

几种新体制半导体激光器及相关产业的现状、挑战和思考

韦欣^{1,2}, 李明¹, 李健¹, 汪超¹, 李川川^{1,2}

(1. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083; 2. 中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘要: 半导体激光器产业体量大、辐射和带动能力强, 作为激光器工业的基础, 被广泛应用在光通信、光信息处理、新型加工、激光显示、生物和医学传感等工业、军事和消费生活领域。为了适应逐渐扩大的应用范围, 满足不同应用场景所提出的新要求, 半导体激光器领域近年来通过学科交叉渗透不断地引入了各种新机制、新概念以及新结构, 大大优化了其波长覆盖范围、光束质量、器件体积和功耗、调制速度以及输出功率。本文通过对比几种新型激光器的物理内涵、结构设计及制备手段, 介绍了几种应用前景广泛且发展势头强劲的半导体激光器。结合我国相关产业的发展现状指出, 半导体激光器产业的发展仍然应与应用紧密结合, 通过市场和强大的系统开发能力闭环优化器件性能, 提升核心技术, 通过交叉学科融通不断引入新概念、新结构和新工艺。同时, 结合国内政策导向优势, 在垂直外腔面发射激光器、微纳结构激光器以及拓扑绝缘体激光器等几个发展势头强劲的新型激光技术中加大投入, 进行批量生产和可控制备研发, 力争在国际相关领域的竞争中抢占战术制高点。
关键词: 半导体激光器; 光泵浦垂直外腔面发射激光器; 纳米激光器; 拓扑绝缘体激光器

中图分类号: TN2 文献标识码: A

Several New Semiconductor Lasers and Status, Challenges and Insights of Related Industries

Wei Xin^{1,2}, Li Ming¹, Li Jian¹, Wang Chao¹, Li Chuanchuan^{1,2}

(1. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As the basis of the whole laser industry, the semiconductor laser industry is not only large-scaled but also has strong radiation and driving capacities. The semiconductor lasers are widely used in industrial, military, and living consumption fields such as optical communication, optical information processing, novel manufacturing, laser display, and biological and medical sensing. To adapt to the gradually expanding application range and satisfy the new requirements of different application scenarios, various new mechanisms, concepts, and structures have been introduced into the semiconductor laser industry through interdisciplinary penetration, greatly optimizing the wavelength coverage, beam quality, device volume, power consumption, modulation speed, and output power of the semiconductor lasers. This paper introduces several rapidly developed new semiconductor lasers by comparing their physical connotation, structural design, and preparation methods. Considering the current development status of related industries in China, we suggest that the development of the semiconductor laser industry should be closely combined with industrial application. The performance of the semiconductor lasers should be optimized in a closed-loop manner relying on the market capacity and the strong systematic development ability in China to promote the key technologies. New principles, structures, and processes should be continually introduced into this industry through interdisciplinary integration. Meanwhile, using the policy-oriented advantages in China, we suggest to increase investment in vertical external cavity surface emitting lasers, micro-nano lasers, and topological insulator lasers and conduct mass

收稿日期: 2020-03-26; 修回日期: 2020-04-10

通讯作者: 韦欣, 中国科学院半导体研究所研究员, 研究方向为半导体激光器; E-mail: weix@red.semi.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国激光技术与应用 2035 发展战略研究”(2018-XZ-27)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

production and controllable production, thus to seize the leading position in international competition in the related fields.

Keywords: semiconductor lasers; optically pumped vertical external cavity surface emitting lasers; nanolasers; topological insulator lasers

一、前言

半导体激光器是以半导体材料为增益介质的激光器，依靠半导体能带间的跃迁发光，通常以天然解理面为谐振腔。因此其具有波长覆盖面广、体积小、结构稳定、抗辐射能力强、泵浦方式多样、成品率高、可靠性好、易高速调制等优势，同时也具有输出光束质量差，光束发散角大，光斑不对称，受到带间辐射的影响导致光谱纯度差、工艺制备难度高的特点。

本文针对半导体激光器光谱纯度差、光束质量差、大功率工作困难、难于实现腔内调控等缺点，以光泵浦垂直外腔面发射激光器、微纳激光器和拓扑绝缘体激光器的研究发展路线为载体，简要回顾新体制激光器的发展历程，并通过研究总结相关器件的技术发展路线，总结了在多学科交叉的技术背景下，实现新物理、新概念以及新技术融合的方法，为我国半导体激光器产业的发展提出相关建议，以供参考。

二、几种新体制半导体激光器简介

新物理、新概念以及新技术与半导体激光器的

融合，为其发展注入了新鲜的血液，通过与光学、电磁学、微电子学、拓扑学以及量子力学的交叉渗透，催生出了许多新体制激光器，它们或者有大规模的集成应用前景，或者有优秀的光束和光谱质量，或者有更高更稳定的输出功率，或者有更小的体积和突破衍射极限的光斑，或者便于调制和倍频，或者具有让人兴奋的微小功耗。这些新体制激光器的发展，代表了半导体激光器技术的先进水平，同时也反映着物理理论、工程技术以及制备工艺的发展现状，值得进行深入的研究。其中，光泵浦垂直外腔面发射激光器、微纳激光器和拓扑绝缘体激光器（见图1）分别代表了激光学科内部的交叉应用、激光器与光学的交叉应用以及激光器与新兴物理领域交叉应用所催生出的新型半导体激光器，具有丰富的物理内涵和应用价值，本文将进行较详细的讨论。

（一）光泵浦垂直腔面发射激光器

光泵浦垂直外腔面发射激光器（OP-VECSEL），又称光泵浦半导体激光器（OPSLs），或半导体薄片激光器（SDL），是半导体激光与固体激光结合的产物。它的增益芯片采用半导体材料，与垂直腔面发射激光器（VCSEL）非常相似；谐振腔结构则

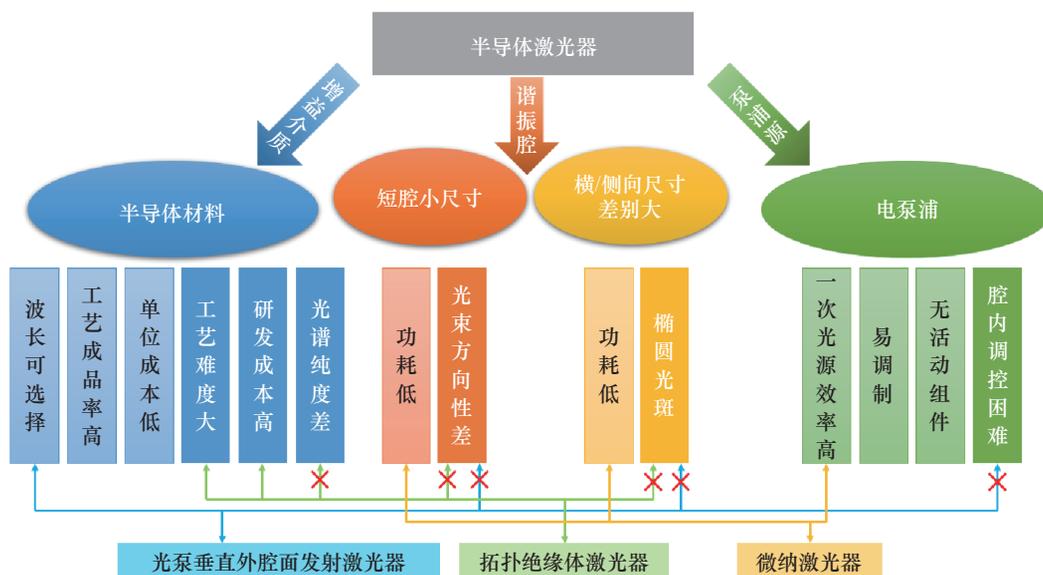


图1 基于半导体激光器的几种新体制激光器及其特点

采用固体激光器构型，通常由半导体芯片上的分布布拉格反射镜（DBR）和外腔镜共同构成；泵浦方式通常使用光泵浦，可以提供更灵活的工作方式和更优良的器件性能。VECSEL 使用半导体芯片作为增益物质，可以提供多种波长选择和宽谱的调谐范围。基于固体激光器的光学腔使其可以方便进行腔内光学元件插入，易于进行脉冲压缩、和频、差频及光束整形，可以产生如超短脉冲激光、特殊波长激光、太赫兹激光、多色激光等，满足多种特殊应用需求。

由于 OP-VECSEL 的上述特点，目前该领域的主要研究内容集中在提高输出功率、波长可调谐性，激光超短脉冲或超强脉冲产生以及特殊波长或多波长设计等方面。就波长覆盖范围来讲，VECSEL 激光器目前已经实现了紫外波段到可见光波段再到红外波段甚至太赫兹波段的全波段覆盖。表 1 给出了不同波段 VECSEL 激光器的一些典型参数。通过腔内倍频 VECSEL 实现的最短激光波长可以达到 244 nm [1]，使用双波长腔内差频实现的最长波长也可以达到 1.9 THz [2]。目前，VECSEL 激光器的最高单片输出功率纪录为 106 W [3]，最高重复频率为 175 GHz [4]，最小脉冲宽度为 60 fs [5]。

VECSEL 非常适合需要高性能光源的定制化应用，正处于面向应用的关键技术研发阶段，如特殊环境通信或特殊波长传感等。大量固体激光和半导体激光领域的现有技术被用来改善激光器的输出特性。谐振腔设计、光谱控制、腔内倍频、锁模、多程泵浦、碟片等固体激光技术，以及芯片制备和热管理等半导体相关工艺技术都为 VECSEL 的发展提供了有力的基础支撑。

垂直外腔激光器（见图 2）的高性能和灵活性

特点使其非常适合定制化应用，其发展应该紧密结合应用，以平台建设为主，兼顾多波长、多输出特点的实用技术开发。一方面需要针对 VECSEL 本身的平台化技术进行创新研发；另一方面，迫切需要进行面向具体应用的特定技术开发和扩展，如开发适用于特殊波长、高光束质量、窄线宽、宽调谐范围等应用的高性能激光系统等。

（二）微纳激光器

微纳激光器通常指尺寸或模式尺寸接近或小于发射光波长的激光器。其结构小巧、阈值低、功耗低，在高速调制领域具有广阔的应用前景，是未来集成光路、光存储芯片和光子计算机领域的重要组成部分，同时被广泛应用于生物芯片、激光医疗领域，并在可穿戴设备等领域内有着潜在的应用价值。

最早的结构微小化半导体激光器是垂直腔面发射激光器，将激光器的尺寸降低到了几十微米量级，并在通信、电子消费等领域获得了广泛的应用。由于尺寸的降低往往代表着阈值和功耗的降低，在过去的 50 年中，半导体激光器的体积已经减少了大约 5 个数量级。为了进一步减小体积获得更高的性能，人们尝试了各种方法来进行腔长的压缩和谐振腔的设计，如使用回音壁模式的微盘激光器、使用

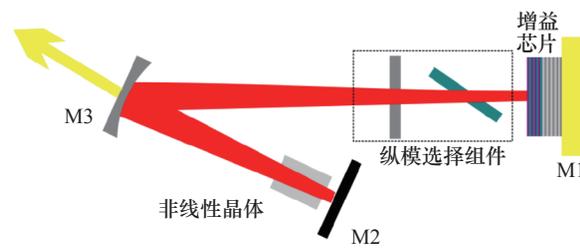


图 2 垂直外腔面发射激光器

表 1 不同波段 VECSEL 激光典型参数

波长	输出功率	其他特征指标	参考文献
588 nm	20.00 W	V 型腔 LBO 倍频效率达到 28%	[6]
7XX nm	4.24 W	747~788 nm 调谐	[7]
1013 nm	3.30 W (平均)	脉宽 400 fs, 峰值功率 4.35 kW, 重复频率 1.67 GHz	[8]
1028 nm	106.00 W	热沉温度 3 °C 多横模	[9]
1030 nm	27.10 W	金刚石热沉	[10]
1030 nm	31.00 mW	半导体可饱和吸收镜锁模 (SESAM) 脉宽 107 fs, 脉冲重复频率 92 GHz	[11]
1560 nm	1.00 W	线宽 12 kHz	[12]
2300 nm	1.10 W	GsSb 基线宽 20 kHz	[13]

金属核壳结构的等离子激元激光器、基于法布里-波罗腔的异质结二维材料激光器等。表 2 介绍了几种不同类型的微纳激光器特性比较。通过光学、表面等离子、二维材料等新兴科学技术的引入，微纳激光器目前已经实现了三维尺寸衍射极限的突破。基于表面等离子激元介电模式的 SPASER 激光器，横向尺度可以做到 260 nm 以下 [14]，并可以实现电学泵浦。基于过渡金属二卤化物 (TMDC) 的二维材料增益介质，可以保证在激光器体积小型化的前提下，提供比一般半导体量子阱材料高几个量级的材料增益，并可以实现三维尺寸上的突破衍射极限 [15]。此外，量子点材料的引入，也为激光器增益性能的提高提供了新的思路。

就各种微纳激光器的发展程度来讲，除 VCSEL 已经成功商用以外，其余类型的激光器在实际应用方面的道路依旧曲折，但微盘激光器的小尺寸，光子晶体激光器的低阈值和高速率，纳米线激光器的灵活调控波长以及等离子激元激光器的均衡性能使其在各自的应用领域内有着广泛的发展前景。

微纳激光器在不同场合的应用，对于其性能要求有所不同，所适合的技术方案可能有很大差别。如在其最大的目标市场光通信和光信息处理领域，成品率、可靠性与寿命方面的要求使得电泵浦的基于微纳加工的解决方案更为适合；而在生物医疗领域，在生物兼容性和尺寸方面的严格要求下，光泵浦和自组织的方案会更有竞争力。

微纳激光器的发展需要强大的技术能力保证。除了微纳加工技术以外，与之匹配的材料生长技术、

器件制备工艺，甚至检测封装技术均需要进行针对性的开发，避免出现某项技术的缺位与短板，从而限制整个器件的性能水平。

(三) 拓扑绝缘体激光器

拓扑绝缘体激光器是半导体激光技术与凝聚态物理中“拓扑绝缘体”概念的结合。利用拓扑结构中的边缘态概念，这种激光器对器件内部结构的扰动和缺陷不敏感，易于实现高输出功率、高鲁棒性、模式稳定的激光。尤其在大功率激光器以及新兴的纳米光子激光器中，这种激光器对散射损耗和随机制造缺陷不敏感的特点使其非常适用于高功率锁模激光阵列和量子信息产生及传输等领域的应用。

尽管距离首次提出基于半导体拓扑结构的拓扑绝缘体激光器概念仅有两年 (2018 年首次提出 [16,17])，此类激光器优异的输出稳定性和结构缺陷不敏感性已经引起了国内外很多研究人员的关注，并逐渐成为了相关学科的研究热点。目前此类激光器大多以半导体微纳拓扑结构为结构单元，通过拓扑结构形成的光场或电子限制来实现谐振功能，进而实现激光器的定向单模激射。表 3 给出了几种不同类型的拓扑绝缘体激光器。以 2020 年北京大学实现的纳米腔拓扑激光器为例 [18]，这种激光器可以实现垂直发射的单模激光，出射方向可以通过器件拓扑结构进行调整，方向性高、体积小、阈值低、线宽窄，横向和纵向模式都有很高的边模抑制比。此外，利用拓扑对称的概念和其他新型激光器的结合，国际上已经在理论上获得了蜂窝对称

表 2 几种不同类型的微纳结构激光器特性比较

激光类型	器件特性	器件尺寸	阈值
VCSEL	基于 DBR 或光栅结构实现腔反馈，有源区与一般半导体激光器相同	有源区尺寸为百纳米量级，器件尺寸为微米量级	相比一般半导体激光器较低
微盘激光器	基于回音壁模式实现腔共振，多采用半导体材料作为有源区	器件多为盘状结构，需要复杂工艺进行微盘制作，器件可以在一个方向实现亚波长尺寸	相比传统半导体激光器低，可以实现高边模抑制比的窄线宽输出
核壳结构激光器	包括纳米线激光器、金属核壳结构激光器等，通常通过激子或电子空穴等离子体实现光增益	基于纳米线中等效折射率差实现光学限制，可以至少在两个方向实现亚波长尺寸	阈值理论可以达到很低的水平，与核壳结构材料和有源区增益方式有关
金属或金属/介质结构微纳激光器	基于 LSP、SPP/光子耦合微腔或光学微腔结构实现光学谐振	基于表面等离子体及其局域效应可以实现 1D/2D/3D 亚波长结构，否则受到衍射极限限制	非 SPP 效应下受金属损耗影响，阈值较高，但包含 SPP 效应时，主要取决于材料增益，使用量子点、二维材料等作为有源区材料可以大大优化器件性能

注：LSP 即分层服务提供商；SPP 为表面等离子激元。

的等离子-光子(衍射)拓扑 SPASER [19], 六边形等离激元金属纳米壳核阵列 SPASER [20] 以及太赫兹紧凑型量子级联拓扑激光器等 [21]。

拓扑绝缘体激光器方面的发展仍处于物理概念提出和验证阶段。加强学科交叉, 促进多学科、多领域合作, 结合半导体激光器的特点, 创新的理论研究和实验验证是当前的重点。

三、国内外半导体激光器产业发展现状

半导体激光产业已经成为整个激光产业的基石, 而激光产业也已经成为人类社会生活不可分割的一部分。据统计, 2019 年全球激光器的销售额预计将维持 6% 的增长速度, 达到 146 亿美元。其中半导体激光器的市场规模(包括直接的半导体激光器, 也包括固体激光器与光纤激光器的泵浦源)约为 68.8 亿美元, 占激光器整体市场的 50% 左右, 年增长率约为 15% [22]。

以现有产业结构来看, 整个行业主要包括材料、芯片、器件、模块、系统等几个应用节点, 但无论是上游的材料和芯片产业还是中下游的器件、模块、系统产业无疑都是技术密集和资金密集型产业, 需要大量的技术沉淀积累和巨额的资金投入。

经过数十年的发展, 国外市场客户对产品的成本控制、器件性能的要求越来越全面, 对产品的筛选也越来越严格, 近年来, 受到这些因素的影响, 行业的发展出现了一些新的趋势。

从应用角度来讲, 半导体激光器产品正在从工业应用领域向消费应用领域扩展, 其市场规模可能迎来爆发性的增长, 但竞争也将进一步加剧。2018 年苹果手机中采用 Lumentum 公司的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 作为传感光源是这一趋势的标志性事件。后者通过在消费电子产业的深耕, 带

动和引导了市场的发展方向, 利用创新的应用, 在技术先进性不占优势的情况下, 改变了与 II-VI、Finisar 等公司的竞争格局。

从半导体激光器从业企业的角度看, 其竞争态势与 20 世纪 90 年代的微电子行业有一定的类似之处。都经历了从中小型企业自由竞争, 到通过合并重组产生的“巨无霸”型公司分割市场的竞争路线。如本来在产业界就占优势地位的 Lumentum 与 Oclaro 公司的合并以及 II-VI 与 Finisar 公司的重组, 势必对产业内其他中小型企业的生存现状产生严重影响。

近年来新形式的半导体激光器公司也获得了巨大发展, 包括大型集成设计制造 (IDM) 公司, 代工 (Foundry) 企业, 无生产线 (Fabless) 公司等。

IDM 模式 (垂直集成) 公司, 实际上是进行半导体激光器生产的应用系统公司, 以半导体激光器产品为其核心竞争力, 但并不以它为最终产品形态。以 IPG 光电子公司、相干激光公司 (Coherent) 等固体激光、光纤激光和激光加工企业为代表。他们大多通过并购或自行发展, 在企业内部实现了从材料、芯片、器件、模块、系统的完整集成。最早实现“垂直集成”的 IPG 公司据此奠定了在光纤激光器领域的绝对优势地位, 尽管有多余的生产能力, 但半导体激光器甚至不作为产品出售。

Foundry 企业主要从事外延和芯片工艺方面的工作。外延方面包括英国 IQE、美国英特磊科技有限公司 (IntelliEpi)、台湾省全新光电、日本的住友化学。其中 IQE 所占据的整个外延芯片市场份额已达到 60%, 与 VCSEL 应用相对应的市场份额已达到 80%。芯片工艺方面, 台湾省的稳懋、宏捷科、GCS 环宇占整个芯片代工市场 90% 的市场份额。这类公司具备强大的专项能力和成本控制水平, 可以助力客户实现良好的成本和性能控制。

表 3 几种基于拓扑态的拓扑绝缘体激光器

激光类型	文章类型	波长	发表时间/年
微环共振腔阵列实现边界模式激光	理论 / 实验	1556 nm	2018
体材料拓扑结构阵列中带翻转引起的界面反射形成激光谐振	理论 / 实验	1600 nm	2019
六边形纳米壳核结构拓扑阵列 SPASER	理论	—	2020
蜂窝对称型等离子-光子衍射晶格拓扑相激光	理论 / 实验	1.426 eV ~869.6 nm	2019
基于谷边界态的太赫兹量子级联激光器	理论 / 实验	3.2 THz	2020

Fabless 企业本身只从事半导体激光器设计和封装测试等工作，而委托 Foundry 进行生产。这类企业以中小型为主，但有些大型企业也会以类似的方式将生产进行外包，甚至向 Fabless 企业转换，从而降低整体运营成本。如 Lumentum 尽管本身具有垂直整合能力，但其 VCSEL 的设计和和生产主要由 IQE 和稳懋（WIN）代工完成；而 Avago 则将芯片工艺部分进行了剥离，将其位于科罗拉多的工厂出售给了台湾地区的稳懋，而入股该公司，成为了该公司的第三大股东，生产也委托给稳懋进行。

通常来讲，IDM 公司的半导体激光器在性能和可塑性上更具优势；而通过 Foundry 与 Fabless 企业的组合可以将产品成本控制得更低。

从半导体激光器产业与上下游产业的关系来看，其产业带动能力强、先发效应明显，在产品中的性能比重远大于其价格比重。半导体激光器是系统应用的核心竞争力，对器件的功能和可靠性的系统验证又需要长时间、大样本量的闭环优化，试错成本高，形成了较高的“门槛”。在半导体激光器产业成熟的这一过程中，领先者与追赶者的差距被进一步拉大。这是我国相关行业发展初期所面临的主要问题，尤其在中美贸易战爆发以后，这一问题得到了更充分的暴露。

近年来国家有针对性地对核心芯片进行了大力扶持，在人才和技术储备方面获得了一定的基础，先发效应的影响得到了一定程度的缓解，但各种措施的真正见效，仍然需要一个过程。

我国半导体激光器产业的发展，前弱后强的现象十分严重。在下游系统行业，已经涌现出如华为技术有限公司、中兴通讯股份有限公司等行业龙头企业，光模块企业也有苏州旭创科技有限公司等先进企业可以在国际上与同行进行竞争。然而，在上游的光芯片环节，我国相关企业的研发和生产能力极为不足，材料方面则更甚，相关企业规模均以中小型为主，从实力上难以与国外产品竞争。尽管政府的管理和支持热情很高，但由于非业内人士对芯片行业的认识不足，同质化严重，缺乏耐心和顶层设计，难以形成良好的产业链。整个产业处于有前景的产品无法获得市场，市场资金不愿支持技术开发的恶性循环中。某些成功的系统企业认识到了这一问题，进行了垂直产业整合努力，但遇到了较大的困难，进展缓慢。

四、我国在半导体激光行业的发展需求

我国在半导体激光行业发展的首要需求是保障国家战略安全。半导体激光器是光通信、激光传感、激光加工、激光泵浦的核心元器件，还可以直接应用于激光雷达、激光测距、激光武器、导弹制导、光电对抗等领域。

建设完整的闭环产业链条，形成正反馈，通过市场应用，促进前端核心芯片的加速成熟，利用成熟的芯片技术，带动新成果和新应用的落地是我国相关产业发展应该选择的最佳路径。

我国半导体激光器产业长期处于追赶阶段，在某些领域实现引领是行业发展的迫切需求。从实际出发，针对新应用，开发新器件，占据“先发优势”，是实现超越的有效途径。

基于以上考虑，距市场真正成熟仍有一定发展距离的新体制激光器产业，无疑是解决这一矛盾的重要突破口。

首先，我国在新体制激光器的研发方面与国外的差距相对较小。受到近年来政策偏向的支持，我国在交叉学科融合以及新兴半导体激光器领域已经有了长远的发展。尤其在微纳光学和微纳激光领域，我国的科研人员通过国际合作参与或主持了许多世界顶尖的研究成果，如果能够将这些成果进行产业化转移，必定会为我国新体制半导体激光器产业的发展奠定良好的基础。其次，新体制激光器涉及基础物理领域。我国近年来重视基础学科建设，为新体制激光器的发展提供了人才基础和发展后劲。最后，在新体制激光器产业领域，国外的发展与我们一样处于起步阶段，通过国家的资金和政策支持，我国的新体制激光器发展将有能力在世界新体制激光器产业的发展中占有一席之地。

技术的积累和产业的发展不能一蹴而就，在看到希望的同时也要正视所遇到的困难。我国半导体激光器产业的发展仍然处于相对落后的状态，无论是技术理论、人才储备还是工艺流程和生产设备都远远落后于国外的先进企业。企业规模仍然以中小型民营企业为主，所生产的产品也主要面对中低端应用，无法实现本质上的产业变革。技术输出仍然以单一技术或单一专利为基础，无法形成完整的产业链发展，更无法建立完善的“产学研”结合体系。制造设备仍然以进口设备为主，强烈依赖于国外的

技术输出, 无法实现真正的自主知识产权。所以, 相关方向的政策扶植迫在眉睫。

五、对策建议

半导体激光产业是关系国计民生的基础产业之一, 半导体激光器产业的发展对我国在现代信息化社会的竞争中抢占先机具有重要意义。充分发挥我国在市场方面的优势开发新应用, 坚持自主的原则发展新技术, 鼓励新概念和学科交叉发展新理论, 实现新体制的半导体激光器发展。新体制半导体激光器产业的竞争领域在国际范围内仍有广阔的疆土。结合我国的政策优势、科技发展水平和人才储备, 在未来的 10~20 年我们有希望在新体制半导体激光器领域内培育出可以与世界领先激光产业巨头相抗衡的优秀企业, 为抢占战略制高点, 为半导体激光产业的进一步发展提供源动力。

首先, 鉴于当前半导体激光器产业发展中的困难和挑战, 我国在近期的首要任务是有选择、有针对性地扶植适用于特种应用的半导体激光器的研制和生产, 如针对高功率、窄线宽、特殊波长等应用, 进行相关科研和技术攻关及企业技术转移。充分评估国产器件性能, 正视差距, 努力提升, 保证国家装备安全。

其次, 在民用领域, 推动成本敏感的半导体激光器国产化替代, 充分利用市场导向和企业自身动力, 辅以地方政策引导扶植, 注重相关产品的差异化, 避免一窝蜂式发展是当前的一个重要目标。例如, 相比电信应用, 数据中心应用中光器件和模块生命周期短、维护较方便, 进入门槛相对较低; 在激光加工系统中, 半导体激光器成本占比高, 中低功率材料加工企业具有较高的替代意愿, 也是国产器件的突破口。在这一过程中, 还可以进一步培育企业, 培养人才。

最后, 挖掘已有技术的应用潜力。对于成熟的或者接近成熟的一些半导体激光器, 如新体制的垂直外腔面发射激光器等, 从实际应用出发, 进行开发或二次开发, 推进技术的横向拓展和领域交叉, 针对新应用进行有针对性的技术提升, 利用与应用厂商的紧密联系占据“先发优势”。

在中长期, 主要目标是实现高端半导体激光器的国产化和自主发展, 需要国家层面更多的参与甚

至主导, 必要时可以采用政策扶植, 资金和专项经费倾斜等手段。

(1) 充分利用我国在应用端的巨大优势, 鼓励 IDM 模式公司或者公司群的建立。可以采用引导成立多个具有稳定合作关系的纵向企业集团的方式, 实现器件开发和应用的反馈闭环, 促进前端核心材料和器件的成熟。

(2) 下大力气鼓励和引导国产器件的应用。采用国家投资或补贴的方式, 建立完整的国产化替代示范平台, 在实际应用条件下实现国产化核心器件评估; 在此基础上以政策倾斜、财政补贴等方式鼓励国产器件应用。

(3) 建立具有芯片代工厂功能的全自主的、完整的新技术开发通用平台, 以对技术水平要求高的新体制微纳激光器为牵引, 同时满足无生产线企业的激光器制备需求, 提升综合能力。尤其要弥补短板, 掌握核心技术和关键工艺, 避免“卡脖子”问题, 为新型半导体激光器的发展提供技术保障。

(4) 鼓励新概念、新器件, 提前布局, 掌握先发优势。开展包括拓扑绝缘体激光器等新体制半导体激光器及其相应工艺的研究; 鼓励跨行业 and 前后端交流, 在适当阶段由新概念开发转入针对具体应用的技术开发。

参考文献

- [1] Yushi K, Yarborough J M, Li L, et al. Continuous-wave all-solid-state 244 nm deep ultraviolet laser source by fourth-harmonic generation of an optically pumped semiconductor laser using CsLiB₆O₁₀ in an external resonator [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(15): 1705–1707.
- [2] Bondaz T A G, Lawrain A, Moloney J V, et al. Generation and stabilization of continuous-wave THz emission from a bi-color VECSEL [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(19): 1569–1572.
- [3] Heinen B, Wang T L, Sparenberg M, et al. 106 W continuous-wave output power from vertical-external-cavity surface-emitting laser [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(9): 516–517.
- [4] Wilcox K G, Quarterman A H, Apostolopoulos V, et al. 175 GHz, 400-fs-pulse harmonically mode-locked surface emitting semiconductor laser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7040–7045.
- [5] Quarterman A H, Wilcox K G, Apostolopoulos V, et al. A passively mode-locked external-cavity semiconductor laser emitting 60-fs pulses [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(12): 729–731.
- [6] Kantola E, Leinonen T, Ranta S, et al. High-efficiency 20 W yellow VECSEL [J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6372–6380.
- [7] Hermann P K, Nechay K, Penttinen J. AlGaAs-based vertical-external-cavity surface-emitting laser exceeding 4 W of direct

- emission power in the 740–790 nm spectral range [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1578.
- [8] Wilcox K G, Tropper A C, Beere H E, et al. 4.35 kW peak power femtosecond pulse mode-locked VECSEL for supercontinuum generation [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1599–1605.
- [9] Heinen B, Wang T L, Sparenberg M, et al. 106 W continuous-wave output power from vertical-external-cavity surface-emitting laser [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(9): 516–517.
- [10] Hou G Y, Shu S, Shi S Z, et al. High power (>27 W) semiconductor disk laser based on pre-metalized diamond heat-spreader [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(2) 1–8.
- [11] Klopp P, Griebner U, Zorn M, et al. Pulse repetition rate up to 92 GHz or pulse duration shorter than 110 fs from a mode-locked semiconductor disk laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(7): 1–3.
- [12] Rantamäki A, Rautiainen J, Sirbu A, et al. 1.56 μm 1 watt single frequency semiconductor disk laser [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2):2355–2360.
- [13] Kaspar S, Rattunde M, Tino Töpfer, et al. Linewidth narrowing and power scaling of single-frequency 2.X μm GaSb-based semiconductor disk lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2013, 49(3): 314.
- [14] Hill M T, Yok-siang O, Barry S, et al. Lasing in metallic-coated nanocavities [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1: 589–594.
- [15] Li Y Z, Zhang J X, Huang D, et al. Room-temperature continuous-wave lasing from monolayer molybdenum ditelluride integrated with a silicon nanobeam cavity [J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12: 987–992.
- [16] Harari G, Bandres M A, Lumer Y, et al. Topological Insulator Laser: Theory [J]. *Science*, 2018, 359(6381): 1–6.
- [17] Bandres M A, Wittek S, Harari G, et al. Topological insulator laser: Experiments [J]. *Science*, 2018, 359(6381): 1–5.
- [18] Shao Z K, Chen H Z, Wang S, et al. A high-performance topological bulk laser based on band-inversion-induced reflection [J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(1): 67–72.
- [19] Guo R, Necada M, Hakala T K, et al. Lasing at K Points of a honeycomb plasmonic lattice [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(1): 1–6.
- [20] Wu J S, Apalkov V, Stockman M I. Topological spaser [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124: 1–6.
- [21] Zeng Y Q, Chattopadhyay U, Zhu B F, et al. Electrically pumped topological laser with valley edge modes [J]. *Nature*, 2020, 578: 246–250.
- [22] 中国科学院武汉文献情报中心, 中国激光杂志社, 中国光学学会. 中国激光产业发展报告2019 [R]. 武汉: 中国科学院武汉文献情报中心, 中国激光杂志社, 中国光学学会, 2019. Wuhan Library, Chinese Academy of Sciences, Chinese Journal of Lasers, the Chinese Optical Society. Annual report on Chinese laser industry refined edition 2019 [R]. Wuhan: Wuhan Library, Chinese Academy of Sciences, Chinese Journal of Lasers, the Chinese Optical Society, 2019.