

可重构相干纳米激光阵列

马仁敏[†]

(北京大学物理学院 北京 100871)

2023-12-19收到

[†] email: renminma@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20240107

纳米激光是一种新型的微型化激光,其尺寸在三个维度上都接近或小于其激射波长(对于可见光波段,激射波长约为数百纳米)。在空间维度上,纳米激光将光场限制在一个极小的区域内,实现了光场的空间极端局域化。这种局域化光场的构建不仅使纳米激光具备小体积、低能耗和快速度等特性,同时也为在强受限体系下研究光与物质相互作用开辟了新的途径。

自1960年激光问世以来,通过在时间、频率、动量或空间等维度对光场进行局域化,从而实现更高性能的激光一直是推动激光物理与器件发展的核心驱动力,由此催生出的新型高性能激光也深刻促进了现代科学与技术的进步。例如,在时间维度极端局域化光场可以得到超快的阿秒激光(2023年诺贝尔物理学奖),为观测微观世界中粒子的超快运动提供了可能;在频率维度极端局域化光场可以得到用来构建精密干涉装置所需的频率稳定激光,使引力波探测成为可能(2017年诺贝尔物理学奖);在波矢维度极端局域化光场可获得超准直激光,可应用于远距离星际空间高速光通信;而在空间维度上,极端局域化光场可以实现微型化激光。微型化激光研究始于20世纪90年代^[1-4],因其所蕴含的丰富物理以及在信息技术领域中的重大应用前景,这一研究领域至今仍然保持着旺盛的活力^[5]。

在世纪之交,贝尔实验室创造了微盘激光,加州理工学院发明了光子晶体缺陷态激光,而加州大学伯克利分校则发明了纳米线激光,这些微型化激光将激光的特征尺寸缩小到一个真空波长

量级^[6-8]。2009年,首次实现的等离激元纳米激光使激光的特征尺度降至真空波长的十分之一量级,达到电子器件特征尺度^[9-11]。近年来,新的光场调控手段被引入到微纳激光领域,实现了功能各异的拓扑微纳激光、连续态中的束缚态微纳激光以及非厄米宇称一时间对称微纳激光等,为微纳激光的发展注入了新的活力。

微纳激光研究的核心目标之一是实现可重构的相控阵纳米激光阵列。通过对各个纳米激光进行相位锁定和控制,可获得任意形状的相干激射,从而开拓纳米激光在激光雷达、激光显示、相干计算和通信等领域的应用。然而由于缺乏相应的物理机制,目前已报道的微纳激光只能实现单个或固定阵列的相干激射。

在双层转角石墨烯体系的启发下,我们课题组发展出了魔角纳米激光(图1)^[12]。该激光的光场局域源于莫尔倒格矢引起的光子晶体模式之间的相互耦合。与光子晶体缺陷态纳米光腔相比,这种耦合无需形成光子晶体禁带即可生成具有亚波长局域的高品质因子纳米光腔。在实验中,我们运用微纳加工技术,在同一层的半导体材料中制

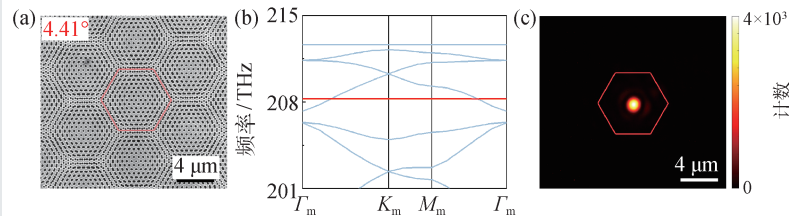


图1 魔角纳米激光 (a)将两套扭转的光子晶体晶格置于同一层半导体材料中形成的单层转角莫尔超晶格的电子显微镜照片。两套光子晶体晶格间的相对转角为 4.41° 。红色六边形是莫尔超晶格的一个原胞。局域在每个原胞中的莫尔平带波函数均可被用来构建莫尔纳米激光;(b)通过三维全波模拟得到的(a)图中莫尔超晶格的能带结构。红色的能带为莫尔光学平带,其在实空间对应着局域化的波函数;(c)利用局域在单个莫尔原胞中的平带波函数实现的魔角纳米激光近场激射图案

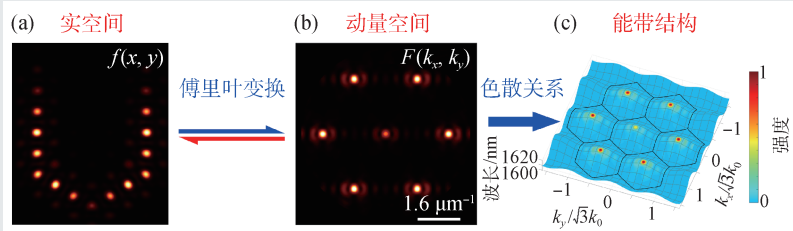


图2 莫尔平带的本征能量简并特性使得任意形状纳米激光阵列的相干激射成为可能。纳米激光阵列实空间和动量空间的电场强度分布通过傅里叶变换相互联系，而动量空间的分布则通过能带结构映射到频率分布上。莫尔平带的存在确保了频率的简并性，使实空间任意排布的阵列均能单模激射。图中以U形莫尔激光阵列为例，展示了实空间激射图案(a)、动量空间激射图案(b)和投影到能带结构之后激射模式的动量和频率分布(c)

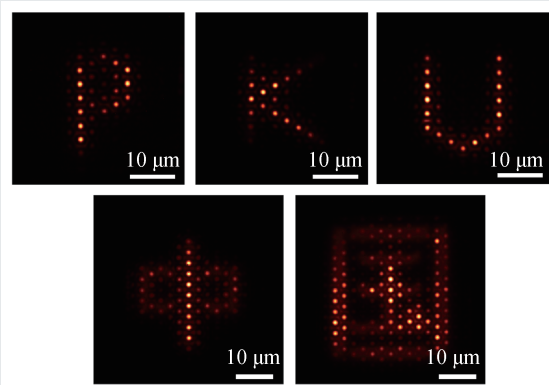


图3 莫尔纳米激光阵列以“P”、“K”、“U”和“中”、“国”图形生成的阵列化相干激射。由于莫尔平带的本征能量简并特性，任意形状的莫尔纳米激光阵列均能够通过自发相位锁定产生相干激射

备了两套扭转的光子晶体晶格。这样便形成了更大周期的莫尔超晶格，其中的莫尔倒格矢引起了具有不同晶格动量的布洛赫模式之间的相互耦合，进而在实空间中形成光场的局域化。这些在实空间局域的布洛赫模式在能带中对应着莫尔光学平带。值得注意的是，与电子体系的双层转角石墨烯不同，我们在光学体系中将两套扭转的光子晶体晶格置于同一层的半导体材料中。在这种单层转角莫尔超晶格中，两套光子晶体中的布洛赫波函数在垂直于传播方向的维度完全重合，增强了它们之间的耦合强度。因此，在较大的扭转角度下，这个体系仍能获得莫尔平带及其对应的光场局域化效应。

随后，我们还运用单层转角莫尔超晶格成功构建了硅基转角纳米光腔，其品质因子超过一百

万^[13]。运用单层转角莫尔超晶格，哈佛大学还在氮化镓体系实现了激射波长在450 nm附近的莫尔纳米激光^[14]。美国西北大学发现即使将两套扭转的等离激元光子晶体在空间上分开数百微米，仍然能够观察到两套光子晶体之间转角依赖的相互耦合，并用其构建了可调谐莫尔激光^[15]。

一般而言，当把相同的纳米激光排布成阵列时，由于纳米激光谐振腔之间的相互耦合，

其简并的频率会发生劈裂。但由魔角纳米激光排布构成的莫尔超晶格中，各纳米激光的频率均对应着莫尔光学平带，具有频率简并的特性。最近，我们利用这一特性实现了莫尔纳米激光阵列的相位锁定和控制，使其能够生成任意形状的阵列化相干激射^[16]。纳米激光阵列实空间和动量空间的电场强度分布由傅里叶变换相互联系，动量空间分布通过能带结构对应出频率分布，莫尔平带保证了频率的简并性，这种简并特性使得任意形状纳米激光阵列的相干激射成为可能(图2)。

我们可以将局域于单个莫尔原胞的本征模式 Ψ_j 作为莫尔平带模式的一组完备基(Ψ_j 满足本征方程： $\mathcal{H}\Psi_j = E_j\Psi_j$ ($j = 1, 2, \dots, N$))，其中 N 为整个莫尔超晶格的原胞数量)。由于平带的本征能量简并特性， Ψ_j 的任意线性组合亦为莫尔超晶格的本征模式，即 $\mathcal{H}\Phi \equiv \mathcal{H}\sum_{j=1}^n \Psi_j = \sum_{j=1}^n E_j\Psi_j = E\sum_{j=1}^n \Psi_j \equiv E\Phi$,

其中 $E = E_1, E_2, \dots, E_n$ ，本征模式 $\Phi = \sum_{j=1}^n \Psi_j$ 可用于不同形状图案的单模激射。在实验中，我们通过不同的光泵浦图案选择性地激发不同的本征模式，演示了莫尔纳米激光阵列可以用“P”、“K”、“U”和“中”、“国”等图形生成阵列化相干激射(图3)。我们还进一步对纳米激光的相对相位进行了精确控制，实现了相控阵纳米激光阵列。在实验中，通过不同的光泵浦图案选择性地激发不同阶数的本征模式，在相应的波函数中，纳米激光在不同位置具有由阶数确定的 180° 相位差。通过

利用不同区域的相位差，我们成功调节和控制了纳米激光阵列的出射方向。通过电注入的方式实现莫尔纳米激光阵列可进一步推进其应用进程，这也是我们团队正在探索的课题之一。

在光频段实现相位可控阵列纳米激光的应用铺平了道路。通过相位同步，纳米激光阵列能

够实现大面积、高功率的单模激射；精细的相对相位调节可实现激光阵列出射方向的精准控制。同时，纳米激光之间的相干性还可用于进行相干计算和通信。在基础物理研究方面，在转角纳腔中，光场的极端局域化为研究腔量子电动力学、非线性光学、量子光学等提供了一个出色的平台。

参考文献

- [1] Yokoyama H, Brorson S D. *J. Appl. Phys.*, 1989, 66(10):4801
- [2] Bjork G, Yamamoto Y. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, 27(11):2386
- [3] Yamamoto Y, Machida S, Björk G. *Phys. Rev. A*, 1991, 44(1):657
- [4] Yokoyama H, Nishi K, Anan T *et al.* *Opt. Quant. Electron.*, 1992, 24:S245
- [5] Ma R M, Oulton R F. *Nat. Nanotechnol.*, 2019, 14(1):12
- [6] McCall S L, Levi A F J, Slusher R E *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1992, 60(3):289
- [7] Painter O, Lee R K, Scherer A *et al.* *Science*, 1999, 284(5421):1819
- [8] Huang M H, Mao S, Feick H *et al.* *Science*, 2001, 292(5523):1897
- [9] Oulton R F, Sorger V J, Zentgraf T *et al.* *Nature*, 2009, 461(7264):629
- [10] Hill M T, Marell M, Leong E S P *et al.* *Opt. Express*, 2009, 17(13):11107
- [11] Noginov M A, Zhu G, Belgrave A M *et al.* *Nature*, 2009, 460(7259):1110
- [12] Mao X R, Shao Z K, Luan H Y *et al.* *Nat. Nanotechnol.*, 2021, 16(10):1099
- [13] Ma R M, Luan H Y, Zhao Z W *et al.* *Fundam. Res.*, 2023, 3(4):537
- [14] Raun A, Tang H N, Ni X Q *et al.* *ACS Photonics*, 2023, 10(9):3001
- [15] Guan J, Hu J, Wang Y *et al.* *Nat. Nanotechnol.*, 2023, 18:514
- [16] Luan H Y, Ouyang Y H, Zhao Z W *et al.* *Nature*, 2023, 624(7991):282



Fermion Instruments(Shanghai)Co.,Ltd.

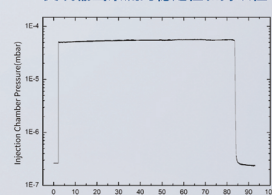
Inspire the Innovations
www.fermi.com

液化型高纯臭氧系统

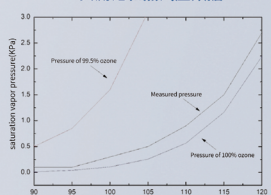


- 臭氧浓度高于99.5%
- 30分钟可从常温状态降温到制备高纯臭氧状态
- 提纯1小时,能产出约4标升高纯臭氧气体
- 持续时间可达10h以上

臭氧输出束流的稳定性和持续性



实测饱和蒸汽压数据



费勉仪器科技(上海)有限公司
 Fermion Instruments (Shanghai)Co.,Ltd.

上海市宝山区富联二路 558 号
 558 Fulian Er Road, Shanghai, 201906, China

info@fermi.com
 +86-21-6525 3206

 界面钝化

 物理外延

 等离子应用

 科研仪器