

# 中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 79 次

学部工作局学术与文化处 编报  
《中国科学》杂志社

2019 年 2 月 27 日

## “高功率高光束质量半导体激光”论坛综述

### 一、国内外研究现状

1. 高功率高光束质量半导体激光芯片是我国国防装备和国民经济支柱产业实现跨越式发展必须自主把控的战略核“芯”技术

半导体激光芯片是几乎所有光电系统不可或缺的核心，是国防装备的基石，更是先进制造、能源、通信、航空航天、生物和医疗健康等国民经济支柱产业的共性基础，是“国之重器”，是必须自主把控的军民共用高技术战略性基础产品。发展自主可控的高功率高亮度激光半导体芯片技术对于推动当前装备进步、把握主导权具有重要的意义。这些先进半导体激光芯片不仅是当前众多光电系统及装备不可或缺的核心，如以固体激光器和光纤激光器为主的激光武器的能量来源（泵浦光源），还可以直接应用成为下一代战术激光武器的首选，带来作战模式的变革。同时工业应用的固体激光和光纤激光均以半导体激光器做泵浦源，因此半导体激光器是最基础的关键、核心光源器件。美国在近 10 年内持续支持了 4 个半导体激光芯片的专项，计划于 2021 年列装机载和装甲车等装备，开启所谓的“1 美元光战争”。

## 2. 高功率高光束质量半导体激光芯片中国制造升级的致命短板之一，是激光及其相关产业的基础器件，必须解决命脉受制于人的被动局面，是我国强“芯”无法回避的问题

先进半导体激光芯片是整个激光产业的源头，是“中国制造2025”、“数字中国”、“健康中国”等国家战略的重要支撑元素，其直接或间接涉及智能制造、信息网络、医疗健康等基础性、战略性新兴产业对国民经济贡献巨大。美国科学与技术办公室2010年的分析报告认为，激光应用及其扩展延伸的经济价值约为7.5万亿美元，占美国当年GDP的50%；据行业国际权威期刊*Laser Focus World*报道，截至2017年，全球半导体激光器市场连续10年占据整个激光器市场的50%。由此估算，半导体激光芯片直接或者间接应用所产生的经济价值约占美国GDP的1/4。我国光学学会近几年的调研报告指出：“国际激光器及其激光相关产品和服务的市场价值高达上万亿美元。半导体激光占整个激光领域产品销售总额的60%，超过其他各类激光器的总和”。

从世界半导体激光产业的分布来看，美国和德国在高功率半导体激光芯片领域处于垄断地位，占据90%以上份额；日本在信息型半导体激光领域占据市场70%的份额。我国在半导体激光器的封装、系统集成和产品应用发展迅速，成为世界半导体激光器应用的重要基地之一，但核心的半导体激光芯片和部分配件主要依赖进口。尤其在高功率高亮度、特种半导体激光芯片等先进激光产品和合束技术等方面与国外尚有较大差距，如果发生类似中兴的事件，那么我国的激光制造产业将处于近乎停产的状态。因此，亟待设立专项联合优势单位进行攻关和突破，改变半导体激光芯片产品受制于人的局面，从而实现高端半导体激光器产品的自主研发和生产，打破国外的限制。

## 3. 人类社会已经进入“光子时代”，以先进半导体激光芯片技术等为代表的“光子技术”是“后摩尔时代”的核心及颠覆性技术，已

## 经成为当前和当今国际产业竞争的制高点

人类社会已经进入“光子时代”，半导体激光芯片是核心基础器件，对于先进半导体激光芯片的核心技术及生产装备的研发要摒弃幻想，自力更生。“中兴事件”就是由于“电子时代”集成电路芯片发展初期，我国没有抓住关键发展机遇，没有掌握技术核心，更为危险的是可能导致智能制造、信息网络、医疗健康产业丧失基础，对我国的发展造成严重威胁，还将极大地压制我国利用“光子技术”实现超越的时间窗口。因此，在光子时代刚起步的时刻，需要提前进行半导体激光芯片基础研发和产业应用布局，抢占战略发展的制高点。在需求牵引下，需要去探索，更需要不同产业链条的合作，需要尽快掌握先进激光芯片的核心技术，在半导体激光的原理机制和芯片的材料、结构以及工艺技术和装备等方面不断创新，引领半导体激光产业的发展。

## 二、论坛概况

2018年7月11~12日，以“高功率高光束质量半导体激光”为主题的第79次科学与技术前沿论坛在长春召开。论坛由中国科学院学部主办，中国科学院信息技术科学部、学部学术与出版工作委员会承办，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、发光学及应用国家重点实验室和《中国科学》杂志社协办。

论坛由中国科学院院士、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员王立军担任执行主席。来自高校、科研机构和相关单位的产、学、研、用各领域的专家学者60余人参加了论坛。

## 三、论坛的目的、重要性和重点关注的问题

为了满足人们未来生活的需要，世界各国纷纷提出智慧城市的发展规划，如欧盟的《欧洲2020战略》，美国的“IBM-迪比克计划”，日本的《i-Japan2015战略》，韩国的“Smart Seoul 2015”，新加坡投资190亿新币打造“智慧国家2025”。国务院于2016年7月发布了《“十

三五”国家科技创新规划》，其中强调大力发展新一代信息技术，提出建设“智慧城市”的要求。在智能城市建设中，智慧的“眼睛”——半导体激光传感器是必不可少的一个感知器件，可以用于城市测绘、智能交通、物流管控、环境监测、智能家居等各个方面，因此高端的半导体激光器是目前光电子产业的一个新兴热点。

与会专家依据国家“十三五”中长期发展规划纲要，在充分分析高光束质量半导体激光技术在智能城市、智能车等领域的应用现状及发展趋势的基础上，提出未来5年需要解决和突破的科学问题和关键技术，总结出该领域重点发展方向，重点推动高光束质量半导体激光器在激光雷达、智能汽车、智能机器人等领域的应用，为科技部、基金委、中国科学院等项目指南的制定提出建议。

论坛围绕“高功率半导体激光及应用”安排了8个专题报告，并就“高功率高光束质量半导体激光”“激光雷达技术及应用”等议题开展了研讨。

#### 四、报告内容及讨论情况

王立军院士围绕半导体激光技术的发展前沿、半导体激光应用发展概况、激光产业的发展动态及半导体激光技术的发展机遇及建议等内容作了主题报告。

中国电子科技集团公司第13研究所（中电13所）徐会武高级工程师作了题为“面向激光雷达的半导体光电器件”的报告，围绕激光雷达需求的全产业链设计及生产能力，详细介绍了中电13所在“十一五”和“十二五”期间承担的相关科研项目，以及在LOC大光腔外延材料、真空裂片钝化镀膜等关键工艺技术方面获得的突破。报告指出，大功率窄脉冲半导体激光器以其体积小、重量轻、电光转换效率高等优点成为激光雷达中的理想光源。中电13所具备完整的半导体光电器件的设计和工艺平台，包括GaAs基、InP基体系外延材料、大功率单管和Bar条芯片、InP基PIN/APD芯片、各类芯片封装及光束整形、

耦合、测试等能力。中电 13 所承担了“大功率半导体激光器”重大专项等科研项目，在项目研究基础上先后开发了 LOC 大光腔外延材料、SLOC 超大光腔外延材料、电流非注入透明窗口、真空裂片钝化镀膜等关键工艺技术，实现了国产大功率半导体激光器电光转换效率、功率、可靠性显著提升。通过开发出的隧道结级联技术，实现了芯片的外延叠层，将单管芯片的脉冲最高输出功率提高到 75 W。针对激光雷达人眼安全的迫切需求，正在进行 1550 nm 光收发芯片的开发。具备围绕激光雷达需求的全产业链设计及生产能力，提供激光雷达收发一体化解决方案，产品指标达到国际先进水平，在可靠性、环境适应性等方面满足军工品质要求。

西安唐晶量子科技有限公司总经理龚平博士作了题为“垂直腔面发射激光技术在激光雷达中的应用前景”的报告，围绕激光雷达光源，重点介绍了 VCSEL 外延片研发及生产中涉及的芯片设计、掺杂技术及 DBR 生长质量控制等技术，以及 VCSEL 在光通信、激光雷达和传感领域的应用。龚平博士曾先后在半导体产业链上游国际一流企业英国 IQE 公司及世界 500 强的化工企业荷兰 AkzoNobel 公司工作近 20 年，积淀了丰厚的半导体材料的技术工艺、生产管理、项目管理和市场营销经验。在欧洲、美国、日本、韩国及中国台湾等产业界积累了丰富的的人脉和资源。在英国 IQE 工作期间，作为项目经理，他领导跨部门团队通过在 InGaAs 量子阱掺入 N 形成 InGaAsN 量子阱将 GaAs 基的 VCSEL 波长扩展到了 1300 nm，成功开发并熟练掌握了成熟的 850 nm/905 nm/980 nm/1.3  $\mu$ m VCSEL 外延片设计和批量制造工艺。2017 年底，他创办了西安唐晶量子科技有限公司，致力于 GaAs/InP 基外延片研发和生产，主要产品包括 GaAs 衬底 850/905/940 nm VCSEL 外延片，用于光通信、激光雷达和 3D 传感。

中国科学院半导体研究所韩勤研究员作了题为“近红外单光子雪崩光电探测器焦平面阵列研究与应用”的报告，围绕单光子级别的近

红外弱光探测技术在信息感知领域的应用，介绍了雪崩光电探测器 APD 及焦平面阵列芯片的研究进展、其在激光雷达方面的应用、盖格模式下缺陷影响雪崩过程的内在机制和规律，以及影响单光子探测的主要过程。

吉林大学宋俊峰教授作了题为“全固态激光雷达的发展与展望”的报告，围绕第 3 代固态激光雷达，介绍了固态激光雷达的工作原理、发展趋势、国内外激光雷达的产业链等信息，以及吉林大学在该研究领域开展的工作及取得的最新研究进展。激光雷达及相关技术是探测感知系统的基础，是智能自动化技术的核心之一，对推动智慧城市的建设具有重要意义。激光雷达既可以测距测速，用于“智慧交通”、“智能网联车”、智能工业和家居；也可以绘制高精度地图，用于数字化城市、地理勘测；还可以实现三维成像，用于手机、机器人、虚拟现实、增强现实等。预期以激光雷达为核心的探测感知技术在未来 10 年将会带动千亿量级的巨大市场。目前主流的混合固态激光雷达由于内部有机械结构，价格昂贵、体积大、可靠性差。第 3 代固态激光雷达可以完美解决上述问题，是民用激光雷达的理想产品。报告介绍了固态激光雷达的工作原理、发展趋势、国内外激光雷达的产业链等，以及未来的研究计划等。

大连理工大学常玉春教授作了题为“前行中的激光雷达专用集成电路”的报告，针对激光雷达系统需要的专用集成电路，介绍了目前激光雷达主要的架构方案、LiDAR 专用集成电路的研发情况、发展趋势，并重点介绍了大连理工大学在单光子 LiDAR 方面的研究工作及研究成果。报告指出，伴随着智能驾驶、人工视觉等行业的广泛需求，激光雷达产业发展迅速。虽然机械扫描的线性模式激光雷达技术已经非常完善，但全固态方案正逐渐成为激光雷达的发展重点，要求系统具有更高的性能和集成度、更低的成本。激光雷达系统需要多种专用集成电路，核心元件包括：控制激光雷达的光源发射的专用集成电路，

实现相控阵光源调制；光电探测读出电路，用于阵列式光电探测器的信号读出；高速飞行时间数据处理，还原三维点云信息。同时，利用专用芯片来实现基于人工智能算法的多模态图像数据融合方法，可将激光雷达三维点云信息与由高分辨率二维图像信息进行高速结合，可直接进行高精度、高速度目标识别和跟踪。总之，专用集成电路的性能是整体激光雷达系统探测精度、探测距离、探测速度等参数的决定性因素，也是激光雷达系统成功产业化、商业化的关键。

中国科学院半导体研究所张冶金研究员作了题为“硅基光电子集成光源”的报告。硅基集成光源目前是光子、光电子集成中的热点也是难点问题。报告首先介绍了硅基集成光源近年的发展状况以及挑战，重点给出了几种新型的低技术门槛 C 波段单模工作硅半导体激光器，包括周期性微结构跑道环形激光器、混合型 III-V/Si 变形微盘单模激光器、周期微结构 FP 硅激光器，以及利用低垂直发散角的倾斜光束直接耦合到硅基表面光栅中以形成集成光源，这些光源具有工艺简单、成本低、适于大批量生产的特点。报告中强调了无源耦合技术对未来硅基光电子集成的重要意义，包括大容差耦合技术以及光子线键合技术等。目前国内在硅基光源的发展还比较薄弱，有必要通过科技专项来推动设备以及芯片实现技术的创新。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所彭航宇副研究员作了题为“基于红绿蓝三基色的半导体激光照明技术研究”的报告，报告指出，相对于 LED 照明，激光照明在转换效率、作用距离及亮度等方面具有显著优势，同时还具有体积更小、结构更紧凑等特点。据 LED 照明标杆人物、2014 年诺贝尔物理学奖获得者中村修二预测，未来 10 年，激光照明将会代替 LED 照明。发展激光照明技术对于推动其在汽车大灯上的应用具有重要意义。当前激光照明主要分为蓝激光打粉照明和红、绿、蓝三基色合成白光照明，报告介绍了当前红、绿、蓝三基色激光单元器件及激光合成光源的技术进展，展示了他们团队在红、

绿、蓝三基色合成光源方面所开展的工作。

## 五、共识、建议和提出的科学问题

未来 20 年,需要解决半导体激光芯片在外延生长和器件工艺方面的核心技术,使激光器成为中国“杀手铜”式的产品。高功率高光束质量半导体激光器的研究要重视与应用需求相结合,需求引导器件的研究方向。大功率激光应用的芯片,从指标上讲,与国外差距不明显,但是在工程应用上与国外有差距,需要国家给予支持和重视,在研究的阶段把工程研究考虑进去,以工程牵引目标支持基础研究,可能有新的发展。在国家安全中具有重要应用的半导体激光芯片,国外对此类器件禁运,需要加强此项技术的攻关。高功率激光器芯片的材料和工艺是核心,国家应建立激励机制,给予从事外延生长的研发人员更大的发展空间,重点突破高功率半导体激光器的腔面镀膜技术、光栅制备技术和光谱合束技术等。半导体激光器产品的发展要坚持国产化,做自己有特点的产品,发展拥有知识产权的核心技术。

中国科学院长春光机所梁静秋研究员、长春理工大学晏长岭教授、中电 13 所张岩高级工程师、中国科学院半导体研究所曹玉连研究员、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所王维彪研究员以及龚平博士、宋俊峰教授、张冶金研究员、常玉春研究员等作了发言。与会专家围绕论坛主题并结合自身所处的研究领域,围绕高功率高光束质量半导体激光及激光雷达相关前沿基础理论、核心关键技术及应用前景等问题,进行了热烈交流和深入讨论。本次论坛的特点是多领域专家汇聚,来自光电子与微电子领域及研发制造企业的专家学者从各自背景出发畅所欲言、各抒己见,总结并凝练了该领域的现状,前瞻性地分析了该领域中长期发展趋势。

王立军院士在总结时指出,半导体激光技术经历了 50 年的辉煌发展历程,已全面渗透到物理、化学、机械、生物、医疗、人类学、天文、地学、信息科学等大量基础交叉学科领域中,在基础科学创新中



发挥着不可替代的作用。半导体激光芯片及模块是几乎所有光电系统不可或缺的核心，不仅是国防应用的基石，更是先进制造、绿色能源、信息通信、航空航天、生物和医疗健康等国民经济支柱产业的共性基础，对国民经济发展具有重大贡献，是“国之重器”，也是必须自主把控的共用高技术战略性基础产品。我国目前处于“互联网+”的发展时期，中国也即将进入“激光+”的快速发展阶段，以激光技术和激光元器件连接物联网、大数据、智能制造和智能应用场景，是国际社会的发展趋势和潮流。在市场需求牵引下，需要我们去探索，更需要不同行业加强合作，不断打破领域的信息孤岛，为促进信息化和智能化发展贡献一份力量。王立军院士肯定了本次论坛的交流讨论效果。他说，演讲专家观点新颖、研讨氛围热烈活跃，特别符合中国科学院学部倡导的自由研讨、鼓励争论的理念，相信软件与制造业的交叉融合未来可期、大有可为。

论坛提出以下科学问题：（1）器件表面、界面、腔面缺陷形成机理及控制：从影响外延质量、能带结构及发光特性的缺陷形成机理进行分析，提出解决方法，降低串联电阻、减小内部损耗，提高器件的电注入效率、光输出特性及寿命。（2）高光束质量半导体激光单元结构创新研究：半导体激光器的输出功率受模场体积及腔面损伤阈值的限制难以实现大功率基横模输出，提出单元结构的创新性设计，实现高功率基横模输出。（3）高功率半导体激光器的空间模式调控及器件研究：大功率半导体激光芯片呈多侧模激射，劣化了输出光束质量。通过重构快慢轴方向的折射率分布，实现高光束质量输出。在三维方向上扩展半导体激光器单元结构，扩展模式增益体积，降低空间功率密度，大幅度提升单芯片输出功率。

## 六、与国外同领域研究相比的优势和不足

国内在半导体激光芯片的集成化封装技术、工程化应用方面具有优势。瓦级、10瓦级别的半导体激光模块的研发已经接近国际水平。

国内在半导体激光芯片的设计方面具有多年的积累和经验。在半导体激光的应用方面研发人员储备丰富。研究所和科技公司之间形成了较好的合作关系。但是，我国在高功率高光束质量半导体激光芯片、探测器芯片以及千瓦以上激光模组方面，性能指标与国际领先水平还有很大的差距。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的千瓦以下半导体激光合束光源，光束质量接近国际水平，但总体还亟待进一步提高核心技术，服务智能制造产业。因此，需要集中国内优势力量联合攻关，保持在此领域的领先地位，并以此为牵引，引领半导体激光在能源、环境、生命、制造等科学领域及激光产业的发展，在新一轮国际激光技术竞争中抢占制高点，实现激光光源领域的一场革命。

## 七、其他特色和创新之处

为便于召集产、学、研、用等各领域的专家学者，共同商讨半导体激光在“智慧城市”和智能车领域的应用以及未来发展走向，为智慧城市需要的物联网传感器的研发明确方向，为我国的“智慧城市”绘制蓝图，本次论坛与“2018中国（长春）国际智能网联高峰论坛”同期举行，两个论坛联办，相互补充，旨在推动高功率半导体激光技术及成果在产业界的推广和应用，同时明确产业界的需求，带动我国半导体激光芯片技术的发展，推动智能网联技术的创新发展。

（作者：王立军，中国科学院院士，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员；秦莉，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员；付喜宏，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员；张金龙，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，高工）