

光子莫尔晶格的研究进展

王鹏 傅其栋 李雨芮 叶芳伟

Research developments on photonic moiré lattices

WANG Peng, FU Qi-dong, LI Yu-rui, YE Fang-wei

引用本文:

王鹏, 傅其栋, 李雨芮, 叶芳伟. 光子莫尔晶格的研究进展[J]. 中国光学, 2021, 14(4): 986–997. doi: 10.37188/CO.2021-0110

WANG Peng, FU Qi-dong, LI Yu-rui, YE Fang-wei. Research developments on photonic moiré lattices[J]. Chinese Optics, 2021, 14(4): 986–997. doi: 10.37188/CO.2021-0110

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0110>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

表面等离子体平面金属透镜及其应用

Planar plasmonic lenses and their applications

中国光学. 2017, 10(2): 149 <https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0149>

金属等离子激元调控Fabry–Perot微腔谐振模式研究

Resonant mode of Fabry–Perot microcavity regulated by metal surface plasmons

中国光学. 2019, 12(3): 649 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0649>

半导体超晶格声子激光器的研究进展

Progress of semiconductor superlattice phonon laser

中国光学. 2017, 10(4): 415 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0415>

纳米尺度下的局域场增强研究进展

Advances in the local field enhancement at nanoscale

中国光学. 2018, 11(1): 31 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0031>

近红外光热转换纳米晶研究进展

Research progress of near-infrared photothermal conversion nanocrystals

中国光学. 2017, 10(5): 541 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0541>

超表面上表面等离子激元波的光栅衍射行为研究

Grating diffractive behavior of surface plasmon wave on meta-surface

中国光学. 2018, 11(1): 60 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0060>

文章编号 2095-1531(2021)04-0986-12

光子莫尔晶格的研究进展

王 鹏, 傅其栋, 李雨芮, 叶芳伟*
(上海交通大学 物理与天文学院, 上海 200240)

摘要:莫尔晶格是指两个相同或者相似的周期结构重叠形成的复合结构。受二维材料中范德瓦尔斯(van der Waals)异质结形成的莫尔超晶格研究的影响,光学、声学、力学、热学领域中莫尔晶格的研究也相继重拾热情或不断涌现。本文主要回顾了光学莫尔晶格的研究进展,包括构成莫尔晶格的两个周期结构在空间上处于同层的单层莫尔晶格结构和处于不同层的双层莫尔晶格结构,讨论了由不同材料、不同形式构成的各类光学莫尔结构的线性和非线性光学特性。

关 键 词:光子莫尔晶格;局域;非局域;孤子;等离子体激元

中图分类号:O437 文献标志码:A doi: 10.37188/CO.2021-0110

Research developments on photonic moiré lattices

WANG Peng, FU Qi-dong, LI Yu-rui, YE Fang-wei*

(School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

* Corresponding author, E-mail: fangweiye@sjtu.edu.cn

Abstract: Moiré lattices are composite structures composed of two identical or similar periodic structures. Inspired by the research in the van der Waals heterostructures, the research interest on moiré physics in optical, acoustic, mechanical, and thermal systems is either renewing or emerging. Here we review the recent research developments on optical/photonic moiré lattices, including monolayered and bilayered moiré structures, discussing their linear and nonlinear optical properties of different realization of moiré lattices.

Key words: photonic moiré lattices; localization; delocalization; solitons; surface plasmonic polaritons (SPPs)

1 引 言

莫尔晶格是指两个相同或者相似周期结构(称子晶格)重叠形成的复合结构。由于两个子晶格晶格常数的差异或者叠加时两个子晶格之间存在转角,该复合结构会在原来子晶格周期的基础

上,产生一套长周期图样,即所谓莫尔条纹。在生活中,莫尔条纹并不罕见,比如:将两把梳子重叠即可形成莫尔条纹,两面纱窗重叠处会产生莫尔条纹,电风扇的前后网罩在视野中重叠也能产生莫尔条纹。当人们用手机拍摄电脑屏幕时,经常会看到彩色的莫尔条纹,摄影爱好者在拍摄衣织

收稿日期:2021-05-14; 修订日期:2021-05-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 91950120, No. 11690033);上海市科学基金(No. 9ZR1424400);上海优秀学术带头人计划(No. 20XD1402000)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.91950120, No. 11690033); Scientific Funding of Shanghai (No. 9ZR1424400); Shanghai Outstanding Academic Leaders Plan (No. 20XD1402000)

物时也会发现在照片上出现恼人的莫尔条纹^[1]。鉴于莫尔条纹的长周期特点,莫尔条纹在艺术设计、纺织业、建筑学、图像处理、测量学和干涉仪等方面都有一些独特的应用,但这些应用基本上都是基于莫尔条纹的几何特点,对于莫尔条纹或莫尔晶格物理性质的研究并不多见。

对莫尔晶格物理性质的研究主要起源于范德瓦尔斯(van der Waals, vdW)异质结结构^[2-5]。vdW异质结结构是指两层(或者多层)二维材料堆叠在一起形成的超晶格,层间通过范德瓦尔斯力相互耦合。受层间耦合的影响,vdW异质结出现单层材料所不具有的光电响应特性^[4-9]。进一步,如果将上层材料相对于下层材料转过一个小角度(本文称其为“莫尔角”),就会出现原子晶格在二维空间排布的莫尔条纹。该莫尔条纹周期性地调节层间耦合,导致系统的能带结构发生显著改变。这方面最著名的例子可能是Cao等人做的转角石墨烯实验:当两层石墨烯之间的转角取所谓的魔角(1.08°)时,电子能带结构在费米能级附近出现平带,双层石墨烯呈现出莫特绝缘相。更神奇的是,在合适的外加偏压下,该异质结结构呈现出超导相^[10-11]。莫尔晶格竟然在根本上改变了材料的性质!一石激起千层浪,该工作引发了vdW异质结结构的理论和实验研究的热潮^[12-17],甚至形成了一个专门的学科方向:扭曲电子学(twistronics)^[18]。

vdW异质结的研究也引发了物理学其他学科方向的相关研究。由于莫尔结构是通过将两个周期晶格堆叠所形成的,光学、声学、力学、热学以及冷原子系统等领域的研究者均可以通过构造类似的堆叠结构产生相应的莫尔晶格,如光学莫尔晶格^[19-21],声学莫尔晶格^[22-23],力学莫尔晶格^[24]等。莫尔光晶格也被引入到冷原子系统,用来模拟凝聚态中的相关物理现象^[25-26]等。这些莫尔晶格均显示出与转角密切相关的物理特性,在特定的角度下,结构中也会出现跟魔角石墨烯中类似的能带平坦化现象。

本文主要回顾和总结光学莫尔晶格方面的研究成果。

2 基于一维光栅的莫尔晶格

一维光栅是最简单的周期结构^[29-34]。将两个

晶格常数不同的一维光栅叠加,便可看到明暗相间的一维莫尔条纹(图1(a))。莫尔条纹的周期一般比两个构成光栅的周期要大得多,且莫尔条纹对光栅周期结构的微小变化十分敏感,因此莫尔条纹很早即被用于材料形变的分析和形貌测量^[27-28],近期也被用于图案的防伪识别^[29]等。

考虑两个周期分别为 d_1 和 d_2 的正弦函数,且它们的周期接近,即 $d_2-d_1 \ll d_1, d_2$ (设 $d_1 < d_2$)。按照三角函数“和差化积”公式,可知该两正弦函数的和可表达为 $S(x)=\cos(Gx)\sin(gx)$ 的形式,其中 $G=2\pi(d_2-d_1)/(2d_1d_2)$, $g=2\pi(d_2+d_1)/(2d_1d_2) \approx 2\pi/d_1$ 。可见,莫尔条纹涉及两个周期:在子晶格周期 $d_1(\approx d_2)$ 的基础上,出现了一个反比于 d_2-d_1 的长周期。因此,整个莫尔条纹 $S(x)$ 可以看成是一个短周期晶格 $\sin(gx)$ 被一长周期的包络函数 $\cos(Gx)$ 缓慢调节。Askin等人将该类莫尔条纹引入到金属表面^[30-32](图1(c))。在金属莫尔条纹的节点处(空间位置满足 $\cos(Gx)=0$ 的地方),研究者观察到了局域的SPP波,因此这些节点充当了等离子体微腔的角色,被用来产生等离子体激元的激光辐射^[30],其辐射波长可以方便地通过调节莫尔结构的参数(如 d_1 和 d_2)加以调控(图1(f))。另一方面,当莫尔周期较小时,这些等离子体微腔发生耦合,便构成了一类特殊的耦合腔波导结构(CROW),该波导的色散关系曲线(图1(e))出现在均匀周期光栅结构(指周期为 d_1 或 d_2 的单光栅周期)的能隙中间(图1(d))。由于耦合强度决定了该波导色散曲线的宽度,因此通过调节莫尔周期(G)即可调控带宽。当莫尔周期较大时,微腔之间的耦合很弱,该波导的色散带就较为平坦(图1(e))。平坦化的色散带意味着此时形成了慢光等离子波的传输。有理论研究表明:采用此类耦合腔波导结构,光脉冲的群速度可以下降3个数量级^[33]。

上述慢光波导结构在机理上类似于光子晶体波导结构,即利用带隙导波。这种导波机制决定了电磁波在空间上可以限域在折射率较低处(图1(g))^[33-34](图中光场在折射率低谷处的来回振荡是波导色散带的多个模式被同时激发而发生干涉所致)。有趣的是,数值研究表明,即使光一开始是在折射率高峰处入射,在后续的演化过程中也会逐渐耦合至折射率低谷处(图1(h)),说明一维莫尔晶格结构的节点处确实可以稳定地局域光与引导光。

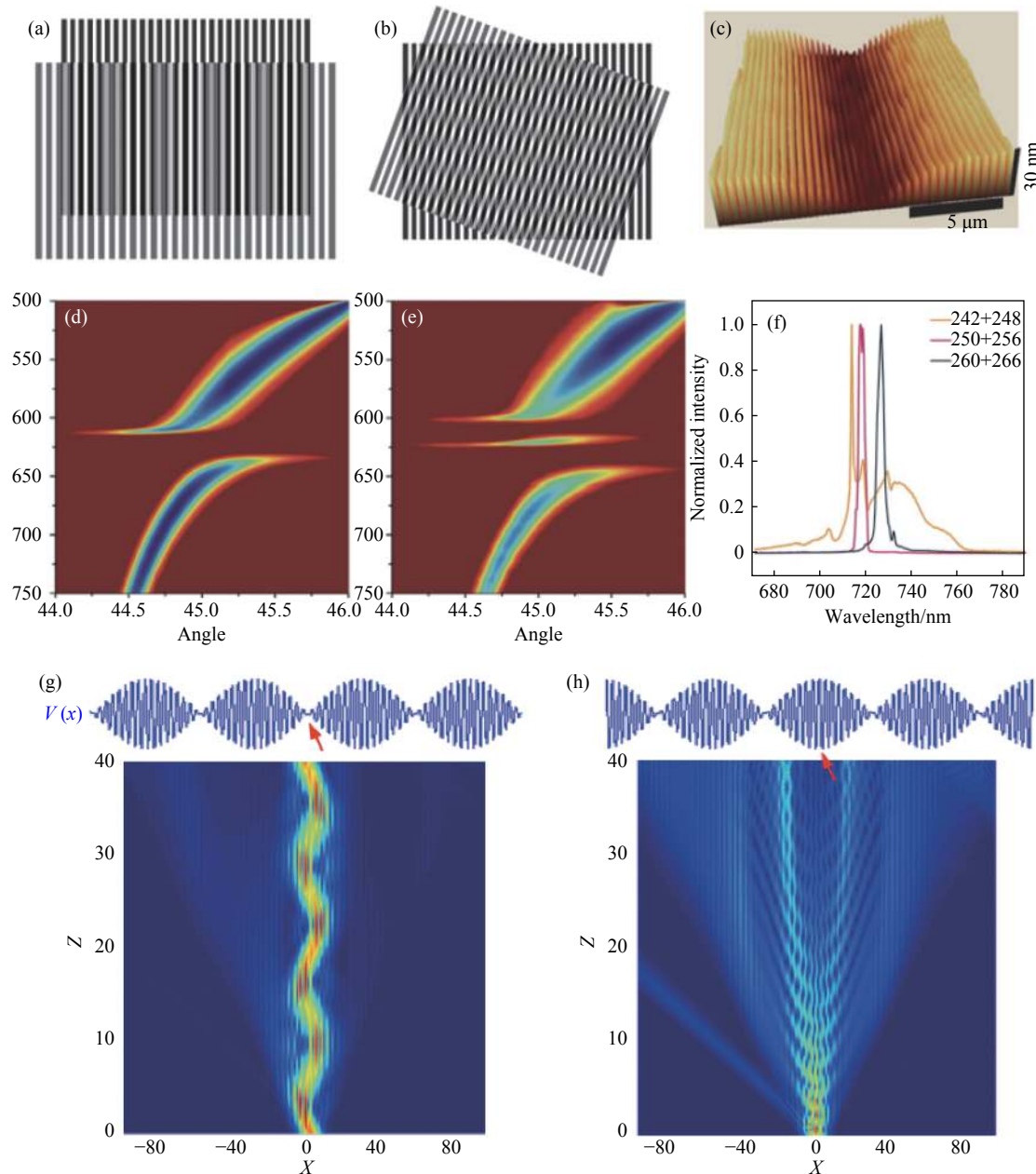


图 1 (a) 由周期略有差异的两个一维光栅构成的莫尔光栅; (b) 由两个周期相同的一维光栅, 旋转一定角度后构成的二维莫尔光栅; (c) 一个莫尔周期内的一维金属莫尔结构形貌图^[32]; (d, e) 实验测得的金属光栅的 SPP 色散曲线和金属莫尔光栅的 SPP 色散曲线^[30]; (f) 两个金属子光栅的周期(即 d_1 , d_2) 发生改变时, 相应的金属莫尔微腔辐射的激光发生频移^[32]; 在一维莫尔晶格的节点 (g) 和最大包络处 (h) 激发莫尔晶格, 光在晶格中的传输图像^[34]。

Fig. 1 (a) Moiré gratings constituted from two 1D gratings with slightly detuned periods. (b) 2D moiré pattern constituted from two 1D gratings with a relative rotation angle. (c) Landscape of 1D metallic moiré structure shown within one moiré period^[32]. (d, e) Experimentally measured dispersion curves of SPP on metallic 1D gratings and on moiré gratings^[30]. (f) With the change of the period (i.e. d_1 , d_2) of the two constituent metallic gratings, the lasing frequency of the corresponding metallic moiré cavity changes^[32]. Light propagating dynamics when a 1D moiré lattice is optically excited at its node (g) or at its peak (h) of the structural envelop^[34].

上述莫尔结构均由两个周期不同的一维光栅构成。通过互相转过一定的角度再重叠, 两个一维光栅也可以构成一个二维周期结构——二维莫

尔结构 (图 1(b))。显然, 二维莫尔结构甚至可以由两个周期完全相同的光栅构成。该类莫尔晶格被用于增强钙钛矿太阳能电池的光电性能^[35]。相

比于单层的光栅结构, 莫尔晶格的出现提高了单位角度内衍射级次和衍射光斑的数目, 从而提升了光能的收集效率。研究表明, 当转角为 30° 时, 该太阳能电池对光的捕获和吸收效率达到最大: 接近且部分超过传统的 Yablonovitch $4n^2$ 吸收极限。由于该类莫尔结构的周期对转角的依赖高度敏感, 故研究者可以通过转角自由度在很宽的频段范围内调控结构响应的共振波长。因此, 莫尔结构被提议用于热辐射的动态管理, 可大幅度提升热辐射管理器件频率的可调范围^[36]。莫尔晶格为制备高效率的光电和光热器件提供了新的途径。

3 基于二维周期结构的莫尔晶格

将两个二维周期结构重叠后, 由于存在晶格常数差异或者彼此之间有相对转角, 便能形成二维莫尔晶格。比起一维的情形, 二维莫尔晶格在结构上更加丰富多彩, 因此吸引了更多的研究。

首先是莫尔超表面方向上的工作。通过所谓的纳米球光刻技术 (Moiré nanosphere lithography), 研究者在一些基底材料上制备了各类金属二维莫尔结构。相比于传统单周期的金属晶格, 莫尔晶格包含了多个大小、方向不同的周期, 因此可以在更多传播方向和更宽频率范围内激发表面等离子体激元 (Surface Plasmonic Polaritons, SPP)^[37]。当莫尔晶格中的金属在结构上没有联通的时候, 则可以激发产生形态各异各类局域等离子体共振 (Localized Plasmonic Resonances, LPR)^[38]。这些 SPP 或 LPR 的工作频段可落在可见光或者近红外范围。通过纳米球光刻技术, 研究者还将莫尔条纹刻写到单层石墨烯上, 在莫尔图案化的石墨烯上激发了中红外和 THZ 频段的 LPR, 实现了共振频率的调控^[39]。显然, 如果将莫尔结构的特征尺度变大, 比如在一些合适的基底材料上刻蚀出金属圆盘的莫尔排布结构, 那么, 当圆盘的半径和圆盘之间的间隔为毫米尺度时, 将在 GHz 频段激发出各类准 LPR, 通过调节莫尔角可以将入射电磁波的透过率在 10%–90% 范围内连续调节^[40]。

上述工作均是将莫尔结构引入到了薄层材料中, 可称为莫尔超表面结构。莫尔结构也可以引

入到体材料中, 形成莫尔体结构: 即沿着材料的某个方向 (比如 z 向), 在处于任意 z 处的横截面上均呈现为二维莫尔型的折射率分布。这种莫尔体结构可以通过光学诱导或者飞秒激光直写的方法在一些光敏材料中得以构建^[19-20, 41-42]。光学莫尔体结构的获得为研究光在莫尔晶格中的演化提供了条件。Huang 等人首先提出了莫尔晶格体结构的实现办法, 并研究了光束在体结构中的传输动力学行为^[19], 即设想一体材料的折射率 $n(x, y, z)$ 在 z 向 (即光束的传输方向) 分布均匀, 但在其横截面 (x 和 y 轴组成的平面) 内则为两个方形晶格的简单叠加: $n(x, y, z) = p_1 [\cos(2x) + \cos(2y)] + p_2 [\cos(2x') + \cos(2y')]$, 其中 $(x', y')^T = S(\theta) (x, y)^T$, $S(\theta)$ 为二维旋转矩阵, 即 $S(\theta) = [\cos\theta \sin\theta; \sin\theta \cos\theta]$, θ 即莫尔角。研究发现, 对一般的莫尔角而言, 当构成莫尔晶格的第二个子晶格的振幅 p_2 小于某个临界值 p_2^c 的时候 (第一个子晶格的振幅 p_1 固定为 1, $p_1 \equiv 1$), 光束在相应的莫尔晶格中演化时持续地衍射发散; 当 p_2 超过该 p_2^c 时, 则光束始终保持局域的状态。这是首次在二维系统中发现的非局域-局域的相变。同时, 研究也发现, 当莫尔角取到所谓的勾股角 (即 θ 是 3 个边长为正整数的直角三角形的内角) 时, 则对应的莫尔晶格恢复为方形周期晶格 (但周期大于子晶格周期, 并为复式元胞结构), 因此, 此时无论 p_2 取何值, 晶格中传输的光束始终处于发散状态。

以上理论预测得到了实验证实。Wang 等人采用光学诱导^[43]的办法, 将 8 束平面波的干涉图样写入到光折变材料铌酸锶钽 (SBN) 晶体中^[20]。这 8 束平面波分成两组, 前 4 束平面波干涉在 SBN 中诱导出子晶格 1, 后 4 束平面波干涉则诱导出子晶格 2。这两组平面波的强度和它们之间的转角在实验上容易调节, 因此研究者得到了高度可调的光子莫尔晶格, 见图 2(a-c)。借此, Wang 等人通过信号光 (包括高斯光束和携带涡旋位相的光束) 在各个莫尔晶格中进行传输测试, 证实了关于光束局域和局域-非局域相变的理论预测, 见图 2(e-g)。进一步, 他们通过构建其他各类型莫尔晶格 (如基于三角晶格、斜方晶格、长方晶格^[44-45] 等各类基本晶格的莫尔晶格), 证实了莫尔晶格中光束的局域和局域-非局域相变是一个普遍存在的现象。

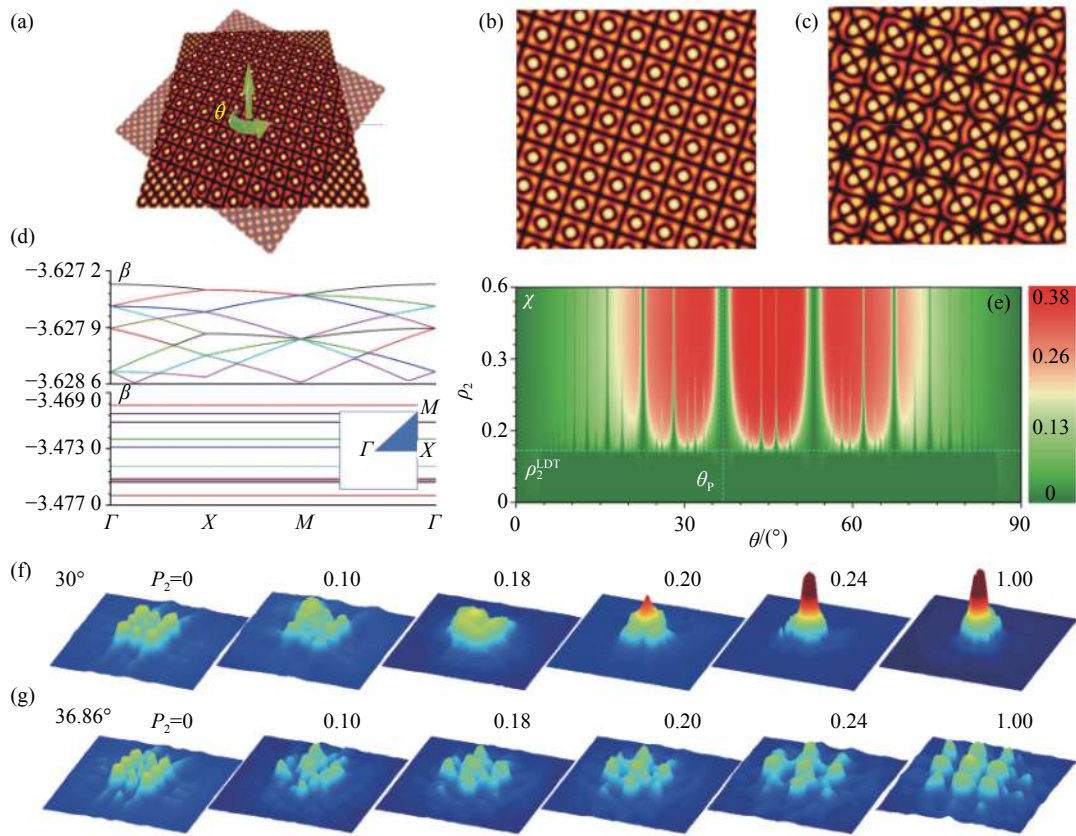


图 2 (a) 由两个方形子晶格重叠, 且转过相对角度 θ 后, 构成的二维光子莫尔晶格; (b) 周期莫尔晶格; (c) 非周期莫尔晶格; (d) 非周期莫尔晶格对应的准能带图, 上图 $p_2 < p_2^{\text{cr}}$, 下图 $p_2 > p_2^{\text{cr}}$; (e) 本征模在二维平面 (θ, p_2) 的形式因子分布图, 图中绿色代表模式处于非局域状态, 红色代表模式处于局域状态; (f, g) 用高斯光激发莫尔晶格, 在不同 p_2 (固定 $p_1=1$) 对应的晶格中传输 2 cm 后的光强输出图。上行图代表光束在非周期莫尔晶格中传输的情形, 可以看到当 p_2 超过 0.18 ($p_2^{\text{cr}}=0.15$) 时, 光束开始局域; 下行图代表光束在周期莫尔晶格中传输的情形, 可以看到光束始终处于离散衍射的状态^[20]。

Fig. 2 (a) 2D photonic moiré lattices obtained by superpositioning two square lattices with a relative rotational angles θ ; (b) A moiré lattice in a commensurate phase; (c) A moiré lattice in an incommensurate phase; (d) Quasi-bandstructure for an incommensurate moiré lattice: upper row for $p_2 < p_2^{\text{cr}}$, lower row for $p_2 > p_2^{\text{cr}}$; (e) Form factor of the eigen modes shown in the plane (θ, p_2) , where the blue-colored domains imply mode delocalization, while the red-colored domains imply mode localization; (f, g) After propagating 2 cm in the moiré lattice of an initially narrow Gaussian beam, the light-intensity distribution at the output facet of the lattice with different p_2 (with fixed $p_1=1$). Upper row shows the results in incommensurate moiré lattices, and one can see that the light beam starts localizing when p_2 exceeds 0.18 ($p_2^{\text{cr}}=0.15$); Bottom row shows the results in commensurate moiré lattices, and one sees the delocalization of the light persists for all values of p_2 ^[20].

莫尔晶格为什么可以将光束局域?光的局域是信息传播的基础, 也是对光信息进行各种操纵和处理的前提。光局域的常见办法有利用光纤(全反射机制)、光子晶体波导(光子晶体能隙)、随机结构(安德森局域)、非线性效应(如自聚焦机制)等。莫尔晶格中光的局域显然与上述体系中的局域机制均不同。为此, Wang 等人提出了“等效周期晶格”的概念, 用一系列级次不断升高的周期晶格无限逼近(非周期)莫尔晶格, 从而将

非周期晶格的研究转化为成熟的周期系统的研究。借此办法, 求解了光子莫尔晶格的准能带结构, 发现: 当 $p_2 > p_2^{\text{cr}}$ 时, 能带中存在丰富的平带(见图 2(d), 下图), 平带意味着衍射振幅(正比于能带的曲率)为零, 所以光束在莫尔晶格中自然地保持了局域的状态^[20]。相比较地, 当 $p_2 < p_2^{\text{cr}}$ 时, 能带是弯曲的(见图 2(d), 上图), 此时光束在莫尔晶格中就会衍射发散。

平带是能带中一种特殊的存在, 平带意味着

波函数的局域化和态密度的剧增,这与许多强关联物理息息相关。因此,设计具有平带结构的人工微纳结构是一个具有重要价值的研究方向。平带设计的常见办法是采用具有特殊对称性的晶格^[46-48]或者通过精心调节晶格参数得以实现^[49]。一般而言,这些方法只能设计出一条特定的平带,而光子莫尔体晶格中则存在着丰富的平带结构。光子莫尔体晶格代表了一种得到平带的新方式。

上述二维光子莫尔晶格的体结构是通过光学诱导法产生的,这种方法能引入的折射率的变化很弱,仅为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 量级,这和光子晶体结构中折射率的显著变化形成鲜明对比,后者一般由两种不同材料组成。文献^[50]考虑了两个方形光子晶体构成的莫尔体结构,计算了莫尔角取某些特殊角时结构的能带。研究发现,由于复式元胞的出现,莫尔型光子晶体的能带带隙比单一方形光子晶体的带隙明显增大,这为光子晶体的能带设计提供了一个新的途径。然而,该工作仅仅考虑了取若干特殊莫尔角时的莫尔晶体的能带结构,关注点落在能隙的变化上,没有关于能带是否平坦化的讨论。

关于莫尔超晶格结构中能带平带的出现和影响,双层转角石墨烯材料的相关文献中有诸多讨论^[51-53]。但需要特别指出的是,Huang和Wang等人研究的莫尔晶格是将两个周期晶格写入到同一

块晶体中^[19-20],属于单层(monolayer)莫尔晶格结构,而vdW异质结则为双层结构。因此,这两者除了研究对象上有根本性区别之外(一为波色子,另一为费米子),在几何结构上也有明显的不同,因此这两类体系的研究结论不能直接拿来对比。然而,非蜂窝状周期晶格构成的莫尔结构也存在能带平带的发现,对二维材料的相关研究具有明显的启发和借鉴价值。

受二维材料堆叠形成的vdW异质结结构研究的影响,近期关于光学双层莫尔结构的研究也陆续出现^[54-56]。Hu等人研究了双层 α 相三氧化钼(α -MoO₃)超结构中声极化激元(声子与光子耦合形成的准粒子)的传播行为^[55]。 α 相三氧化钼是一种双曲(Hyperbolic)材料,即在其面内两个相互垂直的方向传输时,准粒子感受到符号相反的介电常数,此时色散关系为双曲线类型。然而,研究人员发现,在 α 相三氧化钼的两层堆叠结构中,当转角超过一定值时,由于准粒子间的层间耦合,色散关系从原先开放的双曲线过渡为闭合的椭圆曲线(图3),即在某个特定的转角处(研究者称其为光子“魔角”),色散关系呈现为一平带,这意味着声极化激元无衍射地定向传输。因此,通过控制莫尔角,研究人员在同一结构上实现了三种不同类型的色散关系曲线(双曲-平带-椭圆)相继转换,展示了莫尔结构对极化激元大范围的动态调控。

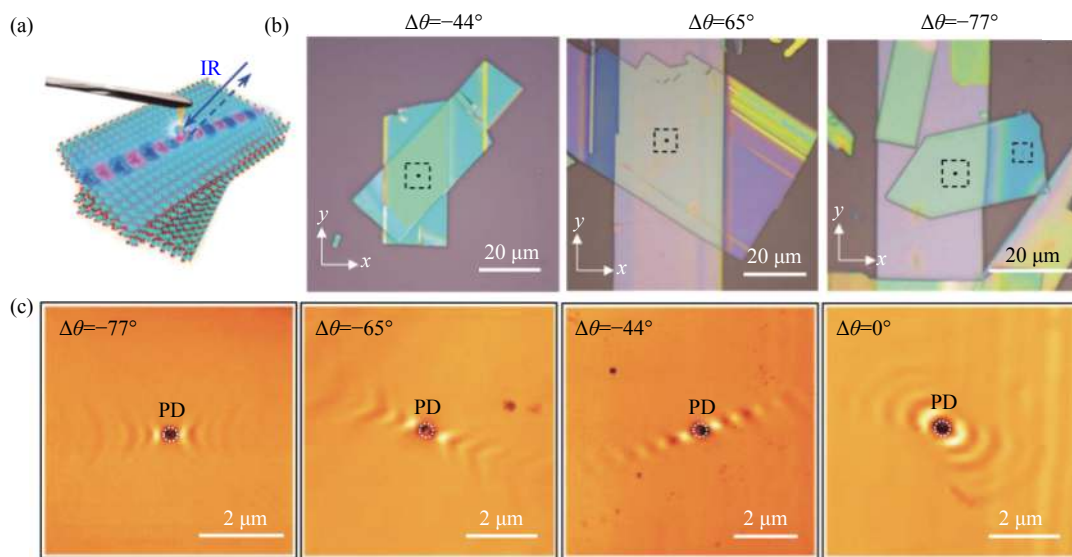


图3 (a) 两层 α -MoO₃堆叠构成的莫尔超晶格结构;(b) α -MoO₃莫尔超晶格结构在不同莫尔角下的光学照片;(c)声极化激元在不同莫尔角度下的波形分布图,显示出双曲-平带-椭圆三类拓扑上不同的色散带的转变^[55]。

Fig. 3 (a) Moiré superlattice constituted by twist-stacked α -MoO₃ bilayer; (b) Optical images of α -MoO₃ moiré superlattice as a function of rotation angle; (c) In-plane propagation of phonon polaritons at different twist angle of an α -MoO₃ bilayer, indicating a transition among three topologically different dispersion: hyperbolic, flat and elliptic^[55].

Wang 等人则考虑双层莫尔超结构中的另外一种极化激元,即准表面等离子体激元(Spoof SPP, 该类激元可看成是传统 SPP 在微波等长波段的存在形式)^[57]。他们考虑在厚度一定的薄介质层上表面和下表面分别附着呈蜂窝状晶格排布的金属环结构,该类超表面结构支持 Spoof SPP。上下表面的耦合使得 Spoof SPP 产生模式杂化,情况类似于堆叠二维材料通过分子力产生的层间耦合。研究者发现,当上下蜂窝状晶格在某个维度方向上的晶格常数有所差异时(该工作中未考虑转角非零的情形),复合结构中出现的周期性变化的莫尔条纹使得 Dirac 点在布里渊区移动,从而引入了电中性粒子(光子)的规范势和等效磁场,后者被在实验上观察到的平坦化朗道能级所证实。进一步地,如将转角自由度引入到该类莫尔结构中,则 vdW 异质结结构具有的一些与能带相关的重要性质也可以在光子莫尔晶格中重现,如在合适的转角和层间距下,光子能带出现平坦化、莫尔晶格边缘处存在拓扑局域模等^[58]。

上述双层光子莫尔晶格的工作关注极化激元在面内的传输动力学行为,这种双层结构对面外如垂直入射光的散射如何响应?Liu 等人将两个超透镜(二维位相型光栅)置于传统的光学成像系统中,通过调节两个超透镜的相对转角,实现了对成像焦平面位置和聚焦光斑形态的调控^[59]。Lou 等人则分析了两层光子晶体层状结构(PhC slab)互相转过一定角度之后形成的异质结结构的光散射特性^[56]。他们在理论上提出了一个对应原理:对于双层光子晶体层状结构堆叠而成的莫尔晶格,其支持的导波共振(Guided Resonances)频率,可以用单层光子晶体和一均匀层状材料的堆叠结构很好地近似。由于后者为一周期结构,因此传统的能带理论可以直接用来求解、预测双层堆叠结构的光学响应,从而大大降低数值计算的复杂度。研究者进一步揭示了该类光子莫尔结构的光学手性响应特征^[56]。

4 莫尔晶格中的非线性光学现象

光子莫尔晶格极大地改变了结构的色散关系,如能带平坦化或者能带发生拓扑上的改变。能带的改变如何影响传统的非线性光学过程,如光孤子的形成、非线性波长转换过程等?

非线性光子莫尔晶格的研究最早见于莫尔晶格中空间光孤子的研究^[19,21]。空间光孤子是光的衍射效应和非线性效应互相平衡、从而在传输过程中保持空间波形不变的光束^[60]。空间光孤子被认为在信息传输、全光路由、光控光等方面具有独特的应用价值。然而,材料的非线性响应一般非常微弱(相比于线性响应),因此在体材料中激发光孤子一般需要很高的激光功率。人们也研究了各种周期结构中的空间光孤子,周期结构提供的能带设计可以较好地降低光束的衍射效应,从而降低光孤子的激发对激光功率的要求。研究者还考虑了包括金属纳米线阵列结构在内的各类等离子体晶体(Plasmonic Crystals)中空间光孤子的激发^[61],借助于 SPP 的场增强效应也可降低孤子的激发功率。然而,由于金属纳米线自身的热稳定性问题,目前尚未见到等离子体格子孤子的实验观察。

Fu 等人通过光学诱导的办法,在光折变晶体(铌酸锶钡)中产生光子莫尔晶格。在施加偏压的条件下,铌酸锶钡具有饱和型非线性响应,这就相当于在光子莫尔晶格中引入了光学非线性响应。理论和实验研究发现,光子莫尔晶格中光孤子的阈值激发功率明显依赖于莫尔角。图 4(b) 和图 4(d) 给出了当线性莫尔晶格处于非局域相(即 $p_1=1, p_2 < p_2^c$) 时,莫尔光孤子的阈值功率 U_{th} 对莫尔角 θ 的依赖关系曲线。曲线显示, U_{th} 并非是 θ 的单调变化函数(在 $\theta=36.8^\circ$ 附近, U_{th} 取最大值)。另一方面,当线性莫尔晶格处于局域相(即 $p_1=1, p_2 > p_2^c$) 时,由于在一般角度下光束会发生自动局域,因此此时孤子的激发其实并无功率的要求,只有当莫尔角处于特殊角(对于四方晶格,即勾股角)时,由于莫尔晶格恢复为周期晶格,此时光孤子的激发依然需要一定的阈值功率,见图 4(a)、4(c)。有趣的是,研究发现孤子的阈值功率随着勾股角的级次升高而不断降低(勾股角级次的定义由直角三角形(a, b, c)中的 c 值决定, c 值越大,该勾股角级次越高)。图 4(e) 揭示了背后的物理原因:随着 c 值的升高,光在相应晶格中的衍射效应不断降低,因此,用于平衡衍射形成孤子所需要的非线性强度也就不断降低。研究发现,在同等参数条件下,采用三阶勾股角下的莫尔晶格,光孤子的激发功率比简单方形晶格中光孤子的激发功率要小 3 个数量级以上。该发现意味着通过调控莫尔

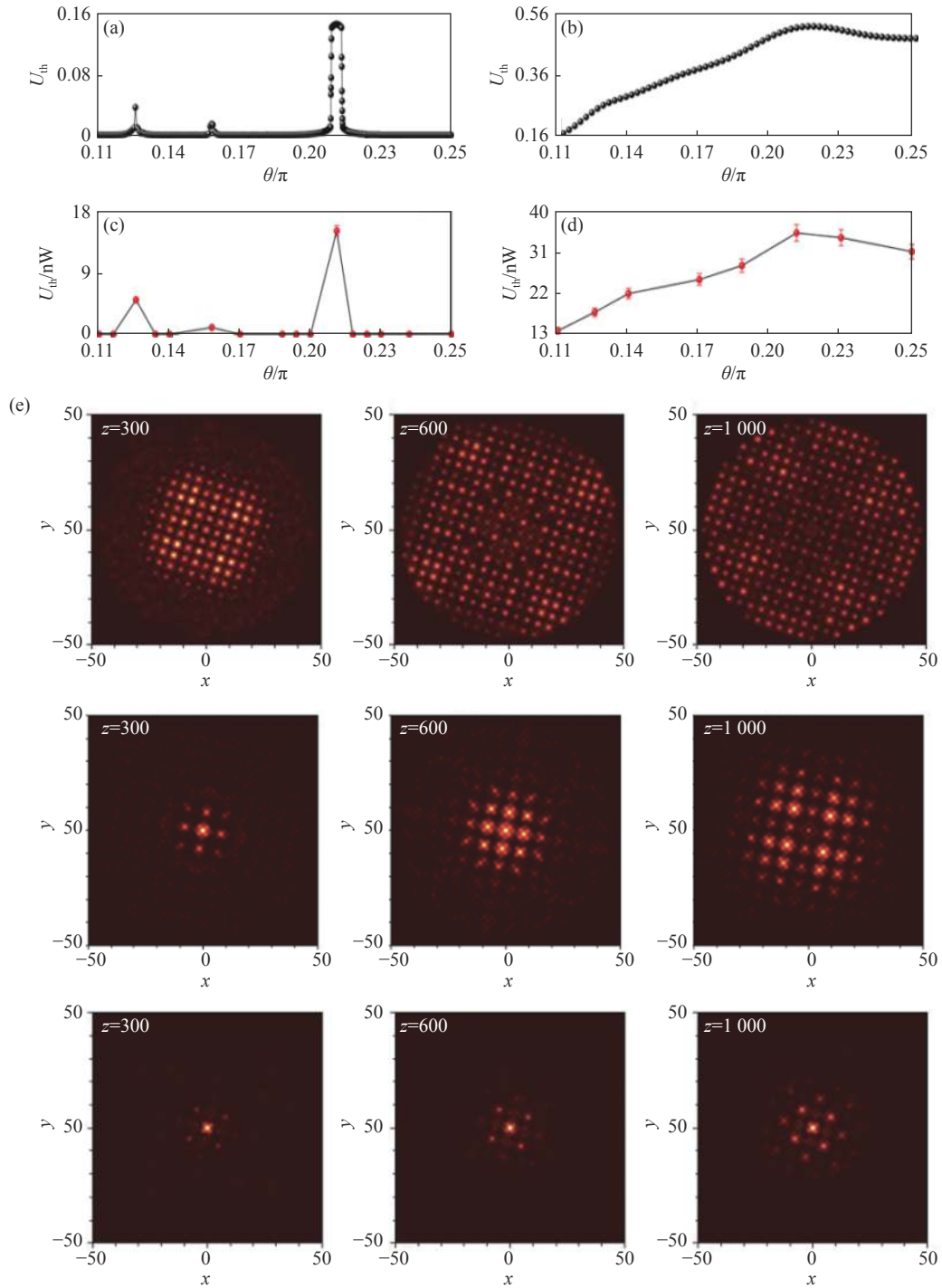


图4 (a-d)激发莫尔光孤子的阈值功率随莫尔角的变化, (a,c)对应 $p_2 > p_2^{cr}$ 的情形, (b,d)对应 $p_2 < p_2^{cr}$ 的情形。(a, b)是模拟结果, (c, d)是实验结果^[21]。(e)给出了在莫尔角为三个不同勾股角时, 莫尔晶格中光的衍射程度的比较。从上往下分别对应勾股角(3, 4, 5), (5, 12, 13), (8, 5, 17)。可以看到, 随着勾股角的级次增加, 光在莫尔晶格中的衍射效应不断降低, 从而解释了图(a, c)中孤子阈值功率随着勾股角级次的增加不断降低的现象。

Fig. 4 (a-d) Dependencies of the threshold power on rotational angle for optical soliton formation in moiré lattices, (a, c) $p_2 > p_2^{cr}$, (b, d) $p_2 < p_2^{cr}$. Theoretically calculated results are shown in (a, c) and experimentally measured results are shown in (b, d)^[21]. (e) Comparison of diffraction strength of light propagating in moiré lattices for three different Pythagorean angles, corresponding, from upper to bottom, to (3, 4, 5), (5, 12, 13), (8, 5, 17). Note the continuous decreasing of the light diffraction strength with the increasing of the order of Pythagorean triples, which explains the continuous decrease of the soliton threshold power with the Pythagorean angles seen in figure (a, c).

角可以显著降低光孤子的激发功率。需要说明的是,相关实验是在具有较强非线性响应的光折变晶体中进行的,但该发现也同样适用于其他非线性光学材料。因此,莫尔光孤子为光孤子走向应用突破了功率要求上的瓶颈。

最后,也有研究者报道了二次非线性介质中莫尔光孤子的数值研究^[62],发现莫尔孤子在参数空间中的存在区域与莫尔角无关,但孤子的稳定性则依赖于莫尔角。另外,具有自聚焦效应的一维莫尔晶格中也有光孤子数值研究的报道^[63]。

5 双层石墨烯莫尔晶格

Cao 等人的工作引发了转角石墨烯研究的热潮^[9-10],这方面工作主要集中于转角石墨烯的电子特性,但也有不少研究人员开始研究它们的光学特性。石墨烯支持 THz 或者近红外波段的 SPP,其波长可比光子波长小 3 个数量级^[64-65],且由于损耗相对较低和电学特性的可调性,石墨烯被认为是一种性能优良的等离子体材料。Sunku 等人提出了利用双层石墨烯莫尔晶格产生周期性等离子体结构,从而在原子尺度上实现对 SPP 的各种调控^[66]。人们也发现了双层石墨烯中的 SPP 激发具有手性和圆二色性^[67-69],且 SPP 在不同的莫尔结构构成的畴壁处有不同的反射行为^[66,70]等。

除了石墨烯,莫尔结构也会影响其他二维材料的光学性质,比如过渡金属硫族化合物(TM-

DCs)。通过叠加、旋转两单层 TMDCs,同样可以产生原子在空间分布上的莫尔条纹,从而改变这些材料中准粒子的特性,为新型光电方面的应用提供新的可能^[71-72]。类似地,通过莫尔角和层间耦合的控制,人们也实现了对二维材料异质结结构的非线性光学响应的调控^[73-78]。

6 结束语

莫尔晶格通过将两个周期晶格简单叠加得到,但呈现出两个组成晶格所不具有的物理特性,是“一加一大于二”的又一个明证。光子莫尔晶格提供的能带平带化开辟了一条获得光子平带和光束局域的新途径,也为各类光场的空间调控提供了一个新平台。根据其具体实现方式,光子莫尔晶格所具有的一些独特的设计自由度,如莫尔角、子晶格之间的耦合力度、两个子晶格的相对比重,为光场的动态调节提供了新的设计自由度。莫尔晶格是处于周期和随机结构之间的一个中间相,相当于较为成熟的周期和随机系统的研究,光学莫尔晶格的研究刚刚起步。已经取得的研究结果表明,准周期或者非周期结构可能具有周期系统完全不具有的光学性质,可为光的控制提供独特的手段。我们相信光学莫尔晶格将会吸引更多的研究,得到更多的莫尔晶格的光学实现,并在揭示其奇特光学特性的基础上得到一些特殊的应用。

参考文献:

- [1] 叶芳伟. 生活中的莫尔晶格[EB/OL][2021.07.21] <https://www.physics.sjtu.edu.cn/fangweiye/moire>. YE F W. Moiré lattices in life[EB/OL][2021.07.21] <https://www.physics.sjtu.edu.cn/fangweiye/moire>.
- [2] OHTA T, BOSTWICK A, SEYLLER T, *et al.*. Controlling the electronic structure of bilayer graphene[J]. *Science*, 2006, 313(5789): 951-954.
- [3] GEIM A K, GRIGORIEVA I V. Van der Waals heterostructures[J]. *Nature*, 2013, 499(7459): 419-425.
- [4] OOSTINGA J B, HEERSCHE H B, LIU X L, *et al.*. Gate-induced insulating state in bilayer graphene devices[J]. *Nature Materials*, 2008, 7(2): 151-157.
- [5] LIU L X, ZHOU H L, CHENG R, *et al.*. High-yield chemical vapor deposition growth of high-quality large-area AB-stacked bilayer graphene[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(9): 8241-8249.
- [6] LAI Y H, HO J H, CHANG C P, *et al.*. Magnetoelectronic properties of bilayer Bernal graphene[J]. *Physical Review B*, 2008, 77(8): 085426.
- [7] LI J, ZHANG R X, YIN ZH X, *et al.*. A valley valve and electron beam splitter[J]. *Science*, 2018, 362(6419): 1149-1152.
- [8] BITTENCOURT V A S V, BERNARDINI A E. Lattice-layer entanglement in Bernal-stacked bilayer graphene[J]. *Physical Review B*, 2017, 95(19): 195145.

- [9] LI H Y, YING H, CHEN X P, *et al.* Thermal conductivity of twisted bilayer graphene[J]. *Nanoscale*, 2014, 6(22): 13402-13408.
- [10] 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.
- [11] CAO Y, FATEMI V, FANG SH A, *et al.* Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices[J]. *Nature*, 2018, 556(7699): 43-50.
- [12] PARK M J, KIM Y, CHO G Y, *et al.* Higher-order topological insulator in twisted bilayer graphene[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(21): 216803.
- [13] SEYLER K L, RIVERA P, YU H Y, *et al.* Signatures of moiré-trapped valley excitons in MoSe₂/WSe₂ heterobilayers[J]. *Nature*, 2019, 567(7746): 66-70.
- [14] YUAN L, ZHENG B Y, KUNSTMANN J, *et al.* Twist-angle-dependent interlayer exciton diffusion in WS₂-WSe₂ heterobilayers[J]. *Nature Materials*, 2020, 19(6): 617-623.
- [15] CHEN G R, JIANG L L, WU SH, *et al.* Evidence of a gate-tunable Mott insulator in a trilayer graphene moiré superlattice[J]. *Nature Physics*, 2019, 15(3): 237-241.
- [16] 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.
- [17] LIU Y, WEISS N O, DUAN X D, *et al.* Van der Waals heterostructures and devices[J]. *Nature*, 2016, 1(9): 16042.
- [18] 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.
- [19] HUANG CH M, YE F W, CHEN X F, *et al.* Localization-delocalization wavepacket transition in Pythagorean aperiodic potentials[J]. *Scientific reports*, 2016, 6: 32546.
- [20] WANG P, ZHENG Y L, CHEN X F, *et al.* Localization and delocalization of light in photonic moiré lattices[J]. *Nature*, 2020, 577(7788): 42-46.
- [21] FU Q D, WANG P, HUANG CH M, *et al.* Optical soliton formation controlled by angle twisting in photonic moiré lattices[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(11): 663-668.
- [22] DENG Y CH, OUDICH M, GERARD N J R K, *et al.* Magic-angle bilayer phononic graphene[J]. *Physical Review B*, 2020, 102(18): 180304(R).
- [23] GARDEZI S M, PIRIE H, DORRELL W, *et al.* Acoustic twisted bilayer graphene[J]. arXiv: 2010.10037, 2020.
- [24] LÓPEZ M R, PEÑARANDA F, CHRISTENSEN J, *et al.* Flat bands in magic-angle vibrating plates[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(21): 214301.
- [25] O'RIORDAN L J, WHITE A C, BUSCH T. Moiré superlattice structures in kicked Bose-Einstein condensates[J]. *Physical Review A*, 2016, 93(2): 023609.
- [26] GONZÁLEZ-TUDELA A, CIRAC J I. Cold atoms in twisted-bilayer optical potentials[J]. *Physical Review A*, 2019, 100(5): 053604.
- [27] DURELLI A J, PARKS V J. *Moiré Analysis of Strain*[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1970.
- [28] TAKASAKI H. Moiré topography[J]. *Applied Optics*, 1970, 9(6): 1467-1472.
- [29] CADARSO V J, CHOSSON S, SIDLER K, *et al.* High-resolution 1D moirés as counterfeit security features[J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(7): e86.
- [30] KOCABAS A, SENLIK S S, AYDINLI A. Slowing down surface plasmons on a moiré surface[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(6): 063901.
- [31] BALCI S, KARABIYIK M, KOCABAS A, *et al.* Coupled plasmonic cavities on moire surfaces[J]. *Plasmonics*, 2010, 5(4): 429-436.
- [32] KARADEMIR E, BALCI S, KOCABAS C, *et al.* Lasing in a slow Plasmon moiré cavity[J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(7): 805-809.
- [33] KHURGIN J B. Light slowing down in Moiré fiber gratings and its implications for nonlinear optics[J]. *Physical Review A*, 2000, 62(1): 013821.
- [34] XUE R D, WANG W, WANG L Q, *et al.* Localization and oscillation of optical beams in Moiré lattices[J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5788-5796.
- [35] WANG Y, LAN Y J, SONG Q, *et al.* Colorful efficient Moiré-perovskite solar cells[J]. *Advanced Materials*, 2021,

- 33(15): 2008091.
- [36] GUO CH, GUO Y, LOU B CH, *et al.*. Wide wavelength-tunable narrow-band thermal radiation from moiré patterns[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(13): 131111.
- [37] HUANG SH F, ZHANG H F, WU Z L, *et al.*. Large-area ordered P-type Si nanowire arrays as photocathode for highly efficient photoelectrochemical hydrogen generation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(15): 12111-12118.
- [38] WU Z L, CHEN K, MENZ R, *et al.*. Tunable multiband metasurfaces by moiré nanosphere lithography[J]. *Nanoscale*, 2015, 7(48): 20391-20396.
- [39] WU Z L, LI W, YOGESH M N, *et al.*. Tunable graphene metasurfaces with gradient features by self-assembly-based Moiré nanosphere lithography[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(12): 2035-2043.
- [40] HAN J H, KIM I, RYU J W, *et al.*. Rotationally reconfigurable metamaterials based on moiré phenomenon[J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 17443-17449.
- [41] GAO Y M, WEN Z R, ZHENG L R, *et al.*. Complex periodic non-diffracting beams generated by superposition of two identical periodic wave fields[J]. *Optics Communications*, 2017, 389: 123-127.
- [42] JIN W T, SONG M, XUE Y L, *et al.*. Construction of photorefractive photonic quasicrystal microstructures by twisted square lattices[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(22): 6638-6641.
- [43] FLEISCHER J W, SEGEV M, EFREMIDIS N K, *et al.*. Observation of two-dimensional discrete solitons in optically induced nonlinear photonic lattices[J]. *Nature*, 2003, 422(6928): 147-150.
- [44] 陈俞安. 五类莫尔晶格的光学特性[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- CHEN Y A. Optical properties of five kinds Moiré lattice[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2020. (in Chinese).
- [45] 李静. 基于复杂晶格的莫尔晶格的光学性质[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- LI J. Optical properties of Moiré lattice based on complex lattice[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2020. (in Chinese).
- [46] MUKHERJEE S, SPRACKLEN A, CHOUDHURY D, *et al.*. Observation of a localized flat-band state in a photonic lieb lattice[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(24): 245504.
- [47] VICENCIO R A, CANTILLANO C, MORALES-INOSTROZA L, *et al.*. Observation of localized states in lieb photonic lattices[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(24): 245503.
- [48] XIA SH Q, RAMACHANDRAN A, XIA SH Q, *et al.*. Unconventional flatband line states in photonic lieb lattices[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(26): 263902.
- [49] LEYKAM D, ANDREANOV A, FLACH S. Artificial flat band systems: from lattice models to experiments[J]. *Advances in Physics: X*, 2018, 3(1): 1473052.
- [50] GÓMEZ-URREA H A, OSPINA-MEDINA M C, CORREA-ABAD J D, *et al.*. Tunable band structure in 2D Bravais-Moiré photonic crystal lattices[J]. *Optics Communications*, 2020, 459: 125081.
- [51] BISTRITZER R, MACDONALD A H. Moiré bands in twisted double-layer graphene[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(30): 12233-12237.
- [52] ZHANG ZH M, WANG Y M, WATANABE K, *et al.*. Flat bands in twisted bilayer transition metal dichalcogenides[J]. *Nature Physics*, 2020, 16(11): 1093-1096.
- [53] UTAMA M I B, KOCH R J, LEE K, *et al.*. Visualization of the flat electronic band in twisted bilayer graphene near the magic angle twist[J]. *Nature Physics*, 2021, 17(2): 184-188.
- [54] HU G W, KRASNOK A, MAZOR Y, *et al.*. Moiré hyperbolic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(5): 3217-3224.
- [55] HU G W, OU Q D, SI G Y, *et al.*. Topological polaritons and photonic magic angles in twisted α -MoO₃ bilayers[J]. *Nature*, 2020, 582(7811): 209-213.
- [56] LOU B CH, ZHAO N, MINKOV M, *et al.*. Theory for twisted bilayer photonic crystal slabs[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(13): 136101.
- [57] WANG W H, GAO W L, CHEN X D, *et al.*. Moiré fringe induced gauge field in photonics[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(20): 203901.
- [58] OUDICH M, SU G X, DENG Y CH, *et al.*. Bilayer photonic graphene[J]. arXiv: 2103.03686, 2021.
- [59] LIU ZH, DU ZH Y, HU B, *et al.*. Wide-angle Moiré metalens with continuous zooming[J]. *Journal of the Optical*

- Society of America B*, 2019, 36(10): 2810-2816.
- [60] CHEN ZH G, SEGEV M, CHRISTODOULIDES D N. Optical spatial solitons: historical overview and recent advances[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2012, 75(8): 086401.
- [61] YE F, MIHALACHE D, HU B, *et al.* Subwavelength plasmonic lattice solitons in arrays of metallic nanowires[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(10): 106802.
- [62] BAĞCI M. Soliton dynamics in quadratic nonlinear media with two-dimensional Pythagorean aperiodic lattices[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(4): 1276-1282.
- [63] LEI F Q, WANG CH F. Study on the properties of solitons in moiré lattice[J]. *Optik*, 2020, 219: 165169.
- [64] 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.
- [65] CHEN J N, BADIOLI M, ALONSO-GONZALEZ P, *et al.* Optical nano-imaging of gate-tunable graphene plasmons[J]. *Nature*, 2012, 487(7405): 77-81.
- [66] 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.
- [67] LIN X, LIU Z F, STAUBER T, *et al.* Chiral plasmons with twisted atomic bilayers[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(7): 077401.
- [68] BREY L, STAUBER T, SLIPCHENKO T, *et al.* Plasmonic Dirac cone in twisted bilayer graphene[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(25): 256804.
- [69] ZHANG X Y, ZHONG Y H, LOW T, *et al.* Emerging chiral optics from chiral interfaces[J]. *Physical Review B*, 2021, 103(19): 195405.
- [70] 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.
- [71] WU F CH, LOVORN T, MACDONALD A H. Topological exciton bands in Moiré heterojunctions[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(14): 147401.
- [72] YU H Y, LIU G B, TANG J J, *et al.* Moiré excitons: from programmable quantum emitter arrays to spin-orbit-coupled artificial lattices[J]. *Science Advances*, 2017, 3(11): e1701696.
- [73] KIM C J, BROWN L, GRAHAM M W, *et al.* Stacking order dependent second harmonic generation and topological defects in *h*-BN bilayers[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(11): 5660-5665.
- [74] HSU W T, ZHAO Z A, LI L J, *et al.* Second harmonic generation from artificially stacked transition metal dichalcogenide twisted bilayers[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(3): 2951-2958.
- [75] YAO K Y, YANEV E, CHUANG H J, *et al.* Continuous wave sum frequency generation and imaging of monolayer and heterobilayer two-dimensional semiconductors[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(1): 708-714.
- [76] LIU F, WU W J, BAI Y S, *et al.* Disassembling 2D van der Waals crystals into macroscopic monolayers and reassembling into artificial lattices[J]. *Science*, 2020, 367(6480): 903-906.
- [77] YAO K Y, FINNEY N R, ZHANG J, *et al.* Nonlinear twistoptics at symmetry-broken interfaces[J]. arXiv: 2006.13802, 2020.
- [78] ZHANG L, WU F CH, HOU SH C, *et al.* Van der Waals heterostructure polaritons with moiré-induced nonlinearity[J]. *Nature*, 2021, 591(7848): 61-65.

作者简介:



王 鹏(1991—), 男, 湖南益阳人, 上海交通大学物理与天文学院博士研究生, 主要研究光学微结构中的光传输和光场调控。Email: lingwoxing@sjtu.edu.cn



叶芳伟(1976—), 男, 浙江嵊州人, 上海交通大学长聘教授, 博士生导师, 主要研究方向为微纳光学和非线性光学。Email: fangweiye@sjtu.edu.cn