

浙江大学团队成功研制世界首个电驱动钙钛矿激光器 中国激光:最快的刀 最准的尺 最亮的光

■ 本报记者 沈烨婷 褚晶君
通讯员 李亦楠

手机的人脸识别、汽车的雷达测距、医院的激光手术……这些场景都离不开一个核心角色——激光。

激光具有高单色性、高方向性、高亮度和良好的相干性,被称为“最快的刀”“最准的尺”“最亮的光”,支撑着通信、医学、科研等多个领域的多重应用。

正因如此,不断迭代研发效率更高、体积更小、成本更低的激光器,成了全世界科学家追寻的目标。记者日前在浙江大学的实验室里,看到一个仅大拇指指甲盖大小的方形器件,能发射肉眼难以直接观察到的近红外激光。这,就是世界上首个电驱动钙钛矿激光器。

实现这一突破的,是浙江大学国际联合学院/光电科学与工程学院狄大卫教授、邹晨研究员和赵保丹教授团队,他们相关研究成果此前已发表于国际学术期刊《自然》。

这束中国激光,不仅为半导体激光器领域开创了新的方向,更有望让激光技术走进更微型、更节能的应用场景,为下一代光电芯片、可穿戴设备等技术带来全新可能。

攀登钙钛矿光电领域的“珠穆朗玛峰”

激光的基本原理早在1916年就被物理学家爱因斯坦提出,但直到1960年,激光才首次在实验室成功验证。

简单来说,激光器就像一个“光的大器”,需要外部能量激发材料产生光子,再通过特定的光学结构让光子不断振荡放大,最终形成稳定的激光发射。

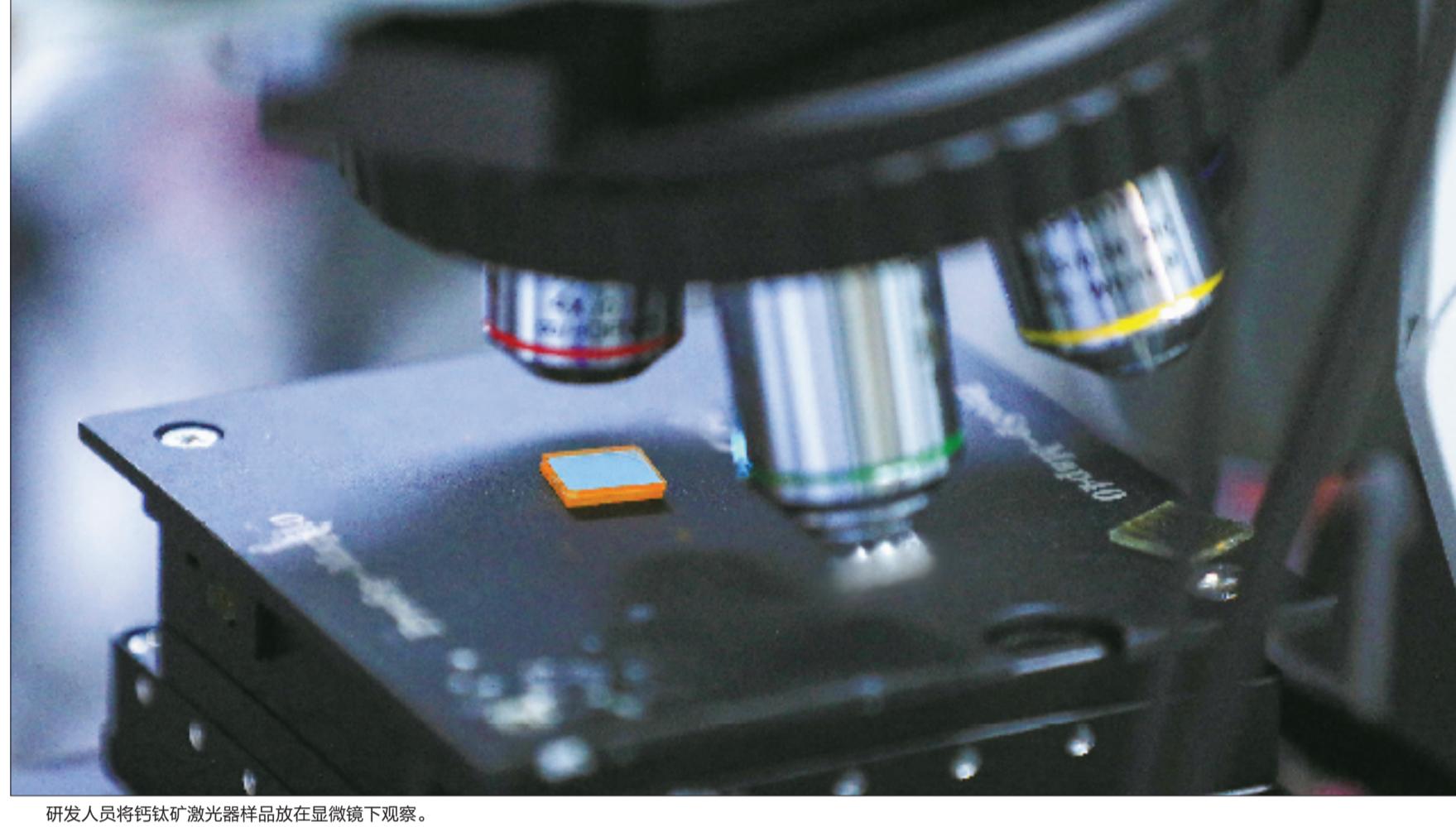
激光材料种类繁多,其中半导体激光器是信息技术领域的重要光源,但其传统制造工艺复杂且成本高昂。钙钛矿半导体、有机半导体和量子点等新型激光材料则展现出显著优势。其中,钙钛矿半导体因可实现各种色彩的激光,且在光驱动条件下能实现极低的激光发射阈值,具有十分优异的技术前景。然而,光驱动钙钛矿激光器依赖庞大且昂贵的外置光源(比如价值百万元的飞秒激光器),限制了实际应用。

驱动激光的过程按照外部能源源,主要分为光驱动和电驱动。在钙钛矿激光领域,从“光驱动”转向“电驱动”的核心矛盾之一是,钙钛矿半导体虽在光的激励下容易产生激光,但一旦改为电驱动,较高的电场、电流及随之产生的热量会立即引发材料降解和光学性能下降,导致激光难以产生。

狄大卫将这个重大挑战分解为两个问题,光子学问题与电子学问题。在光子学方面,需要寻找理想的钙钛矿增益介质,同时构建低损耗、高精密的光学反馈结构;在电子学方面,需要实现大电流、高功率的钙钛矿器件,为此需要突破钙钛矿材料在电场下不稳定的难题,还需要大幅增加器件亮度、缩小器件尺寸。

然而,在钙钛矿光电器件里同时达到这些条件极其困难。

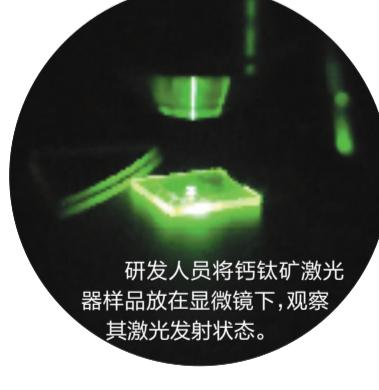
“这是钙钛矿光电子学中普遍认为



研发人员将钙钛矿激光器样品放在显微镜下观察。



狄大卫(左)和邹晨在实验室讨论钙钛矿激光器设计方案。



研发人员将钙钛矿激光器样品放在显微镜下,观察其激光发射状态。

院(海宁国际校区)给予了一系列支持。“学校和政府有足够的耐心和信心,愿意支持高风险的前沿研究,这正是科研最需要的环境。”狄大卫说。

闯过多个“领域之最”的难关

这并不是一场可以速战速决的“战役”。过去7年,狄大卫带领团队开展的大多数研究,都在为电驱动钙钛矿激光器的研制奠定基础。

“电驱动钙钛矿激光器的实现,背后是多项技术的突破。”狄大卫告诉记者举了四个“领域之最”——实测寿命最长的钙钛矿LED、最高亮的钙钛矿LED、最小的



狄大卫展示钙钛矿激光器。

本版摄影 本报记者 阮西内

LED、最低阈值的光泵浦钙钛矿激光。“这些技术积累,为我们实现全球首个电驱动钙钛矿激光器奠定了基础。”狄大卫说。

简单来说,LED(发光二极管)和半导体激光器(如激光二极管)是“亲戚”,它们都利用半导体材料发光。“钙钛矿LED技术就像电驱动钙钛矿激光器的‘地基’,需要先建设稳定的地基,才能在上面建造大厦。”狄大卫介绍。

第一个实现突破的是超长寿命的钙钛矿LED。2021年2月,狄大卫团队的硕士生郭兵兵,报告了一个特别的现象。彼时郭兵兵正在进行钙钛矿LED的稳定性研究。当时学界普遍认为,这类器件“本性脆弱”,几乎不可能达到如OLED般的长寿命。在反复实验中,郭兵兵注意到一个特殊样品:它的衰减速度,竟然比当时国际报道中最稳定的同类器件还要缓慢。

这是一次偶然,还是一个新的突破方向?郭兵兵陷入困惑——测试方案是根据国际通用测试LED的标准来执行,如果追踪这个“异常”样本,实验测试方案就要重新调整,也意味着要花费更多的时间和成本,会不会得不偿失?

他向狄大卫报告了这一现象。狄大卫鼓励和开导他:“科学研究中,最珍贵的往往就是这些‘异常’。但验证它,需要比发现它多十倍、百倍的耐心,放心大胆去做。”并提议可以参照OLED领域的通用方法,对器件进行加速老化实验,或许能看得更清楚。

于是,师徒俩这场持久观察战开始了。在设备工程师的协助下,郭兵兵搭建起新的测试系统,启动了更为严苛的稳定性考核。结果令人震惊,经过双极性分子稳定剂处理的钙钛矿LED,在5mA/cm²的恒定电流下,连续运行3600小时,亮度曲线几乎持平,未见衰减。

兴奋之余,他们决定挑战极限,建立了一套更严苛的测试协议:扩大电流测试范围、增加样品数量,发现钙钛矿

LED器件稳定性在不同电流密度下,均比当时最稳定的同类器件高100倍左右,首次接近OLED水平。

2022年8月,该研究成果正式发表,消除了钙钛矿LED可能“本征不稳定”的隐忧。

这也给团队打了一针强心剂。接下来,如何让器件的发光亮度进一步提高?狄大卫团队的博士生熊文涛聚焦钙钛矿半导体电学掺杂的难题,显著提高了发光亮度。“我们研发的钙钛矿LED,其亮度达到116万尼特,相当于正午太阳照在地面亮度的30倍。”熊文涛说。这一突破,如同为钙钛矿发光器件锻造了强劲的“心脏”,为实现电驱动激光清除了另一个障碍。

另一项突破来自狄大卫团队的博士生连亚青,他开发了微型与纳米钙钛矿LED,像素尺寸覆盖范围从几百微米一直到90纳米,创造了世界上最小的LED。

当传统半导体LED的尺寸降低到微米级时,性能会急剧衰退,但微型与纳米钙钛矿LED不仅可以保持可观的效率,还拥有极高的色彩纯度。这项突破,展示了微型钙钛矿光源可以同时实现极其微小与高效。

狄大卫团队的核心成员、研究员邹晨,在钙钛矿半导体光学微腔中,实现了室温下稳定的激子极化元色——爱因斯坦凝聚,这种宏观量子态可以大幅降低激光阈值。基于这一原理,邹晨制备了高质量的单晶钙钛矿光学微腔,在光泵浦下实现了目前最低阈值(0.4W/cm²)的连续波钙钛矿激光,相比当前性能最优的传统半导体激光器,其阈值仅为后者的1/30左右。

这意味着,未来基于此技术制造出的激光器,将变得更节能、高效。超低功耗将使得激光技术更广泛地融入对效能要求较高的领域,如未来的高性能手机显示、可穿戴设备、植入式医疗传感及大规模光子计算芯片中,为下一代光电器件奠定关键基础。

突破在1960年5月16日。美国休斯研究实验室的西奥多·梅曼将一个手指大小的红宝石晶体精心包裹在螺旋形闪光灯中,当闪光灯瞬间点亮,世界第一束激光——波长为694.3纳米的红色激光——从红宝石中迸发而出。这束光不像普通光源那样发散,而是笔直、集中、

“钙钛矿半导体激光器的制备,或许可以类比为制造汽车,”狄大卫说,“发动机、底盘等核心部件我们都攻克了,但最后的精密组装同样关键。”他解释道,这个过程需要用各种微观工艺构筑一个复杂的结构:先后采用真空镀膜、溶液旋涂、晶体生长等技术,将数十层功能材料严丝合缝地叠加在一起,每一步的材料、厚度和顺序都需精确控制。

邹晨主动承担了这项挑战。为了构筑电驱动钙钛矿激光器并搭建与之匹配的测试系统,邹晨日夜不停地调试、组装、优化。在团队成员的协助下反复探索可能的器件结构,搭建激光器测试系统。

2024年5月,他们终于在采用双光学

链接

一束光的诞生

激光并不是自然界发出的光,而是通过“受激辐射”放大的光。激光的理论基础是爱因斯坦在1916年提出的“受激辐射”理论,即原子在受到外部能量激发时可以发出光,并且这种光是相干的。但在这以后相当长的一段时间内,有关受激辐射的研究并未引起人们的足够重视。

1958年,美国物理学家查尔斯·汤斯和阿瑟·肖洛在《物理评论》上共同发表论文《红外和光量子放大器》,提出第一个实际激光器的概念,预言了激光的可行性。

突破在1960年5月16日。美国休斯研究实验室的西奥多·梅曼将一个手指大小的红宝石晶体精心包裹在螺旋形闪光灯中,当闪光灯瞬间点亮,世界第一束激光——波长为694.3纳米的红色激光——从红宝石中迸发而出。这束光不像普通光源那样发散,而是笔直、集中、

微腔设计的集成式钙钛矿器件中,观测到期待已久的电驱动激光。为验证结果的可靠性,团队又投入更严格的复测与系统优化。又经过数个月对器件的优化改进和实验重复性验证后,世界首个电驱动钙钛矿激光器,在浙大、在中国诞生了!

把今天的“首创”变成明天的“日常”

事实上,狄大卫团队研制的电驱动钙钛矿激光器仅需92A/cm²的电流密度即可启动,这个数值仅为目前性能最优的有机半导体激光器所需电流的1/10。

“通俗来说,就像一台新引擎,用更小的‘油门’就能平稳点火,意味着效率更高、能耗与发热更小。”狄大卫介绍,该器件的一个关键创新在于其双光学微腔结构,即把两个光学腔单元精巧耦合,使内部光耦合效率提升至82.7%,大幅增强了光放大能力。

但这并不意味着研究的终点,而是新的起点。

“电驱动钙钛矿激光器领域仍处于‘婴儿期’,我们的下一次攀登,是解决‘长大成人’道路上的两个关键问题——更简洁的器件结构和更长久的稳定性,从而推动它真正走出实验室,走向规模化的产业应用。”狄大卫说。

攀登珠峰,不满足于登顶一次。狄大卫透露,团队正为实现结构更精简的单腔激光二极管不断努力。与已实现的集成式双腔激光器相比,单腔设计更有希望实现大规模应用。这是迈向高效率、低能耗、微型化激光器的关键一步,让它从实验室走向实际应用的可能性大大增加。

在此之后,他们还需克服稳定性的挑战,研究重心也会从“从无到有”的原理与概念突破,转向攻克“从有到优”的难题。“在未来,我们不仅要让钙钛矿激光器在实验室的理想环境中工作,还要确保它在高温、高湿、持续电流冲击等更接近真实应用的严苛考验下,依然保持性能可靠、寿命持久。”狄大卫说。

这项技术成熟后,将如何重塑我们的生活?

想象一下,在可穿戴设备领域,微型激光器能被集成进智能手表的表盘之下。它发射的特定波长可无创穿透皮肤,实时、精准地监测血糖、血氧甚至乳酸代谢水平,让你手腕上的设备从一个运动记录仪,升级为个人的“健康预警中心”。

或许,你的眼镜还能直接投射屏幕,手机之间可通过激光实现高速数据传输,交互方式或因此迎来变革。

这项突破,标志着我国在下一代光电子技术竞争中,正从长期的“跟随者”,转向关键的“定义者”。其战略意义,远不止于一项国际首创,而在于它可能重构部分产业的核心技术路线。

从“跟跑”到“并跑”,再到如今在若干领域前沿“提前抢占身位”,这一转变的背后,是国家对基础研究与前沿技术长期稳定的支撑,以及一线科研工作者敢于瞄准各自领域的“珠穆朗玛峰”发起攻坚的战略定力。这项成果,不仅是一篇顶级论文,更是一个清晰的信号:中国光电研究,已具备在世界创新版图上开辟新大陆的勇气与能力。它就像一颗至关重要的“种子”,未来可能生长出一片更具原创性、自主性与竞争力的中国光电子信息技术产业“森林”。

此后,更多类型的激光器相继问世:氦氖激光器、半导体激光器、化学激光器……激光技术迅速发展,从实验室走向广阔应用天地。

从超市扫码器到眼科手术台,从光纤通信到核聚变研究,激光已经成为现代社会不可或缺的工具,被广泛应用到诸多领域,激光被认为是20世纪以来继原子弹、计算机和半导体之后的又一重大发明。

这束特殊的光,不仅照亮了我们的物质世界,更闪耀着人类智慧的光芒。

(本报记者 褚晶君 整理)