

光学学报

大功率半导体激光器发展及相关技术概述

宁永强, 陈泳屹*, 张俊**, 宋悦, 雷宇鑫, 邱橙, 梁磊, 贾鹏, 秦莉, 王立军

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, 吉林 长春 130033

摘要 激光被称为“最快的刀”、“最准的尺”、“最亮的光”, 与原子能、计算机、半导体并称为 20 世纪新四大发明。大功率半导体激光器在工业加工、医疗美容、光纤通信、无人驾驶、智能机器人等方面有着广泛的应用。如何实现大功率半导体激光光源, 一直以来都是国际的研究前沿和学科热点。为此, 简述了大功率半导体激光器的发展历史, 综述了大功率半导体激光器的共用技术, 包括大功率芯片技术和大功率合束技术, 并对大功率半导体激光的发展方向进行了展望。

关键词 激光器; 半导体激光器; 大功率; 芯片技术; 合束技术

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0114001

Brief Review of Development and Techniques for High Power Semiconductor Lasers

Ning Yongqiang, Chen Yongyi*, Zhang Jun**, Song Yue, Lei Yuxin,
Qiu Cheng, Liang Lei, Jia Peng, Qin Li, Wang Lijun

State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract Laser is called “the fastest knife”, “the most accurate ruler”, and “the brightest light”. Together with the atomic energy, computer, and semiconductor, they are called the four new inventions in the 20th century. High power semiconductor lasers are widely used in industrial processing, medical cosmetology, optical fiber communication, unmanned driving, intelligent robot, and so on. How to realize high power semiconductor laser source has always been an international research frontier and a hot topic. Thus, the development history of high-power semiconductor lasers is briefly described. The common technologies of high-power semiconductor lasers, including high-power chip technology and high-power beam combining technology, are summarized. Finally, the development direction of high-power semiconductor lasers is prospected.

Key words lasers; semiconductor laser; high power; chip technology; beam combining technology

OCIS codes 140.5960; 140.2020

1 引言

半导体激光器具有体积小、重量轻、电光转换效率高、可靠性高和寿命长等优点, 在工业加工、生物

医疗和国家防御等领域具有重要的应用^[1-10]。1962 年, 美国科学家成功研制出了第一代 GaAs 同质结构注入型半导体激光器^[11-12]。1963 年, 前苏联科学院约飞物理研究所的 Alferov 等^[13-14]宣布成功研制了

收稿日期: 2020-08-04; 修回日期: 2020-08-28; 录用日期: 2020-08-31

基金项目: 国家重点研发专项 (2016YFE0200700, 2017YFB0503100, 2017YFB0405100, 2018YFB0504600, 2018YFB2200300)、国家自然科学基金 (11874353, 61935009, 61934003, 61674148, 61904179, 61727822, 61805236, 61991433)、中科院前沿科学重点研究项目 (QYZDY-SSW-JSC006)、吉林省科技发展计划重点科技研发项目 (20190302042GX, 20200401069GX, 20200401062GX)、集成光电子重点实验室公开项目 (IOSKL2018KF21)、长春光机所旭光人才计划项目

* E-mail: chenyy@ciomp.ac.cn; ** E-mail: 13604315686@163.com

双异质结半导体激光器。20 世纪 80 年代以后,由于引入了能带工程理论,同时涌现了晶体外延材料生长新工艺[如分子束外延(MBE)和金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)等],量子阱激光器登上历史舞台,大大提升了器件性能,实现了高功率输出。

大功率半导体激光器主要分为单管与 Bar 条两种结构^[15],单管结构多采用宽条大光腔的设计,并增加了增益区域,以实现高功率输出,减少腔面灾变损伤;Bar 条结构为多个单管激光器的并联线阵,多个激光器同时工作,再经过合束等手段实现高功率激光输出。最初的大功率半导体激光器主要应用于泵浦固体激光器和光纤激光器,波段主要为 808 nm 和 980 nm。随着近红外波段高功率半导体激光单元技术的成熟和成本的降低,使得以之为基础的全固态激光器和光纤激光器性能不断提升,单管连续波(CW)输出功率从 20 世纪 90 年代的 8.1 W 达到 29.5 W^[16]水平,bar 条 CW 输出功率达到 1010 W^[17]水平、脉冲输出功率达到 2800 W^[18]水平,极大地推动了激光技术在加工领域的应用进程。半导体激光器作为泵浦源的成本占固体激光器总成本的 1/3~1/2,占光纤激光器的 1/2~2/3。因此,光纤激光器和全固态激光器发展之快,大功率半导体激光器的发展功不可没。

随着半导体激光器性能的不断改进、成本的不断降低,其应用范围也越来越广。如何实现大功率的半导体激光器一直以来都是研究的前沿和热点。

实现大功率的半导体激光芯片,需要从材料、结构和腔面保护这三个方面考虑:

1) 材料技术。可以从提高增益和防止氧化两方面入手,对应的技术包括应变量子阱技术和无铝量子阱技术。

2) 结构技术。为了防止芯片在高输出功率下烧毁,通常采用非对称波导技术和宽波导大光腔技术。

3) 腔面保护技术。为了防止灾变光学镜面损伤(COMD),主要技术包括非吸收腔面技术、腔面钝化技术和镀膜技术。

随着各行各业的发展,无论是作为泵浦源,还是直接应用,都对半导体激光光源提出了进一步的需求。在需求更高功率的情况下,为了保持高光束质量,就必须进行激光合束。

半导体激光合束技术主要包括:常规合束(TBC)、密集波长合束(DWDM)技术、光谱合束(SBC)技术、相干合束(CBC)技术等。本文主要对上述技术进行了概述。

2 实现大功率激光的重要技术手段

2.1 边发射大功率半导体激光芯片技术

2.1.1 材料技术

2.1.1.1 应变量子阱技术

量子阱作为半导体激光器最广泛采用的有源区,其内部表现出量子化的子带和阶梯状态密度,将大大提高激光器的阈值电流密度和温度稳定性;通过改变势阱宽度和势垒高度,可以改变量子化的能量间隔,实现激光器的可调谐特性,与传统的双异质结半导体激光器相比,可以有效地降低激光器的阈值电流,提高量子效率与微分增益。而在量子阱中引入应变则会显著地改变其本身的能带结构,通过调整价带中的重、轻空穴带的位置,从而增加芯片外延结构的设计参数和自由度。一般来说,在 III-V 族三元和四元材料组成的量子阱外延结构中引入压应变,会加剧能带函数的变化,从而降低激光器的阈值电流;而引入张应变,则会平缓能带函数,在一定程度上提高材料在大功率下工作状态下的增益。应变量子阱的出现使得通过调节应变获得所需能带结构并提高增益成为了可能^[19-20],使半导体激光器的性能出现了大的飞跃。

1984 年, Laidig 等^[21]最早报道了基于应变 InGaAs/GaAs 量子阱的激光器,在较高的阈值电流密度(1.1 kA/cm²)下获得了波长为 1 μm 的激光,通过完善工艺将阈值电流密度降低到 465 A/cm²^[22]。1991 年 AT & T Bell 实验室利用 MBE 方法降低了阈值电流——低至 45 A/cm²,基本达到理论极限^[23]。1993 年 7 月,日本的 Hayakawa 等^[24]利用 GaAs/AlGaAs 张应变量子阱得到了输出波长在 780 nm 的横磁(TM)模 CW 激光器。

2.1.1.2 无铝量子阱技术

无铝材料激光器相比有铝材料激光器具有明显的优势:

1) 无铝材料比含铝材料具有更高的 COMD 功率密度。有源区中的铝容易氧化和产生暗线缺陷,致使发生 COMD 时的功率密度减小,更容易产生 COMD,从而限制了激光器的功率和寿命。

2) 同时,相对于含铝量子阱,无铝量子阱的电阻更低、热导率更高,因而表面复合速率低、表面温升低、腔面退化速率慢,对暗线缺陷的攀移有抑制作用,且材料内部退化速率慢。

在 1998 年,美国的 Pendse 等^[25]最初提出,无铝量子阱激光器具有更高的可靠性。1999 年,美国

的 Mawsi 等^[26]对与 GaAs 晶格匹配的 InGaAsP 单量子阱激光器的可靠性进行了研究,证明了无铝器件的端面温升比含铝的 AlGaAs 激光器低得多,并在 10 °C 工作温度下,获得了 3.2 W 的最大输出功率。2008 年,中国电子科技集团公司第十三研究所报道了无铝 1 mm 腔长的准连续阵列输出功率可达 40 W,无铝 1 cm 长的镀膜 bar 条在 180 A 工作电流下,输出功率大于 185 W^[27]。2013 年,山东大学报道了无铝有源区在 20 A 工作电流下,输出功率达 20.86 W 的激光器^[28]。

2.1.2 波导结构技术

2.1.2.1 非对称波导技术

在大光腔结构中,随着波导尺寸的增加,器件的串联电阻也会增加。故为降低串联电阻,通常对 p 型限制层施以较高的掺杂。实验研究发现,光吸收正比于掺杂区的掺杂浓度,并且在 p 型材料中被空穴吸收光子的损耗大于在 n 型材料中被电子吸收光子的损耗^[29-32]。这样,在对称波导结构中,p 型高掺杂区载流子的光吸收是形成内部损耗、导致效率降低的主要原因。可以通过 p 型波导和 n 型波导的厚度非对称,折射率非对称等调节方式,让光场分布尽量限制在 n 型区域内扩展,从而降低串联电阻和内部损耗,获得较高的效率。

2007 年,中国科学院半导体研究所报道了无铝有源区非对称波导结构激光器,波长为 808 nm,连续工作条件下,输出功率可达 6 W^[33],2009 年实现了 980 nm 半导体激光,内损耗仅有 0.78 cm^{-1} ^[34],2010 年,实现了 980 nm 半导体激光效率 58.4%^[35]。2013 年,日本的 Morita 等^[36]实现了条宽为 100 μm ,腔长为 4 mm,CW 输出功率为 19.8 W,20 °C 温度下转换效率 68% 的半导体激光器。2020 年,芬兰的 Ryvkin 等^[37]通过对非对称波导的折射率、限制因子、载流子浓度、内部损耗等方面的模拟分析,最终设计了短腔结构计算出 CW 输出功率达 40 W 的半导体激光器。

2.1.2.2 大光腔技术

为了获得高输出功率,提高 COMD 阈值,需要降低有源区与限制层的光场能量密度。这就需要增大波导的尺度,增加光斑的尺寸,拓宽光场分布,这就是大光腔技术。在增加波导尺度的同时,可以优化波导结构,降低激光器的远场快轴光束发散角。

2005 年,德国的 Knauer 等^[38]实现了 808 nm 大光腔结构,获得了 25 °C 温度下,CW 输出功率为 15 W,快轴远场发散角为 18°。2006 年,Bookham

公司采用 InGaAs/AlGaAs 材料,设计了渐变折射率大光腔芯片,在温度为 16 °C、电流为 20 A 时,获得了大于 17 W 的 CW 输出功率^[39]。2008 年,Xu 等^[40]采用 InAlGaAs/AlGaAs/GaAs 材料的渐变折射率新型大光腔结构,实现了 25 °C 温度下 CW 输出功率为 23 W 的 915 nm 激光器。2009 年,德国的 Crump 等^[41]采用 InGaAs/GaAsP 材料和芯径 2.5 μm 的大光腔结构,得到了 CW 输出功率为 20 W 的 975 nm 单管半导体激光器,寿命大于 4000 h。2015 年,北京工业大学凌小涵等^[42]设计了 980 nm 大光腔单发光条大功率半导体激光器,其 CW 输出功率达到 12 W,经老化实验得到器件综合成品率达到 40%。2019 年,长春理工大学的乔闯等^[43]设计并制作了非对称大光腔结构,制备了 890 nm 周期的分布式布拉格反射镜(DBR)光栅,最终实现了输出功率为 10.7 W,斜率效率为 0.73 W/A 的激光输出。

2.1.3 腔面技术

2.1.3.1 非吸收腔面技术

通过增大腔面附近量子阱带隙宽度,使得腔面处对激光波长透明,这就是非吸收腔面技术。非吸收腔面可以减少因非辐射复合和光吸收产生的热量及光子载流子的数量,是提高半导体激光器输出功率和可靠性的有效方法。目前,非吸收腔面的制作方法主要包括:二次外延生长技术和量子阱混合技术。二次外延生长是通过刻蚀、再生长一种宽带隙半导体材料。这种方法技术难度大、工艺复杂,难以保证结合界面的晶体质量^[44]。量子阱混合技术通过在外延片上进行薄膜淀积或杂质注入,再通过高温快速退火,使各组成元素发生互扩散,导致阱、垒组分发生变化,从而增大带隙结构。这种方法操作相对简单,成本低,效果较为明显^[45],但需要高温条件下进行热退火,可能会对器件造成一定的损伤。

1984 年,英国电信研究实验室利用选择性外延生长技术制备出非吸收腔面的 AlGaAs 大光腔激光器,在脉冲输出(脉宽为 100 ns)时,得到的输出功率是普通激光器的 2~3 倍^[46]。1999 年,日本京都大学制备出带有非吸收腔面的 780 nm AlGaAs/GaAs 大功率半导体激光器,最大输出功率是传统激光器的 3 倍^[47]。2000 年,英国格拉斯哥大学制备了具有非吸收腔面的 GaAs/AlGaAs 半导体激光器,在发生 COMD 时的最高输出功率是普通激光器的 2 倍^[48]。2015 年,滨松光电子股份有限公司制备了带隙差为 100 meV 的非吸收腔面,915 nm 波段

InGaAs 宽条半导体激光器的连续输出功率为 20 W,可靠工作时间在 5000 h 以上,最大效率超过 65%^[49]。

2.1.3.2 腔面钝化技术

半导体激光器的自然解理面极易被潮解和氧化,氧化物和沾污易成为非辐射复合中心,从而加剧腔面结温升高的急剧上升,最终导致 COMD,使得器件失效。腔面钝化能够有效地去除半导体激光器腔面的沾污和氧化层等杂质,降低腔面的表面态密度,从而有效提高器件的热稳定性、抑制 COMD,最终提升最大输出功率并提高器件的可靠性,为高性能和稳定工作提供保障。

1987 年,贝尔通讯研究公司的 Sandroff 等^[50]发明了腔面硫化处理技术。采用 $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 溶液将 GaAs/AlGaAs 异质结双极晶体管(HBTs)腔面钝化,经硫化处理后的 HBT 电流增益提高了 60 多倍。1996 年,Syrbu 等^[51]在蒸镀高反/增透膜前利用原位生长 ZnSe 技术,将 980 nm InGaAs 半导体激光器腔面钝化,使激光器连续输出功率提高 50%。1997 年,美国威斯康星大学的 Mawst 等^[52]利用激光辅助化学气相沉积法在 InGaAs 双量子阱半导体激光器腔面处形成 ZnSe 钝化层,将器件 COD 阈值提高了 50%。2005 年,德国的 Ressel 等^[53]报道了腔面钝化无铝有源区大功率半导体激光器,在激光器的老化过程中表现出优异的性能。2016 年,北京工业大学利用离子铈氮钝化处理 980 nm 半导体激光器腔面,得到了 CW 输出功率为 22.5 W,器件输出功率提高了 32.14%^[54]。2019 年,中国科学院半导体研究所采用射频等离子体增强反应磁控溅射沉积 $\alpha\text{-SiN}_x$ 薄膜对 980 nm 光子晶体激光器进行腔面钝化。通过优化氮-氩混合等离子体并采用快速退火的方法,显著抑制了 COMD,提高了器件的性能和激光系统的稳定性^[55]。2019 年,中国科学院半导体所在真空中直接蒸镀一层厚度为 25 nm 的 ZnSe 材料作为钝化膜,利用 ZnSe 薄膜材料大禁带宽度的特性作为半导体激光器腔面钝化膜,有效提高半导体激光器输出功率和器件损伤阈值,提供腔面保护^[56]。

2.1.3.3 镀膜技术

腔面镀膜技术是大功率激光器的关键工艺技术之一,其作用有两个:1)覆盖解理腔面,防止有源区氧化,提高可靠性和稳定性;2)改变腔面膜反射率,使得激光器在保持性能的基础上实现单面出光,提高激光器的输出功率和激光的利用效率。因为激光

器的腔面是晶体的自然解理面(110 面),其反射率约为 31%,在激光器工作时,由于激光器前后腔面反射率大小一样,因而造成两个腔面同时出光。通过腔面镀膜在激光器的前后腔面分别制备增透膜和高反射膜,高反膜降低了阈值电流,而增透膜提高了器件的量子效率和电-光转换效率。

该技术主要内容有两个方面:一是膜系材料的选择。首先要考虑镀层材料的高纯度、长期稳定性、附着力、镀层材料与自然解理面之间的热匹配和应力匹配、镀层材料之间的晶格匹配等。同时还要易于蒸镀,不会对激光器的自然解理面产生破坏,能够防止环境气氛扩散进入器件发光区。二是确定高反膜的反射率和增透膜的透射率,基本原则是:通过后腔面发射的光尽可能少,使激光尽可能由前腔面透过,同时又不引起明显的腔面附加吸收和附加损耗。对于增透膜,膜系材料可以选择折射率介于波导层有效折射率与空气折射率之间的材料。通常选择 Al_2O_3 、 SiO_2 作为低折射率材料, ZrO_2 、 TiO_2 等作为高折射率材料。高反膜的反射率一般采用 95%~98%,增透膜的反射率一般采用 1%~5%。

2.2 大功率半导体激光合束技术

处于近红外波段(750~1100 nm)的边发射结构半导体激光器发展最为成熟,是当前用于泵浦和加工的大功率半导体激光源主要形式。根据激光单元数量,激光芯片可分为单管和线阵,前者为单个激光单元,可连续输出几瓦至数十瓦功率,后者为多个激光单元在水平方向的集成,可连续输出几十瓦至数百瓦功率。对于激光线阵,根据集成单元方向宽度,可分为宽度 10 mm 的厘米线阵和宽度小于 10 mm 的迷你线阵。将激光芯片在水平或垂直方向进行一维或二维的光叠加或物理位置叠加,进一步提高输出功率,如采用微通道封装的激光线阵在垂直方向物理叠加成叠阵,可输出上千瓦功率,但也导致其整体光束质量恶化。在提升功率时,如何获得高光束质量半导体激光成为关键。激光合束是实现大功率、高光束质量半导体激光的有效技术途径之一,它通过几何或物理光学手段,将多个单元光束合成一束激光。根据合束激光单元的相干性,分为相干合束和非相干合束。相干合束要求精确控制合束单元的光谱、相位等特性,技术较复杂,且相干合束半导体激光源的性能优势并不明显,当前未实用化。非相干合束无需考虑单元之间的相干性,技术相对简单,是当前实用化大功率半导体激光合束光源的主要实现方式。非相干合束可分为传统合束技

术、密集波长合束和光谱合束。下面对非相干合束技术进展进行概述。

2.2.1 TBC 技术

常规合束技术基于标准的半导体激光芯片,在合束过程中,不影响激光单元腔内谐振,仅通过外部光学元件对激光芯片输出光束进行整形、空间合束、偏振合束和波长合束来提升整体功率、改善整体光束质量,是当前实现大功率半导体激光源的主要方式。

其中,空间合束是利用折射或反射,将多束光在空间上进行一维或二维堆叠,增加功率的同时光束质量变差;偏振合束利用半导体激光的线偏振特性,将振动方向相互垂直的两束线偏振光通过偏振合束元件,其中 P 偏振光透射、S 偏振光反射,光场实现近场和远场重叠,功率提升近 2 倍的同时光束质量不变;波长合束是利用激光波长特性,通过波长合束元件,其中波长 λ_1 的光透过(反射),波长 λ_2 光反射(透过),两束光实现近场和远场重叠,功率提升的同时光束质量不变,通过采用不同的波长合束元件,可以实现多束不同波长($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$)的激光合束,考虑到半导体激光器自身谱宽、光谱受温度及电流影响等因素,常规波长合束的相邻波长间隔一般不低于 25 nm。

根据不同封装形式,基于常规合束技术,目前已发展出激光单管合束光源、线阵合束光源和叠阵合束光源,实现了几十瓦至数万瓦级的直接输出或光纤耦合输出,应用在光纤激光泵浦、激光加工等方面。

单管合束光源直接采用激光单管进行合束,由于热源相对分散,热流密度相对低,相同热功率影响下可以采用更高电流驱动,激光单元可输出超过十瓦的功率及 $1 \text{ MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 量级的亮度,合束后可从芯径 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 光纤中输出几十瓦至千瓦的单波长激光,光束质量为 $6 \sim 20 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,具有亮度高、成本低及可靠性好等优点,应用在光纤激光泵浦、激光医疗、激光照明等领域。尤其是在光纤激光器泵浦需求牵引下,单管合束光源的性能出现了快速提升,而成本也大幅度下降。美国 nLight 报道采用多个大功率、高光束质量的 975 nm 激光单管,通过空间及偏振合束后进行光纤耦合,实现芯径 $105 \mu\text{m}$ 的光纤连续输出功率 363 W,芯径 $220 \mu\text{m}$ 的光纤连续输出功率 1000 W,可以用于光纤激光器的泵浦^[57]。北京凯普林光电科技有限公司采用 156 个波长被体布拉格光栅(VBG)锁定至 975.5 nm 的激光单管,通过空间叠加和偏振合束,使得芯径

$200 \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的光纤实现输出 1037 W 的稳波长、窄线宽激光^[58],以增加光纤激光器泵浦效率。

线阵合束光源多采用光束质量相对较好的迷你线阵(5~10 个激光单元)或者填充因子较低的厘米线阵(填充因子 $< 20\%$),单线阵功率为 40~80 W,合束后功率一般在几百瓦至数千瓦,耦合光纤芯径为 $200 \sim 600 \mu\text{m}$,光束质量为 $20 \sim 60 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,主要应用在激光焊接等工业加工领域。由于单管合束光源性能的快速提升,通过多个单管合束光源的组合,已经能够达到线阵合束光源的性能指标,考虑到单管合束光源的成本及可靠性等因素,线阵合束光源已有被单管合束光源取代的趋势。

叠阵合束光源采用微通道封装的激光线阵合束,借助微通道热沉的高效散热能力以及激光芯片多为高填充因子结构,单层微通道线阵输出功率可达数百瓦,多层线阵垂直叠加后可输出数千瓦至万瓦级功率,通过波长合束可以将功率提升到更高水平。德国 Laserline 研发出系列大功率光纤耦合产品,连续输出功率从 1.5 kW(芯径 $400 \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.1)到 45 kW(芯径 $2000 \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.2)^[59]。目前,叠阵合束光源多用于激光熔覆、表面硬化等对激光功率要求高、光束质量要求低的工业加工方面。

2.2.2 DWDM 技术

相对于常规合束相邻波长间隔不低于 25 nm 而言,密集波长合束可将波长间隔缩小至纳米量级,在不改变光束质量条件下,数倍增加激光单元数量,可以提高合束光源功率和亮度。

密集波长合束关键器件:1)中心波长稳定的窄线宽激光单元,可以通过直接在芯片刻蚀光栅或者通过 VBG 外腔反馈调制光谱实现;2)波长间隔较小的合束元件,如高波长陡度的二向分色元件、合束 VBG 等。

德国弗劳恩霍夫激光技术(ILT)研究所采用内置光栅方式,直接在集成 5 个激光单元的迷你线阵上刻蚀不同周期光栅,5 个激光单元输出中心波长间隔为 2.5 nm 的 5 束不同波长激光^[60],再采用 4 个二向分色镜合束,最终耦合进 $35 \mu\text{m}$ 光纤^[61]。该方法实现的窄线宽单元结构稳定,但是芯片光栅工艺要求非常高,一旦某个单元的光谱和位置关系出现偏差,则合束效率急剧降低。

VBG 外腔反馈是当前实现窄线宽激光输出的主要方式,所采用的半导体激光芯片前腔面镀增透

膜,其后腔面与 VBG 构成谐振腔,利用 VBG 衍射光作为种子光调控起振光谱,可实现谱宽窄至 0.1 nm、温度漂移 0.01 nm/°C 的激光输出。基于该技术,德国 DILAS 公司从芯径 100 μm、数值孔径 0.2 的光纤中输出功率达 410 W^[62]。德国 ILT 研究所从芯径 100 μm、数值孔径 0.17 的光纤中输出功率超过 800 W^[63];该研究所也以 VBG 作为合束元件,通过精密温控和角度调节 4 片 VBG,实现 5 个中心波长间隔 1.5 nm 的激光合束^[64]。德国 DirectPhotonics Industries 公司也推出了功率为 500~2000 W、光束质量为 5 mm·mrad、芯径为 100 μm 的光纤耦合半导体激光源产品^[65],应用在金属切割领域。密集光谱合束技术将芯径为 100 μm 光纤耦合半导体激光源的输出功率提升到千瓦量级,相对于常规合束光源,功率和亮度提升了近 1 个数量级。

2.2.3 SBC 技术

相对于前面两种采用多个合束元件实现多波长激光合束而言,光谱合束技术仅利用单个色散元件即可实现多束波长间隔低至 0.1 nm 的激光合束,进一步提高了合束单元的数量,在相同光束质量下,增加了合束功率和亮度。

目前采用的光谱合束结构基本构架由美国麻省理工学院于 2000 年最先报道,他们对推动该技术的

发展做了很多工作^[66-68]。该合束基本结构由前腔面增透的半导体激光芯片、变换透镜、光栅和外腔镜构成,激光芯片输出的单元光束经变换透镜作用到光栅同一位置,然后经光栅和外腔镜的共同作用,部分光沿原路返回形成种子光,辅助腔内谐振,部分光直接输出。返回的种子光的起振波长严格满足光栅方程,由于各子光束的光栅入射角不同而衍射角相同,使得各激光单元起振在不同的波长,经过外腔镜输出的激光在近场和远场均重合,因此实现合束功率为所有单元之和、合束光束质量与单个激光单元一致的激光输出。经过技术转化,美国 Teradiode 公司推出了功率为 1 kW(芯径为 50 μm)、2~12 kW(芯径为 100 μm)光纤输出系列产品^[69],并报道了功率为 360 W、2 倍衍射极限^[70]、亮度达到 10 GW/(cm²·sr)的半导体激光源,直接将大功率半导体激光的亮度提高 2 个数量级,为大功率、高亮度半导体激光器的发展指明新方向。

表 1 为 12 kW 连续输出功率下,基于光谱合束的半导体激光器与其他商用激光器的亮度对比,可以看出,半导体激光器超过了 CO₂ 激光器、达到了 Disk 激光器的水平。同时光谱合束也将芯径 100 μm 光纤耦合半导体激光源的功率提升到千瓦量级,相对于常规合束技术,其功率和亮度提升了近 2 个数量级。

表 1 12 kW 连续功率下的各种激光器的亮度对比

Table 1 Brightness comparison of various lasers under 12 kW continuous power

Lasers	CW output power /W	Beam quality / (mm·mrad)	Lightness / [MW/(cm ² ·sr)]	Company
CO ₂ lasers	12000	12.83	739	Trumpf(Germany)
Disk lasers	12000	4	7607	Trumpf(Germany)
Fiber lasers	12000	0.34	1052844	IPG(USA)
Spectral beam combing	12000	4	7607	Teradiode(USA)

德国 Trumpf 提出一种将窄带滤光片用于外腔反馈波长锁定结构^[71],通过镀膜,使窄带滤光片具有角度-波长筛选特性,只有同时满足入射角和波长条件的光才能透过滤光片,这使得激光芯片上不同位置的激光单元起振在不同的波长,实现了波长调制。利用该技术,进一步结合光栅技术,在 200 μm 芯径的光纤中实现输出功率超过 5 kW^[72]。

激光合束技术除了应用在上述近红外波段外,在可见光、中红外波段也实现了广泛应用。受激光显示、汽车大灯及铜、金等金属加工等应用的驱动,基于 GaN 基的蓝光激光器在近几年出现了井喷式

的发展。日本 Nichia^[73]、德国 OSRAM^[74]、日本 Panasonic^[75] 等公司相继推出了大功率的蓝光激光器芯片。据 Nichia 报道,条宽 45 μm、腔长 1.2 mm 的蓝光单管半导体激光器的连续功率超过 6 W,在 3 A 电流驱动下,5.67 W 功率输出时,电光转换效率达到 48% 以上^[76]。德国 OSRAM 研制的激光阵列输出功率达到 107 W^[77],并研制出可满足 -40 °C ~ +120 °C 工作温度的蓝光激光器^[78]。基于蓝光芯片,采用与近红外波段相似的合束技术,德国 Laserline^[79]、美国 Coherent^[80] 和美国 NUBURU^[81] 等公司相继报道了千瓦级的蓝光激光器,用于铜的

焊接、三维打印等。其中,美国 NUBURU 报道芯径 100 μm 光纤输出蓝激光功率高达 1.5 kW。意大利 Riva 等^[82]采用波长间隔 4 nm 的 3 种蓝光模块通过密集波长合束,从芯径 50 μm 光纤中实现输出功率超过 100 W。美国 Teradiode 公司利用光谱合束技术,实现了功率为 180 W,光束质量仅为 1.26 mm · mrad \times 1.31 mm · mrad 的蓝激光^[83],对应的亮度达到 1.1 GW/(cm² · sr),也是当前报道的最高亮度的蓝光激光器。

3 结束语

本文针对大功率半导体激光的常用技术进行了总结介绍,主要包括边大功率发射半导体激光芯片和大功率半导体激光合束技术。大功率半导体激光器的应用范围几乎涵盖了所有光电子领域。进一步发展大功率半导体激光技术对于推动我国光电子领域学科发展、推动我国激光产业发展、推动国民经济升级转型,有着重要科研、经济以及战略意义。

随着各行各业对激光光源需求的发展,半导体激光器对大功率的需求是永无止境的。根据应用领域的不同,大功率也不再是唯一的指标。对于工业加工而言,除了进一步提升输出功率以外,还需要对光束质量和亮度进行进一步优化;针对不同的材料进行加工时,还需要考虑吸收波段,采用不同波长的激光器进行合束,这就需要对不同衬底材料体系的大功率激光进行研发;为了进一步提升合束功率,还要进一步增加合束的光谱密度,研究新的合束技术;针对泵浦单模光纤放大器或者通过耦合单模光纤输出的应用领域,保持单模特性,以方便单模光纤耦合为首要目标,在此基础上尽可能提升输出功率;在泵浦原子钟、泵浦激光陀螺、泵浦碱金属激光器、分离激光同位素、气体监测、光纤通信、卫星激光通信等领域,需要在维持单波长或窄线宽的情况下尽可能提升输出功率;对泵浦光纤激光器、固体激光器等在一定吸收波段具有高吸收效率的应用场景而言,需要尽可能提升有用波段的功率,从而提高泵浦效率,降低废热,有必要在提高输出功率的基础上进行输出光谱的调整和适当的优化。

因此,大功率半导体激光器根据行业需求将变得精细化、多样化。针对不同行业的应用进行定制化生产的大功率半导体激光器,将是未来的发展方向。

参 考 文 献

[1] Bhattacharya P. Semiconductor optoelectronic devices

[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2012.

[2] Saleh B E A, Teich M C. Fundamentals of photonics [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991.

[3] Yariv A. Optical electronics [M]. 4th ed. Philadelphia: Saunders College Publishing, 1991.

[4] Agrawal G P, Dutta N K. Semiconductor lasers[M]. 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993.

[5] Coldren L A. Diode lasers and photonic integrated circuits[J]. Optical Engineering, 1997, 36(2): 616.

[6] Chuang S L. Physics of photonic devices[M]. New Jersey: Wiley Publishing, 2009.

[7] Zhang B, Wang Z, Brodbeck S, et al. Zero-dimensional polariton laser in a subwavelength grating-based vertical microcavity[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(1): e135.

[8] Hu Y, Liang D, Mukherjee K, et al. III/V-on-Si MQW lasers by using a novel photonic integration method of regrowth on a bonding template [J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 93.

[9] Lu H Y, Tian S C, Tong C Z, et al. Extracting more light for vertical emission: high power continuous wave operation of 1.3- μm quantum-dot photonic-crystal surface-emitting laser based on a flat band[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 108.

[10] Mei Y, Weng G E, Zhang B P, et al. Quantum dot vertical-cavity surface-emitting lasers covering the 'green gap' [J]. Light: Science & Applications, 2017, 6(1): e16199.

[11] Basov N G, Krokhin O N, Popov Yu M. Obtainment of the negative temperature state in the p-n junctions of degenerate semiconductors [J]. Zhur. Eksptl. i Teoret. Fiz, 1961, 40: 1320-1321.

[12] Hall R N, Fenner G E, Kingsley J D, et al. Coherent light emission from GaAs junctions [J]. Physical Review Letters, 1962, 9(9): 366-368.

[13] Alferov Z I, Kazarinov R F. Semiconductor laser with electric pumping: Soviet Union Patent, N181737[P]. 1963.

[14] Kroemer H. A proposed class of hetero-junction injection lasers[J]. Proceedings of the IEEE, 1963, 51(12): 1782-1783.

[15] Diehl R. High-power diode lasers [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000.

[16] Demir A, Peters M, Duesterberg R, et al. 29.5 W continuous wave output from 100 μm wide laser diode [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9348: 93480G.

[17] Li H, Reinhardt F, Chyr I, et al. High-efficiency, high-power diode laser chips, bars, and stacks[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6876: 68760G.

[18] Liu G, Lehtonen S, Xu Z, et al. High power 808 nm to 1060 nm CW and QCW laser diode bars [J].

- Proceedings of SPIE, 2019, 10900: 10900B.
- [19] Adams A R. Band-structure engineering for low-threshold high-efficiency semiconductor lasers [J]. Electronics Letters, 1986, 22(5): 249.
- [20] Yablonovitch E, Kane E. Reduction of lasing threshold current density by the lowering of valence band effective mass [J]. Journal of Lightwave Technology, 1986, 4(5): 504-506.
- [21] Laidig W D, Caldwell P J, Lin Y F, et al. Strained-layer quantum-well injection laser [J]. Applied Physics Letters, 1984, 44(7): 653-655.
- [22] Laidig W D, Lin Y F, Caldwell P J. Properties of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs}$ strained-layer quantum-well-heterostructure injection lasers [J]. Journal of Applied Physics, 1985, 57(1): 33-38.
- [23] Chand N, Becker E E, van der Ziel J P, et al. Excellent uniformity and very low ($< 50 \text{ A/cm}^2$) threshold current density strained InGaAs quantum well diode lasers on GaAs substrate [J]. Applied Physics Letters, 1991, 58(16): 1704-1706.
- [24] Hayakawa T, Matsumoto K, Horie H, et al. $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ single strained quantum well lasers with GaAs/AlGaAs short-period superlattice barrier layers grown by molecular beam epitaxy [J]. Journal of Applied Physics, 1993, 74(8): 5285-5287.
- [25] Pendse D R, Chin A K, Dabkowski F P, et al. Reliability comparison of GaAlAs/GaAs and aluminum-free high-power laser diodes [J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3547: 79-85.
- [26] Mawsi L J, Rusli S, Al-Muhanna A, et al. Short-wavelength ($0.7 \mu\text{m} > \lambda > 0.78 \mu\text{m}$) high-power InGaAsP-active diode lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1999, 5(3): 785-791.
- [27] Chen H T, Liu Y B, Hua J Z, et al. Research on 808 nm Al-free active region laser diodes [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2008, 29(4): 500-502, 557.
陈宏泰, 刘英斌, 花吉珍, 等. 808 nm 无铝有源区激光器研究[J]. 半导体光电, 2008, 29(4): 500-502, 557.
- [28] Li P X, Jiang K, Zhang X, et al. 20.8 W TM polarized GaAsP laser diodes of 808 nm wavelength [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8605: 860510.
- [29] Crump P, Pietrzak A, Bugge F, et al. 975 nm high power diode lasers with high efficiency and narrow vertical far field enabled by low index quantum barriers[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(13): 131110.
- [30] Xue Y H, Uemura S, Torizuka K. Optimal design for a diode-pumped high-power high-efficiency high-beam-quality laser [J]. Optics Communications, 2008, 281(21): 5389-5392.
- [31] Bergmann J P, Patschger A, Bastick A. Enhancing process efficiency due to high focusing with high brightness lasers-applicability and constraints [J]. Physics Procedia, 2011, 12: 66-74.
- [32] Klopff F, Reithmaier J P, Forchel A. Low threshold high efficiency MBE grown GaInAs/(Al) GaAs quantum dot lasers emitting at 980 nm[J]. Journal of Crystal Growth, 2001, 227/228: 1151-1154.
- [33] Zhong L, Wang J, Feng X M, et al. 808 nm high-power lasers with Al-free active region with asymmetric waveguide structure[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(8): 1037-1042.
仲莉, 王俊, 冯小明, 等. 808 nm 大功率无铝有源区非对称波导结构激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(8): 1037-1042.
- [34] Chong F, Wang J, Xiong C, et al. Optimum the thickness of p-waveguide layer for high conversion efficiency diode lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3419-3423.
崇锋, 王俊, 熊聪, 等. 优化 p 型波导层厚度提高半导体激光器电光转换效率[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3419-3423.
- [35] Xiong C, Chong F, Wang J, et al. Doping profile optimization and design of waveguide layer for laser diode with high conversion efficiency [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(1): 16-19, 54.
熊聪, 崇锋, 王俊, 等. 高效率半导体激光器波导层掺杂的优化设计[J]. 半导体光电, 2010, 31(1): 16-19, 54.
- [36] Morita T, Nagakura T, Torii K, et al. High-efficient and reliable broad-area laser diodes with a window structure [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 1502104.
- [37] Ryvkin B S, Avrutin E A, Kostamovaara J T. Asymmetric-waveguide, short cavity designs with a bulk active layer for high pulsed power eye-safe spectral range laser diodes[J]. Semiconductor Science and Technology, 2020, 35(8): 085008.
- [38] Knauer A, Erbert G, Staske R, et al. High-power 808 nm lasers with a super-large optical cavity [J]. Semiconductor Science and Technology, 2005, 20(6): 621-624.
- [39] Pawlik S, Sverdlov B, Buttig R, et al. 9xx high power pump modules [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6104: 61040J.
- [40] Xu Z, Gao W, Cheng L S, et al. Highly reliable, high-brightness 915 nm laser diodes for fiber laser applications [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6909:

- 69090Q.
- [41] Crump P, Blume G, Paschke K, et al. 20 W continuous wave reliable operation of 980 nm broad-area single emitter diode lasers with an aperture of 96 μm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7198: 719814.
- [42] Ling X H, Cui B F, Zhang S, et al. Failure analysis of 980 nm large-optical-cavity single light bar high-power LD[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(4): 369-372.
凌小涵, 崔碧峰, 张松, 等. 980 nm 大光腔单发光条大功率 LD 失效分析[J]. *激光与红外*, 2015, 45(4): 369-372.
- [43] Qiao C, Su R G, Li X, et al. Design and fabrication of 980 nm distributed Bragg reflection semiconductor laser with high power[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0701002.
乔闯, 苏瑞巩, 李翔, 等. 980 nm 高功率 DBR 半导体激光器的设计及工艺[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0701002.
- [44] Kawaguchi M, Kasugai H, Samonji K, et al. Catastrophic-optical-damage-free InGaN laser diodes with epitaxially formed window structure[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(5): 1412-1416.
- [45] Najda S P, Bacchin G, Qiu B, et al. Benefits of quantum well intermixing in high power diode lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5365: 1-13.
- [46] Botez D, Connolly J C. Nonabsorbing-mirror (NAM) CDH-LOC diode lasers [J]. *Electronics Letters*, 1984, 20(13): 530-532.
- [47] Ko H C, Cho M W, Chang J H, et al. A new structure of 780 nm AlGaAs/GaAs high power laser diode with non-absorbing mirrors [J]. *Applied Physics A*, 1999, 68(4): 467-470.
- [48] McDougall S D, Jubber M J, Kowalski O P, et al. GaAs/AlGaAs waveguide pin photodiodes with non-absorbing input facets fabricated by quantum well intermixing[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(8): 749-750.
- [49] Naito H, Nagakura T, Torii K, et al. Long-term reliability of 915 nm broad-area laser diodes under 20 W CW operation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(15): 1660-1662.
- [50] Sandroff C J, Nottenburg R N, Bischoff J C, et al. Dramatic enhancement in the gain of a GaAs/AlGaAs heterostructure bipolar transistor by surface chemical passivation[J]. *Applied Physics Letters*, 1987, 51(1): 33-35.
- [51] Syrbu A V, Yakovlev V P, Suruceanu G I, et al. ZnSe-facet-passivated InGaAs/InGaAsP/InGaP diode lasers of high CW power and 'wallplug' efficiency [J]. *Electronics Letters*, 1996, 32(4): 352.
- [52] Mawst L J, Bhattacharya A, Nesnidal M, et al. MOVPE-grown high CW power InGaAs/InGaAsP/InGaP diode lasers[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1997, 170(1/2/3/4): 383-389.
- [53] Ressel P, Erbert G, Zeimer U, et al. Novel passivation process for the mirror facets of Al-free active-region high-power semiconductor diode lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(5): 962-964.
- [54] He X, Cui B F, Liu M H, et al. Research on nitrogen passivation for high power semiconductor lasers[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(7): 805-808.
何新, 崔碧峰, 刘梦涵, 等. 大功率半导体激光器腔面氮钝化的研究[J]. *激光与红外*, 2016, 46(7): 805-808.
- [55] Zhou L, Wang Y H, Jia B S, et al. Novel passivation process for GaAs (110) surface with sulf-solutions [C]//2011 Academic International Symposium on Optoelectronics and Microelectronics Technology, October 12-16, 2011, Harbin, China. New York: IEEE Press, 2011: 35-37.
- [56] Ghita R V, Negrila C C, Cotirlan C, et al. On the passivation of GaAs surface by sulfide compounds [J]. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 2013, 8(3):1335-1344.
- [57] Kanskar M, Bai C, Bao L, et al. High brightness diodes and 600 W 62% efficient low SWaP fiber-coupled package [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11262: 112620A.
- [58] Xu D, Ma D, Yu Z K, et al. Kilowatt wavelength-stabilized CW and QCW diode laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11262: 112620C.
- [60] Decker J, Crump P, Fricke J, et al. 25-W monolithic spectrally stabilized 975 nm minibars for dense spectral beam combining [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(15): 1675-1678.
- [61] Witte U, Traub M, Meo A D, et al. Compact 35 μm fiber coupled diode laser module based on dense wavelength division multiplexing of NBA mini-bars [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9733: 97330H.
- [62] Unger A, Uthoff R, Stoiber M, et al. Tailored bar concepts for 10 mm-mrad fiber coupled modules scalable to kW-class direct diode lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9348: 934809.
- [63] Witte U, Schneider F, Holly C, et al. kW-class direct diode laser for sheet metal cutting based on commercial pump modules[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10086: 1008608.
- [64] Hengesbach S, Krauch N, Holly C, et al. High-

- power dense wavelength division multiplexing of multimode diode laser radiation based on volume Bragg gratings[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(16): 3154-3157.
- [65] Directphotonics. [EB/OL]. [2020-08-04]. www.directphotonics.com.
- [66] Daneu V, Sanchez A, Fan T Y, et al. Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(6): 405-407.
- [67] Chann B, Huang R K, Missaggia L J, et al. Near-diffraction-limited diode laser arrays by wavelength beam combining[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(16): 2104-2106.
- [68] Gopinath J T, Chann B, Fan T Y, et al. 1450-nm high-brightness wavelength-beam combined diode laser array[J]. *Optics Express*, 2008, 16(13): 9405-9410.
- [69] Teradiode. [EB/OL]. [2020-08-04]. www.teradiode.com.
- [70] Hecht J. Beam combining cranks up the power[J]. *Laser Focus World*, 2012, 48(6):50-53.
- [71] Zimer H, Haas M, Ried S, et al. Thin film filter wavelength-locked laser cavity for spectral beam combining of diode laser arrays [C]//2014 IEEE Photonics Conference, October 12-16, 2014, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014: 230-231.
- [72] Strohmaier S G, Erbert G, Meissner-Schenk A H, et al. kW-class diode laser bars[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10086: 100860C.
- [73] Nakatsu Y, Nagao Y, Kozuru K, et al. High-efficiency blue and green laser diodes for laser displays[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10918: 109181D.
- [74] König H, Lell A, Stojetz B, et al. Blue 450nm high power semiconductor continuous wave laser bars exceeding rollover output power of 80 W [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10514: 1051402.
- [75] Nozaki S, Kawaguchi M, Nibu T, et al. A high power InGaN laser array with built-in smile suppression structure [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11262: 112620S.
- [76] Nakatsu Y, Nagao Y, Hirao T, et al. Blue and green InGaN semiconductor lasers as light sources for displays [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11280: 112800S.
- [77] König H, Ali M, Bergbauer W, et al. Visible GaN laser diodes: from lowest thresholds to highest power levels [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10939: 109390C.
- [78] König H, Gerhard S, Ali M, et al. Blue high power InGaN semiconductor laser diodes: design optimization of laser bars and single emitters for best performance and reliability[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11262: 112620Q.
- [79] Baumann M, Balck A, Malchus J, et al. 1000 W blue fiber-coupled diode-laser emitting at 450 nm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10900: 1090005.
- [80] Könning T, Harth F, König P, et al. Kilowatt-class high power fiber-coupled diode lasers at 450 nm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11262: 112620N.
- [81] Fève J P, Finuf M, Fritz R, et al. Scalable blue laser system architecture [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11262: 112620P.
- [82] Riva M, Rossi G, Braglia A, et al. High brightness 100 W-50 μm delivery blue laser diode module[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11262: 112620O.
- [83] Villarreal F, Zhou W, Roethle J, et al. Advances in blue and near-IR high-power/high-brightness direct diode lasers using wavelength beam combining (Conference Presentation) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11262: 112620U.