

大功率激光器及其发展

王狮凌, 房丰洲

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 大功率激光器在工业与国防等领域有着广泛的应用,是现代激光材料加工、激光再制造、国防安全领域中必不可少的核心组件。随着激光技术的发展,大功率激光器的性能也在不断提高,许多新型激光器相继问世。相比于传统的灯抽运激光器,半导体激光器具有体积小、效率高、质量轻、寿命长、成本低等诸多优点,在国民经济的许多方面起着越来越重要的作用。随着大功率半导体激光器的不断发展,由其抽运的全固态和非全固态激光器的发展也十分迅速。综述了半导体激光器以及全固态和非全固态半导体抽运激光器的历史和进展,并就提升大功率半导体激光器各方面性能做了相关介绍,分析评述了大功率激光器的发展趋势,并展望了大功率激光器在未来智能制造中的应用前景。

关键词 激光器; 半导体激光器; 全固态激光器; 光纤激光器; 碱金属蒸气激光器

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.090005

High Power Laser and Its Development

Wang Shiling, Fang Fengzhou

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract High power lasers are widely used in the various areas such as industry and defense. They are essential components of modern laser in material processing, laser remanufacturing and defense security. With the development of laser technology, high power lasers have made much progress. Many new types of lasers are appeared in recent years. Compared with the traditional lamp pumped lasers, the semiconductor lasers play a more and more important role in the development of economy because of smaller sizes, higher efficiency, less weight, longer lifespan and lower cost. The characteristics and development of semiconductor lasers and all solid-state or not all solid-state semiconductor pumped by semiconductor lasers are summarized in details. The improvements on performance of high power semiconductor lasers, the development trend of high power laser diode and applications in intelligent manufacturing technology in the future are also discussed.

Key words lasers; semiconductor lasers; all solid state lasers; fiber lasers; alkali vapor lasers

OCIS codes 140.3280; 140.3290; 140.3580

1 引言

继原子能、计算机、半导体之后,激光是20世纪以来人类的又一项重大成就。激光科学与技术以各类激光器件为核心,主要研究激光的辐射理论、产生原理、物理性质、调制技术和应用方向,并将物理光学、几何光学、热力学、电子学等学科的知识交叉融合。

从1960年休斯顿实验室的科学家梅曼采用脉冲氙灯抽运掺铬的红宝石,制成新光源——红宝石激光器以来,激光技术的发展蒸蒸日上,因其具备较好的方向性、单色性、相干性和高亮度等特点,在工业、农业、通

收稿日期: 2017-03-07; **收到修改稿日期:** 2017-04-30

基金项目: 国家973计划(2016YFB1102200)、国家自然科学基金(51320105009, 61635008)、国家引智计划“111”项目(B07014)

作者简介: 王狮凌(1992—),男,硕士研究生,主要从事大功率激光整形扩束方面的研究。E-mail: wangshiling@tju.edu.cn

导师简介: 房丰洲(1963—),男,博士,教授,主要从事光学自由曲面加工,超精密加工技术及装备、微制造、微加工等方面的研究。E-mail: fzfang@tju.edu.cn(通信联系人)

信、娱乐、医疗、科研和国防等领域逐步产生深远影响。激光技术日渐成为了信息时代高新技术产业链中的关键一环,并成为一股重要的驱动力量,带动了人民生活的快速变化,推动着科研水平、国民经济建设、国防安全的战略性前进。

到目前为止,激光器种类繁多,根据工作物质物态的不同可以把激光器分为以下几类:

1) 固体(晶体和玻璃)激光器

固体激光器有红宝石、石榴石 YAG、钕玻璃激光器等。这类激光器将金属离子掺入具有良好的光谱特性、光学透射率特性和高度光学均匀性的晶体或玻璃基质中,进而通过其产生受激辐射作用构成发光体。其特点是结构紧凑、功率高、使用便捷,经常用于工业加工、医疗、军事等领域。

2) 气体激光器

气体激光器采用的工作物质为气体,并且根据气体中工作粒子的不同性质,还可以将其细分为分子(如 CO_2)、原子(如 He-Ne)、离子(如 Ar^+)以及准分子(如 Xe_2 、 XeF 、 CuF 等)激光器。其工作原理是未电离的气体通过气体放电激励、电子束激励、热激励和化学激励在气体的不同能级之间产生激光跃迁。其特点是种类多、转换效率高、波长范围广、应用范围广,可应用于精密测试计量领域。

3) 液体激光器

液体激光器采用的工作物质主要有有机荧光染料溶液和含有稀土金属离子的无机化合物溶液两大类构成。由于其工作物质为液体,因此这类器件的不足是稳定性比较差。其优点是输出的激光波长在很大范围内连续可调,被广泛应用于激光医学、光生物学、光化学等领域。

4) 半导体激光器

半导体激光器又称激光二极管,是以半导体材料作为工作物质的激光器,是最实用也是最重要的一类激光器。其工作原理为采用电注入式、电子束激励式和光抽运激励式等激励方式,实现在半导体物质能带之间的非平衡载流子的粒子数反转,在粒子数反转状态下,大量电子与空穴复合便产生受激发射作用。其中电注入式半导体激光器一般是由锑化铟(InSb)、砷化镓(GaAs)、砷化铟(InAs)等材料制成的半导体面结型二极管,沿正向偏压注入电流进行激励,在结平面区域产生受激发射。电子束激励式半导体激光器一般用 N 型或者 P 型半导体单晶(PbS、CdS、ZnO、ZnO 等)作为工作物质,由外部注入高能电子束进行激励。光抽运激励式半导体激光器一般用 N 型或 P 型半导体单晶(GaAs、InAs、InSb 等)作为工作物质,以其他激光器发出的激光作为光泵激励。其特点是体积小、质量轻、寿命长、成本低、易于调制、发散角大、单色性差,并可采用注入电流的简单方式来抽运其工作电压和电流,与集成电路兼容,因而可与之单片集成,应用于通信光源、光陀螺、光存储以及激光雷达等方面。

5) 化学激光器

化学激光器如氟化氢、碘原子激光器等,是利用化学反应释放的能量产生化学能激励来实现工作粒子数布居反转的激光器,其特点是将化学能直接转化为激光能,不像其他激光器那样需要外部能源,输出能量高、波带宽,适用于无电源的野外作业。

近年来大功率半导体激光器的研究工作取得了显著的进步,广泛应用于激光材料加工、激光再制造以及国防工业等领域,并且大大促进了全固态和非全固态半导体抽运激光器的技术革新和产业升级。本文将着重介绍近年来在提高大功率半导体激光器各方面性能所做的研究工作如提高激光器的功率、效率,增强其可靠性等方面;并且讨论全固态和非全固态半导体抽运激光器所取得的进展以及今后的发展趋势。

2 半导体激光器

半导体激光器的研究始于 20 世纪 60 年代^[1-4]。1961 年,Basov 等^[1]认为在半导体材料内能够产生受激辐射。1963 年,美国科学家 Hall^[2]首次研制成功了第一代半导体激光器——低温脉冲工作的 GaAs 同质结激光器。由于其结构的受激发射阈值电流密度非常高,需要 $5 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$,因此它虽然在理论上证明了半导体激光器的可行性,但是由于其只能在液氮温度下工作,工作条件要求过高,无实用价值,难于实用化,但它为半导体激光器的研制和开发利用奠定了基础^[5]。1963 年,Alferov 等^[6]为提高辐射效率提出异质结的结构,即把窄带隙的半导体材料夹在两个宽带隙半导体之间。随着液相外延、气相外延等先进的异质

结材料生长方法的相继出现, 异质结的生长情况也日趋进步。在 1967 年, 美国科学家研究出 AlGaAs-GaAs 单异质结, 成功实现了半导体激光器在室温下连续工作, 并且阈值电流密度为 $8.6 \times 10^3 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 较之前的同质结激光器下降了整整一个数量级。而在单异质结激光器大力开展研究的同时, 双异质结半导体激光器也由前苏联科学院约飞物理研究所的 Alferov 等宣布研制成功, 其结构是将具有低折射率和宽带隙的半导体材料包裹住有源层, 以便在横向(垂直于结平面的方向)有效地限制辐射复合。此结构可以将阈值电流密度降低到 $4 \times 10^3 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 双异质结构半导体激光器阈值电流密度之所以能够明显降低, 是借助双异质结的两个特点: 1) 有源区材料与两边包层材料的带隙差形成的势垒可以将注入的电子和空穴限制在有源区内, 复合发光的效率更高; 2) 两边包层材料的折射率小于有源区材料的折射率, 由全反射效应可以将光场限制在有源区内。自此半导体激光器迈入了新时期^[7-8]。随着能带工程理论的不断深入以及新材料、新结构、新工艺的不断问世及发展, 新制备出的量子阱激光器、垂直腔面发射激光器的各方面功能特性都有了很大程度的提高, 实现了高功率输出。

量子阱激光器由于其量子阱中的载流子是量子化地沿垂直井壁方向进行运动, 实现离子数反转的阈值电流很低, 同时还具备高转化率和高输出功率, 使半导体激光器的发展向前迈进了一大步。1977 年, 日本东京工业大学 Soda 等^[9]设计了光学谐振腔与半导体芯片衬底垂直的垂直腔面发射激光器(VCSEL)。在大功率工作条件下, 光学灾变性损坏通常会发生在传统的边发射半导体激光器的腔面上, 而垂直腔面发射激光器则凭借其特殊的外延结构增益区, 可以避免光学灾变性损坏, 同时还具备器件工作寿命长、单波长工作稳定、频率可调等优点。此外, 垂直腔面发射激光器由于其光波导面积较大, 相比于边发射半导体激光器产生的功率密度更低, 因此, 不仅工作时间延长, 而且降低了系统的冷却条件, 可靠性也得到了提高, 现已广泛应用于光通信、光互联等光电领域。

在欧美等国大力研发的情况下, 半导体激光器器件结构理论的研究日益深入, 材料制备工艺也逐渐成熟, 尤其在材料外延生长技术、腔面钝化技术、芯片结构的优化技术和器件封装等方面都有了显著提高。因此, 波段宽、成本低、体积小、质量轻、制作简单、易于大量生产和寿命长的特点使半导体激光器的应用遍及通信光源、光陀螺、光存储以及激光雷达等方面。

2.1 半导体激光器的输出功率

目前国际上大功率半导体激光器的标准封装形式主要有单管、线阵、迭阵这三大类。围绕半导体激光器性能方面的提升, 首先考虑的通常是功率, 其他指标例如高转化效率、高可靠性、高光束质量都是在功率提升之后逐步改进的, 继而实现对大功率激光器整体功能特性的完善, 方便其在各个领域中的更新换代。

2.1.1 单管输出功率

Alfilight 公司在 2010 年采用面发射分布反馈(SE-DFB)技术研制成功的半导体激光单管连续输出功率可达 73 W, 峰值脉冲功率超过 300 W^[10]。美国 Axcel Photonics 生产的 808 nm 的半导体激光器单管, 腔长为 2 mm, 发光单元宽度为 400 μm , 连续输出功率达到 29 W^[11]。美国 nLight 公司生产的 885 nm 单管激光器, 其峰值输出功率超过 25 W(额定功率 12 W), 转换效率超过 60%^[12]。德国 Ferdinand-Braun-Institut 生产的 980 nm 的半导体激光单管, 它的发光单元宽度为 96 μm , 连续输出功率达到 20 W, 工作 4000 h 后无损坏^[13]。

2.1.2 激光器线阵输出功率

由于单个半导体激光器的腔体发光面积较小, 其输出功率最高只能达到几十瓦, 因此要实现更量级的激光输出, 通常采用阵列式构造, 实现多个激光器单管的组合。通常可根据要求达到的功率将成千上百个单管平行排列, 构成一个 bar 条, 即线阵半导体激光器。如表 1 所示, 半导体激光线阵的输出功率在 10 年内增长了近 3 倍。美国 Spectra-Physics 研制的 940 nm 波长单激光线阵结构将 65 个填充因子为 83%、腔长为 5 mm、条宽为 125 μm 的激光单元以 150 μm 为间隔集成在一个标准厘米线阵上, 在水温 5 $^{\circ}\text{C}$ 单边冷却散热的情况下可以达到 640 W; 而若采用双边冷却散热方式, 连续功率可以实现 1010 W 的输出。同时该激光线阵相同的结构在波长 980 nm 和 808 nm 分别实现功率 950 W 和 800 W 连续激光输出。

表 1 半导体激光器 bar 条输出功率

Table 1 Output power of semiconductor laser bar

Research institution	Published time	Wavelength /nm	Efficiency /%	Output power /W	Operating temperature /°C
Fraunhofer-IAF ^[14]	2000	980	52.5	267	22
Bookham ^[15]	2005	920	62	325	16
nLight ^[16]	2005	790	58	364	6
Jenoptic ^[17]	2005	940	>60	509	5-8
Spectra-Physics ^[18]	2007	940	65	700	25
Spectra-Physics ^[19]	2007	940	65	928	10
Jenoptik ^[20]	2007	980	70	1005	15
Spectra-Physics ^[21]	2008	940	67.4	1010	5-8
Science Research Laboratory ^[22]	2010	940	70	940	20

2.1.3 激光器迭阵输出功率

为了提高半导体激光器的功率输出,一方面可将若干个单管激光器芯片集成,形成激光器 bar 条。同时,还可以将多个 bar 条堆叠起来形成二维面阵,激光器面阵的光功率可以达到几十千瓦甚至几百千瓦^[23-24]。

德国 Laserline 公司在激光器迭阵中采用激光合束技术,多款大功率半导体激光器已经投入商用,主要参数如表 2 所示。德国 Dilas 公司通过采用 11×8 个单元(每个单元 25 个 bar)的二维列阵结构,制备了波长为 941 nm,脉冲输出功率为 264 kW 的半导体激光器列阵。该公司生产的产品已经广泛应用于工业加工、国防、医疗以及科研等领域。

表 2 德国 Laserline 公司的半导体激光器迭阵合束光源参数^[25]Table 2 Semiconductor laser stack source parameters from German Laserline company^[25]

Output power of continuous wave /W	Beam parameter product /(mm·mrad)	Spot diameter /mm ($f=150$ mm)
3000	20	0.3
4500	30	0.45
6000	40	0.6
10000	60	0.9
15000	100	1.5
20000	200	3

2.2 半导体激光器的效率

评价半导体激光器的的一项重要指标是电光转换效率。通常,进入材料的那部分能量都会转化为有用的光,而剩余的大部分通常会以热的形式残留在设备中。对于一个给定的能量源来说,高效率可以获得更多的有用输出,产生的废热也更少,这就意味着可以使用更为环保经济的冷却系统。

效率高的激光器设备产生较少废热的同时也意味着整个设备的温度较低,而较低的工作温度也保障了激光器更长的工作寿命,因为半导体组件的降解速率是会随着温度的上升以指数形式升高的。相对来说,废热产量更低也意味着激光器可以输出更高的功率。高质量低缺陷的激光器可获得的峰值功率是会受到热效应影响的,也就是说它的峰值功率只在特定的温度才能实现。低废热意味着激光器可以在达到给定温度之前尽可能提高输出功率。

总而言之,半导体激光器的电光转换效率十分重要,尤其是在需要高输出功率的工业、医疗和军事领域。另外,半导体激光器在不断追求高功率的同时也试图在更加宽阔的波段领域寻求突破。以可获得的宽波段为例,图 1 展示了 nlight 公司生产的在微通道热沉的情况下 1 cm 宽的 bar 条的主要性能,即峰值功率和峰值效率^[26]。从图 1 中可以发现:

- 1) 峰值效率与峰值发射功率基本成正相关;
- 2) 在波长范围为 800~1000 nm 波段的激光性能最为优异,因此这一波段在激光市场上应用范围最广、

时间最长；

3) 波长不同每个光子的能量也不相同,功率随波长的变化有些复杂,但是在大于 800 nm 的波段,波长越短,光电子能量越高,峰值功率越高,转换效率也相对更高,这也促进了短波长高效率激光器的研究。

表 3 列举了近年来市场上应用最为广泛的半导体激光器的最高输出功率、转换效率和工作温度,工作波段为 800~1000 nm。

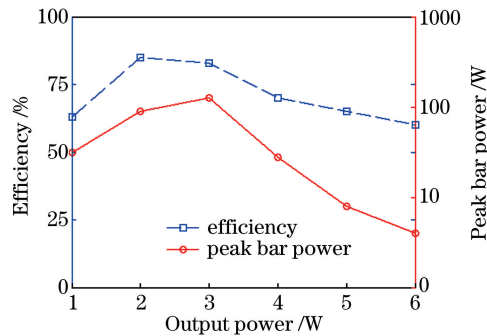


图 1 nLight 公司生产的 1 cm bar 条功率和功率转换率随波长的变化^[26]

Fig. 1 Power and efficiency versus wavelength of 1 cm bar from nLight corporation^[26]

表 3 半导体激光器 bar 条输出功率及转化效率

Table 3 Output power and efficiency of semiconductor laser bar

Wavelength /nm	Output power /W	Efficiency /%	Operating temperature /°C
1064 ^[27]	16	74	25
975 ^[28]	7	85	-50
975 ^[28]	6	76	10
970 ^[29]	50	73	10
940 ^[30]	75	73	25
885 ^[31]	>200	70	5
808 ^[32]	80	>70	15

2.3 半导体激光器的可靠性

目前,随着工业加工、国防安全等领域对半导体激光器输出功率要求的日益提升,半导体激光器的发展进入了快车道,单管输出功率已超 10^4 kW,阵列式激光器的输出功率亦明显提高,电光转化效率也突破 80%。但是,激光器功率的急剧上升也致使可靠性水平下降,缩短了其工作寿命。因此,国内外学者对于如何保证高功率输出的同时进一步增强其可靠性与寿命展开了深入的研究工作^[33-34]。

在光通信、光存储等领域,单管激光器的工作时间可超 10^6 h,而线阵半导体激光器的寿命则降低到 $1 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$ h,多个 bar 条组成的半导体激光器阵列更是降低了好几个数量级^[35-36]。考虑到整体激光器系统的体积,阵列中各个激光发射单元的排布较为紧密,获得高功率激光输出的同时也给系统的散热带来了诸多问题,在连续大电流工作时,各个发光单元产生的热量分别累计相互影响,从而产生热量梯度,因此常常会造成烧孔、电热烧毁和端面灾变性损伤。与此同时,各单元紧密的排列提升了系统整体结构的复杂性,同时也对激光器件的整体封装技术提出了挑战。由于封装工艺不到位引起的焊料空洞、引线脱落等会对激光器的可靠性带来潜在的影响。

解决这些问题一般通过以下方法:1) 提高晶体生长质量;2) 改进制备工艺和封装技术;3) 增大光斑尺寸;4) 优化传热结构和散热方法等。近年来,由于半导体激光器转换效率的提高以及封装散热工程的改进,半导体激光器单管报道的最长寿命很多已达到 10^5 h,线阵的可靠性也有了非常明显的提高^[37-38]。半导体激光器的高电光转换率可能会在重量、空间以及电能吃紧的领域产生新的用途。较高的电光转换效率可以降低内部工作温度,也会减轻折射率分布产生的热效应。

3 全固态激光器

全固态激光器全称为半导体激光器抽运的固态激光器,是以半导体激光器或者半导体激光器阵列作为

抽运源,掺入金属离子的晶体或玻璃基质作为增益介质的激光器装置。因此,从某种意义上讲,全固态激光器整合了半导体激光器和固体激光器两者的优点,具有体积小、质量轻、寿命长、性能稳定、可靠性高、光束质量好、转换效率高等一系列优势,发展前景巨大。且它可通过变频获得宽波段可见、红外、紫外甚至深紫外激光输出,采用电激励的方式也便于模块化,在军民领域都有极其广泛、重要的应用,因而成为当前激光技术领域研究热点之一。

自1964年世界上第一台激光二极管抽运的固体激光器从美国麻省理工学院林肯实验室问世以来^[39],大功率全固态激光器发展快速。与传统的灯泵激光器相比,其总体效率可以高出10倍,整体可靠性也可以提高100倍左右。在输出功率以及光束质量的控制方面,美国已实现光束质量小于2倍衍射极限的万瓦激光输出,并计划进一步提高其功率至十千瓦,用于机载战术激光武器。

基于全固态激光器其自身的优势以及巨大的市场潜力,在欧美等国的努力研发下,辅之以相干合成和热容技术,目前输出平均功率均已超过千瓦,可用于工业加工和国防安全领域。高功率全固态激光器按增益介质形状主要分为圆棒激光器、板条激光器、薄片激光器和光纤激光器等。国内对于全固态激光器的研究受限于早期大功率激光器抽运源禁运,起步较晚,但近年来发展迅速。

3.1 圆棒激光器

圆棒激光器是目前发展最成熟、应用最广泛的固体激光器。其特点是增益介质呈圆棒状,主要有Nd:YAG和Yb:YAG。依照其抽运方式的不同可以分为端面抽运棒状激光器和侧面抽运棒状激光器,各自具备不同的特点。端面抽运也称纵向抽运,是指抽运光从圆棒状晶体的端面入射,产生的激光与抽运光入射方向相同,因此转换效率高、光束质量好。端面面积越小,激光振荡模式与抽运光匹配度越高,与此同时,功率密度也会很高,这就对激光晶体的损伤阈值提出了很高的要求。因此,端面抽运产生的激光功率最多只能达到数百瓦的量级,并且由于其工作物质端面面积较小,短时间内产生的热无法释放因而会产生热透镜效应,影响光束质量。

侧面抽运又称横向抽运,是指抽运光从晶体的侧面射入,即从轴向进行抽运,产生的激光振荡方向与抽运光方向垂直。相比于端面抽运,侧面抽运的光束质量一般,但成本较低,单个激光单元产生的功率可以达到千瓦量级。

2003年日本Toshiba公司采用6个激光头串接定标放大,当注入电功率为52.5 kW时,可以获得12 kW的1064 nm激光输出^[40]。图2为LD抽运模块的示意图,采用三个互成120°间隔的半导体激光器叠阵抽运圆棒晶体,为了提高抽运效率,增加抽运次数,在石英管的表面镀制高反膜。当注入电功率为52.5 kW时,获得了12 kW的1064 nm连续激光输出。

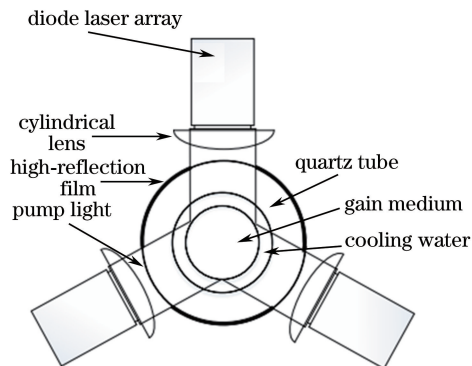
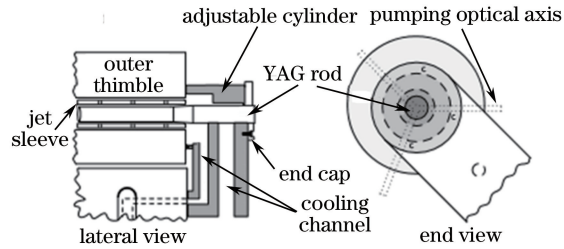


图2 LD抽运模块示意图^[40]

Fig. 2 Schematic of the LD pump module^[40]

2005年,美国Bruesselbach等^[41]在电子注入功率为9 kW时,成功实现单根Yb:YAG激光棒(图3)输出功率达到2.65 kW,也是目前单根激光棒所能达到的最大输出功率,转换效率为28%。当抽运功率为6 kW时,可以实现860 W激光输出,光束质量因子为2.1。

2004年,中国科学院的Bo等^[42]利用5个均匀排列在激光晶体周围的二极管阵列抽运Nd:YAG激光

图3 Yb:YAG激光头的抽运和冷却示意图^[41]Fig. 3 Schematic of the Yb:YAG pump module and its type of cooling^[41]

器,输出功率可达到 1.15 kW。2006 年 4 月中国科学院半导体所的林春学等^[43]通过双棒串接以及自行研制的高功率激光头,获得超 3 kW 的全固态激光输出,同年 10 月获得 3.8 kW 激光输出。而 11 月该所全固态光源实验室对自行研制的高功率激光头进行了技术优化,转化效率提高到 50%,输出激光超过 4 kW^[44]。2007 年,该所利用三棒串接实现 6 kW 激光输出,输出功率又上升了一个台阶^[45]。2012 年,该所采用自主研发的千瓦级半导体激光侧面抽运模块,利用三级谐振加五级串联放大技术实现了平均功率大于 7 kW 的稳定激光输出^[46]。通过测试,该激光器连续运转 8 h 的平均输出功率为 7.13 kW,不稳定性小于±0.98%,电光效率为 18.4%,光束质量为 50.3 mm·mrad,最高激光输出功率超 7.6 kW。利用自行设计的光束整形系统,将上述激光耦合进 1 mm 芯径的光纤,最高出纤功率为 6.82 kW,耦合效率优于 95%。

3.2 板条激光器

圆棒激光器虽是目前发展最成熟、应用最广泛的固体激光器,但其大功率的输出受限于圆棒的热畸变、双折射效应以及破裂应力而无法承受更高功率的抽运强度。因此,如何解决固体激光器的热效应从而提高全固态激光器的输出功率和光束质量成为了科研人员研究的重点。为此,薄片激光器、板条激光器、热容激光器等新型的激光器先后问世。

其中板条激光器问世于 1972 年,其激光增益介质的形状为板条几何结构,该结构(图 4)将激光晶体切割成“口香糖”结构,由于板条激光器的工作物质结构特殊,在三组对称面可以实现端面抽运、面抽运和边抽运三种方式。端面抽运方式与圆棒激光器相类似,板条的端面面积较小耦合难度较大,而采用面抽运方式可以在一定程度上降低其功率密度,晶体内部热效应影响较小,但是与冷却面接触的抽运面容易被污染从而影响抽运质量。边抽运方式与端面抽运的面积相近,受限于抽运面积同样无法射入较强的抽运光,但其抽运效率高、光束质量也由于冷却面与抽运面相分离而能得到较好保障。另外,板条的形状也可以根据具体的应用需要切割成其他形状来提高抽运效率。

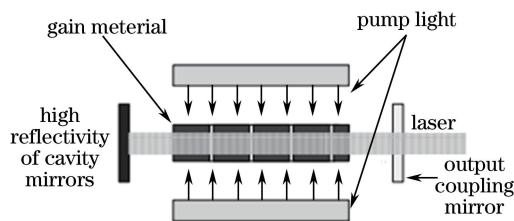


图4 面抽运板条激光器的结构图

Fig. 4 Sketch of face-pumped slab solid-state lasers

板条激光器的结构最早是由通用电气公司的工程师 Martin 和 Chernoch 提出,其主要特点是通过特殊的“之”字形光路来缓解板条厚度方向上产生的热畸变,同时还可以消除热应力导致的双折射和双轴聚焦。而激光输出功率则由宽度方向的尺寸决定,同时配合边缘绝热技术减小该方向上的热应变以期提高输出激光的光束质量。

2003 年日本 Fanuc 公司成功利用板条结构抽运单块 Nd:YAG 晶体,输出激光功率达到 6.1 kW^[47]。2005 年美国诺格公司利用端面抽运将两块 12.5 kW 的板条合成放大实现 25 kW 的激光输出^[48]。

2006 年,美国诺格公司采用主振荡功率放大(MOPA)结构将两路放大链路进行相干合成,获得了

1.73 倍衍射极限,输出功率为 19 kW 的激光^[49]。

2007 年,诺格公司对前期产品结构进行了改进,在激光功率有所降低的同时进一步提高了光束质量,实现了光束质量因子为 1.3,功率为 15 kW 的板条激光输出^[50],如图 5 和图 6 所示。

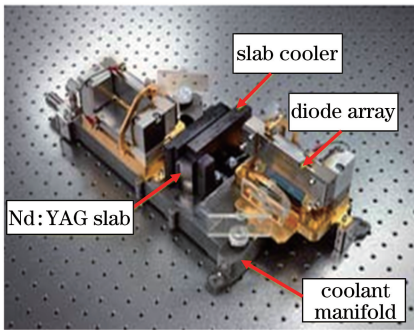


图 5 诺格公司报道的输出 15 kW 的 Nd:YAG 板条激光器放大模块实物图^[50]

Fig. 5 Photograph of amplification modules of 15 kW Nd:YAG slab lasers reported by Northrop Company^[50]



图 6 诺格公司报道的输出 15 kW 的全固态板条激光系统实物图^[50]

Fig. 6 Photograph of 15 kW solid-state slab lasers reported by Northrop company^[50]

2008 年,Yasuhara 等^[51]通过研究大功率二极管抽运 Nd:Glass 板条激光器装置,实现了平均功率为 213 W、峰值功率为 2.4 GW 的激光输出。

2009 年,美国诺格公司通过将 7 束 15 kW 板条固体激光器进行相干合束,实现了光束质量因子为 2.9,功率为 100 kW 的激光输出^[52-53]。

国内开展高平均功率板条激光器研究的单位主要有华北光电所、清华大学和中国科学院上海光学精密机械研究所,其中 2008 年华北光电技术研究所设计了通过传导冷却端抽运的 Nd:YAG 板条模块^[54]。单个模块实现对百瓦级信号 20 倍的放大,总共 4 个模块组成放大链路。单纵模种子光经预放后注入放大链,在抽运功率 36.8 kW 时,系统的输出功率为 11.4 kW,转换效率大于 30%,在垂直方向上光束质量因子 $M^2 \approx 10$ 。2010 年,该所对输出功率 11 kW 的增益介质通过有限元软件进行热分析,并采用自适应光学系统进行光束净化,最终输出激光的光束质量因子 $M^2 = 4.8$ ^[55]。清华大学 Gong 等^[56]提出了角抽运板条激光器,采用的角抽运 Yb:YAG/YAG 复合板条结构,通过将复合晶体的四个角切割成 45° 以形成抽运面,使得抽运光在晶体介质中多次通过,以实现均匀抽运,该结构如图 7 所示。采用这种结构,该小组在 2004 年获得 202 W 的激光输出,斜率效率为 22.7%;又在 2005 年获得 520 W 的激光输出^[57],斜率效率和光-光转换效率分别为 32% 和 25%,光束质量因子 M^2 在宽度方向和厚度方向分别优于 20 和 5。并且在 2006 年,该小组利用该结构获得了 1016 W 的连续激光输出^[58],斜率效率和光-光转换效率分别为 42.8% 和 34.4%。

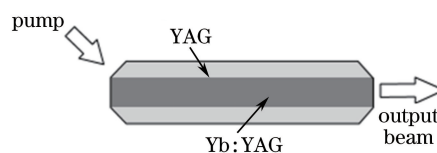
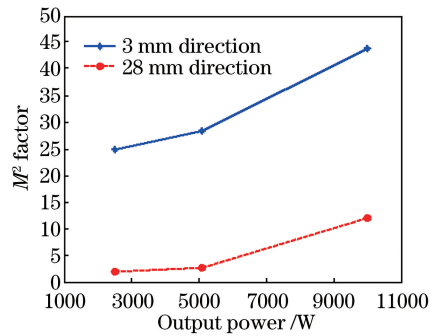


图 7 角抽运 Yb:YAG 板条示意图^[56]

Fig. 7 Schematic of the corner-pumped slab Yb:YAG^[56]

2011 年,中国科学院理化技术研究所激光中心采用 MOPA 结构,振荡级输出功率 100 W,光束质量 $M^2 \approx 1.1$,经过 4 级板条放大后实现了 10 kW 的输出功率。其中 4 级板条的第 1 级和第 2 级采用了像传递空间滤波系统,第 3 级和第 4 级未采用像传递空间滤波系统,该激光器输出光束质量和输出功率如图 8 所示。随着板条激光器的功率升高,光束质量呈下降趋势^[59]。

2012 年,中国工程物理研究院应用电子学研究所报道了其设计的 10 kW 级高功率全固态激光放大器实验装置^[60]。也是通过 MOPA 结构将种子源通过一级预放大器和两级主放大器放大,获得了光束质量为 7.56 倍衍射极限,功率达到 11.3 kW 的激光输出,出光时间为 110 s,光-光转换效率为 30%。

图 8 板条 MOPA 激光系统光束质量和输出功率的关系^[59]Fig. 8 Relationship between beam quality factor and output power of MOPA slab lasers^[59]

3.3 光纤激光器

光纤激光器是利用光纤作为激光介质的激光器,结构如图 9 所示。受限于光纤纤芯尺寸,一般的抽运源无法完全聚焦至其芯部,因此自 1961 年 Snitzer 等使用光纤作为增益介质制成世界上第一台光纤激光器之后的 20 多年里,光纤激光器一直无法快速发展^[61]。但随着抽运技术、光纤工艺及半导体激光器的发展,为实现光信号放大,半导体激光光泵掺铒单模光纤的新方法问世,但其对抽运的半导体激光模式有较高要求,导致单模掺铒光纤放大器仅能输出几百毫瓦的激光,无法满足大功率应用需求。1988 年,采用包层作为光抽运的媒介这一设想被提出。早期的设计是将内包层设计为圆形,但对称的圆形内包层会产生不经过纤芯的螺旋光,较低的纤芯利用率也影响着抽运效率,之后通过逐步改变内包层的形状,方形、矩形、D 形以及梅花形纷纷应运而生。激光器的转换效率也随之提高。特别是双包层光纤的问世,使得光纤激光器的功率得到了快速地发展,光纤激光器的发展进入了快车道。

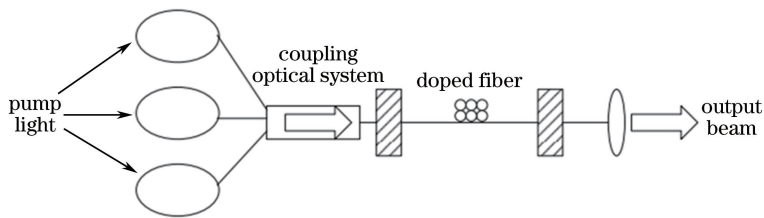


图 9 大功率光纤激光器结构原理图

Fig. 9 Schematic diagram of the high power fiber lasers

双包层光纤结构特殊,和常规光纤相比,多了一个包裹纤芯的内包层用于光束传输,如图 10 所示。内包层作为传输波导,其直径和数值孔径都较大,直径一般为百微米,因此就降低了之前抽运光必须耦合到纤芯时的难度系数,耦合效率很高。直径为微米至几十微米量级的纤芯通常掺有稀土离子,如 Yb、Nd 或 Er 等,是激光的振荡通道,也是单模激光的传输场所。外包层由折射率小于内包层的材料构成,起到保护内包层的作用。设计时选择纤芯的折射率大于内包层,进入内包层的抽运光就会以全反射形式多次穿越纤芯,可保证激光始终在纤芯中振荡,从而输出的激光模式好、质量高,并伴随很高的转换效率^[62],一般掺 Yb 的光纤转化效率可达 80%。作为大功率光纤激光器中不可或缺的组成部分,双包层光纤激光器的转化效率受内包层的

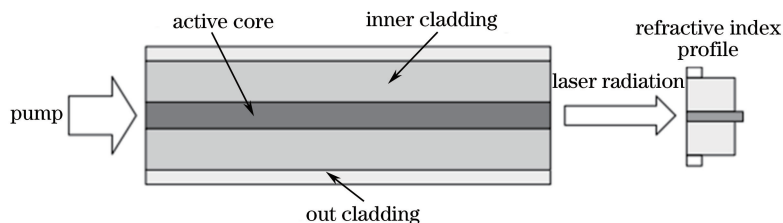


图 10 双包层光纤示意图

Fig. 10 Schematic of the double-cladding fiber

横截面积、形状以及数值孔径影响很大。其中在内包层的诸多形状中,对称性最高的圆形是转化效率最低的,而在目前其他内包层结构中,在兼顾抽运效率和光纤制备的情况下,梅花形、D形结构应用最为广泛。

近年来,随着大功率半导体激光器快速发展以及双包层掺杂光纤制造工艺持续进步,单模双包层光纤激光器的单光纤输出功率呈现指数倍的递增,光纤激光器的输出功率水平按每年翻一倍的速度增长。2003年,英国SPI制作的波长为1090 nm光纤激光器,可以实现光束衍射极限因子小于3倍,功率为1 kW的激光输出。2004年,该公司利用两个半导体激光模块双端抽运长12 m、数值孔径小于0.05、纤芯直径小于40 μm 的双包层光纤,其中两个半导体激光模块的波长为975 nm,总功率为1.8 kW,可以得到波长为1.1 μm ,光束衍射极限因子为1.4,功率为1.36 kW的连续光输出,光-光转化率高达83%^[63]。2005年,德国Jena大学对传统的光纤激光器进行了部分改进,利用光子晶体单纤可以得到输出功率为1530 W的高光束质量激光^[64]。2017年,II-VI公司宣布准备新建一条光纤半导体激光器生产线,预计功率将会达到 10^5 W,可以满足当今工业大功率生产加工需求。

国内对于双包层光纤激光器研究起步相对较晚,第一根双包层掺Yb光纤直到1999年才由中国电子科技集团公司第46研究所和南开大学共同合作研究完成^[65]。2006年,中国科学院上海光学精密机械研究所通过将近四年的研发工作,成功采用大功率半导体激光器双端抽运长度为12 m的双包层光纤,输出激光功率可以达到714 W^[66]。同年,中国兵器装备研究院通过大功率半导体激光器对单根光纤激光器进行抽运,在转化效率大于60%的情况下得到了功率为1064 W的激光输出。同年,华北光电技术研究所采取双端面抽运方案对直径为700 mm的D形内包层进行抽运,当抽运光功率为1550 W时,输出激光功率为1207 W,光-光转换效率为78.6%^[67]。

然而,考虑到掺杂光纤受受激布里渊散射和受激拉曼散射等非线性效应的影响以及纤芯的光热损伤等物理现象,单光纤输出功率还是较为有限,而且随着输出功率的提高,光束质量也很难得到保证。因此,为满足材料加工、空间光通讯、激光雷达和激光武器等诸多领域对高质量、高功率和高亮度的激光束的需要,光纤激光合束技术迅速发展了起来,常通过采用激光器阵列合束的方法来获得更高的激光输出功率,而激光合束技术主要有相干和非相干合束两大类。其中相干合束技术被认为是获得近衍射极限的大功率光束输出的高效方法^[68]。全光纤组束、主振荡放大、外腔相干组束和多芯光纤自组束是目前市场上应用较多的相干合束技术^[69-70]。

2009年,美国空军实验室的Shay等^[71]采用5路百瓦级光纤放大器的相干合成得到725 W的激光输出。2010年Q-peak公司的Moulton采用MOPA结构,通过6个半导体激光器侧面抽运掺铥光纤对种子光进行放大,再经过两级功率放大,初始功率为50 W,最终功率输出1 kW以上,整体转换效率为53.2%。

非相干合束技术主要是通过功率的标量合并来实现激光功率的扩大。与相干合束技术不同,非相干合束技术的原理简单、结构简洁且操作方便,仅需合束元件频谱范围包括抽运源即可,抽运源波长对放大器的输出光束没有相位要求。2009年,美国海军实验室的Sprangle和Ting等采用非相干合束技术将4台单模光纤激光器合束得到3 kW的功率输出。同年,德国的Wirth也采用外腔非相干合束技术将4路光子晶体光纤放大器得到功率超过2 kW的合束激光。

国内南开大学在2015年利用双包层掺Yb光纤得到6.5 W的激光输出,转化效率可达86.5%;北京光电技术研究所也实现了单模连续全光纤激光器30 W的功率输出;2012年,国内首台1 kW工业光纤激光器在西安光机所研制成功。2016年,功率达到12 kW的工业级光纤激光器由天津东方锐镭公司联合国防科学技术大学高能激光技术团队研制成功,其各方面指标排在世界前列。近日,武汉锐科光纤激光器技术有限责任公司也表示该公司投入研发的国内首台20 kW光纤激光器已处于装机阶段,预计2018年调试完毕并交付使用,国产光纤激光器又将开启一个新的里程碑,其国际竞争力也将越发强劲。

4 半导体抽运碱金属蒸气激光器

半导体抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)属于非全固态激光器,工作物质为碱金属原子饱和蒸气,与气体激光器一样,通过外层价电子能级跃迁来实现激光输出。由于集合了气体和固体激光器的长处,系统散热好、转换效率高,市场应用前景巨大。目前,人们对DPAL的功率定标放大能力开展了系统深入的研究,并

于近期成功实现了高效的千瓦级连续输出,正处于功率提升的关键发展时期。

2003年,Krupke等^[72]首先提出半导体抽运碱金属蒸气激光器的概念。2005年,Page等^[73]首次完成半导体抽运铷蒸气激光器的出光实验。2012年,俄罗斯核物理中心的研究人员采用线宽为0.7 nm弱压窄的半导体激光抽运流速为20 m/s碱蒸气,可以得到连续输出功率为1 kW的铯激光,转换效率可达48%。这是首次关于采用横向抽运流动介质方法公开报道,体现了流动散热的优越性,使半导体抽运碱金属蒸气激光器的研究又上了一个台阶。

国内对于半导体抽运碱金属蒸气激光器的研究大多还处于理论研究阶段,浙江大学、北京工业大学以及深圳大学都开展了相关方面的研究工作。而国防科技大学在2011年首次完成了半导体抽运铷蒸气激光器的出光实验,也是国内对于该领域研究的一项重大突破。

5 激光器的发展水平

目前各类激光器的发展水平迅速,其中商业应用较为广泛的大功率激光器型号如表4所述。

表4 各类商用大功率激光器发展水平

Table 4 Development level of various commercial high-power lasers

Classification	Output power of continuous wave /W	Research institution	Laser part types
Diode laser	20000	Laserline	LDF
Fiber laser	65000	IPG	FLW-D85-HP
Gas laser	8000	Rofin	SLAB-Lasers DC Series
Solid laser	1000	Rofin	DQ-Series

6 结束语

激光领域已经为人类结出许多硕大的科研成果。然而,众多新技术新工艺新产品接连问世的同时,各类激光器的性能也存在着或多或少的不足,大功率激光器的快速发展和广泛应用还面临着诸多难题。例如,固体激光器由于热效应的限制导致其功率提升受限和光束质量下降;高功率气体激光器由于原理限制致其具有庞大的体积规模,且维护成本较高;光纤激光器的单根光纤输出功率由于端面损伤、非线性效应、材料破坏阈值等影响因素而无法突破上限;半导体激光器的光束质量固体、激光器的热效应问题、光纤激光器的非线性效应;化学激光器的体积重量及燃料安全性问题,严重制约着其向更高功率发展的进程,以至于高能激光真正实现兆瓦级功率水平的应用还面临诸多挑战。

如今,各路厂商逐渐重视下游应用产业的开发,不断地研制新工艺、新技术,使激光能够应用在更多的材料上。同时,传统应用对激光设备的需求也在不断地增加,因此未来中国工业激光总产值还将保持较高的增长速度。伴随机器人技术与工业智能制造发展的大潮来袭,激光加工作为先进的制造技术,本身就融合了机械、光学、电气等多个领域,智能制造的基因与生俱来。因而,激光是智能制造产业前进队伍中不可或缺的先行者。现如今激光技术已经迈入产业化的高速发展阶段,激光显示、激光3D打印以及激光雷达的出现也带动了相关行业的快速进步。结合“中国制造2025”的契机,相信在不久的将来,激光加工技术将作为传统工业加工的重要补充,有效推动科学技术的发展和进步。

参 考 文 献

- [1] Basov N G, Krokhin O N, Popov Y M. Obtainment of the negative temperature state in the p-n junctions of degenerate semiconductors[J]. Zhur Eksptli Teoret Fiz, 1961, 40.
- [2] Hall R N. Coherent light emission from p-n junctions[J]. Solid-State Electronics, 1963, 6(5): 405-408.
- [3] Diehl R High-power diode lasers[M]. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2000, 69.
- [4] Bachmann F. Industrial applications of high power diode lasers in materials processing[J]. Applied Surface Science, 2003, 208: 125-136.
- [5] Guo X Y. Development of semiconductor laser[J]. Laser Technology, 1987, 11(2): 1-6.
- [6] Alferov Z I, Kazarinov R F. Semiconductor laser with electric pumping[J]. Inventor's Certificate, 1963, 181737.

- [7] Du Baoxun. Principle of semiconductor laser[M]. Tianjin: The Publishing House of Ordnance Industry, 2004: 62-65.
杜宝勋. 半导体激光器原理[M]. 天津: 兵器工业出版社, 2004: 62-65.
- [8] Alferov Z I, Gurevich S A, Kazarinov R F, *et al.* Semiconductor laser with extremely low divergence of radiation[J]. Soviet Physics: Semiconductors, 1974, 8: 832-833.
- [9] Soda H, Iga K, Kitahara C, *et al.* GaInAsP/InP surface emitting injection lasers[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(12): 2329-2330.
- [10] Hand C F. Novel 300 W single-emitter laser diodes for laser initiation applications[C]. SPIE, 2010, 7795: 779507.
- [11] Gao W, Xu Z, Cheng L, *et al.* High-power highly reliable single emitter laser diodes at 808 nm[C]. SPIE, 2007, 6456: 64560B.
- [12] Leisher P, Price K, Bashar S, *et al.* Mode control for high performance laser diode sources[C]. SPIE, 2008, 6952: 69520C.
- [13] 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 [C]. SPIE, 2009, 7198: 719814.
- [14] Braunstein J, Mikulla M, Kiefer R, *et al.* 267 W cw AlGaAs/GaInAs diode laser bars[J]. Proceedings of SPIE, 2000: 17-22.
- [15] Lichtenstein N, Manz Y, Mauron P, *et al.* 325 Watts from 1-cm wide 9xx laser bars for DPSSL and FL applications [J]. Proceedings of SPIE, 2005: 1-11.
- [16] Crump P, Wang J, Crum T, *et al.* 360 W and $>70\%$ efficient GaAs-based diode lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2005: 21-29.
- [17] Lorenzen D, Schröder M, Meusel J, *et al.* Comparative performance studies of indium and gold-tin packaged diode laser bars[C]. SPIE, 2006, 4973: 30-41.
- [18] Li H X, Chyr I, Jin X, *et al.* >700 W continuous-wave output power from single laser diode bar[J]. Electronics Letters, 2007, 43(1): 27-28.
- [19] Li H, Chyr I, Brown D, *et al.* Ongoing development of high-efficiency and high-reliability laser diodes at Spectra-Physics[C]. SPIE, 2007, 6456: 64560C.
- [20] Schröder D, Meusei J, Hennig P, *et al.* Increased power of broad-area lasers (808 nm/980 nm) and applicability to 10-mm bars with up to 1000 Watt QCW[C]. SPIE, 2007, 6456: 64560N.
- [21] Li H, Reinhardt F, Chyr I, *et al.* High-efficiency, high-power diode laser chips, bars, and stacks[C]. SPIE, 2008, 6876: 68760G.
- [22] Knapczyk M T, Jacob J H, Eppich H, *et al.* 70% efficient near 1 kW single 1 cm laser-diode bar at 20 °C [C]. SPIE, 2011, 7918: 79180F.
- [23] Zhou Minchao, Jiang Xianfeng, Zhang Lifang, *et al.* Optical performance of high power laser diode stack[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1202004.
周旻超, 江先锋, 张丽芳, 等. 大功率半导体激光器叠阵的光学性能[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1202004.
- [24] Zhou Chongxi, LiuYinhui, Xie Weimin, *et al.* Analysis and design of fiber coupled high-power laser diode array[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(11): 1296-1300.
周崇喜, 刘银辉, 谢伟民, 等. 大功率半导体激光器阵列光束光纤耦合研究[J]. 中国激光, 2004, 31(11): 1296-1300.
- [25] Laserline GmbH. Fraunhofer Straße 56218 Mülheim-Kärlich [EB/OL]. [2017-03-07] <https://www.laserline.de/en/diodelasers/ldfseries/technical-data.html>.
- [26] Crump P, Dong W, Grimshaw, *et al.* 100-W+ diode laser bars show $>71\%$ power conversion from 790 nm to 1000-nm and have clear route to $>85\%$ [C]. SPIE, 2007, 6456: 64560M.
- [27] Pikhtin N A, Slipchenko S O, Sokolova Z N, *et al.* 16 W continuous-wave output power from 100 μm -aperture laser with quantum well asymmetric heterostructure[J]. Electronics Letters, 2004, 40(22): 1413-1414.
- [28] Crump P, Grimshaw M, Wang J, *et al.* 85% power conversion efficiency 975 nm broad area diode lasers at 50 °C, 76% at 10 °C [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, IEEE, 2006: JWB24.
- [29] Kanskar M, Earles T, Goodnough T J, *et al.* 73% CW power conversion efficiency at 50 W from 970 nm diode laser bars[J]. Electronics Letters, 2005, 41(5): 245-247.

- [30] Erbert G, Bugge F, Knigge A, *et al.* Highly reliable 75 W InGaAs/AlGaAs laser bars with over 70% conversion efficiency[C]. SPIE, 2006, 6133: 61330B.
- [31] Kanskar M, Bai J G, Chen Z, *et al.* High efficiency kW-class QCW 88x nm diode laser bars[J]. Conference on Lasers and Electro Optics: Applications and Technology, 2013, JW1J: JW1J.1.
- [32] Crump P, Wenzel H, Erbert G, *et al.* Passively cooled TM polarized 808 nm laser bars with 70% power conversion at 80 W and 55 W peak power per 100 μm stripe width[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(16): 1378-1380.
- [33] Hodges A, Wang J, Defranza M, *et al.* A CTE matched hard solder passively cooled laser diode package combined with nXLT facet passivation enables high power, high reliability operation[C]. SPIE, 2007, 6552: 65521E.
- [34] Rossin V, Peters M, Zucker E, *et al.* Highly reliable high-power broad area laser diodes[C]. SPIE, 2006, 6104: 610407.
- [35] Gao W, Xu Z, Mastrovito A. High-power highly reliable single emitter laser diodes at 808 nm[C]. SPIE, 2007, 6456: 64560B.
- [36] Xu Z, Gao W, Cheng L, *et al.* Highly reliable, high-brightness 915nm laser diodes for fiber laser applications[C]. SPIE, 2008, 6909: 69090Q.
- [37] Lorenzen D, Meusel J, Schröder D, *et al.* Passively cooled diode lasers in the cw power range of 120 to 200W[C]. SPIE, 2008, 6876: 68760Q.
- [38] Schröder D, Schröder M, Werner E, *et al.* Improved laser diode for high power and high temperature applications[C]. SPIE, 2009, 7198: 719809.
- [39] Gan Qijun, Jiang Benxue, Zhang Pande, *et al.* Research progress of high average power solid-state lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 010003.
甘啟俊, 姜本学, 张攀德, 等. 高平均功率固体激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 010003.
- [40] Akiyama Y, Takada H, Yuasa H, *et al.* Efficient 10 kW diode-pumped Nd:YAG rod laser[C]. Advanced Solid-State Lasers, 2002: WE4.
- [41] Bruesselbach H, Sumida D S. A 2.65 kW Yb:YAG single-rod laser[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 600-603.
- [42] Bo Y, Geng A, Bi Y, *et al.* 1.15 kW continuous-wave generation by diode-side-pumped two-rod Nd:YAG laser[J]. Chinese Physics, 2005, 14(4): 771-773.
- [43] 林学春, 方高瞻, 马骁宇, 等. 3 kW 高效、高功率全固态连续波激光器[J]. 中国激光, 2006, 33(6): 831.
- [44] 林学春, 张玲, 马骁宇, 等. 4 kW 高功率全固态连续波激光器[J]. 中国激光, 2006, 33(12): 1647.
- [45] 林学春, 侯玮, 张玲, 等. 6 kW 高效、高功率全固态连续波激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(7): 900.
- [46] 王奕博, 王宝华, 张志研, 等. 7 kW 级光纤耦合输出全固态激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0108003.
- [47] Nishikawa Y. Slab-shaped 10 kW all-solid-state laser[J]. Review of Laser Engineering-Laser Society of Japan, 2003, 31(8): 513-518.
- [48] Goodno G, Komine H, Mcnaught H, *et al.* Multi-kW near-diffraction-limited single-frequency Nd:YAG laser[C]. Lasers and Electro-Optics Europe, 2005: 25.
- [49] Goodno G D, Komine H, Mcnaught S J, *et al.* Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers[J]. Optics Letters, 2006, 31(9): 1247-1249.
- [50] Redmond S, Mcnaught S, Zamel J, *et al.* 15 kW near-diffraction-limited single-frequency Nd:YAG laser[C]. Lasers and Electro-Optics Europe, 2007: 1-2.
- [51] Yasuhara R, Kawashima T, Sekine T, *et al.* 213 W average power of 2.4 GW pulsed thermally controlled Nd:glass zigzag slab laser with a stimulated Brillouin scattering mirror[J]. Optics Letters, 2008, 33(15): 1711-1713.
- [52] Mc Naught S J, Asman C P, Inheyen H, *et al.* 100 kW coherently combined Nd:YAG MOPA laser array[C]. Frontiers in Optics, 2009, FThD: FThD2.
- [53] Marmo J, Injeyan H, Komine H, *et al.* Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman[C]. SPIE, 2009, 7195: 719507.
- [54] Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1605-1618.

- 周寿桓, 赵 鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1605-1618.
- [55] Wang Chao, Tang Xiaojun, Xu Liuqing, *et al.* Investigation on thermal effect of high power slab laser with 11 kW[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2807-2809.
王 超, 唐晓军, 徐臻婧, 等. 输出功率 11 kW 的高功率固体板条激光器介质热分析[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2807-2809.
- [56] Gong M, Li C, Liu Q, *et al.* 200 W corner-pumped Yb:YAG slab laser[J]. Applied Physics B, 2004, 79(3): 265-267.
- [57] Liu Q, Gong M, Lu F, *et al.* 520 W continuous-wave diode corner-pumped composite Yb:YAG slab laser[J]. Optics Letters, 2005, 30(7): 726-728.
- [58] Liu H, Gong M. Efficient corner-pumped Nd:YAG/YAG composite slab laser[J]. Chinese Physics B, 2010, 18(5): 054209.
- [59] Peng Qinjun, Xu Zuyan. Relationship of beam quality and power for solid state laser with high average power[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(7): 1707-1712.
彭钦军, 许祖彦. 高平均功率固体激光功率和光束质量关系研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(7): 1707-1712.
- [60] Gao Qingsong, Hu Hao, Pei Zhenping, *et al.* Design and experiment study of all-solid slab laser amplifier with laser power of 10 kW[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0202001.
高清松, 胡 浩, 裴正平, 等. 10 kW 级固体板条激光放大器设计与实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0202001.
- [61] Kelson I, Hardy A. Strongly pumped fiber lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(9): 1570-1577.
- [62] Fermann M E. Single-mode excitation of multimode fibers with ultrashort pulses[J]. Optics Letters, 1998, 23(1): 52-54.
- [63] Jeong Y, Sahu J K, Payne D, *et al.* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. Optics Express, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [64] Bonati G, Voelckel H, Gabler T, *et al.* 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser[J]. Photonics West, San Jose, Late Breaking Developments, 2005: 5709.
- [65] Ning Ding, Wang Wentao, Ruan Ling, *et al.* Fabrication and lasing properties of Yb³⁺-doped double-clad silica fiber [J]. Chinese J Lasers, 2000, 27(11): 987-991.
宁 鼎, 王文涛, 阮 灵, 等. 掺 Yb³⁺ 双包层石英光纤的研制及其激光特性[J]. 中国激光, 2000, 27(11): 987-991.
- [66] Zhou Jun, Lou Qihong, Zhu Jianqiang, *et al.* A continuous-wave 714 W fiber laser with China-made large-mode-area double-clad fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(7): 1119-1120.
周 军, 楼祺洪, 朱健强, 等. 采用国产大模场面积双包层光纤的 714 W 连续光纤激光器[J]. 光学学报, 2006, 26(7): 1119-1120.
- [67] 赵 鸿, 周寿桓, 朱 辰, 等. 大功率光纤激光器输出功率超过 1.2 kW[J]. 中国激光, 2006, 36(10): 930.
- [68] Huo Y, Cheo P K, King G G. Fundamental mode operation of a 19-core phase-locked Yb-doped fiber amplifier[J]. Optics Express, 2004, 12(25): 6230-6239.
- [69] Cheo P K. Recent advances in high-power and high-energy multicore fiber lasers[C]. SPIE, 2004, 5335: 106-115.
- [70] Michaille L, Bennett C R, Taylor D M, *et al.* Multi-core photonic crystal fibers for high-power lasers and amplifiers [C]. SPIE, 2006, 6102: 61020W.
- [71] Shay T M, Baker J T, Robin C A, *et al.* High-power phase locking of a fiber amplifier array[C]. SPIE, 2009, 7195: 71951M.
- [72] Krupke W F, Beach R J, Kanz V K, *et al.* Resonance transition 795-nm rubidium laser[J]. Optics Letters, 2003, 28(23): 2336-2338.
- [73] Page R H, Beach R J, Kanz V K, *et al.* Multimode-diode-pumped gas (alkali-vapor) laser[J]. Optics Letters, 2005, 31(3): 353-355.