

实现原子级特征尺度与可重构光频相控阵的纳米激光器

马仁敏^{1*}, 祝世宁^{2*}

1. 北京大学物理学院, 北京 100871

2. 南京大学物理学院, 南京 210093

* 联系人, E-mail: renminma@pku.edu.cn; zhusun@nju.edu.cn

在20世纪最具影响力的几项发明中, 晶体管和激光器占据着重要地位。晶体管依托电子, 激光器则依托光子。电子和光子作为两种基本粒子, 不仅都能承载能量, 也可以用于传递信息。电的广泛应用推动了工业革命和现代化进程, 极大地提升了社会生产效率; 而以电子为载体的集成电路芯片, 则引发了信息技术革命, 开启了人类社会的数字化时代。

自1960年美国科学家梅曼成功研制出世界上第一台激光器以来, 激光技术被广泛应用于科学技术、工业生产与日常生活各个方面, 并持续向着两个极端方向发展(图1): 一方面向着超高功率、超大能量推进, 例如用于可控核聚变研究的国家点火装置和“神光”激光装置。正如钱学森先生形象地比喻, 这一技术相当于在地球上创造一个“小太阳”, 有望为人类提供持久、清洁的能源。另一方面则是不断向微型化演进。就像晶体管的微型化推动了集成电路芯片的发展, 激光器的微型化也正深刻改变着光子技术的未来。

然而, 与晶体管相比, 激光器的微型化面临着更严峻的挑战。可见光光子的波长通常比电子的波长三个量级, 受到光学衍射极限的制约, 光子器件如激光器的最小体积理论上要比电子器件如晶体管大约9个数量级——也就是10亿倍。要在纳米尺度上制造出高性能的激光器, 核心难点在于如何突破这一极限, 实现对光子的极限“压缩”。解决这个难题, 不仅将推动光子技术的深度发展, 更有望催生出全新的应用场景。设想一下, 当光子也能像电子那样在纳米尺度上灵活操控时, 我们或许能用光直接“看清”DNA的结构细节, 或实现高密度、大规模的光电集成芯片, 从而大幅提升信息处理的速度和效率^[1,2]。

在这一背景下, 北京大学马仁敏团队的研究成果“实现原子级特征尺度与可重构光频相控阵的纳米激光器”入选了国家自然科学基金委员会发布的“2024年度中国科学十大进展”。该团队提出了奇点色散方程, 首次建立起介电材料中突破衍射极限的理论框架, 并发明了一种将光学纳腔特征尺寸缩小至1 nm的新型制备技术。这项突破实现了目前已知模式



马仁敏 北京大学博雅特聘教授, 物理学院副院长, 国家重点研发计划“纳米科技”重点专项总体专家组成员。长期致力于微纳激光物理与器件研究, 在激光微型化机理与器件、极端尺度光与物质相互作用等前沿领域取得了系列具有国际影响力的成果。相关研究成果入选“2024年度中国科学十大进展”等多个重大科技进展。曾获科学探索奖、中国光学学会

王大珩光学奖、北京大学优秀博士学位论文指导教师奖(四次)等荣誉。



祝世宁 南京大学教授, 中国科学院院士; 美国光学学会会士、美国物理学会会士、中国光学学会会士。现任《国家科学评论》(*National Science Review*)编委会数理组组长、《人工晶体学报》主编等职。主要从事微结构物理、非线性光学、光学超晶格及激光技术、量子光学和光学超构材料等方面研究。作为主要完成人, 曾获包括国家自然科学奖一等

奖在内的多项奖励。

体积最小的激光器, 使激光器光场的特征尺度进入原子级别^[3]。

不仅如此, 研究团队还利用平带波函数的可重构特性, 构建出基于纳米激光器阵列的光频相控阵, 实现了多个激光器之间的相干控制, 成功演示了可以输出“中”“国”等任意图形的相干激光图案^[4]。本文将带领读者一探激光器微型化所

引用格式: 马仁敏, 祝世宁. 实现原子级特征尺度与可重构光频相控阵的纳米激光器. 科学通报

Ma R-M, Zhu S. Nanolasers with atomic-scale feature sizes and reconfigurable optical phased arrays (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: [10.1360/CSB-2025-5005](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5005)



图1 面向能源和信息领域的应用, 激光自发明以来一直持续沿“极强”与“极小”两个方向深化发展

Figure 1 Since its invention, the laser has advanced along two complementary extremes—toward ultra-high power for energy applications, and toward ultra-miniaturization for information technologies

面临的物理瓶颈, 回顾近三十年来该领域的重要进展, 并介绍北京大学团队在该方向的最新突破。

1 极端空间局域化的挑战: 衍射极限

在激光器问世30年后, 随着微纳加工技术的不断进步以及人们对激光物理与器件机制的深入理解, 各类微型半导体激光器相继被开发出来, 包括微盘激光器、光子晶体缺陷态激光器和纳米线激光器。1992年, 贝尔实验室成功实现了首个微盘激光器, 利用微盘中的回音壁模式, 使光在微盘内反复反射, 产生共振反馈并实现激励^[5]。1999年, 加州理工学院通过在二维光子晶体中引入点缺陷来约束光, 实现了首个光子晶体缺陷态激光器^[6]。2001年, 加州大学伯克利分校首次利用纳米线的端面作为反射镜, 成功实现了半导体纳米线激光器^[7]。这些激光器的模式体积已缩减至接近衍射极限, 显著推动了激光器微型化的发展。然而, 由于受光学衍射极限的约束, 这些基于介电谐振腔的激光器难以进一步减小其模式体积。

激光器模式是谐振腔的本征模, 其模式体积受限于光学的衍射极限, 而这一衍射极限由量子力学中的不确定性原理所决定。根据不确定性原理, 在空间的任一维度, 位置和动量的不确定度满足关系式: $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$ 。其中, Δx 表示位置的不确定度, Δp 表示动量的不确定度, $\hbar$ 为约化普朗克常数。光子的动量 p 与波矢 k 之间的关系为: $p = \hbar k$ 。而波矢 k 则由材料的折射率 n 和光的真空波长 λ 决定: $k = \frac{2\pi n}{\lambda}$ 。

因此, 在特定波长下, 若要进一步增强光场的局域性(即减小 Δx), 需要增大光子的动量不确定度 Δp , 这就需要增大光

子的最大可取动量。然而, 在可见和近红外波段, 介电材料的折射率都很小, 一般不超过4。这极大地限制了光场的局域化能力, 使得最小可实现的局域化尺寸只能达到百纳米量级, 难以进一步缩小。

2 第一次冲破极限: 但仍被欧姆损耗束缚

2009年, 国际上有三个团队实现了突破光学衍射极限的等离激元纳米激光器。其中, 加州大学伯克利分校和北京大学的团队实现了基于一维半导体纳米线-绝缘体-金属结构的等离激元纳米激光器^[8]; 埃因霍温理工大学和亚利桑那州立大学的团队开发了基于金属-半导体-金属三层平板结构的等离激元纳米激光器^[9]; 诺福克州立大学和普渡大学的团队则展示了基于局域表面等离激元共振的金属核-内嵌增益介质壳的核-壳结构等离激元纳米激光器^[10]。

等离激元纳米激光器利用了等离激元色散方程: $k_x^2 + (ik_y)^2 = k^2$ 。相比于介电体系的色散方程 $k_x^2 + k_y^2 = k^2$, 等离激元色散方程中多了一个虚数单位 i 。物理上, 虚数单位 i 的引入对应于等离激元模式在垂直于金属-介电材料界面的方向(y 方向)上, 电场呈指数衰减, 其数学形式为 $e^{-k_y y}$ 。由于 $(ik_y)^2 = -k_y^2$, 等离激元色散方程可重写为 $k_x^2 - k_y^2 = k^2$ 。这个双曲线形式的色散关系意味着波矢量的分量 k_x 和 ik_y 的大小均可以超过由材料折射率 n 所决定的总波矢 k 。因此, 在 x 和 y 两个方向上, 都可以突破光学衍射极限, 将光场压缩至深亚波长尺度。

经过十余年的发展, 等离激元纳米激光器已展现出极小的模式体积、超快的调制速度和低能耗等优异特性。然而,

相较于介电材料,虽然等离激元效应通过将光场与金属中自由电子的集体振荡耦合,获得等离激元色散方程,实现了更强的光场局域化,但这种耦合也引入了固有的欧姆损耗,导致热量产生,进而增加了器件的功耗,并限制了其相干时间。

2020年,南京大学与北京大学的合作团队首次实现了基于金属钠的等离激元纳米激光器,借助钠金属较低的欧姆损耗,有效提升了器件性能,验证了材料选择在降低能量损耗方面的关键作用^[11]。然而,若要彻底摆脱欧姆损耗的限制,在介电体系中实现突破光学衍射极限的深亚波长激光器,还需发展全新的光场局域机制与理论框架。

3 新理论将激光器光场特征尺度推进至原子级

2024年,北京大学团队提出了一种全新的色散方程,即奇点色散方程: $(ik_\rho)^2 + k_\phi^2 \approx k^2$, 其中 ik_ρ 表示径向波矢, k_ϕ 表示角向波矢。该方程基于麦克斯韦方程的波动形式,揭示了全介电蝶形纳米天线中心附近的色散特性。通过将蝶形纳米天线嵌入北京大学团队提出的转角纳腔结构中^[12,13], 研究人员首次在介电体系中实现了突破光学衍射极限的奇点介电纳米激光器^[3](如图2所示)。

介电蝶形纳米天线由一对顶点相对的三角形介质纳米颗粒组成,其和转角纳腔构成的复合结构可实现光场的极端局域化。首先,转角纳腔将光场限制在其中心,即蝶形纳米天线的位置,尺寸接近衍射极限。通过奇点色散方程,蝶形纳米天线使电场在接近顶点时不断增强,在顶点处形成电场强度趋于无穷大的奇点。在这一奇点附近,角向波矢 k_ϕ 为实数,径

向波矢 ik_ρ 为虚数,二者的绝对值随着位置接近顶点而迅速发散,但总波矢仍由材料介电常数决定,保持有限值。这种机制类似于等离激元模式中的光场局域效应(在等离激元效应中,虚数的横向波矢使得横向和纵向波矢的大小均可大于总波矢),但由奇点色散方程描述的介电系统克服了欧姆损耗的限制。

奇点纳腔的结构设计使光场得以实现极限压缩,理论上能够达到无限小的模式体积,远远小于光学衍射极限。此外,转角纳腔的精巧构造进一步提升了光场的存储能力,使得奇点纳腔可以具备超过100万的超高品质因子。

奇点介电纳米激光器是首次在电介质体系中突破光学衍射极限的激光器。它将激光器光场的特征尺度推进至原子级。这一突破有望为物质和生命科学研究提供新的原子级成像工具。与常规激光器相比,奇点介电纳米激光器还可以具有更低的能耗、更快的调制速度和更强的光与物质相互作用,有望在信息技术、传感探测等领域得到广泛应用^[14]。

4 让纳米激光器同步起舞: 实现有源光频相控阵

相控阵技术因具备快速、无机械结构的波束扫描能力,在探测、成像和通信等方面具有重要价值。然而,长期以来将相控阵拓展至光频段一直面临重大挑战,主要难点包括短波长带来的集成难度以及缺乏高效的相干控制机制。

为解决这一难题,北京大学团队利用莫尔平带的本征能量简并特性,实现了莫尔纳米激光阵列的相位锁定与调控,从而能够生成任意形状的阵列化纳米激光相干激励^[4]。纳米激光阵列的实空间和动量空间电场强度分布由傅里叶变换

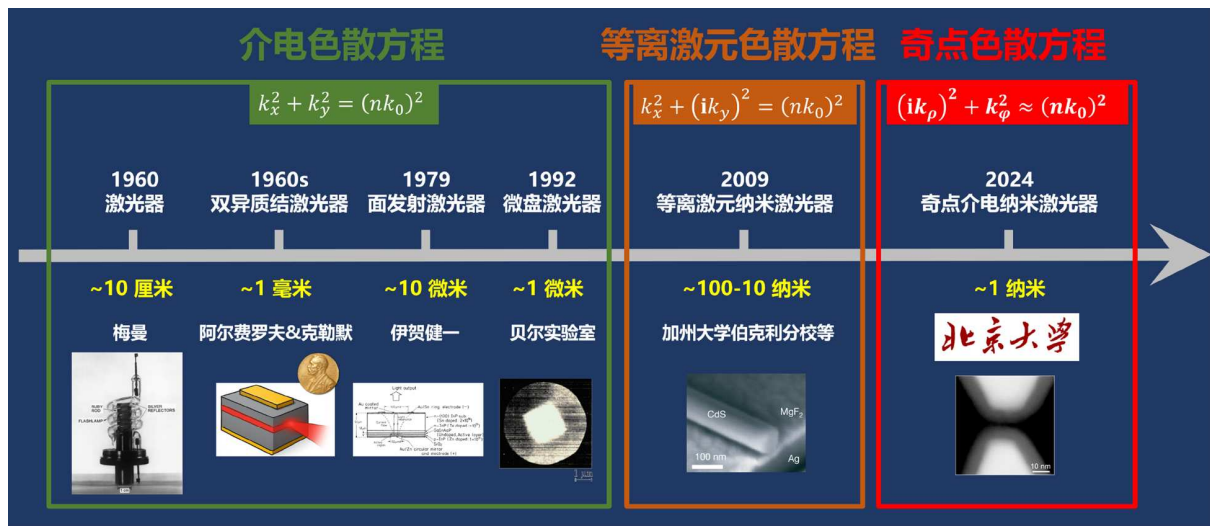


图2 奇点色散方程的发现引入了全新的光场限制机制,首次在介电体系中实现了突破衍射极限的纳米激光器,将激光器光场的特征尺寸推进至原子尺度

Figure 2 By introducing a fundamentally new confinement mechanism, the singular dispersion equation enabled the first demonstration of sub-diffraction-limited nanolasers in dielectric media, achieving atomic-scale light localization

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.

研究团队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. 团队在实验中演示了莫尔纳米激光阵列可以“P”“K”“U”和“中”“国”等图形生成阵列化相干激射. 通过进一步对纳米激光的相对相位进行控制, 实现了相控阵纳米激光阵列, 其对应的波函数为

$$\Phi' = \sum_{j=1}^m \Psi_j + \sum_{j=m+1}^{2m} (-\Psi_j) + \sum_{j=2m+1}^{3m} \Psi_j + \sum_{j=3m+1}^{4m} (-\Psi_j) + \dots,$$

含负号的项代表相与其他项的相位相差 π , 利用不同区域的相位差实现了纳米激光阵列出射方向的调节与控制.

这一有源光频相控阵技术有望突破当前光子器件集成的关键瓶颈, 为微纳光源阵列操控、片上通信系统和智能感知光子芯片设计等提供了新的原理, 展现出广阔的发展前景.

推荐阅读文献

- 1 Norvig P, Relman D A, Goldstein D B, et al. 2020 visions. *Nature*, 2010, 463: 26–32
- 2 Ma R M, Oulton R F. Applications of nanolasers. *Nat Nanotech*, 2019, 14: 12–22
- 3 Ouyang Y H, Luan H Y, Zhao Z W, et al. Singular dielectric nanolaser with atomic-scale field localization. *Nature*, 2024, 632: 287–293
- 4 Luan H Y, Ouyang Y H, Zhao Z W, et al. Reconfigurable moiré nanolaser arrays with phase synchronization. *Nature*, 2023, 624: 282–288
- 5 McCall S L, Levi A F J, Slusher R E, et al. Whispering-gallery mode microdisk lasers. *Appl Phys Lett*, 1992, 60: 289–291
- 6 Painter O, Lee R K, Scherer A, et al. Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser. *Science*, 1999, 284: 1819–1821
- 7 Huang M H, Mao S, Feick H, et al. Room-temperature ultraviolet nanowire nanolasers. *Science*, 2001, 292: 1897–1899
- 8 Oulton R F, Sorger V J, Zentgraf T, et al. Plasmon lasers at deep subwavelength scale. *Nature*, 2009, 461: 629–632
- 9 Hill M T, Marell M, Leong E S P, et al. Lasing in metal-insulator-metal sub-wavelength plasmonic waveguides. *Opt Express*, 2009, 17: 11107–11112
- 10 Noginov M A, Zhu G, Belgrave A M, et al. Demonstration of a spaser-based nanolaser. *Nature*, 2009, 460: 1110–1112
- 11 Wang Y, Yu J, Mao Y F, et al. Stable, high-performance sodium-based plasmonic devices in the near infrared. *Nature*, 2020, 581: 401–405
- 12 Mao X R, Shao Z K, Luan H Y, et al. Magic-angle lasers in nanostructured moiré superlattice. *Nat Nanotechnol*, 2021, 16: 1099–1105
- 13 Ma R M, Luan H Y, Zhao Z W, et al. Twisted lattice nanocavity with theoretical quality factor exceeding 200 billion. *Fundamental Res*, 2023, 3: 537–543
- 14 Ma R M. Nanolaser technology with atomic-scale field localization. *Nat Rev Electr Eng*, 2024, 1: 632–633

Summary for “实现原子级特征尺度与可重构光频相控阵的纳米激光器”

Nanolasers with atomic-scale feature sizes and reconfigurable optical phased arrays

Ren-Min Ma^{1*} & Shining Zhu^{2*}

¹ School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

² School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China

* Corresponding authors, E-mail: renminma@pku.edu.cn; zhushn@nju.edu.cn

Among the most transformative inventions of the 20th century, the transistor and the laser stand as twin pillars of modern technology. The transistor channels electrons; the laser harnesses photons. As fundamental particles, both electrons and photons carry energy—and more importantly, information. The advent of electricity powered the Industrial Revolution, propelling human productivity to new heights. Later, the invention of the integrated circuit—built on the manipulation of electrons—sparked the information revolution and ushered in the digital age.

Since the first laser was demonstrated by Theodore Maiman in 1960, laser technology has rapidly advanced and permeated nearly every aspect of science, industry, and daily life. Over the decades, this progress has pushed in two dramatic directions. One trajectory aims for extreme power and energy—exemplified by facilities like National Ignition Facility and Shenguang Facility, developed for controlled nuclear fusion. As Qian Xuesen once remarked, this effort is akin to creating a “miniature sun” on Earth, potentially unlocking a future of clean and inexhaustible energy. The other direction is the pursuit of ever-smaller lasers. Just as transistor miniaturization enables the rise of microelectronics, the downscaling of lasers promises to reshape the future of photonics.

Yet compared to transistors, shrinking lasers presents far steeper physical hurdles. The wavelength of visible light is roughly three orders of magnitude larger than that of electrons. As a result, the diffraction limit imposes a fundamental bound: in theory, photonic devices such as lasers must be about a billion times larger in volume than their electronic counterparts. To build high-performance lasers at the nanoscale, one must overcome this core constraint—finding a way to compress light itself into volumes far smaller than its wavelength.

Cracking this problem would not only redefine the limits of light control but also unlock new applications at the frontiers of science and technology. Imagine manipulating photons at the same scale as electrons: visualizing DNA in real time, building ultra-dense photonic chips, or achieving light-based computing orders of magnitude faster and more efficient than today’s systems.

It is in this context that a team led by Ren-Min Ma at Peking University achieved a breakthrough—selected as one of the “Top Ten Scientific Advances in China for 2024” by the National Natural Science Foundation. The team introduced the concept of the singular dispersion equation, providing the first theoretical framework to surpass the diffraction limit in lossless dielectric materials. They also developed a novel fabrication technique that enables optical cavity with feature size down to just 1 nanometer—realizing the smallest laser mode volume ever reported, and bringing coherent light confinement into the atomic regime.

Beyond confinement, the team demonstrated unprecedented control. By exploiting the reconfigurability of flatband wavefunctions, they constructed a nanolaser-based optical phased array capable of coherent beam shaping. This system achieved phase-locked operation across multiple lasers, enabling dynamic pattern generation—including coherent laser outputs that spell out characters such as “中” and “国”.

This article explores the fundamental challenges of laser miniaturization, reviews three decades of key progress in the field, and highlights how these latest advances from Peking University may open a new chapter for light at the atomic scale.

singular dielectric nanolasers, singular dispersion equation, optical frequency phased arrays, reconfigurable coherent nanolaser arrays

doi: [10.1360/CSB-2025-5005](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5005)