

前沿周刊 / 科技

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、高亮度性和良好的高相干性,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内,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,他们的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“光的放大器”,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。

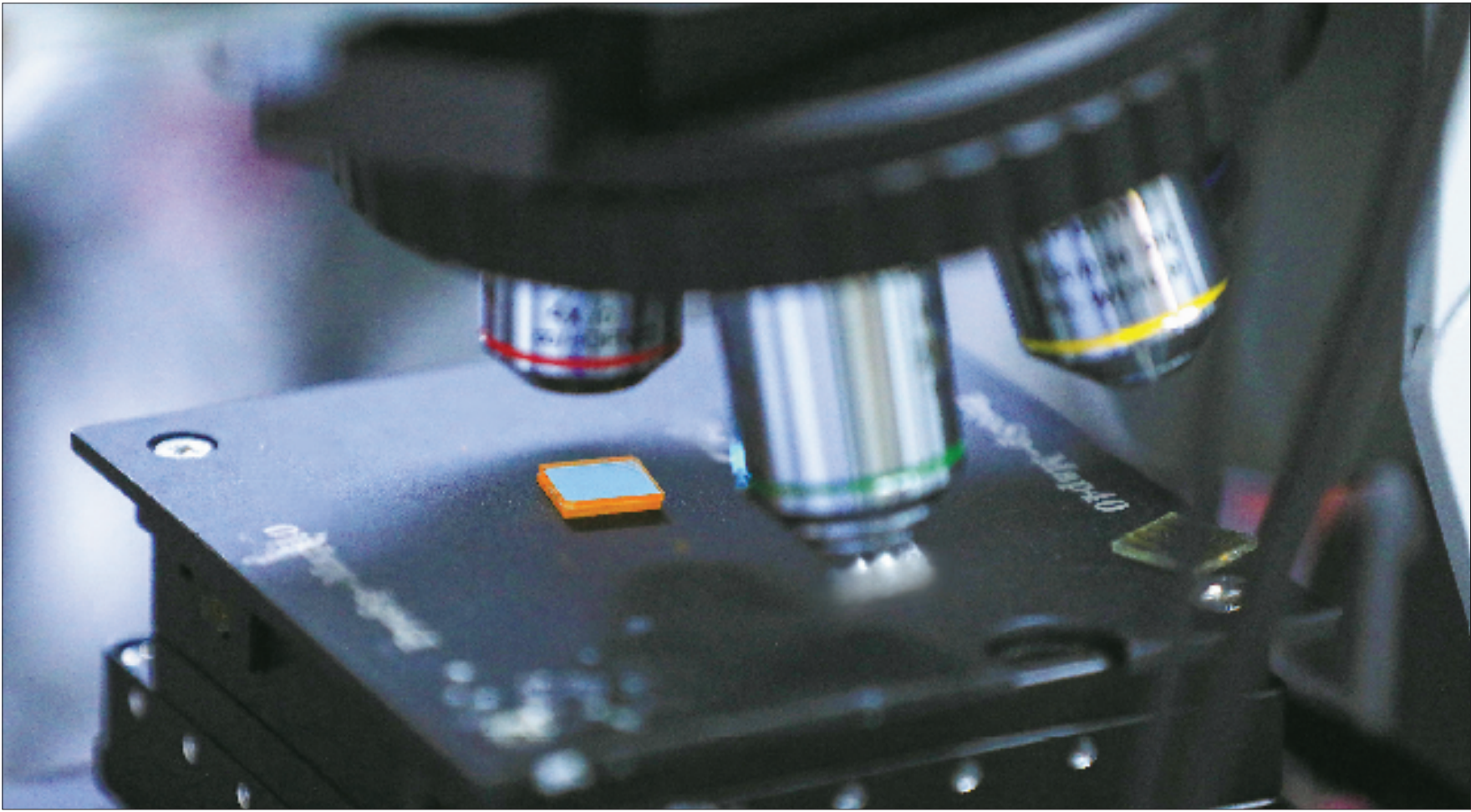
激光材料种类繁多,其中半导体激光器是信息技术领域的重要光源,但其传统制造工艺工序复杂且成本高昂。钙钛矿半导体、有机半导体和量子点等新型激光材料则展现出显著优势。其中,钙钛矿半导体因可实现各种色彩的激光,且在光驱动条件下可实现极低的激光发射阈值,具有十分优异的技术前景。然而,光驱动钙钛矿激光器依赖庞大且昂贵的外置光源(比如价值百万元的飞秒激光器),限制了实际应用。

驱动激光的过程按照外部能量源,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。

“这是钙钛矿光子电子学中普遍认为



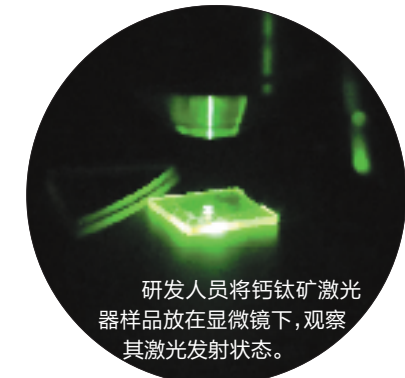
研发人员将钙钛矿激光器样品放在显微镜下观察。

的、难以解决的最大挑战,其难度来源于需要在多学科交叉的边界探寻极限。”狄大卫解释道,就像攀登珠穆朗玛峰需要克服缺氧、极寒、地形等所有极端困难一样,实现电驱动钙钛矿激光器需要攻克光子学、电子学、材料科学、器件物理等学科交叉的多项难题。这项研究就像攀登钙钛矿光子电子学领域的“珠穆朗玛峰”。

狄大卫在半导体光电的道路上探索了近20年。在澳大利亚新南威尔士大学,他完成了关于硅太阳能电池的本科学习和工程学博士研究,掌握了在半导体光电器件领域的学术基础。为了将自己的研究视野从光伏领域拓展到发光领域,2012年,狄大卫前往英国剑桥大学卡文迪许实验室攻读物理学博士。2014年,他所在的课题组成功研制出全球首个可在室温下工作的光泵浦钙钛矿激光器,但这类器件依赖庞大且昂贵的飞秒激光光源,功耗大,成本高,很难走向实际应用。

真正的未来,在于电驱动钙钛矿激光器的实现——它更小、更集成、更有望实现大规模工业应用。怀揣这样的决心,2018年,狄大卫回国加入浙江大学,并迅速布局:搭建实验平台,组建团队,先后引进赵保丹、邹晨等多名青年人才,向领域难题发起挑战。

2020年,狄大卫团队获得浙江省的支持,开展半导体光子电子学基础与前沿研究,其中也涉及电驱动钙钛矿激光器的计划。为了让团队能有更充足的实验空间,海宁市政府、浙江大学国际联合学



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。

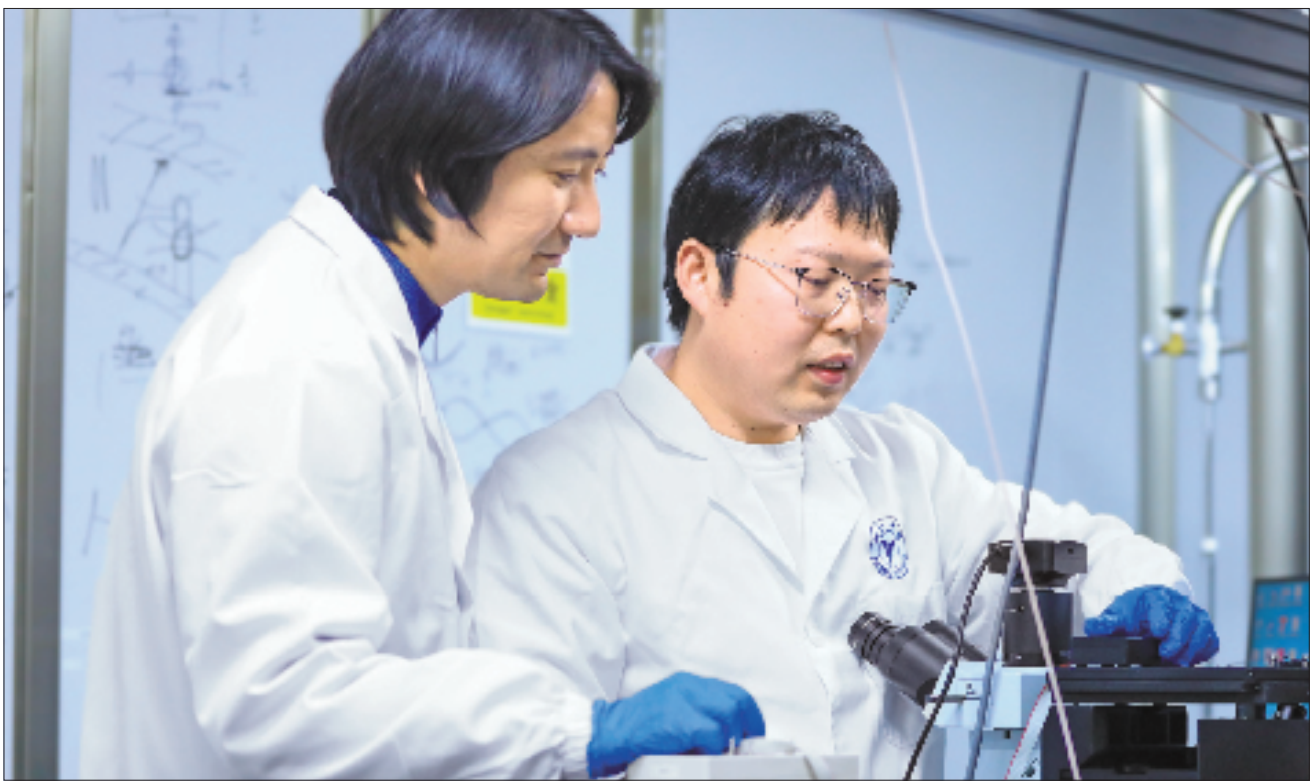
院(海宁国际校区)给予了一系列支持。“学校和政府有足够的耐心和信心,愿意支持高风险的前沿研究,这正是科研最需要的环境。”狄大卫说。

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。”狄大卫给记者举了四个“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(左)和邹晨在实验室讨论钙钛矿激光器设计方案。

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霄,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,展示了微纳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,实现了室温下稳态的激子极化激元玻色-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能更广泛地融入对能效要求较高的领域,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,为下一代光电子器件奠定关键基础。

“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,是解决它‘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持,以及一线科研工作者的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信息技术产业“森林”。

链接

一束光的诞生

纯净。梅曼在实验笔记中简单记录:“红宝石激光器成功运行”,科学史上一个全新领域就此开启。

1961年9月,我国光学科学家、中国科学院院士王之江、邓锡铭等研制成中国首台红宝石激光器,开启了中国激光史。

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,被广泛应用于诸多领域,激光被认为是20世纪以来继原子能、计算机和半导体之后的又一大发明。

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)