

基于超冷原子扭转双层光晶格的量子模拟

孟增明 韩伟 张靖[†]

(山西大学光电研究所 量子光学与光量子器件国家重点实验室 太原 030006)

2023-03-27 收到

[†] email: jzhang74@sxu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20230406

将两个二维周期晶格扭转一个角度可以产生莫尔超晶格,如图1所示,这一现象被广泛应用于光学精密检测、图像处理、艺术设计、纺织工业以及建筑学等。最近研究发现莫尔超晶格不但具有独特的美学价值,而且在量子系统中还可能导致各种新奇的物理效应,一个著名的例子是扭转双层石墨烯^[1]。

石墨烯是近年来科学家广泛关注的一种功能材料。2004年,英国曼彻斯特大学的两位科学家 Andre Geim 和 Konstantin Novoselov 利用胶带剥离出单层碳原子构成的石墨烯引发了材料物理的一场革命^[2],他们由此获得了2010年诺贝尔物理学奖。2018年,麻省理工学院的 Jarillo-Herrero 课题组发现将两层石墨烯相互扭转一个特定的小角度,称为“魔角”,系统在狄拉克点附近的能带将变得非常平坦,呈现出非常大的态密度,同时抑制了动能项,由此放大了相互作用强度,并产生了独特的强关联效应,他们在该扭转双层体系中相继观测到非常规超导性和关联绝缘态^[3, 4]。在类似的扭转二维材料的莫尔超晶格体系中,莫尔超晶格的倒空间布里渊区尺度远小于原晶格的布里渊区,因此扭转角度还使得体系在低掺杂浓度和小范围布里渊区时就可以观测到丰富的物理图像。由此诞生了一个新兴的研究领域:扭转电子学。

扭转角度作为一个可调的维度,已在石墨烯、

过渡金属硫族化合物等各种二维范德瓦耳斯材料中广泛开展扭转电子学的研究,这些材料的性质主要取决于电子在莫尔超晶格中的运动。有关扭转体系和莫尔超晶格的内在物理规律尚未被完全认知,例如二维扭转双层材料中的非常规超导机理,这是当前凝聚态物理的一个研究热点和难点。如何将扭转电子学拓展到新的量子系统引起了科学家的广泛兴趣^[5, 6]。

超冷原子平台在模拟中性原子在周期晶格中的运动方面已经取得了重大成功^[7]。例如,超冷原子光晶格在紧束缚近似下可以模拟玻色—哈伯德模型,科学家基于该平台实验观察到超流—莫特绝缘量子相变^[8]。超冷原子系统跟石墨烯相比具有明显的不同,在石墨烯中决定其性质的电子是带电粒子,是自旋为半整数的费米子。而超冷原子是电中性的,可以是费米子也可以是玻色子。为了进一步拓展扭转电子学的研究范围,深入理解莫尔超晶格导致的各种强关联量子物态的产生机制,科学家迫切需要实现基于超冷原子光晶格体系模拟扭转双层莫尔超晶格结构^[6]。然而,基于超冷原子实现扭转双层莫尔超晶格面临一系列技术挑战,由于光的衍射极限,无法直接生成空间分离的双层光晶格。最近,我们采取原子内部自旋态作为合成维度方案,通过原子自旋依赖光晶格技术,在超冷玻色原子系统中实现了扭转双层方形光晶格,该体系中原子始终驻留在单层空间中,层间耦合通过微波耦合两个原子自旋态模拟实现。我们在该扭转双层系统实验中观察到莫尔超流态和复杂的超流—莫特绝缘相变行为,该成果近期在 *Nature* 杂志上发表^[9]。

实验上,首先我们需要将三维超冷原子气体压缩成准二维体系。对于二维系统,热涨落和量子涨落的作用在有限温度下占主导地位,因此在

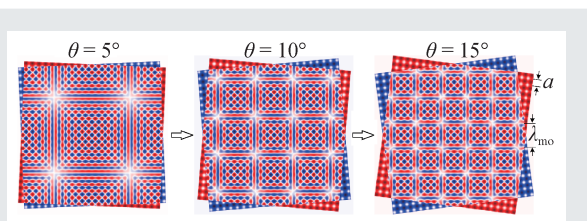


图1 莫尔超晶格(θ 是扭转角度, a 是二维材料的周期, λ_{mo} 是莫尔超晶格周期)

二维系统中会出现许多与三维系统截然不同的有趣物理现象，例如BKT超流相。另外，二维单层超冷原子可以更好地模拟二维材料。实验中，我们利用声光偏转器构建了手风琴光晶格，如图2(a)中的饼状势阱，晶格间距可实现12 μm到3 μm的连续调节，从而将三维超冷原子绝热地压缩为准二维单层超冷原子^[10]，如图2(a)中的深绿色饼状势阱。

原子具有丰富的自旋量子态，不同自旋量子态在光场中的斯塔克频移也不同。幻零波长是指原子某一自旋量子态的斯塔克光频移为零时的激光波长，即：特定自旋量子态的原子感受不到幻零波长激光的作用^[11]，这是产生自旋依赖光晶格的重要机制^[12]，也为设计实现扭转双层光晶格提供了一条全新的技术路线。

我们将超冷⁸⁷Rb原子制备在两个相互扭转的方形光晶格中作为扭转双层晶格系统的量子模拟器。实验中选用⁸⁷Rb原子基态的两个自旋量子态，利用两组正交的幻零波长激光组成自旋依赖的扭转光晶格，扭转角度为5.21°，如图2(a)所示。在光晶格中原子的两个自旋量子态分别只感受到其中一组光晶格，由此通过两个不同原子自旋量子态合成维度的方法形成了扭转双层光晶格，如图2(b)所示。通过实验观察扭转双层光晶格中不同原子自旋态的物质波干涉吸收成像图，验证了扭转双层晶格结构的实现。

在扭转体系中，层间耦合在诱导新奇物理性质方面发挥着重要作用。在扭转双层光晶格中的层间耦合由微波控制，这类似于扭转层状材料中的层间耦合，但是不同于扭转层状材料中固定的层间耦合强度，该实验系统中的层间耦合强度可以精确调控。在该量子模拟器中，原子始终驻留在单层空间中，由微波作用实现自旋态耦合，原

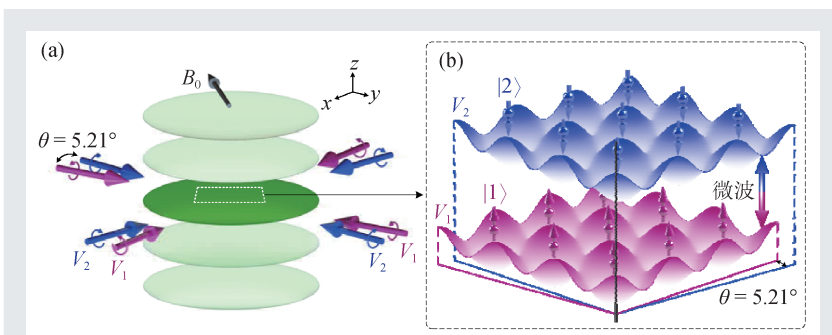


图2 (a)单层超冷原子，相互扭转5.21°的两组正交幻零波长激光 V_1 和 V_2 组成自旋依赖光晶格；(b)扭转双层光晶格示意图，微波耦合双层不同原子自旋态 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$

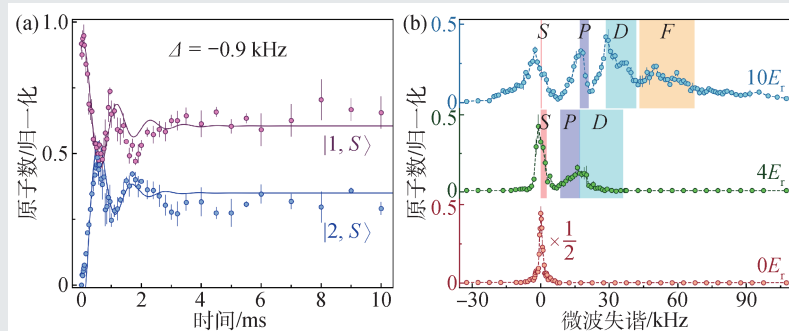


图3 (a)不同原子自旋态的层间跃迁；(b)不同阱深光晶格的原子激发谱，其中 E_s 是阱深的单位

子可在两个自旋态间进行跃迁，如图3(a)所示，层间耦合强度可以通过微波的功率进行调控，这极大增强了超冷原子扭转双层光晶格系统的量子模拟与量子调控能力。我们改变微波场的频率测量了不同阱深的扭转双层光晶格原子激发谱，结果如图3(b)所示。可以看出，通过微波可以实现S能带与S、P、D、F等不同能带的层间耦合，证明超冷原子体系具有更为丰富的调控自由度，例如该实验中微波场的频率失谐可实现不同轨道的耦合。

当两层周期二维材料叠放在一起，并稍作旋转时，会出现莫尔超晶格结构，这种超晶格会形成一个新的二维晶格势，从而可能从根本上改变材料的性能，并诱导出奇特的物理性质。因此在扭转系统中，莫尔超晶格在研究和调控关联电子态以及新奇拓扑物态方面发挥着关键作用。莫尔超晶格周期： $\lambda_{\text{mo}} = \frac{a}{2 \sin(\theta/2)}$ ，式中 a 为二维材料的周期(设两层二维材料具有相同周期)， θ 为扭转角。从式中可知，扭转角度越小，莫尔超晶格

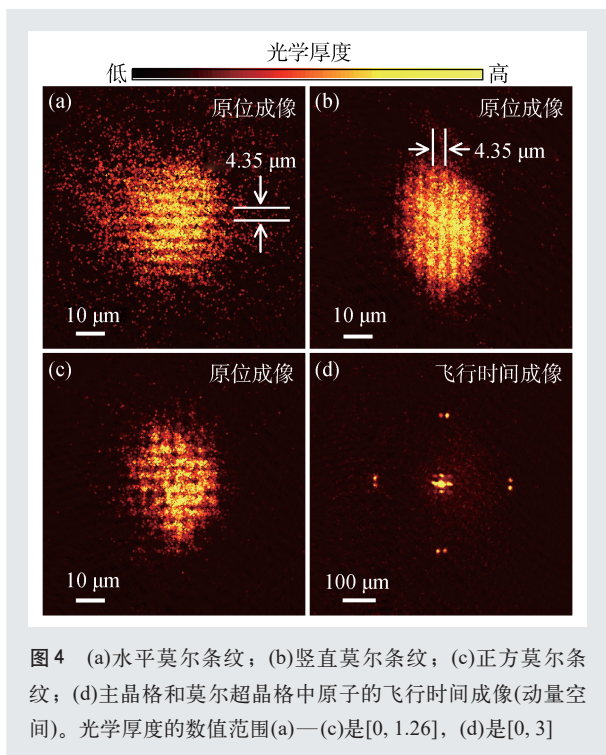


图4 (a)水平莫尔条纹；(b)竖直莫尔条纹；(c)正方莫尔条纹；(d)主晶格和莫尔超晶格中原子的飞行时间成像(动量空间)。光学厚度的数值范围(a)–(c)是 $[0, 1.26]$ ，(d)是 $[0, 3]$

周期越大，如图1所示。

在超冷原子实验中，通常光晶格的周期 a 大约为百纳米量级，在实空间用现有的成像系统不能直接观测到光晶格中原子的周期密度分布，然而我们可以将两个光晶格扭转一个小角度实现 $\lambda_{\text{mo}} \gg a$ ，由此可直接观测到莫尔超晶格结构。但是受限于原子云尺寸，莫尔超晶格周期不能太大。在该系统中，主光晶格周期 $a = 0.395 \mu\text{m}$ ，准二维原子云直径 $D_{xy\text{-平面}} \approx 45 \mu\text{m}$ ，高分辨率成像系统的分辨率 $d \approx 0.7 \mu\text{m}$ 。因此，我们选择了一个合适的扭转角度 $\theta = 5.21^\circ$ ，从而获得可分辨的莫尔超晶格周期 $\lambda_{\text{mo}} \approx 4.35 \mu\text{m}$ ，并且准二维原子云包含约10个莫尔超晶格周期，通过高分辨率成像系统可直接观察到莫尔超晶格结构，如图4(a)–(c)所示，这是扭转双层光晶格量子模拟器的一个关键特征。然后，利用飞行时间成像在动量空间也观察到了莫尔超晶格结构，如图4(d)所示，原子团分为两组，分别对应主晶格动量 (π/a) 和莫尔超晶格动量 $(\pi/\lambda_{\text{mo}})$ 。通过测量实空间莫尔条纹和动量空间原子衍射的对比度，扭转双层光晶格中的原子可长时间保持超流性，这是宏观量

子特性的关键。通过调控层间耦合强度和光晶格势阱深度，我们开展了超流态到莫特绝缘态的量子相变研究，观察到复杂的超流态到莫特绝缘态相变行为，并发现了一个新的无能隙中间相，它既不同于超流态，也不同于莫特绝缘态，类似于超固相特性。

超冷原子扭转双层光晶格的实验实现了将扭转电子学研究从电子推广到中性原子水平，为基于超冷原子的量子模拟开辟了一条新的道路。超冷原子系统的高度可控性，使我们很方便地调节晶格的几何结构、晶格深度、层间耦合的强度以及原子间相互作用，从而为研究各种强关联量子相变行为奠定了实验基础。原子在光晶格周期势中运动会形成能带结构，而双层光晶格的扭转又会引入一个新的莫尔超晶格周期势，从而改变能带结构，再结合可调的层间耦合强度，即可实现对能带的调控，并实现平带结构，因此扭转双层光晶格还可以量子模拟平带及强关联多体物理。进一步，我们还可以将超冷原子扭转光晶格推广到费米原子体系和六角蜂窝晶格结构，从而可以模拟和探索与石墨烯相关的物理机制。此外，超冷原子丰富的超精细塞曼子能级，允许我们通过引入更多的自旋态来模拟扭转多层材料。将基于微波的层间耦合推广到激光的拉曼耦合，还可以在扭转双层材料中产生自旋轨道耦合和人造规范场，从而产生各种新奇的强关联拓扑物态。

参考文献

- [1] Xiao Y, Liu J, Fu L. *Matter*, 2020, 3: 1142
- [2] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V *et al.* *Science*, 2004, 306: 666
- [3] Cao Y, Fatemi V, Fang S *et al.* *Nature*, 2018, 556: 43
- [4] Cao Y, Fatemi V, Demir A *et al.* *Nature*, 2018, 556: 80
- [5] Wang P, Zheng Y, Chen X *et al.* *Nature*, 2020, 577: 42
- [6] Törmä P, Peotta S, Bernevig B A. *Nat. Rev. Phys.*, 2022, 4: 528
- [7] Bloch I, Dalibard J, Zwirger W. *Rev. Mod. Phys.*, 2008, 80: 885
- [8] Greiner M, Mandel O, Esslinger T *et al.* *Nature*, 2002, 415: 39
- [9] Meng Z, Wang L, Han W *et al.* *Nature*, 2023, 615: 231
- [10] Wang L, Wen K, Liu F *et al.* *Chin. Phys. B*, 2022, 31: 103401
- [11] LeBlanc L J, Thywissen J H. *Phys. Rev. A*, 2007, 75: 053612
- [12] Wen K, Meng Z, Wang L *et al.* *J. Opt. Soc. Am. B*, 2021, 38: 3269