials; van der Waals materials; polaritons

1　引　言

在亚波长尺度对光进行调控对于光子学、量子物理学等领域都具有重要的意义。极化激元是光与不同极化子相互作用形成的半光半物质的准粒子,可以突破光的衍射极限并将光波长压缩到纳米尺度进行操控,是一种有效实现突破衍射极限的光调制方式[1-2]。极化激元在光学传感、光学成像、增强光学非线性效应,以及新型超材料等设计领域都有广阔的应用前景。早期研究的极化激元是在金属材料体系中,金属中的自由电子和光子耦合,产生表面等离极化激元。然而,金属内部存在巨大的焦耳热损耗,导致极化激元在金属中拥有较高的损耗与较低的寿命。自从 2004 年发现了石墨烯以后[3],二维范德华尔斯材料以其独特的电学、光学、热力学与机械性能吸引了广泛的关注[4-6]。二维材料包含由单种元素组成的石墨烯、硅烯、黑磷与多种元素组成的六方氮化硼(h-BN)、二维过渡金属硫化物(TMDCs)、二维过渡金属碳(氮)化物(MXenes)等,材料类别覆盖了绝缘体、半导体、半金属、拓扑绝缘体等。这些二维材料有着丰富的物理光学性质,同时各种各样的极化激元也在这些二维层状的范德华尔斯材料中被陆续发现。二维范德华尔斯材料自身的二维属性使得极化激元在二维材料中表现出更强的场局域特性,并且克服了金属材料中极高的本征损耗和工作范围狭窄的局限[6]。同时二维范德华尔斯材料可通过改变厚度或化学掺杂来调控自身性质,这使得二维范德华尔斯材料成为目前备受欢迎的极化激元材料[6]。目前,极化激元在二维范德华尔斯材料的研究中主要包含由电子振荡主导的表面等离极化激元[7]、光跃迁过程中的电子空穴间库伦作用引起的激子极化激元[8]、束缚电子主导的声子极化激元[9-10] 等。

随着魔角石墨烯中非常规超导现象的发现[11-13],转角二维范德华尔斯材料成为了一个新的研究热点,并发展出"转角电子学"(twistronics)这一新的研究方向。这些不同寻常的物理现象与转角二维范德华尔斯材料中的莫尔(Moiré)超晶格的形成有关,其背后的物理原理来自于扭转控制的电子波函数的层间耦合,并随着两层材料间的扭转角度而改变[11]。通过扭转双层二维范德华尔斯材料来改变材料固有的物理性质,该方法也为极化激元的研究拓展了新的研究思路。近年来,转角二维范德华尔斯材料在光学领域也取得诸多进展,如利用旋转双层石墨烯构筑原子层级的光子晶体[14-15]、利用旋转双层过渡金属硫化物构筑激子晶体[16-19]、利用旋转双层六方氮化硼(h-BN)构筑孤子超晶格[20] 以及利用转角双层 α-MoO_3 实现了高度压缩纳米红外光沿特定方向的低损耗且无衍射传播[21-24]。作为转角电子学的延伸,"转角光学"的研究在纳米成像、纳米光的传输、能量转化和量子物理等诸多领域具有潜在的应用前景。

转角光学的重要研究方向之一即通过对极化激元的调控以实现纳米级的无衍射约束和光波导效应。本文将结合转角电子学与转角光学的理论研究,通过类比"魔角石墨烯"体系中莫尔超晶格的形成及电子在费米面的平带产生等物理现象,分别介绍转角石墨烯体系中的等离极化激元、转角过渡金属硫族化合物体系中的激子极化激元、以及在转角六方氮化硼(h-BN)和转角双层 α-MoO_3 体系中的声子极化激元。最后讨论转角二维范德华尔斯材料在光学领域的未来发展方向及潜在的应用价值。

2 转角光学的研究进展

2.1 基于等离极化激元的转角光学

表面等离极化激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)是入射光子与金属表面的自由振动的电子相互作用产生的沿着金属表面传播的电子疏密波,能将电磁场局限在金属表面很小的范围,并发生共振增强,满足麦克斯韦方程组。表面等离极化激元既拥有光子学的速度,又同时具有电子学的尺度,能够在亚波长结构中对光进行约束和操控,被誉为目前最有希望的纳米集成光子器件的信息载体[6]。石墨烯是一种优良的表面等离极化激元传输介质[15, 25-26],表面等离极化激元在石墨烯中表现为光与电子集体振动的相互作用,其特性可以被载流子密度[27-28]、介质环境[26, 29]、光脉冲[30]等调制。但石墨烯体系的表面等离极化激元能量范围在红外波段,而传统光学研究手段受到衍射极限的限制在中红外波段空间分辨率很低。而且,极化激元通常具有非常大的动量 q,很难与在自由空间中传播的光发生耦合[31]。这些客观因素为转角石墨烯莫尔体系的光学研究带来一定的技术困难。散射型扫描近场光学显微技术(s-SNOM)以原子力显微镜(AFM)为基础,可以将红外光聚焦到曲率半径为 10 nm 左右的金属针尖尖端周围,在避雷针效应作用下针尖下方会产生强烈增强的局域光场。该局域光场与被测试样品相互作用,散射的信号携带有材料自身的电子结构、准粒子激发、局部应力响应等信息,因此 s-SNOM 可以在高空间分辨率下研究材料的局域性质[31]。s-SNOM 的近场信号经过针尖散射变为可被探测的远场信号,并且针尖可以使散射光具有额外的动量,从而避免极化激元与自由传播光之间的动量失配,以实现极化激元的激发[27],如图 1(a) 所示。样品表面激发的极化激元信号可以被 s-SNOM 扫描探测到并以具有纳米级分辨率的极化激元图像呈现。石墨烯的近场光学研究已经取得了诸多进展,其中一个重要应用就是利用 s-SNOM 探测被晶界和畴壁散射的表面等离极化激元与传播向边界的表面等离极化激元发生干涉形成的干涉条纹[27-28]。

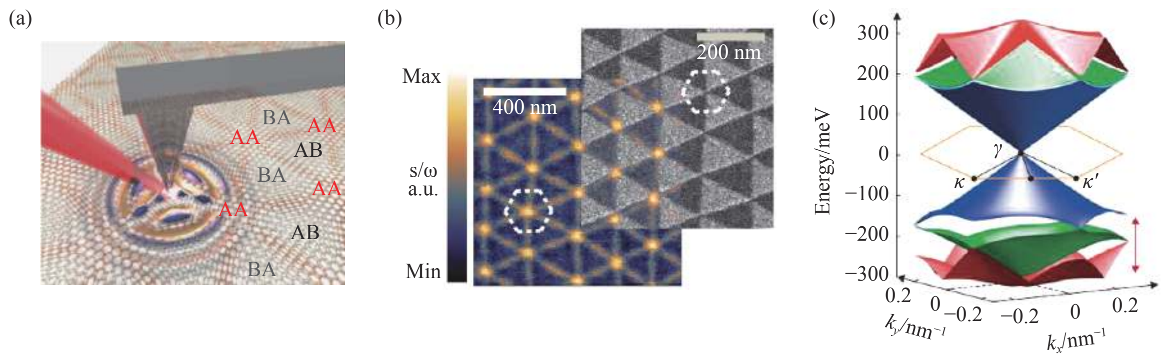

图 1 (a)红外 s-SNOM 测量转角双层石墨烯的示意图[15];(b)显示转角双层石墨烯中由孤子超晶格形成的光子晶体(左);转角双层石墨烯样品的 TEM 暗场图像(右)[15];(c)石墨烯/h-BN 电子能带结构的三维模拟结构图[26]

Fig. 1 (a) Schematic of the IR nano-imaging of twisted bilayer graphene (TBG). Reproduced with permission. Copyright 2018, Science (New York, N.Y.); (b) (Left) Visualizing the nano-light photonic crystal formed by the soliton lattice. (Right) Dark-field TEM image of a TBG sample. Reproduced with permission. Copyright 2018, Science (New York, N.Y.); (c) 3D representation of the electronic band structure of graphene/h-BN. Reproduced with permission. Copyright 2015, Nat Mater.

超材料是一种具有人工设计的结构,并呈现出天然材料所不具备的超常物理性质的特殊材料[32]。超材料在光学领域上有广泛的应用前景,如负折射[33]、超分辨成像[34-35]、自发辐射增强[36-40]、非线性增强[41]、生物传感[42] 等。2018 年,Sunku 等发现旋转双层石墨烯产生的莫尔超晶格体系是一种可以传输纳米光的天然光学超材料[15]。在转角双层石墨烯体系中,由于晶格重构引起的孤子会将 AB 和 BA 堆叠区域分开并形成周期性的三角网状格子,且格子的大小和周期性受体系旋转角度控制[15, 43]。在伯纳尔堆叠(Bernal-stacked)的双层石墨烯中表面等离子激元会被孤子散射[14, 44],类

似于单层石墨烯中表面等离子体激元被晶界散射[45]。由于两侧区域中能谷陈数的反转,孤子中存在无能隙的手性一维电子态,可以无耗散地在孤子中传播并保留相关的能谷指数[46]。这些手性一维态本质是一种拓扑现象,会引起孤子上光电导的局域增强,从而增强了孤子区域对于红外光的响应[44, 47],在 s-SNOM 的成像中表现为孤子区域明显的亮条纹,如图 1(b) 所示。孤子与其他区域光电导的不同会导致样品表面传播的表面等离极化激元在孤子处产生散射和干涉,并形成干涉图像[14-15, 44],因而转角双层石墨烯的莫尔超晶格可以看作是一种天然的表面等离极化激元光子晶体[15]。这一发现为利用旋转双层石墨烯体系或其他旋转二维范德华尔斯材料体系来进行纳米尺度的光场调控提供了重要的启发。由莫尔超晶格势引入的小能带能提供额外的带间跃迁通道并影响材料光学电导率,最终影响表面等离极化激元的振幅、波长、耗散等性质[31]。因此,Ni 等利用 s-SNOM 对表面等离极化激元的测量来研究石墨烯/h-BN 莫尔超晶格体系中的电子能带结构[26]。图 1(c) 展示的是石墨烯/h-BN 的莫尔能带。当载流子密度较低时费米能级无法接触到小能带区域,光电导主要由 γ 点处的狄拉克点提供。当载流子密度提高时,费米能级接触到小能带区域,箭头处产生的额外光学跃迁通道会改变材料的光学电导率。石墨烯/石墨烯与石墨烯/h-BN 两个体系中表面等离极化激元的行为差异来源于后者小能带区域的带间跃迁[26]。在转角石墨烯体系中,不同的转角和堆叠会产生不同的能带结构和其内禀的拓扑及强关联性质,施加不同的入射光频率和电压调控,并分析表面等离极化激元干涉条纹的相位和振幅等,可以在纳米空间分辨率下获得被测样品的能带结构、介电函数、带间跃迁等重要物理信息[31]。

旋转双层石墨烯体系中的小能带和平带的形成也为利用旋转二维材料控制体系中的光学波函数及能带的层间耦合提供了重要的依据[21]。双曲超表面(hyperbolic metasurfaces, HMTSs)是一种具有双曲色散特性的特殊新型的平面超材料。与块体结构的双曲超材料相比,它不仅具有诸如超分辨成像、负折射率效应等三维双曲超材料所拥有的性质,同时由于其纵向维度尺寸的大幅度减小,双曲超表面更易实现大面积加工,更容易与其他光电器件兼容并有利于实现片上器件集成,因此近些年来受到了研究人员的广泛关注[48-49]。双曲超表面已经在多种体系中实现,如银纳米光栅[50]、石墨烯纳米带[51]、黑磷[52] 和其他二维材料[53-54] 等。实现双曲超表面的色散通常有 3 种方式[55]。首先可以将自然界已经存在的天然双曲晶体材料,如紫外波段的石墨[33]、可见光波段的二硼化镁 MgB_2[56-57]、红外波段的钇钡铜氧[58-59]、镧锶铜氧[60]、六方氮化硼 h-BN[61]、金属铋[62] 等,减薄至亚波长量级时就形成具有双曲色散特性的表面结构。第二种方法是直接找天然存在的二维双曲材料,如具有极端各向异性的黑磷[52, 63-67] 与 α-MoO_3[21-23] 等,这种方法避免了三维双曲材料复杂的减薄工艺以及减薄工程中可能带来的尺寸效应。最后是在亚波长尺度上人工构建电磁有序结构来实现双曲超表面。人工双曲超表面可以超越天然材料本身内部晶体结构的限制,为电磁场调控提供了前所未有的灵活性。而双层旋转石墨烯产生的莫尔超晶格为获得双曲面材料提供了新的思路。

2019 年,Hu 等利用双层旋转的石墨烯纳米光栅阵列构成了双曲超表面[48]。不同于双层旋转石墨烯体系中的原子层级尺度上的晶格重构,双层旋转的石墨烯纳米光栅阵列具有更大尺度的晶格间隔,因而该体系不但可以研究电子能带结构变化,还可以研究光学的色散关系。在该体系中,当上下两层石墨烯纳米光栅阵列被旋转到特定角度时,会形成两个近乎平行的色散曲线,进而形成一个低损耗宽波段的传输渠道。这一发现从一定程度上证明了转角二维材料在光学领域具有巨大的应用价值。

2.2　基于激子极化激元的转角光学

二维过渡金属硫化物(Transition-Metal Dichalcogenides,TMDCs)由于其带隙可调节及一些独特的光电性质近年来引起了广泛的关注[63]。类似于转角双层石墨烯中晶格失配引起的二维周期势调控[13, 68],转角双层二维过渡金属硫化物也能产生类似的莫尔超晶格,并引起材料物理性质的改变[16-19]。材料的电子能带结构可以通过莫尔超晶格进行调制,并且由此可以得到非传统超导体或者相关驱动性的绝缘等性质[11-13]。2019 年,Tran 等在小转角的转角二维 $MoSe_2$/WSe_2 异质结体系中观测到正负圆极化发射的多个层间激子共振现象。在实验中,Tran 等人观测到交替的 4 个圆偏振光致发光的层间激子共振、寿命随能量的系统变化以及对温度依赖性,为此他们认为激子

基态和激发态限制在莫尔势内，而且通过重组动力学以及这些层间激子共振对扭转角和温度的依赖性可验证以上机理[16]；另外，他们还观察到与莫尔势产生的影响一致的现象——层间激子的能量间距和寿命有系统的变化，可以尝试使用近场光学仪器进一步实现空间观测。如图 2(a)~2(b) 所示，菱形中的顶点是由圆极化而来，而菱形是由椭圆形极化而来。同年，Seyler 等在转角二维 $MoSe_2$/WSe_2 异质结体系中成功捕获莫尔势的层间谷激子，在低温下观察到光致发光接近自由层间激子能量，但线宽变窄了 100 倍(约 100 μeV)；而且对于某一固定的扭转角，发射器展现出相同螺旋度的强圆极化。这表明捕获势保持了三重旋转对称性，如图 2(c) 所示。将这些结果与对功率和激发能的特征依赖性相结合发现，所观察到的效应的起因是层间激子被困在光滑的莫尔势中，并且具有与山谷形成鲜明对比的物理学原理[17]。

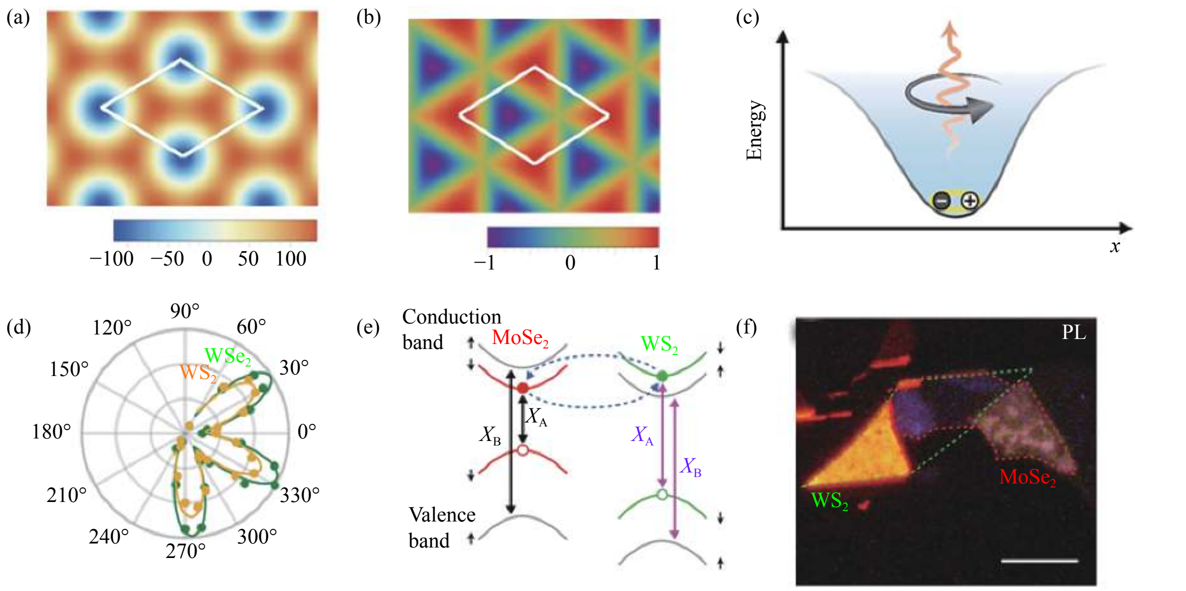

图 2 (a)层间激子的莫尔电位[16]；(b)K 谷激子的空间图[16]；(c)被困在莫尔电位中的激子示意图[17]；(d)单层 WSe_2 和 WS_2 区域上测得的偏振相关的二次谐波信号图[18]；(e)$MoSe_2$/WS_2 的能带示意图[19]；(f)$MoSe_2$/WS_2 的光致发光图像[19]

Fig. 2 (a) The moiré potential of the interlayer exciton transition. Reproduced with permission. Copyright 2019, Nature; (b) Spatial map of the optical selection rules for K-valley excitons. Reproduced with permission. Copyright 2019, Nature; (c) Schematic of an exciton trapped in a moiré potential site. Reproduced with permission. Copyright 2019, Nature; (d) The polarization-dependent second harmonic generation signal measured on the monolayer WSe_2 and WS_2. Reproduced with permission. Copyright 2019, Nature; (e) Schematic of the $MoSe_2$/WS_2 band structure; (f) The PL image of $MoSe_2$/WS_2. Reproduced with permission. Copyright 2019, Nature.

在转角二维 WSe_2/WS_2 异质结体系中，Jin 等观测到与单层材料完全不同的莫尔超晶格激子态，这些激子态在 WSe_2 的 A 激子附近表现出了多个峰，而且相对于单层 WSe_2 的 A 激子对栅极的依赖性尤为不同，另外，虽然研究人员不能通过实验更细致地展现出 WSe_2/WS_2 异质结体的光谱，但是已经可以说明该异质结构具有很强的层间相互作用，并且形成了激子强耦合体系[18]。通过图 2(d) 可以发现，研究人员证实了 WSe_2 和 WS_2 层之间的扭曲角接近零，并很容易确定了异质双层的相对转角为 0.5°±0.3°[18]。2019 年，Alexeev 等在单层 $MoSe_2$ 与 WS_2 组成的 $MoSe_2$/WS_2 异质结旋转体系中发现激子能带可杂化，并可以导致莫尔超晶格效应的共振增强[19]。图 2(e)~2(f) 显示 WS_2(对应橙色) 和 $MoSe_2$(对应的粉红色区域) 发出的光致发光图像。暗区域(低光致发光)对应于异质双层区域，其中 WS_2 和 $MoSe_2$ 层内 A 激子的光致发光被淬灭。杂化激子是由 $MoSe_2$ 中的空穴产生的，当其与相邻单层中扭转依赖的电子态叠加相互结合时，激子能级移动与层间转角会呈现周期性函数关系。由于单层 $MoSe_2$ 与 WS_2 组成了近乎共格的异质结，电子态的共振混合使得异质结的莫尔条纹对杂化激子的色散谱和光谱具有显著影响[19]。这项发现为基于二维范德

华尔斯材料的半导体器件中的能带结构设计提供了更多的思路。

2.3　基于声子极化激元的转角光学

在极性晶格中，谐振的光学晶格的振荡行为被称为声子极化激元（Phonon polaritons）。声子极化激元损耗更低，响应波段更宽，主要作用在中远红外和太赫兹波段[9]。声子极化激元在中远红外的光学增益作用对于材料科学、生物分子探测、传感等领域具有非常重要的应用[69]。2014 年，D.N.Basov 教授团队开创性地在二维范德华极性材料六方氮化硼中发现了在原子级厚度的绝缘材料中的声子极化激元，由于范德华尔斯材料的层状特性，天然的厚度可控，谐振波长随着厚度线性增长。特殊的晶体结构引起的面外双曲色散关系，证明六方氮化硼可以支持极大波矢的极化激元模式，这意味着其具有更强的亚波长局域态[70]。近年来，六方氮化硼(h-BN)等极性材料中声子极化激元的各种特性被陆续发现和报道[71-80]，2019 年，Ni 等利用转角双层六方氮化硼(h-BN)体系实现了类似转角双层石墨烯表面等离极化激元光子晶体[15]结构的声子极化激元光子晶体[20]。

然而，与石墨烯类似，h-BN 内的极化激元在面内均是各向同性传播，这决定了其在纳米尺度上的光场调控自由度有限[1]。2018 年，Ma 等报道了天然范德华尔斯材料 α-MoO_3 中的面内各向异性和超低损耗声子极化激元[22]。研究发现在 α-MoO_3 材料中被压缩的纳米光场会沿着特定的晶体方向以双曲型传播，且具有超长的寿命。2020 年，Hu 等通过旋转两片重叠的 α-MoO_3 晶体，实现了声子极化激元光学能带从双曲型到椭圆型的拓扑变换，且在拓扑变换的转变点附近，光学能带变成平带，从而实现声子极化激元的直线无衍射传播，该光学能带中的平带类似于双层旋转石墨烯中的电子在费米面的平带[13, 21, 81]。发生这一转变的特殊角度被称为光子学魔角(photonic magic angles)。图 3(a) 展示了极化激元的光学能带从双曲型向椭圆型变化的过程。在接近光子学魔角时，能带逐渐扁平化，直至平带。这种开口或闭合的能带面由上下两层双曲能带间的交点(Number of Anti-Crossing Point, NACP)所决定。当 N_{ACP} =4，类似闭合的椭圆型；当 N_{ACP} =2，类似开口的双曲型。因此，由简单的几何关系可以得到，拓扑转换由单层的双曲开角(β)决定，发生在光子学魔角($180°-2|\beta|$)附近[21, 51, 82-83]。

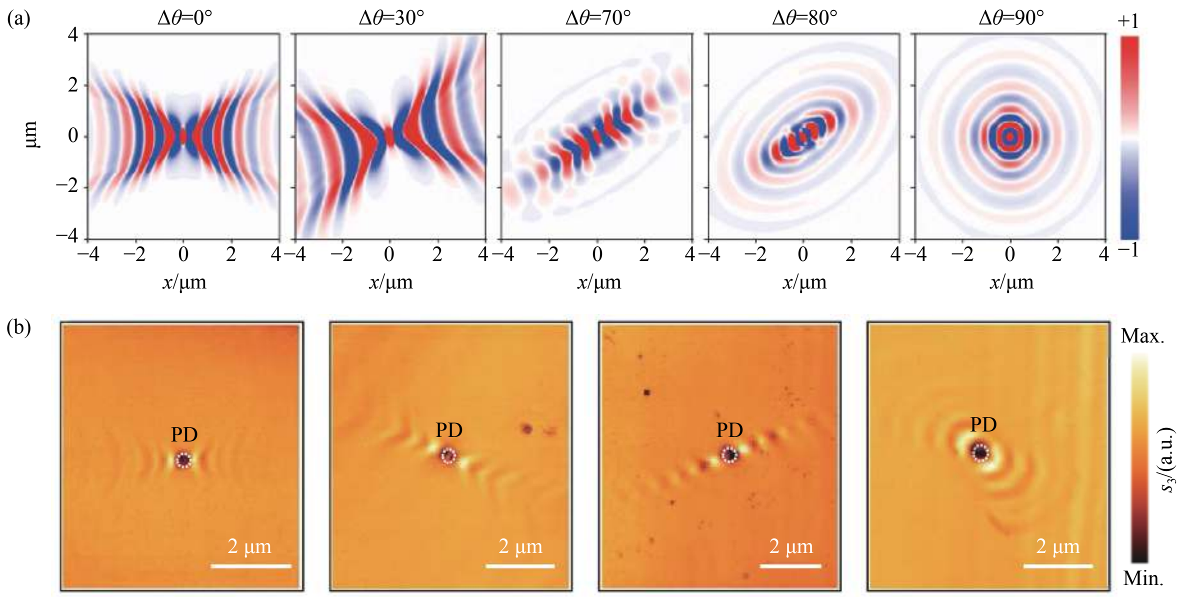

图 3　(a)数值模拟显示转角 α-MoO_3 晶体在固定频率下其能带面的拓扑变换；(b)s-SNOM 实验测试的近场图像显示双层 α-MoO_3 转角体系中的拓扑变换[21]

Fig. 3　(a) Numerically simulated field distributions of α-MoO_3; (b) topological transformation of α-MoO_3 measured by s-SNOM[21]. Reproduced with permission. Copyright 2020, Nature.

s-SNOM 对双层 α-MoO_3 转角体系的扫描成像结果证实了上述模拟结论，如图 3(b) 所示。对于单层 α-MoO_3 晶体，在固定激发频率下产生的声子极化激元的表面传播始终表现为椭圆型或者

双曲型近场图像及光学能带[22]。在转角双层 α-MoO_3 体系中，近场图像随着层间扭角变大呈现从双曲型到椭圆型的拓扑转变，且在接近光子学魔角时出现极化激元沿直线无衍射传播[21]。区别于由频率变化引起的单一频率拓扑转换[81, 84-85]，通过旋转双层 α-MoO_3 实现的极化激元拓扑变换不但可以实现宽频段可调，且具有超低损耗[21]。光子学魔角下的拓扑转换平带也会导致材料在双层区域中的极化激元具有确定的能量传播方向，并不取决于边缘的反射角度。不同于单层 α-MoO_3 极化激元的反射与传播特性，双层 α-MoO_3 中的极化激元在凹槽边缘顶端处无明显衍射和能量耗散，且具有超高的空间分辨率和远超通常拓扑转换的传播距离[21]。

3 应用与展望

转角二维范德华尔斯材料体系为纳米光精确操控、光学能带调制和超低损耗量子光学等方向提供了新的研究平台。转角二维范德华尔斯材料带来的奇特物理特性也为微纳光电器件设计带来了新的活力，如构建拓扑保护的低功耗光电器件，与柔性基底集成制成可穿戴式设备，或利用超表面特性制作隐形斗篷、超透镜、光耦合器等。随着越来越多的二维范德华尔斯材料被发现，这些也为转角光学提供了更多的可能性，对未来发展纳米成像、生物检测以及辐射能量控制等应用具有重要意义。同时，转角光学作为转角电子学的重要分支，体现了转角对波函数的调控是普适的，这一发展和延伸，将为发展“转角声学”或“转角微波系统”提供重要的思路与启发，而转角材料体系中的电子波、光波、声波等新颖物理机制和现象，等待被进一步探索和挖掘。可以预见，转角二维范德华尔斯材料将成为未来材料学与物理学的重要研究热点体系。

参考文献:

[1] DAI ZH G, HU G W, SI G Y, *et al*.. Edge-oriented and steerable hyperbolic polaritons in anisotropic van der Waals nanocavities[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 6086.

[2] MA W L, SHABBIR B, OU Q D, *et al*.. Anisotropic polaritons in van der Waals materials[J]. *InfoMat*, 2020, 2(5): 777-790.

[3] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, *et al*.. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.

[4] BAO Q L, LOH K P. Graphene photonics, plasmonics, and broadband optoelectronic devices[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(5): 3677-3694.

[5] XIA F N, WANG H, XIAO D, *et al*.. Two-dimensional material nanophotonics[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(12): 899-907.

[6] LOW T, CHAVES A, CALDWELL J D, *et al*.. Polaritons in layered two-dimensional materials[J]. *Nature Materials*, 2017, 16(2): 182-194.

[7] KHURGIN J B, SUN G. In search of the elusive lossless metal[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(18): 181102.

[8] HU F, LUAN Y, SCOTT M E, *et al*.. Imaging exciton–polariton transport in $MoSe_2$ waveguides[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(6): 356-360.

[9] CALDWELL J D, LINDSAY L, GIANNINI V, *et al*.. Low-loss, infrared and terahertz nanophotonics using surface phonon polaritons[J]. *Nanophotonics*, 2015, 4(1): 44-68.

[10] HU G W, SHEN J L, QIU CH W, *et al*.. Phonon polaritons and hyperbolic response in van der waals materials[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(5): 1901393.

[11] CARR S, MASSATT D, FANG SH A, *et al*.. Twistronics: manipulating the electronic properties of two-dimensional layered structures through their twist angle[J]. *Physical Review B*, 2017, 95(7): 075420.

[12] CAO Y, FATEMI V, DEMIR A, *et al*.. Correlated insulator behaviour at half-filling in magic-angle graphene superlattices[J]. *Nature*, 2018, 556(7699): 80-84.

[13] CAO Y, FATEMI V, FANG SH A, *et al*.. Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices[J]. *Nature*, 2018, 556(7699): 43-50.

[14] JIANG L L, SHI ZH W, ZENG B, *et al*.. Soliton-dependent plasmon reflection at bilayer graphene domain walls[J].

Nature Materials, 2016, 15(8): 840-844.

[15] SUNKU S S, NI G X, JIANG B Y, *et al*.. Photonic crystals for nano-light in moiré graphene superlattices[J]. *Science*, 2018, 362(6419): 1153-1156.

[16] TRAN K, MOODY G, WU F CH, *et al*.. Evidence for moire excitons in van der Waals heterostructures[J]. *Nature*, 2019, 567(7746): 71-75.

[17] SEYLER K L, RIVERA P, YU H Y, *et al*.. Signatures of moire-trapped valley excitons in $MoSe_2/WSe_2$ heterobilayers[J]. *Nature*, 2019, 567(7746): 66-70.

[18] JIN CH H, REGAN E C, YAN A M, *et al*.. Observation of moire excitons in WSe_2/WS_2 heterostructure superlattices[J]. *Nature*, 2019, 567(7746): 76-80.

[19] ALEXEEV E M, RUIZ-TIJERINA D A, DANOVICH M, *et al*.. Resonantly hybridized excitons in moire superlattices in van der Waals heterostructures[J]. *Nature*, 2019, 567(7746): 81-86.

[20] NI G X, WANG H, JIANG B Y, *et al*.. Soliton superlattices in twisted hexagonal boron nitride[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4360.

[21] HU G W, OU Q D, SI G Y, *et al*.. Topological polaritons and photonic magic angles in twisted α-MoO_3 bilayers[J]. *Nature*, 2020, 582(7811): 209-213.

[22] MA W L, ALONSO-GONZÁLEZ P, LI SH J, *et al*.. In-plane anisotropic and ultra-low-loss polaritons in a natural van der Waals crystal[J]. *Nature*, 2018, 562(7728): 557-562.

[23] ZHENG Z B, XU N SH, OSCURATO S L, *et al*.. A mid-infrared biaxial hyperbolic van der Waals crystal[J]. *Science Advances*, 2019, 5(5): eaav8690.

[24] WU Y J, OU Q D, YIN Y F, *et al*.. Chemical switching of low-loss phonon polaritons in α-MoO_3 by hydrogen intercalation[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2646.

[25] ALCARAZ IRANZO D, NANOT S, DIAS E J C, *et al*.. Probing the ultimate plasmon confinement limits with a van der waals heterostructure[J]. *Science*, 2018, 360(6386): 291-295.

[26] NI G X, WANG H, WU J S, *et al*.. Plasmons in graphene moiré superlattices[J]. *Nature Materials*, 2015, 14(12): 1217-1222.

[27] 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.

[28] CHEN J N, BADIOLI M, ALONSO-GONZÁLEZ P, *et al*.. Optical nano-imaging of gate-tunable graphene plasmons[J]. *Nature*, 2012, 487(7405): 77-81.

[29] WOESSNER A, LUNDEBERG M B, GAO Y D, *et al*.. Highly confined low-loss plasmons in graphene-boron nitride heterostructures[J]. *Nature Materials*, 2015, 14(4): 421-425.

[30] NI G X, WANG L, GOLDFLAM M D, *et al*.. Ultrafast optical switching of infrared plasmon polaritons in high-mobility graphene[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(4): 244-247.

[31] 吕新宇, 李志强. 石墨烯莫尔超晶格体系的拓扑性质及光学研究进展[J]. *物理学报*, 2019, 68(22): 220303.
LÜ X Y, LI ZH Q. Topological properties of graphene moiré superlattice systems and recent optical studies[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(22): 220303. (in Chinese)

[32] DAI ZH G, HU G W, OU Q D, *et al*.. Artificial metaphotonics born naturally in two dimensions[J]. *Chemical Reviews*, 2020, 120(13): 6197-6246.

[33] SUN J B, ZHOU J, LI B, *et al*.. Indefinite permittivity and negative refraction in natural material: graphite[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(10): 101901.

[34] JACOB Z, ALEKSEYEV L V, NARIMANOV E. *Optical hyperlens*: far-field imaging beyond the diffraction limit[J]. *Optics Express*, 2006, 14(18): 8247-8256.

[35] RHO J, YE Z L, XIONG Y, *et al*.. Spherical hyperlens for two-dimensional sub-diffractional imaging at visible frequencies[J]. *Nature Communications*, 2010, 1(1): 143.

[36] LU D, KAN J J, FULLERTON E E, *et al*.. Enhancing spontaneous emission rates of molecules using nanopatterned multilayer hyperbolic metamaterials[J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(1): 48-53.

[37] SHALAGINOV M Y, ISHII S, LIU J, *et al*.. Broadband enhancement of spontaneous emission from nitrogen-vacancy centers in nanodiamonds by hyperbolic metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(17): 173114.

[38] SREEKANTH K V, BIAGLOW T, STRANGI G. Directional spontaneous emission enhancement in hyperbolic

metamaterials[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(13): 134306.

[39] TUMKUR T, ZHU G, BLACK P, *et al*.. Control of spontaneous emission in a volume of functionalized hyperbolic metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(15): 151115.

[40] NOGINOV M A, LI H, BARNAKOV Y A, *et al*.. Controlling spontaneous emission with metamaterials[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11): 1863-1865.

[41] WURTZ G A, POLLARD R, HENDREN W, *et al*.. Designed ultrafast optical nonlinearity in a plasmonic nanorod metamaterial enhanced by nonlocality[J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(2): 107-111.

[42] KABASHIN A V, EVANS P, PASTKOVSKY S, *et al*.. Plasmonic nanorod metamaterials for biosensing[J]. *Nature Materials*, 2009, 8(11): 867-871.

[43] ALDEN J S, TSEN A W, HUANG P Y, *et al*.. Strain solitons and topological defects in bilayer graphene[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(28): 11256-11260.

[44] JIANG B Y, NI G X, ADDISON Z, *et al*.. Plasmon reflections by topological electronic boundaries in bilayer graphene[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(11): 7080-7085.

[45] FEI Z, RODIN A S, GANNETT W, *et al*.. Electronic and plasmonic phenomena at graphene grain boundaries[J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(11): 821-825.

[46] SONG Y, DERY H. Transport theory of monolayer transition-metal dichalcogenides through symmetry[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(2): 026601.

[47] JU L, SHI ZH W, NAIR N, *et al*.. Topological valley transport at bilayer graphene domain walls[J]. *Nature*, 2015, 520(7549): 650-655.

[48] HU G W, KRASNOK A, MAZOR Y, *et al*.. Moiré hyperbolic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(5): 3217-3224.

[49] 张子洁, 梁瑜章, 徐挺. 双曲超材料及超表面研究进展[J]. 光电工程, 2017, 44(3): 276-288.
ZHANG Z J, LIANG Y ZH, XU T. Research advances of hyperbolic metamaterials and metasurfaces[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(3): 276-288. (in Chinese)

[50] HIGH A A, DEVLIN R C, DIBOS A, *et al*.. Visible-frequency hyperbolic metasurface[J]. *Nature*, 2015, 522(7555): 192-196.

[51] GOMEZ-DIAZ J S, TYMCHENKO M, ALÙ A. Hyperbolic plasmons and topological transitions over uniaxial metasurfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(23): 233901.

[52] CORREAS-SERRANO D, GOMEZ-DIAZ J S, MELCON A A, *et al*.. Black phosphorus plasmonics: anisotropic elliptical propagation and nonlocality-induced canalization[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(10): 104006.

[53] LI P N, DOLADO I, ALFARO-MOZAZ F J, *et al*.. Infrared hyperbolic metasurface based on nanostructured van der Waals materials[J]. *Science*, 2018, 359(6378): 892-896.

[54] NEMILENTSAU A, LOW T, HANSON G. Anisotropic 2D materials for tunable hyperbolic plasmonics[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(6): 066804.

[55] GOMEZ-DIAZ J S, ALÙ A. Flatland optics with hyperbolic metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(12): 2211-2224.

[56] BELASHCHENKO K D, VAN SCHILFGAARDE M, ANTROPOV V P. Coexistence of covalent and metallic bonding in the boron intercalation superconductor MgB_2[J]. *Physical Review B*, 2001, 64(9): 092503.

[57] GURITANU V, KUZMENKO A B, Van Der MAREL D, *et al*.. Anisotropic optical conductivity and two colors of MgB_2[J]. *Physical Review B*, 2006, 73(10): 104509.

[58] NEE T W. Anisotropic optical properties of $YBa_2Cu_3O_7$[J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 71(12): 6002-6007.

[59] KORZEB K, GAJC M, PAWLAK D A. Compendium of natural hyperbolic materials[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25406-25424.

[60] SUN J B, LITCHINITSER N M, ZHOU J. Indefinite by nature: from ultraviolet to terahertz[J]. *ACS Photonics*, 2014, 1(4): 293-303.

[61] CALDWELL J D, KRETININ A V, CHEN Y G, *et al*.. Sub-diffractional volume-confined polaritons in the natural hyperbolic material hexagonal boron nitride[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 5221.

[62] ALEKSEYEV L V, PODOLSKIY V A, NARIMANOV E E. Homogeneous hyperbolic systems for terahertz and far-infrared frequencies[J]. *Advances in OptoElectronics*, 2012, 2012: 267564.

[63] GUPTA A, SAKTHIVEL T, SEAL S. Recent development in 2D materials beyond graphene[J]. *Progress in Materials Science*, 2015, 73: 44-126.

[64] LOW T, ROLDÁN R, WANG H, *et al*.. Plasmons and screening in monolayer and multilayer black phosphorus[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(10): 106802.

[65] RODIN A S, CARVALHO A, CASTRO NETO A H. Strain-induced gap modification in black phosphorus[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(17): 176801.

[66] LOW T, RODIN A S, CARVALHO A, *et al*.. Tunable optical properties of multilayer black phosphorus thin films[J]. *Physical Review B*, 2014, 90(7): 075434.

[67] LIU Z ZH, AYDIN K. Localized surface plasmons in nanostructured monolayer black phosphorus[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(6): 3457-3462.

[68] CAO Y, CHOWDHURY D, RODAN-LEGRAIN D, *et al*.. Strange metal in magic-angle graphene with near planckian dissipation[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(7): 076801.

[69] NEUNER III B, KOROBKIN D, FIETZ C, *et al*.. Midinfrared index sensing of pL-scale analytes based on surface phonon polaritons in silicon carbide[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010, 114(16): 7489-7491.

[70] 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.

[71] LI P N, LEWIN M, KRETININ A V, *et al*.. Hyperbolic phonon-polaritons in boron nitride for near-field optical imaging and focusing[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 7507.

[72] 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 Letters*, 2017, 17(1): 228-235.

[73] LI P N, HU G W, DOLADO I, *et al*.. Collective near-field coupling and nonlocal phenomena in infrared-phononic metasurfaces for nano-light canalization[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3663.

[74] LI N, GUO X D, YANG X X, *et al*.. Direct observation of highly confined phonon polaritons in suspended monolayer hexagonal boron nitride[J]. *Nature Materials*, 2021, 20(1): 43-48.

[75] HU H, YANG X X, ZHAI F, *et al*.. Far-field nanoscale infrared spectroscopy of vibrational fingerprints of molecules with graphene plasmons[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 12334.

[76] HU D B, YANG X X, LI CH, *et al*.. Probing optical anisotropy of nanometer-thin van der waals microcrystals by near-field imaging[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1471.

[77] HU D B, CHEN K, CHEN X ZH, *et al*.. Tunable modal birefringence in a low-loss van der waals waveguide[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(27): 1807788.

[78] HU H, YANG X X, GUO X D, *et al*.. Gas identification with graphene plasmons[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1131.

[79] GUO X D, LIU R N, HU D B, *et al*.. Efficient all-optical plasmonic modulators with atomically thin van der waals heterostructures[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(11): 1907105.

[80] YANG X X, ZHAI F, HU H, *et al*.. Far-field spectroscopy and near-field optical imaging of coupled Plasmon-phonon polaritons in 2D van der waals heterostructures[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(15): 2931-2938.

[81] BELOV P A, SIMOVSKI C R, IKONEN P. Canalization of subwavelength images by electromagnetic crystals[J]. *Physical Review B*, 2005, 71(19): 193105.

[82] KRISHNAMOORTHY H N S, JACOB Z, NARIMANOV E, *et al*.. Topological transitions in metamaterials[J]. *Science*, 2012, 336(6078): 205-209.

[83] KEILMANN F, HILLENBRAND R. Near-field microscopy by elastic light scattering from a tip[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*: *Mathematical*, *Physical and Engineering Sciences*, 2004, 362(1817): 787-805.

[84] SHVETS G, TRENDAFILOV S, PENDRY J B, *et al*.. Guiding, focusing, and sensing on the subwavelength scale using metallic wire arrays[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(5): 053903.

[85] LI ZH Y, LIN L L. Evaluation of lensing in photonic crystal slabs exhibiting negative refraction[J]. *Physical Review B*, 2003, 68(24): 245110.

作者简介：

郑嘉璐(1991—)，男，陕西西安人，博士，硕士生导师。研究方向为纳米材料的光电性能研究及在光电器件中的应用。2009年入读中南大学材料学院，并参与中南大学与澳大利亚蒙纳士大学“2+2”联合培养项目；2014年同获两校学士学位；2014年以博士全额奖学金入读蒙纳士大学材料科学与工程学院；2018年获蒙纳士大学博士学位；2019年7月入职西安石油大学。已在Angewandte Chemie、ACS Applied Materials & Interfaces、Nanoscale等期刊上发表论文7篇；Email: zhengjialu_xsy@163.com

鲍桥梁(1979—)，男，湖北黄冈人，2016年受聘为蒙纳士大学材料科学与工程系副教授(tenure)，入选澳大利亚科研委员会“未来研究员”奖励计划。致力于研究石墨烯光子学和光电子器件，以及受限空间的光与物质相互作用与极化激元(等离子体极化激元、激子极化激元和声子极化激元等)，研究工作曾入选“2018中国光学十大进展(基础研究类)”和Physics World网站2020年度“世界物理十大突破”。已在Nature, Nature Materials, Nature Photonics, Nature Chemistry, Light: Science and Applications, Nature Communications等期刊发表论文200余篇，2018至2020年连续入选Clarivate Analytics高被引学者。Email: qiaoliang.bao@gmail.com

仇成伟(1981—)，男，浙江嘉兴人，新加坡国立大学电子与计算机工程系的副教授(tenure)，工学院“院长讲席教授”。研究方向为电磁散射理论，结构表面和结构光场，以及光力操控，(光学、声学、热学)超材料与超表面，低维材料光电子材料与器件。已在Science, Nature, Nature Nanotechnology, Nature Materials, Nature Photonics, Light: Science and Applications, PNAS, PRL等期刊发表论文300余篇。2019年与2020年Clarivate Analytics高被引学者。现任eLight杂志(Springer Nature和长春光机所联合创办)创刊主编。Email: chengwei.qiu@nus.edu.sg