高功率高亮度半导体激光器合束进展

王立军[1,2],彭航宇[1,2],张 俊[1,2],秦 莉[1,2],佟存柱[1,2]

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 发光学及应用国家重点实验室,吉林 长春 130033)

摘 要:半导体激光器体积小、效率高,但单元输出功率低、光束质量差限制了其应用。介绍了提升半导体激光器功率及光束质量的最新进展,对各种技术途径和实验结果进行了综述报道,并具体介绍了中国科学院长春光学精密机械与物理研究所近年来在高亮度半导体激光器芯片及合束方面取得的进展。

关键词:半导体激光器; 高功率; 高亮度; 激光合束

中图分类号:TN248 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201746.0401001

Development of beam combining of high power high brightness diode lasers

Wang Lijun[1,2], Peng Hangyu[1,2], Zhang Jun[1,2], Qin Li[1,2], Tong Cunzhu[1,2]

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun 130033, China)

Abstract: Diode lasers have advantages of high efficiency and compact structure. The low power and poor beam quality of diode lasers limits its application fields. The new developments of diode lasers in power and beam quality were introduced. The new combining techniques and the experimental results of diode lasers were summarized. The high brightness diode laser achievements acquired by CIOMP were also presented.

Key words: diode lasers; high power; high brightness; laser beam combining

0 引 言

大功率半导体激光器具有电光效率高、体积小、质量轻、寿命长、性能稳定、可靠性好等优点,渗透到多个学科领域,形成了新的学科和产业,主要有材料加工、显示、成像、通讯、信息存储与处理、医学及生物学、检测与计量以及军用激光技术等领域,极大地促进了这些领域的技术和产业的快速发展。然而,与气体激光器、固体激光器及光纤激光器相比,大功率半导体激光的光束质量相对较差。当前国际上大功率半导体激光器的研究重点是:半导体激光器在获得高功率、高效率输出的同时,如何提高激光器的光束质量。美国和德国相继部署了 ADHEL、BRIDLE 及 IMOTHEB 等专项,国内也在开展相关研究。具体的途径主要有两条,一是通过外延结构设计及器件工艺提高半导体激光器的光束质量,尤其是慢轴方向的光束质量,从而提高单元器件的亮度;二是通过合束技术,提高输出功率,同时维持一定的光束质量。

收稿日期:2017-03-21; **修订日期**:2017-04-09

基金项目:国家自然科学基金(61574141,61404137,61535013,L1524007);中国科学院项目(QYZDY-SSW-JSC006);
吉林省科技厅项目(20160519019JH,20160203017GX)

作者简介:王立军(1946-),男,中国科学院院士,主要从事大功率半导体激光器及应用方面的研究。Email:wanglj@ciomp.ac.cn

1 高光束质量半导体激光单元器件进展

半导体激光器的光束质量由其横模分布数量决定,而横模高度依赖其光波导结构。垂直方向的横模分布显示了快轴方向(垂直于有源区平面)的光强分布,水平方向的横模分布显示了慢轴方向(平行于有源区平面)的光强分布。激光器快轴方向的横模分布比较简单,与激光器的有源区和波导层的厚度有关,当波导层的厚度接近波长尺度时(μm 量级),为基横模分布。Agnieszka Pietrzak 等人设计的大光腔结构,通过增加波导层的厚度,可以降低光束远场发散角,整个波导层厚度达到 4.4 μm,远场发散角降低到 13°[1],这种大光腔结构增加了光斑尺寸,降低腔面的功率密度,有利于减小腔面灾变损伤的发生几率,提高半导体激光器的可靠性,但是由于激光器限制因子的降低,阈值电流上升,在一定程度上影响激光器效率。

激光器慢轴方向的横模分布限制比较复杂,由折射率导引及增益导引机制共同作用。在折射率导引机制中,光在低折射率材料之间的高折射率区传播,光场分布较稳定,但是输出功率低,瑞士 Oclaro 研制的脊宽 6 μm 和腔长 4.8 mm 的 980 nm 半导体激光器,实现连续近 2 W 的基横模光束输出,功率光束质量比达 6.4 W/(mm·mrad);最大光电转换效率达到 63%[2]。在增益导引机制中,随着注入电流的变化,由于载流子集聚、有源区产生的焦耳热、空间烧孔效应以及热透镜效应,导致在波导中折射率发生变化,从而使慢轴方向的光束质量下降[3],因此控制慢轴方向的载流子集聚及热透镜效应对提高半导体激光器的光束质量非常有必要的[4-6]。国际上对于改善半导体激光器慢轴方向光束质量的研究非常活跃。

德国 FBH 研究所和 OSRAM 公司主要是通过减小慢轴方向脊形条宽的方式控制横模分布的数量,2015 年,FBH 将脊形条宽控制在 30 μm,在输出功率为 7 W 时,将横模分布数量控制在 6 个;而相同外延结构 90 μm 条宽的激光器在相同输出功率下,横模分布数量则为 40 个,相对于 90 μm 条宽激光器,30 μm 横模分布数量降低了近 7 倍,光束质量明显改善,7 W 时,30 μm 条宽激光器的慢轴方向光束质量为 1.8 mm·mrad,功率与光束质量比达到 4~5 W/(mm·mrad)[7],20 μm 条宽激光器的慢轴方向功率与光束质量比甚至达到 6.5 W/(mm·mrad),这是目前宽条激光器所达到的最高值[8]。2016 年,OSRAM 在条宽约为 50 μm 时,5 个发光点的 Minibar 的输出功率达到 50 W,光束质量优于 11 mm·mrad,功率与光束质量比达到 4.8 W/(mm·mrad)[9]。上述通过减少条宽提高光束质量的方式,对激光器腔面 COD 水平提出了非常高的要求,激光器工作时的腔面功率密度都达到了 200 mW/μm,较现有激光器的水平至少提高了一倍,上述两家单位均开发了各自的高质量腔面钝化技术[10-11]。

美国的 nLight 公司及 Fraunhofer IOF 研究所则是通过在激光器的波导层刻蚀结构限制高阶模式的增益,在维持近场光斑尺寸的同时降低远场发散角,从而达到减少横模分布数量的目的,提高激光器的光束质量,nLight 采用喇叭形结构(Flared Oscillator Waveguide Diodes)[12-13],在脊形波导的后腔面处,或者是中端位置缩小脊形宽度,而出光腔面脊形宽度保持不变,甚至增加,如图 1 所示,脊形的最小位置控制横模分布的同时,较大的出光腔面尺寸可以有效降低功率密度,从而提高器件可靠性,2016 年 nLight 实现了输出功率近 13 W,光束质量为 3 mm·mrad,功率与光束质量比达到 4.3 W/(mm·mrad)。Fraunhofer IOF 则是在喇叭形结构的基础上,通过在波导层刻蚀相位结构,增加高阶模式的增益,如图 2 所示,2015 年实现了输出功率 8 W,光束质量为 2.5 mm·mrad,功率与光束质量比达到 3.3 W/(mm·mrad)[14]。

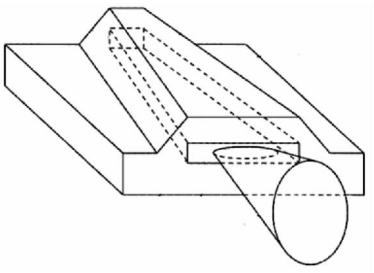


图 1 喇叭形结构激光器

Fig.1 Flared oscillator waveguide diode laser

随着对慢轴光束质量影响机制研究的深入,研究人员发现脊形波导结构会造成侧向载流子积累,从而使高阶模式增多,导致光束质量劣化。为了解决这个问题,德国 FBH 的研究人员采用离子注入的方法,无需刻蚀脊形即可实现载流子限制,90 μm 条宽、4 mm

腔长的 969 nm 半导体激光器，实现连续 7 W 激光输出，功率光束质量比达到 3.5 W/(mm·mrad)[15]。

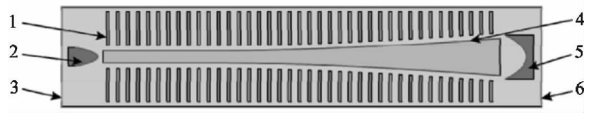


图 2 相位微结构激光器，1~5 分别为沟道区、相位结构、后腔面、欧姆接触区、前腔面

Fig.2 Schematic sketch of a micro structured broad area laser diode which contains aperture grooves (1), phase structures (2), the back-coupling facet (3), the contacted region (4), the out-coupling facet (5)

提高慢轴方向光束质量的结构还有种子振荡功率放大器(MOPA)结构(锥形激光器)，如图 3 所示。MOPA 结构是基于高光束质量的单模种子激光源——即振荡源(MO)激光，经过半导体放大器(PA)将小功率的振荡源激光进行放大。当 MO 激光和 PA 放大器集成到一个芯片上时就是通常所说的锥形激光器。在锥形半导体激光器上还可以集成光栅等结构用于进行光谱线宽的调制。国际上对于锥形激光器的研究非常活跃。德国 FBH 研究所先后报道了多种波长的锥形激光器[16-19]。979 nm 波长 DBR 锥形激光器，在连续输出功率为 11.4 W 时，转换效率为 44%，光束质量 $M^2(1/e^2)=1.1$，光谱宽度 13 pm[20]。1 060 nm 波长 DBR 锥形激光器的连续输出功率为 12.2 W，光束质量 $M^2=1.2$ 时的功率为 10 W，其中主瓣功率占 70%以上，线宽 17 pm(FWHM)。

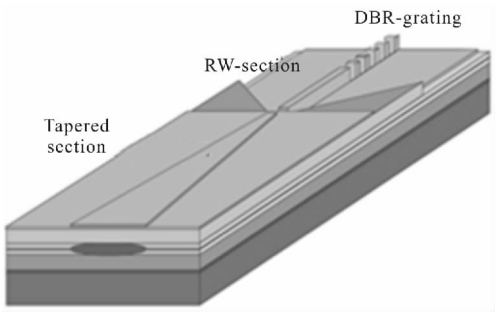


图 3 带有 DBR 光栅的锥形激光器示意图

Fig.3 Typical tapered laser with DBR gratings

2 高光束质量半导体激光合束模块进展

激光合束是半导体激光器实现高功率、高亮度激光输出的关键技术，它基于半导体激光的相位、光场分布、偏振及光谱等特性，通过折射、反射及衍射等效应，将多束毫瓦及瓦级功率单元光束耦合成一束百瓦、千瓦甚至更高功率的激光输出，使得半导体激光器性能获得大大提升，作为直接光源应用在照明、工业加工及国防等领域，作为间接光源泵浦全固态、光纤及碱金属蒸汽激光器等，推动科研、民生及国防等多方面进步。

根据参与合束激光单元的相干性要求和合束机理，分为相干合束和非相干合束。

相干合束技术需要控制激光器单元的相位、偏振及光谱等特性，使各个激光单元保持固定的相位差，实现相干合束输出，理论上可耦合无限个激光单元，同时保证近衍射极限输出，但是相干合束对合束激光单元的光谱、偏振及相位等特性均有严格要求，为保证所有激光单元的相干性，需对每个单元的相位进行严格控制，并随着合束激光单元的增加，系统复杂程度急剧上升。目前代表性的研究成果为美国麻省理工(MIT)[21-23] 于 2011 年报道通过种子注入控制光谱、SPGD 相位分析反馈驱动电流控制相位，实现 218 个激光单元的相干合束，获得 38.5 W 功率输出[24]。相干合束技术目前处于研究阶段，尚未实际应用。

当前报道和实际应用的高功率半导体激光合束光源主要基于非相干合束技术，它利用激光单元光场分布、偏振及光谱特性进行合束，按照如下三方面进行介绍。

2.1 常规激光合束技术及研究进展

目前发展较为成熟、应用较广的为常规激光合束(TBC)技术，它包含光束整形、空间合束、偏振合束及波长合束。光束整形和空间合束均是利用半导体激光单元光束质量分布呈矩形特性，前者将长轴光束质量切割，然后在短轴方向重排，后者是直接短轴方向叠加多个单元光束，达到两方向光束质量均衡的目的。偏振合束和波长合束在不改变光束质量条件下，空间重叠多个激光单元，数倍提高功率和亮度。其中偏振合束利用半导体激光线偏振特性，两倍提高激光功率。波长合束利用半导体激光光谱多样化性，不同波长的两束光经过二向分色镜一束透射，一束反射实现合束，采用不同波长激光可大幅度提高激光功率。常规高功率半导体激光器的输出光谱较宽(3 nm 以上)、光谱温度稳定性差(~0.3 nm/K)，随

电流变动大，为保证高的合束效率，合束光谱不能交叠，常规波长合束间隔一般不低于 25 nm。

常规激光合束技术本身不存在难点，合束光学元件较为成熟，装调精度也相对较低，为了获得高功率、高光束质量的激光输出，需从激光单元输出功率和光束质量本身着手。基于常规激光合束技术的光源指标提升主要归结于激光单元器件性能的提升，这体现在芯片外延技术、工艺技术、封装技术、腔面钝化技术、散热技术及装调技术等，尤其是在光纤激光器泵浦市场带动下，9 xxnm 波段条宽 100 μm 的单管芯片研制水平达到30 W 功率[25]，商用水平也达到 15~20 W。美国 nLight 和日本 Fujikura 采用高功率激光单管，将用于光纤泵浦的 105 μm 光纤耦合模块功率从 100 W 提升至 250 W[26-28]，亮度达到 44 MW/(cm²·sr)。意大利 OPI 采用双波长合束，105 μm/0.15 光纤输出功率 300 W[29]。凯普林通过叠加更多的激光单管，200 μm/0.22 光纤输出功率 600 W[30]。德国 Dilas 采用 OSRAM 研制的新一代高性能 mini bar，将其 225 μm 光纤输出产品功率从 270 W 提升至 360 W[31]，并通过偏振合束和 5 个波长合束，400 μm/0.12 光纤输出 4 600 W[32]，亮度达到 81 MW/(cm²·sr)，如图 4 所示。

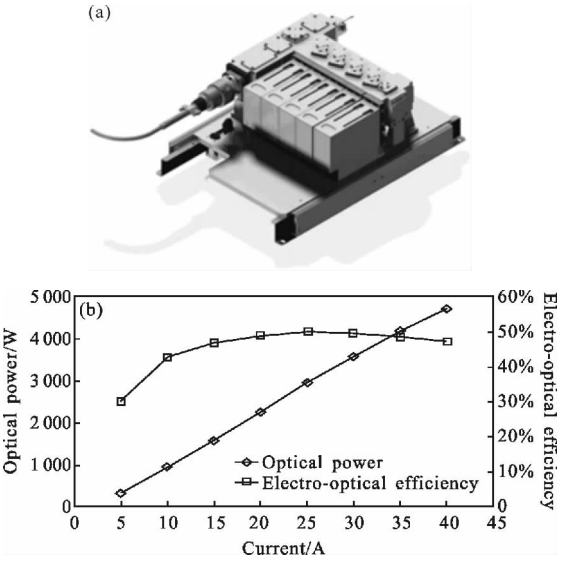


图 4 Dilas 研制的 4 kW、400 μm/0.12 光纤输出半导体激光合束光源

Fig.4 400 μm/0.12 fiber coupled diode laser beam combining source with the power of 4 kW from Dilas

2.2 密集波长合束技术及研究进展

密集波长合束(DWMD)相对于常规波长合束，其合束波长间隔缩小至几纳米，波长分布更加密集。实现密集波长合束的两个基本条件：一是激光单元的波长窄化及光谱锁定，通过芯片内部集成光栅结构实现，如 DFB 或者 DBR 结构，或是通过 VBG 外腔反馈实现；二是波长陡度大的合束元件，如 VBG、二向分色镜、窄带滤光片及面光栅等。

德国夫琅禾费激光技术研究所(ILT)在同一芯片上不同位置激光单元刻蚀不同周期的光栅，使相邻激光单元输出间隔 2.5 nm 的不同波长，且沿侧向位置递变，然后通过二向分色镜将各个激光单元波长合束，耦合进 35 μm 光纤中[33]，如图 5 所示。该方法实现的窄线宽单元结构稳定，但是芯片光栅工艺难度大，且光谱位置分布要求高，一旦某个单元光谱出现偏差，严重影响合束效率。

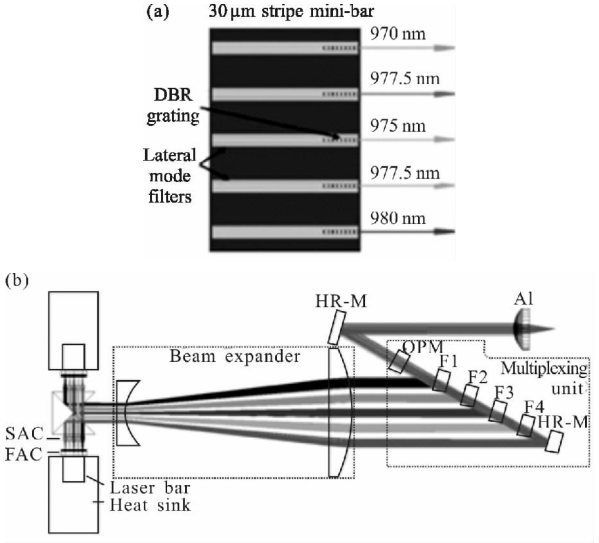


图 5 ILT 采用内置光栅光谱窄化芯片结合二向分色镜实现密集波长合束

Fig.5 DWMD by narrow linewidth chips with the built-in grating and dielectric filters from ILT

当前主流的窄线宽激光单元通过 VBG 外腔反馈实现，采用前腔面镀增透的激光芯片，VBG 与激光芯片后腔面构成一个谐振腔，利用 VBG 的波长选择作用，可实现谱宽窄至 0.1 nm、温度漂移 0.01 nm/℃的激光输出。德国 Dilas 采用波长陡度仅为 1 nm 的二向分色镜，对经过 VBG 线宽窄化处理的 972、976、980 nm 3 个线偏振光，经过波长合束并耦合进 100 μm/0.2 光纤，光纤耦合功率 410 W[34]。德国 ILT 通过 VBG 将 6 个商用激光模块锁定至不同波长(935.9、940.1、944.0 nm，972.5、976.5、979.7 nm)，然

后采用二向分色镜进行密集波长合束、粗波长合束，最后聚焦耦合进光纤，芯径为 100 μm/0.17 光纤输出超过 800 W[35]；德国 Directphotonics 采用相似技术，利用 VBG 作为波长合束镜，实现了波长间隔为 4 nm 的 5 束激光合束[36-37]，如图 6 所示，目前该公司已推出了功率 500~2 000 W、光束质量 5 mm·mrad、芯径 100 μm 的光纤耦合半导体激光源产品[38]。

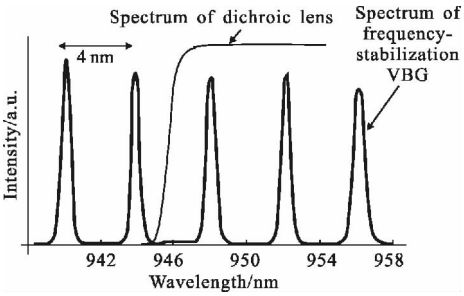


图 6 Direct photonics 实现间隔 4 nm 的 5 波长合束光谱分布

Fig.6 Spectral distribution of 5 wavelengths with the interval of 4 nm from Direct photonics

德国 RWTH 以VBG 作为合束元件，通过角度控制及 TEC 精密温控 4 片相同的合束 VBG，实现衍射波长的偏移，将合束 VBG 的衍射中心波长分别调节至 974.5、976.0、977.5、979.0 nm，实现波长间隔仅为 1.5 nm 激光合束[38]，如图 7 所示。

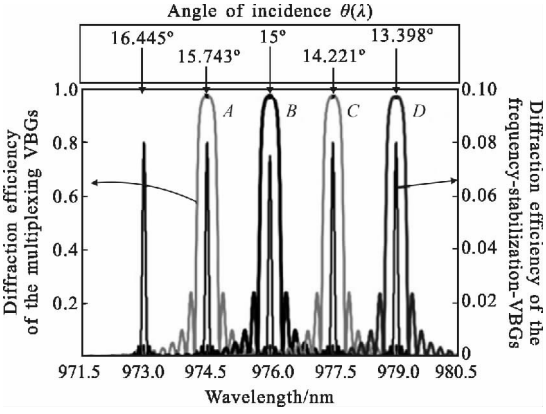


图 7 RWTHVBG 波长合束结果

Fig.7 VBGs beam combining from RWTH

2.3 光谱合束技术及研究进展

光谱合束(WBC)技术采用衍射光栅可实现波长间隔窄至 0.1 nm 的多激光单元合束。目前发展较快，并已经形成产品，光谱合束原理如图 8 所示，由前腔面镀增透膜(反射率小于 0.5%)的半导体激光芯片、准直镜、傅里叶变换透镜、衍射光栅和外腔镜组成，激光芯片后腔面和外腔镜组成谐振腔，激光芯片上各个单元输出的激光光束经傅里叶变换透镜作用，在衍射光栅同一点重合，然后经光栅衍射，由外腔镜将衍射光部分反射回光栅，并沿原路返回，回到原激光单元的光反馈起振，每个单元激光的起振波长严格满足光栅方程，由于光栅入射角不同而衍射角相同，使得各激光单元起振在各自不同的波长，经过外腔镜输出的激光在近场和远场均重合，因此实现功率为所有单元之和、光束质量与单个激光单元一致的激光输出。最具代表的研究单位为美国麻省理工(MIT)[39-41]，现已转向产业化，成立 Teradiode 公司，推出了功率 2~8 kW/100 μm、500 W/50μm 光纤输出产品，图 9 为 8 kW 结构图，应用在厚板金属

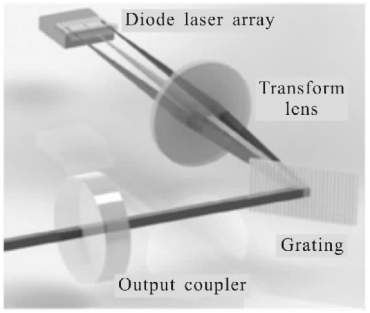


图 8 光谱合束原理

Fig.8 Principe of WBC

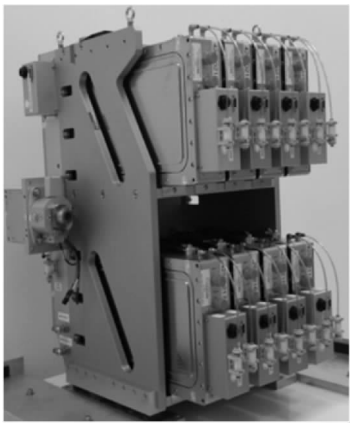


图 9 Teradiode 的 8 kW 直接半导体激光器结构图

Fig.9 Structure of 8 kW direct diode laser source from Teradiode

切割、远程激光焊接等，是同等功率下激光加工光源的有力竞争者，他们并报道了 360 W、2 倍衍射极限[42]、亮度达 10 GW/(cm²·sr)的半导体激光源，直接将高功率半导体激光的亮度提高 2 个数量级，为高功率、

高亮度半导体激光器发展指明新方向。

德国 Trumpf 提出了一种基于带宽达 pm 量级的窄带滤光片用于外腔反馈波长锁定结构[43],通过镀膜,使窄带滤光片获得角度–波长筛选特性,如图 10 所示,使光束在滤光片上的透射角度与波长呈一一对应关系,只有同时满足角度和波长条件,光束才能透过,否则将被滤光片反射截止,呈现出类似于光栅的色散作用。

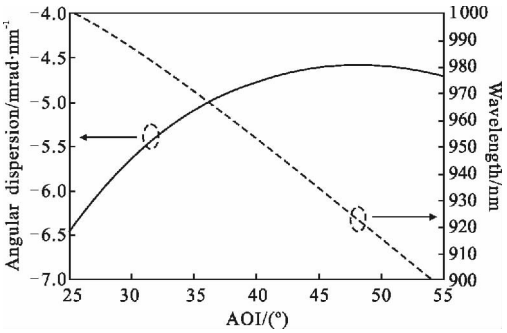


图 10 窄带滤光片的角度–色散–波长特性

Fig.10 Characteristic of angle-dispersion-wavelength of filter

光谱锁定具体结构如图 11 所示,前腔面镀有增透膜(反射率小于 0.5%)的半导体激光芯片阵列出射激光通过快慢轴准直、半波片和傅里叶变换透镜后,以不同角度入射到窄带滤光片上,透过滤光片的光经过傅里叶变换透镜后入射到镀高反膜的外腔镜上,经外腔镜反射能够沿原路返回到原激光单元的光可以起振,在滤光片表面反射形成形成激光。由于只有有效起振才能形成激光,因此不同位置的激光单元起振在不同波长,实现激光单元起振光波长的调制。为了在有效光谱带宽内实现多激光单元起振,每个激光单元起振谱宽窄,对应要求滤光片的选择带宽也非常小,据报道,他们采用 50 pm(FWHM)的滤光片,将 10 个标准的厘米条进行了波长锁定,其中每个条上包含 19 个 100 μm 激光单元,整体输出谱宽为 37 nm,每个厘米条谱宽为 3.4 nm,每个激光单元为 80 pm(FWHM),然后匹配面光栅实现光谱合束,并耦合进 100 μm 芯径光纤中,输出功率近 500 W[44],利用该技术,200 μm 光纤输出超过 5 kW[45]。

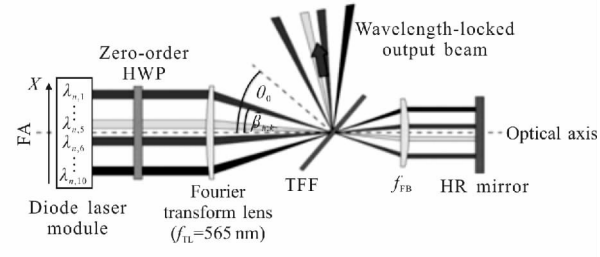


图 11 基于窄带滤光片的外腔反馈波长锁定结构

Fig.11 Structure of feedback cavity with wavelength-locked by the narrowband filter

2.4 合束技术对比

表 1 为当前国际上基于各种激光合束技术研制报道的半导体激光源参数表。根据应用需求,激光功

表 1 国际上报道的高功率、高亮度合束半导体激光合束源参数表

Tab.1 Parameter of international reports on high power and high brightness diode laser sources

Beam combining technology	Institution	Power/W	Fiber diameter	Beam quality/mm·mrad	Brightness /MW·cm^{-2}·sr^{-1}
TBC	nLight	272	105 μm/0.15	7.875	44.48
	Fujikura	252	<125 μm	–	–
	OPI	300	105 μm/0.15	7.875	49.06
	BWT	600	200 μm/0.22	22	12.57
	Dilas	4 600	400 μm/0.12	24	81.00
	Laserline	3 000	400 μm/0.1	20	76.07
		25 000	2 mm/0.22	220	5.24
	Fraunhofer ILT	26	35 μm/0.22	3.85	17.79
DWDM	Dilas	410	100 μm/0.2	10	41.58
	Fraunhofer ILT	808	100 μm/0.17	8.5	113.43
	Direct photonics	450	105 μm/0.15	4.5	225.39
		2 000	105 μm/0.15	7.875	327.09
WBC	TeraDiode	360	–	0.6	10 142.40
		2 030	50 μm/0.12	3	2 287.68
		4 680	100 μm/0.08	3.5	3 874.81
		8 000	100 μm/0.2	6	2 253.87
	Trumpf	550	100 μm/0.1	5	223.13
		5 000	200 μm	–	–

率主要集中在数百瓦至千瓦级量级，常规激光合束方式(TBC)光束质量主要分布在几十 mm·mrad 至数百 mm·mrad，亮度为数十 MW/(cm²·sr)，密集波长合束方式(DWDM)光束质量主要分布在 5~10 mm·mrad，达到数百 MW/(cm²·sr)，光谱合束方式(WBC)光束质量一般≤5 mm·mrad，达到数千 MW/(cm²·sr)，根据合束波长的密集程度，激光光束质量呈倍数优化，亮度呈数量级提升。

基于半导体激光源的功率–亮度分布及与其他类型激光器对比如图 12 所示，常规激光合束光源达到灯泵固体激光器(LPSSL)，光谱合束光源达到 CO_2 激光器水平，结合半导体激光器本身的高效率、长寿命等特性，使得半导体激光器作为直接光源应用具有很强的市场竞争力。

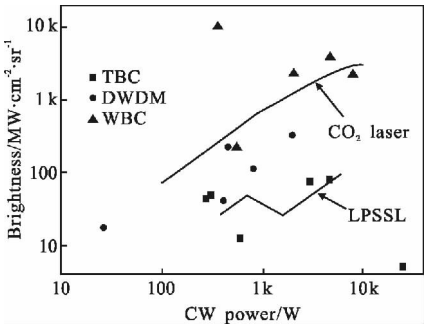


图 12 半导体激光源的功率–亮度分布及与其他类型激光器对比

Fig.12 Power vs brightness distribution of diode lasers, and comparison with other types of lasers

3 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在大功率半导体激光器方面的工作

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(下称长春光机所)是国内最早研究半导体激光器的单位之一，在半导体激光器的芯片结构设计、外延生长、器件工艺、封装热管理及合束等开展系列研究，并取得一定的成果。

3.1 高亮度半导体激光单元器件

为了获得高光束质量激光输出，长春光机所在微结构控制半导体激光器慢轴方向的高阶模式方面做了大量的工作，在普通宽脊激光器中，高阶模式、低阶模式及基模均同时存在，高阶模式在脊形的边缘有较强的光强分布，而低阶模式及基模的光强分布则更集中在脊形的中心区域，因而通过在脊形区波导层的边缘位置刻蚀鱼骨形光子晶体结构[46]，如图 13 所示，可以有效限制高阶模式的增益，而低阶模式及基模的增益基本不受影响。

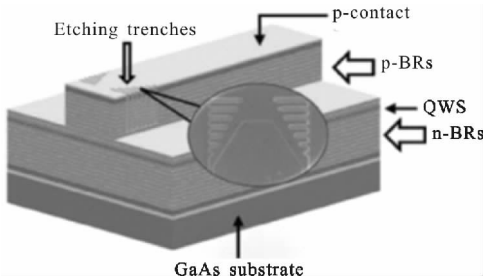


图 13 鱼骨形光子晶体结构激光器示意图

Fig.13 Schematic diagram of the PBC lasers with the fishbone microstructure

图 14 给出了相同外延结构的普通宽脊激光器和鱼骨形光子晶体结构激光器的输出功率对比，从图中可以看出功率下降幅度在 5%以内，鱼骨形结构对激光器的输出功率影响非常小。

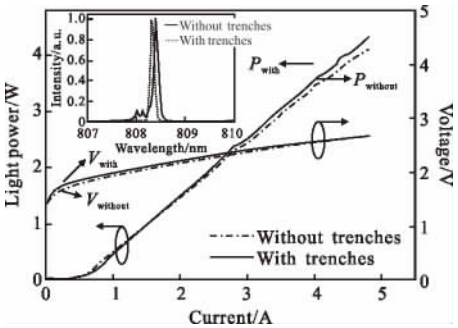


图 14 鱼骨形结构与不带鱼骨形结构激光器的 L–I–V 曲线

Fig.14 L–I–V characteristics curves of laser with and without fishbone microstructure

而由于鱼骨形结构对高阶模式增益的控制，使得激光器远场发散角大幅下降，图 15 给出了普通宽脊激光器和鱼骨形结构光子晶体激光器的远场发散角及光场分布对比，可以看出鱼骨形结构光子晶体激光器在 4.5 A 时的远场发散角只有 6.8°(θ_{FWHM})和 11.0°($\theta_{95\%}$)，与不带鱼骨形结构宽脊激光器相比分别下降了 22.2%和 18.7%，光束质量改善明显。

在此基础上，还开展了空间电流调制光子晶体结构激光器(见图 16)的研究工作[47]，通过在波导层刻蚀周期性的棋盘结构，调制电流的注入，从而控制载流子的分布，在一定程度上限制空间烧孔效应产生。

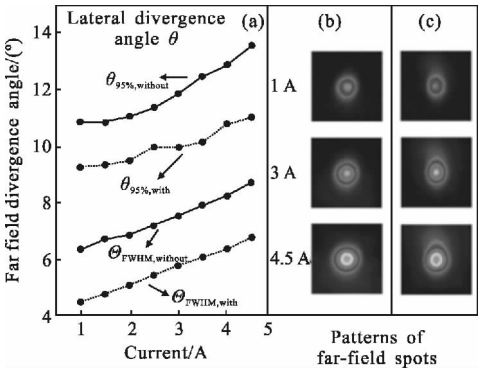


图 15 (a)鱼骨形结构与不带鱼骨形结构激光器的远场发散角分布;(b)不带鱼骨形结构激光器在不同电流下远场光斑;(c)鱼骨形结构激光器在不同电流下远场光斑

Fig.15 (a) Far field divergence angle distribution of laser with and without fishbone microstructure;(b) Far field spots of laser without fishbone structure at different currents;(c) Far field spots of laser with fishbone microstructure at different currents

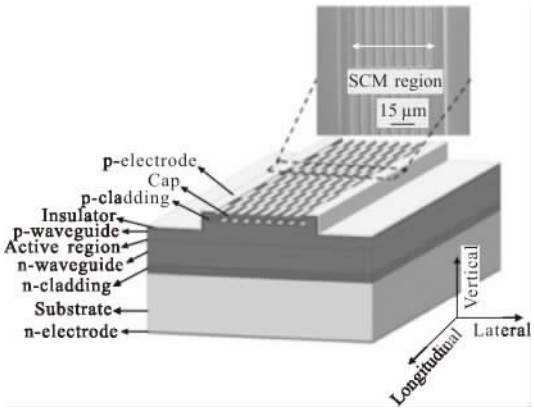


图 16 空间电流调制光子晶体结构激光器示意图

Fig.16 Schematic diagram of the diode laser with SCM photonic crystal structure

图 17 给出了普通宽脊激光器和空间电流调制光子晶体激光器的远场发散角及光场分布对比,可以看出,空间电流调制光子晶体激光器在不同注入电流下表现出较好的远场发散角稳定性,而普通宽脊激光器的远场发散角随着注入电流的增大明显增加。在注入电流为 2.5 A 时,空间电流调制光子晶体激光器的远场发散角只有 12.6°,而普通宽脊激光器增加到 19.2°,发散角减小了近 35%,光束质量改善明显。

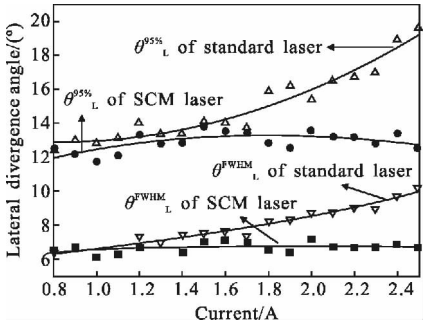


图 17 空间电流调制结构与不具有空间电流调制结构激光器的远场发散角随注入电流的变化情况

Fig.17 Far field divergence angle as function of incident currents with and without SCM structure

3.2 高亮度半导体激光合束

利用常规激光合束技术,长春光机所已实现了 1 kW/200 μm、2 kW/400 μm、3 kW/600 μm 等多个类型的光纤耦合输出半导体激光合束光源。在光谱合束技术方面,首先提出基于透射光栅的外腔反馈光谱合束半导体激光源结构,具有耦合效率高,合束单元多的优势,并进行了从可见光 (670 nm)、近红外(740、808、870、940、980 nm)、中红外(4.0 μm)等多个波段的光谱合束研究,均实现了高功率、高光束质量输出。为了提高光谱合束激光器的单元数量,在腔内引入成像光学结构,实现了 4 个激光线阵的光谱合束(中心 802 nm),连续功率达到 200 W,光束质量仅为 4.27 mm·mrad ,光束质量提高了 82 倍(合束前光束质量 368 mm·mrad)。如图 18 所示。

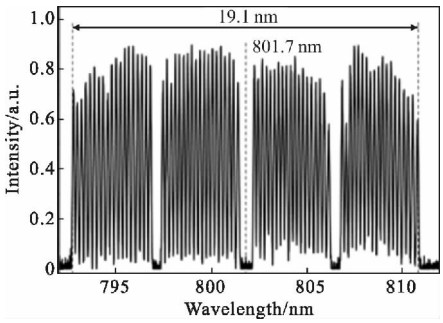


图 18 引入光谱合束结构成像光学后的光谱

Fig.18 Output spectrum of the SBC structure with the image optics

4 展 望

要实现高功率、高亮度的半导体激光源,需要从两方面研究:(1) 高功率、高光束质量半导体激光单元,从芯片层次上改善单元器件的输出功率及光束质量特性,研究近衍射极限输出的高功率激光单元;(2) 从合束技术上提升合束光源功率和光束质量特性,发展光谱合束技术,解决其工程化问题,结合高亮度的激光单元技术,实现千瓦至万瓦及的高亮度

半导体激光源,并探索新的合束技术。

参考文献:

[1] Agnieszka Pietrzak, Hans Wenzel, Götz Erbert, et al. High-power laser diodes emitting light above 1100 nm with a small vertical divergence angle of 13° [J]. ***Optics Letters***, 2008, 33(19): 2188-2190.

[2] Sverdlov B, Pfeiffer H U, Zibik E, et al. Optimization of fiber coupling in ultra-high power pump modules at λ=980 nm [C]//SPIE, 2013, 8605: 860508.

[3] Feit M D, Fleck J A, Jr. Beam nonparaxiality, filament formation, and beam breakup in the self-focusing of optical beams [J]. ***J Opt Soc Am B***, 1988, 5(3):633-640.

[4] Eliseev P G, Glebov A, Osinski M. Modeling of current crowding accompanying optical filament formation in semiconductor lasers and amplifiers [C]//SPIE, 1997, 2994: 580-590.

[5] Zheng Dai, Rainer Michalzik, Peter Unger, et al. Numerical simulation of broad-area high-power semiconductor laser amplifiers[J]. ***IEEE Journal of Quantum Electronics***, 1997, 33(12): 2240-2254.

[6] Robert J Lang, David Mehuys, Amos Hardy, et al. Spatial evolution of filaments in broad area diode laser amplifiers [J]. ***Applied Physics Letters***, 1993, 62(11): 1209-1211.

[7] Crump P, Winterfeldt M, Decker J, et al. Limitations to brightness in high power laser diodes [C]//2015 IEEE Photonics Conference (IPC), 2015: 553-554.

[8] Crump P, Winterfeldt M, Decker J, et al. Novel approaches to increasing the brightness of broad area lasers [C]//SPIE, 2016, 9767: 97671L.

[9] Alexander Bachmann, Christian Lauer, Michael Furitsch, et al. Recent brightness improvements of 976 nm high power laser bars[C]//SPIE, 2017, 10086: 1008602.

[10] Crump P, Erbert G, Wenzel H, et al. Efficient high-power laser diodes [J]. ***IEEE J Sel Top Quant Electron***, 2013, 19 (4): 1501211.

[11] Heiko Kissel, Paul Wolf, Alexander Bachmann, et al. Tailored bars at 976 nm for high-brightness fiber-coupled modules [C]//SPIE, 2017, 10086: 100860B.

[12] Kanskar M, Bao L, Chen Z, et al. Flared oscillator waveguide diodes (FLOW-Diodes) enable high brightness fiber-coupled modules [C]//The 25th International Semiconductor Laser Conference(ISLC), 2016, WE16.

[13] Kanskar M, Bao L, Chen Z, et al. Continued improvement in reduced-mode (REM) diodes enable 272 W from 105 μm 0.15 NA Beam[C]//SPIE, 2017, 10086: 1008609.

[14] Hans-Christoph Eckstein, Uwe Zeitner, Andreas Tünnermann, et al. Numerical simulation and optimization of micro structured high brightness broad area laser diodes [C]//SPIE, 2015, 9382: 93821H.

[15] Martin Winterfeldt, Paul Crump, Steffen Knigge, et al. High beam quality in broad area lasers via suppression of lateral carrier accumulation[J]. ***IEEE Photonics Technology Letters***, 2015, 27(17): 1809-1812.

[16] Feise D, Blμme G, Dittrich H, et al. High-brightness 635 nm tapered diode lasers with optimized index guiding [C]//SPIE, 2010, 7583: 75830V.

[17] Sμmpf B, Adamiec P, Zorn M, et al. 650 nm tapered lasers with 1 W maximμm output power and nearly diffraction limited beam quality at 500 mW [C]//SPIE, 2008, 6876: 68760M.

[18] Sμmpf B, Adamiec P, Zorn M, et al. Nearly diffraction-limited tapered lasers at 675 nm with 1-W output power and conversion effi-ciencies above 30% [J]. ***IEEE Photonics Technol Lett***, 2011, 23(4): 266-268.

[19] Erbert G, Fricke J, Hülsewede R, et al. 3 W-high brightness tapered diode lasers at 735 nm based on tensile strained GaAsP-QWs[C]//SPIE, 2003, 4995: 29-38.

[20] Fiebig C, Blμme G, Kaspari C, et al. 12 W high-brightness single-frequency DBR tapered diode laser [J]. ***Electron Lett***, 2008, 44(21): 1253-1254.

[21] Sμmpf B, Hasler X H, Adamiec P, et al. 12.2 W output power from 1 060 nm DBR tapered lasers with narrow spectral line width and nearly diffraction limited beam quality [C]//European Conference on Lasers and Electro-Optics 2009 and the European Quantum Electronics Conference, 2009.

[21] Redmond S M, Creedon K J, Kansky J E. Active coherent beam combining of diode lasers [J]. ***Opt Lett***, 2011, 36(6): 999-1001.

[22] Missaggia L J, Redmond S M, Bratain M A, et al. Advanced packaging of high-power slab-coupled optical waveguide laser and amplifier arrays for coherent beam combining [C]// Lasers and Electro-Optics, 2010: CThX4.

[23] Huang R K, Channa B, Missaggia L J, et al. Coherently combined diode laser arrays and stacks [C]//CLEO/QELS, 2009: CWF1.

[24] Redmond S M, Creedon K J, Kansky J E. Active coherent beam combining of diode lasers [J]. ***Opt Lett***, 2011, 36(6):

999-1001.

[25] Gapontsev V, Moshegov N, Berezin I, et al. Highly-efficient high-power pumps for fiber lasers [C]//SPIE, 2017, 10086: 1008604.

[26] Hemenway M, Urbanek W, Dawson D, et al. Advances in high-brightness fiber-coupled laser modules for pumping multi-kW CW fiber lasers[C]//SPIE, 2017, 10086: 1008605.

[27] Kanskar M, Bao L, Chen Z, et al. Continued improvement in reduced-mode (REM) diodes enable 272 W from 105 μm 0.15 NA beam[C]//SPIE, 2017, 10086: 1008609.

[28] Kasai Y, Yamagatab Y, Kaifuchi Y, et al. High-brightness and high-efficiency fiber-coupled module for fiber laser pump with advanced laser diode [C]//SPIE, 2017, 10086: 1008606.

[29] Yu H, Rossi G, Braglia A, et al. Development of a 300 W 105/0.15 fiber pigtailed diode module for additive manufacturing applications[C]//SPIE, 2017, 10086: 100860A.

[30] Xu D, Guo Z J, Zhang T J, et al. 600 W high brightness diode laser pumping source[C]//SPIE, 2017, 10086: 1008603.

[31] Kissel H, Wolf P, Bachmann A, et al. Tailored bars at 976 nm for high-brightness fiber-coupled modules [C]//SPIE, 2017, 10086: 100860B.

[32] Könning T, Köhler B, Wolf P, et al. Optical components for tailoring beam properties of multi-kW diode lasers [C]// SPIE, 2017, 10085: 100850G.

[33] 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 [C]//SPIE, 2017, 9733: 97330H.

[34] 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[C]//SPIE, 2015, 9348: 934809.

[35] Witte U, Schneider F, Holly C, et al. kW-class direct diode laser for sheet metal cutting based on commercial pump modules[C]//SPIE, 2017, 10086: 1008608.

[36] Heinemann S, Fritsche H, Kruschke B, et al. Compact high brightness diode laser emitting 500 W from a 100 μm fiber [C]//SPIE, 2017, 8605: 86050Q.

[37] Fritsche H, Krusche B, Koch R, et al. High brightness, direct diode laser with kW output power [C]//SPIE, 2014, 8965: 89650G.

[38] 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]. ***Opt Lett***, 2013, 38(16): 3154-3157.

[39] Daneu V, Sanchez A, Fan T Y, et al. Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity [J]. ***Opt Lett***, 2000, 25(6): 405-407.

[40] Chann B, Huang R K, Missaggia L J, et al. Near-diffraction-limited diode laser arrays by wavelength beam combining [J]. ***Opt Lett***, 2005, 30(16): 2104-2106.

[41] Gopinath J T, Chann B, Fan T Y, et al. 1450-nm high-brightness wavelength-beam combined diode laser array [J]. ***Opt Express***, 2008, 16(13): 9405-9410.

[42] Hecht J. Beam combining cranks up the power [J]. ***Laser Focus World***, 2012, 48(6): 41-43.

[43] 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, 2014: 230-231.

[44] Zimer H, Haas M, Nagel S, et al. Spectrally stabilized and combined diode lasers [C]//2015 IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference(HPD), 2015: 31-32.

[45] Strohmaier S G, Erbert G, Meissner-Schenk A H, et al. kW-class diode laser bars[C]//SPIE, 2017, 10086: 100860C.

[46] Rong Jiamin, Xing Enbo, Wang Lijie, et al. Control of lateral divergence in high-power, broad-area photonic crystal lasers [J]. ***Applied Physics Express***, 2016, 9: 072104.

[47] Wang Tao, Tong Cunzhu, Wang Lijie, et al. Injection-insensitive lateral divergence in broad-area diode lasers achieved by spatial current modulation [J]. ***Applied Physics Express***, 2016, 9: 112102.