

# 砷化镓基近红外大功率半导体激光器的发展及应用

袁庆贺<sup>1,2</sup>, 井红旗<sup>1</sup>, 张秋月<sup>1</sup>, 仲莉<sup>1</sup>, 刘素平<sup>1</sup>, 马骁宇<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院半导体研究所光电子器件国家工程研究中心, 北京 100083;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

**摘要** 综述了世界各国近年来在大功率半导体激光器方面所取得的研究成果, 重点介绍了砷化镓基近红外大功率半导体激光器在输出功率、亮度、电光转换效率、光束质量、寿命与可靠性方面的研究进展。结合目前市场分析, 详细阐述了半导体激光器的应用前景, 展望了未来大功率半导体激光器的发展趋势。

**关键词** 激光器; 大功率半导体激光器; 输出功率; 光束质量; 可靠性

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.040003

## Development and Applications of GaAs-Based Near-Infrared High Power Semiconductor Lasers

Yuan Qinghe<sup>1,2</sup>, Jing Hongqi<sup>1</sup>, Zhang Qiuyue<sup>1</sup>, Zhong Li<sup>1</sup>, Liu Suping<sup>1</sup>, Ma Xiaoyu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

<sup>2</sup>College of Materials Science and Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The recent research achievements on high-power semiconductor lasers in various countries of the world are reviewed. The research progress is mainly introduced in terms of output power, brightness, electro-optical conversion efficiency, beam quality, lifetime, and reliability of GaAs-based near-infrared high-power semiconductor lasers. Combined with the current market analysis, the application prospect of these semiconductor lasers is elaborated. The development trend of high-power semiconductor lasers in the future is forecasted.

**Key words** lasers; high power semiconductor lasers; output power; beam quality; reliability

**OCIS codes** 140.2020; 140.3070; 140.3290; 140.3295

## 1 引言

大功率半导体激光器具有体积小, 质量小, 结构简单, 亮度高, 寿命长等优点。以大功率半导体激光器为基础的工业和军事应用在全球范围内迅猛发展, 现已广泛应用于工业生产、激光通信、激光医疗、激光显示、自动控制以及军事国防等方面。

由于大功率半导体激光器的众多优点, 发达国家为了在经济全球化浪潮中占据垄断地位, 纷纷加紧实施大功率半导体激光器技术研发计划, 如美国的“超高效率激光光源”项目<sup>[1]</sup>、德国的“德国光子学研究-未来之光”<sup>[2]</sup>、英国的“高能光纤激光武器研制

计划”<sup>[3]</sup>等。在以美、德、日为代表的发达国家, 半导体激光产业迅速发展, 其主要应用在大型制造业中。目前, 在汽车、电子、机械、航空、钢铁等行业中, 已基本完成了用激光加工工艺对传统工艺的更新换代, 进入“光制造”时代<sup>[4]</sup>。

随着理论研究的深入、材料生长技术的进步以及封装工艺的发展, 大功率半导体激光器的输出功率、转换效率、寿命和可靠性等都有了很大的提高。本文重点介绍了砷化镓(GaAs)基近红外大功率半导体激光器在输出功率、亮度、电光转换效率、光束质量、寿命等方面所取得的最新研究进展及应用现状, 并展望了未来大功率半导体激光器

收稿日期: 2018-07-30; 修回日期: 2018-08-26; 录用日期: 2018-09-10

基金项目: 大功率半导体激光器技术(41414010302)

\* E-mail: maxy@semi.ac.cn

的发展趋势。

## 2 GaAs 基近红外大功率半导体激光器研究进展

目前,基于 GaAs 衬底的近红外波段(760~1060 nm)半导体激光器发展最为成熟,应用也最广泛,早已实现商品化<sup>[5]</sup>。

典型边发射半导体激光器结构示意图如图 1 所示,从下至上依次为 GaAs 衬底、n 限制层、n 波导层、i 有源层、p 波导层、p 限制层、脊波导。利用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术生长半导体激光器外延片,再经过光刻、腐蚀、p 面金属化、减薄、n 面金属化、合金、镀膜、烧结、引线键合等一系列工艺过程制备激光器件,并进行相关测试。表征半导体激光器性能的参数有很多,如波长、输出功率、转换效率、阈值电流、亮度、光束质量、寿命等。以下将从几个方面阐述 GaAs 基近红外大功率半导体激光器的最新研究进展。

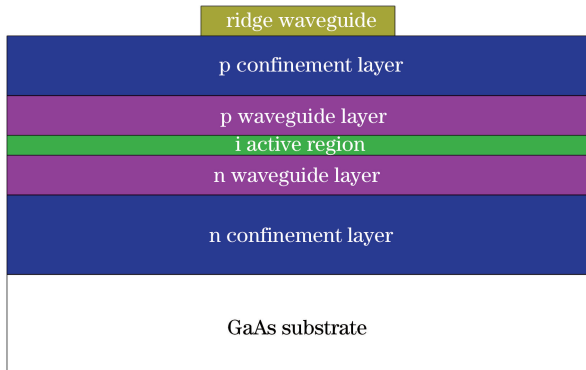


图 1 典型边发射半导体激光器结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of typical edge-emitting semiconductor laser

### 2.1 半导体激光器输出功率

输出功率是半导体激光器最重要的性能参数之一,提高输出功率是半导体激光器发展的永恒课题。在一些应用领域,如激光切割、激光焊接等,需要半导体激光器具有较高的输出功率以满足实际应用的要求。目前,提高半导体激光器的输出功率主要有两种方法:一种是提高半导体激光器单管的输出功率<sup>[6]</sup>;另一种是增加半导体激光器的发光点个数。

#### 2.1.1 激光二极管(LD)单管输出功率

提高半导体激光器单管输出功率的方法多种多样,目前广泛采用的方法主要有以下 4 种:采用宽条形结构<sup>[7-9]</sup>、增加腔长<sup>[10-12]</sup>、宽波导结构设计、腔面钝化。

通过利用上述各种技术手段及对其进行组合,大功率半导体激光器单管输出功率水平不断提高。其中激射波长为 900~1000 nm、发光孔径为 100  $\mu\text{m}$  的单管器件,以及室温下连续(CW)工作功率标称值为 10~20 W 的单管器件得到广泛使用,实验室中单管输出功率可达 25~33 W<sup>[13]</sup>。

900~1000 nm 波段大功率半导体激光器功率研究进展如图 2 所示。从图 2 中可以看出,900~1000 nm 大功率半导体激光器,在连续工作条件下,输出功率在过去十多年间稳定增长。对比 2007—2011 年与 2014—2018 年的功率增长,发现近 5 年来功率增长速度更快,每年增幅大于 15%。这与世界各国每年对半导体激光器的研究投资大幅提高密切相关,预示了半导体激光器在未来世界发展中的重要地位。

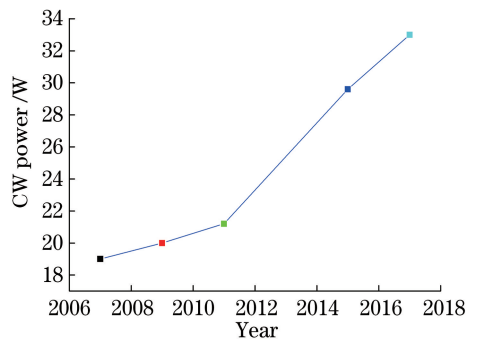


图 2 900~1000 nm 波段大功率半导体激光器功率研究进展

Fig. 2 Research progress of high power semiconductor laser at 900-1000 nm

包括日本 Fujikura 公司、美国 JDSU 公司、德国 Jenoptik 公司等在内的多家公司,均推出了商用大功率半导体激光器,其中 900~1000 nm 单管激光器连续输出功率超过 15 W,800~900 nm 激光器连续输出功率也已达到 10 W 左右,如表 1 所示<sup>[14-22]</sup>。德国 FBH (Ferdinand-Braun-Institut) 研究所<sup>[15]</sup>通过微通道制冷方式,从 4 mm 腔长、96  $\mu\text{m}$  发光孔径的激光器中,获得了 24.6 W 连续功率输出;美国 JDSU 公司<sup>[20]</sup>通过理论和实验证明了限制半导体激光器输出功率的内在机制,采用开腔设计,解决了高功率输出时的纵向空间烧孔<sup>[23]</sup>和双光子吸收效应问题<sup>[24]</sup>,100  $\mu\text{m}$  条宽、5.7 mm 腔长的 900~1000 nm 半导体激光器最大连续输出功率达到 29.5 W;日本的 Fujikura 公司<sup>[13]</sup>采用非对称的异质限制层设计,将有源区的限制因子降低到 0.4%,4 mm 腔长、220  $\mu\text{m}$  条宽的 900~1000 nm 激光器,27 W 功率输出时,电光转换效率大于 60%,最大脉

冲输出功率 68 W;另据 Pietrzak 等<sup>[25]</sup>报道,100  $\mu\text{m}$  条宽 808 nm 激光器输出功率为 15 W,当条宽为 200  $\mu\text{m}$  时,输出功率高达 22 W。同时,如 nLight、OSRAM、TRUMPF 等公司的 900~1000 nm 激光器单管连续输出功率超过 15 W,寿命长达数年。相较于 900~1000 nm 波段半导体激光器,800~900 nm 波

段功率稍低,美国 nLight 公司<sup>[18]</sup>报道的 800~900 nm 器件,双有源区的级联激光器最高连续输出功率为 18.8 W,普通单有源区最高输出功率为 17 W;Coherent 公司<sup>[21]</sup>商品化 808 nm 单管输出功率为 9 W,寿命达  $5 \times 10^4$  h;德国 Jenoptik 公司<sup>[22]</sup> 808 nm 波长的半导体激光器单管输出功率为 8 W。

表 1 半导体激光器单管输出功率

Table 1 Output power of single-emitter semiconductor laser

Year	Wavelength /nm	Power /W	Operation condition	Conversion efficiency /%	Aperture / $\mu\text{m}$	Research unit
2007	915	14.8	CW, 15 °C	64	100	Photonic Device Research Center <sup>[14]</sup>
2009	980	24.6	CW, cooling	54	96	Ferdinand-Braun-Institute <sup>[15]</sup>
2013	915	19.8	CW, 20 °C	68	100	Hamamatsu Photonics K.K. <sup>[16]</sup>
2013	915	15.0	CW	68	100	Ferdinand-Braun-Institute <sup>[17]</sup>
2014	880	18.8	QCW	64	95	nLight <sup>[18]</sup>
2015	950	20.0	CW	60	90	TRUMPF Photonics <sup>[19]</sup>
2015	920	29.5	CW	61	100	JDSU <sup>[20]</sup>
2016	808	9.0	CW	63	140	Coherent <sup>[21]</sup>
2017	808	8.0	CW	64	100	Jenoptik <sup>[22]</sup>
2017	915	33.0	CW	60	220	Fujikura <sup>[13]</sup>

Note:QCW is quasi-continuous work.

### 2.1.2 LD 巴条输出功率

半导体激光器单管出光面发光面积小,当输出功率达到一定值时,易受到腔面灾难性光学镜面烧毁(COMD)效应的影响,因此其输出功率不能过大。为了得到更高的功率输出,可以采用阵列式结构,将多个半导体激光器单管平行排列组合起来。根据输出功率要求,将若干单管平行排列,构成半导体激光器巴条,半导体激光器巴条示意图如图 3 所

示。在半导体激光器巴条设计时,一个重要的参数是填充因子,它描述了发光区长度占巴条长度的百分比,等于一个发光区的宽度与两相邻发光区中心之间的长度之比。腔长为 1 mm 时,填充因子由 30% 增加到 50%,通过使用水冷方式,半导体激光器巴条的连续输出功率可由 40 W 提高到 100 W<sup>[26]</sup>。因此,在满足高效制冷的前提下,增加填充因子,可以提高半导体激光器巴条的输出功率。

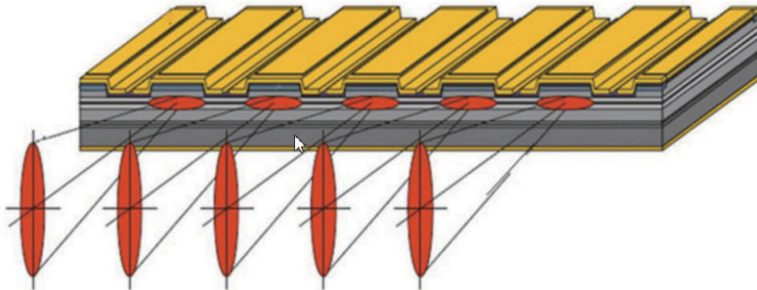


图 3 半导体激光器巴条示意图

Fig. 3 Schematic of semiconductor laser bar

近年来,为满足市场应用需求,GaAs 基近红外大功率半导体激光器巴条在输出功率和光电转换效率方面都取得了巨大的进步,半导体激光器巴条输

输出功率及转换效率如表 2 所示<sup>[27-36]</sup>。2014 年,Pietrzak 等<sup>[27]</sup>通过优化外延结构,降低内部损耗(小于  $1 \text{ cm}^{-1}$ ),制备出填充因子 50% 的 1020 nm

半导体激光器巴条,在25 °C制冷条件下,连续功率输出达到 200 W,电光转换效率大于 63%;2015年,德国 FBH 研究所优化了 1 cm GaAs 基激光器巴条,4 mm 腔长的 940 nm 半导体激光器,在 203 K 准连续条件(0.2 ms, 10 Hz)下,输出功率高达 1.9 kW,电光转换效率为 57%,高电流和低温测试均未发现损坏现象<sup>[28]</sup>;2016 年,Morales 等<sup>[21]</sup>报

道了填充因子为 28%、腔长为 2 mm 的激光器,室温下连续输出功率为 80 W,使用寿命大于  $5 \times 10^4$  h;2017 年,Wang 等<sup>[29]</sup>采用非对称宽波导外延结构,降低内部损耗( $0.5 \text{ cm}^{-1}$ ),可实现填充因子为 50% 的 808 nm 激光器,室温下输出功率达 100 W,电光转换效率达 68%,为当时报道的最高水平。

表 2 半导体激光器巴条输出功率及转换效率

Table 2 Output power and conversion efficiency of semiconductor laser bar

Year	Wavelength /nm	Output power /W	Operation condition	Conversion efficiency /%	Resonator length /mm	Fill factor /%
2011	8xx	350	QCW, 200 $\mu$ s, 100 Hz	62	5.0	80 <sup>[30]</sup>
2014	1020	200	CW, 25 °C	63	4.0	50 <sup>[27]</sup>
2017	940	600	QCW	>60	1.5	70 <sup>[35]</sup>
2015	940	1980	QCW, 0.2 ms, 10 Hz, 203 K	57	6.0	72 <sup>[28]</sup>
2015	940	500	QCW, 2 ms, 10 Hz	>60	1.5	75 <sup>[31]</sup>
2015	760	100	CW	>60	4.0	30 <sup>[32]</sup>
2016	940	1000	QCW, 1 ms, 10 Hz, 203 K	70	4.0	75 <sup>[33]</sup>
2016	808	80	CW	63	2.0	28 <sup>[21]</sup>
2017	80x	210	QCW, 200 $\mu$ s, 20 Hz	70	5.0	72 <sup>[34]</sup>
2017	808	106	CW	68	1.5	50 <sup>[29]</sup>
2018	1060	500	QCW	75	2.0	76 <sup>[36]</sup>

### 2.1.3 LD 迭阵输出功率

为了满足市场应用需求,进一步提高半导体激光器的输出功率,可以将多个巴条按照一定形式堆叠起来形成二维面阵,输出功率可以提升至几十千瓦甚至几百千瓦<sup>[37-38]</sup>。半导体激光器迭阵如图 4 所示,半导体激光器迭阵的排列方式有两种:水平迭阵(H-array)和垂直迭阵(V-array)。由于半导体激光

器迭阵工作时会产生大量的废热,因此必须采用冷却手段,降低器件温度,防止因温度过高导致激光器失效和使用寿命的缩短。目前,主要有 3 种冷却方式:小巧简单的 Peltie 型开放式制冷;高效的水冷方式;Hamamatsu 公司发明的 Funryu 制冷。具体采用哪种制冷方式应该根据器件的输出功率、工作环境和应用方式等确定。

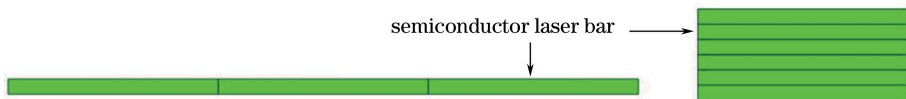


图 4 半导体激光器迭阵。(a)水平迭阵;(b)垂直迭阵

Fig. 4 Semiconductor laser array. (a) Horizontal array; (b) vertical array

2006 年,美国 Alfalight 公司的 Kanskar 等<sup>[39]</sup>推出了高可靠性、窄带宽半导体激光器迭阵,该器件由 5 个 bar 条组成,输出波长为 975 nm,25 °C 热沉

条件下输出功率高达 500 W,电光转换效率达 70%。2007 年,美国 JSDU 公司的 Peters 等<sup>[40]</sup>报道了具有 5 个半导体激光器 bar 条的迭阵结构,输

输出功率达480 W,波长范围覆盖了910~980 nm,通过水冷方式将工作温度控制在室温,电光转换效率达73%。

日本 Hamamatsu 公司一直致力于半导体激光器迭阵研究,结合激光束整形技术,推出了多款商用

表3 日本 Hamamatsu 公司的半导体激光器 bar 条模块参数

Table 3 Parameters of Japanese Hamamatsu semiconductor laser bar module

Product type	Wavelength /nm	Output power /W	Operation current /A	Beam quality factor at pulse peak of $1/e^{-2}$
L13713-25P940	940	10000	310	$15^\circ \times 58^\circ$
L11398-16P808	808	1600	105	$10^\circ \times 40^\circ$
L11398-16P940	940	1600	100	$10^\circ \times 40^\circ$

## 2.2 半导体激光器的光束特性

在某些应用领域,半导体激光器无法完全替代固体激光器和二氧化碳(CO<sub>2</sub>)激光器,主要原因在于其亮度与光束质量不能达到要求,因此在保持大功率输出的同时,需要尽可能地提高激光器的亮度与光束质量。目前,在实际应用中改善半导体激光器亮度与光束质量的方法主要有采用电极两侧非注入空气隙结构、在前后腔面引入相位结构、主振荡器-功率放大器结构,采用平板耦合波导、光子晶体的应用和激光合束技术。

传统宽条型激光器在大电流注入时光亮度迅速降低,Piprek 等<sup>[41]</sup>认为出现这种现象的主要原因在于发光区过热导致热透镜效应。为解决此问题,封装时在电极区两侧的非注入区下方留出空气隙,使两侧非注入区散热较差而温度升高,以缓解热透镜效应,2 W 输

半导体激光器巴条模块,日本 Hamamatsu 公司的半导体激光器巴条模块参数如表 3 所示。L13713-25P940 半导体激光器模块的峰值波长为 940 nm,峰值输出功率高达  $1 \times 10^4$  W,其性能已经能和相同输出功率下灯泵的固体激光器相比拟。

出时的慢轴线亮度从原来的  $0.9 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{mrad}^{-1}$  提升至  $1.4 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{mrad}^{-1}$ 。而 Winterfeldt 等<sup>[42-43]</sup>则认为光束质量恶化的主要原因在于侧向载流子分布不均,并通过在电极区两侧进行离子注入解决了这一问题,90  $\mu\text{m}$  条宽器件 7 W 输出光参数乘积( $P_{\text{BPP}}$ )小于  $2 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。Fraunhofer 研究所的 Eckstein 等<sup>[44]</sup>则通过等离子体刻蚀和钝化层沉积在前后腔面附近引入相位结构,对光束质量较差的慢轴光进行整形,将 970 nm 宽条器件 8 W 输出时的慢轴线亮度从  $1.95 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{mrad}^{-1}$  提升至  $3.2 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{mrad}^{-1}$ ,  $P_{\text{BPP}}$  约为  $2.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。FBH 研究所提出窄条宽面(NBA)激光器的概念,条宽在  $20 \sim 50 \mu\text{m}$ ,并使用光栅结构来稳定波长,最高线亮度达到  $5.6 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{mrad}^{-1}$ <sup>[45]</sup>。表 4 为近年来高亮度宽条半导体激光器亮度的概况<sup>[41-46]</sup>。

表4 高亮度宽条半导体激光器的亮度概况

Table 4 Brightness overview of high-brightness wide stripe semiconductor laser

Year	Wavelength /nm	Brilliance /( $\text{W} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{mrad}^{-1}$ )	Research unit
2013	710	1.4	NUSOD institute <sup>[41]</sup>
2014	969	3.5	FBH research institute <sup>[43]</sup>
2014	970	2.5	Fraunhofer <sup>[44]</sup>
2015	970	5.6	FBH research institute <sup>[45]</sup>
2017	915	4.3	nLight <sup>[46]</sup>

2015 年,德国 FBH 研究所的 Martin 等<sup>[45]</sup>提出,9xx nm 宽条型半导体激光器光束质量恶化的主要原因是波导区两侧载流子的积累。为了解决上述问题,在波导区的两侧进行质子轰击,这主要起到两个方面的作用:一是波导区两侧的电导率降低,阻止了注入电流的横向扩展,使电流可以直接传送到有源区;二是质子轰击,在波导区两侧产生高浓度点缺陷,因此当有源区载流子扩散到波导区边缘时,可以被快速复合,从而有效抑制了横向载流子的积累。通过上述手段,本课题组制作了 976 nm 波长宽条型激光器,条宽 90  $\mu\text{m}$ ,波导区两侧质子轰击区宽度

为 200  $\mu\text{m}$ ,轰击深度为 3.9  $\mu\text{m}$ ,测得器件的光束质量参数降低了 35% ( $P_{\text{BPP}} < 2 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ )。

虽然可以通过各种手段提高宽条型半导体激光器的亮度,但其作用有限且工艺过程比较复杂。最具代表性的高亮度高光束质量激光器是主振荡-功率放大器(MOPA),主振荡器提供高光束质量的种子光,接着由功率放大器进行放大,可以在高功率输出的同时实现高亮度高光束质量。2011 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的杨晔等<sup>[47]</sup>报道了具有低红暴优势的 850 nm 大功率高亮度锥形半导体激光器,获得了近衍射极限的激光输出,当

连续输出功率为200 mW时,光束质量因子  $M^2$  仅为1.7,亮度高达  $16.3 \text{ MW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ ;当功率提高到1 W时,  $M^2$  因子和亮度仍分别达到  $2.8 \text{ MW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$  和  $9.9 \text{ MW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ 。2016年,北京工业大学激光工程研究院报道了由双量子阱非对称波导结构外延片刻蚀成的带有脊形波导结构的锥形半导体激光器,在电流为7 A时获得了中心波长963 nm、连续功率4.026 W的激光输出<sup>[48]</sup>。测得慢轴和快轴方向的  $P_{\text{BPP}}$  分别为  $1.593 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 和  $0.668 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 。德国FBH研究所一直致力于MOPA半导体激光器的研究,先后报道过多种波长的近衍射极限大功率器件。808 nm器件在4.4 W功率输出时,  $M^2$  因子为1.9<sup>[49]</sup>;979 nm器件最高输出功率为12 W,在11.4 W输出时,  $M^2$  因子仅为1.1<sup>[50]</sup>;2013年,Wang等<sup>[51]</sup>使用分布布拉格反射器(DBR)脊形激光器作为主振荡器(MO),将锥形放大器作为功率放大器(PA),两者之间加入光隔离器和柱透镜,形成MOPA系统,准连续工作条件下主瓣功率达到17 W,  $M^2$  因子为1.9;Müller等<sup>[52]</sup>于2016年研制出1030 nm的DBR锥形激光器,采用非对称超大光腔的外延设计,在15 °C测量时实现了主瓣功率为8.1 W,  $M^2$  因子为1.1的输出;2017年,该团队继续优化器件,通过对脊型电注入区两侧进行离子注入,增强脊型区的模式选择作用,并进一步优化前后腔面的反射率,制作出的1030 nm DBR锥形激光器在15 °C时主瓣功率为9.1 W,  $M^2$  因子为1.2<sup>[53]</sup>。

一种常见的高亮度半导体激光器是平板耦合波导激光器(SCOWL),这种激光器相对于MOPA激光器的优点在于像散较小,可以输出近圆形的光斑,MIT Lincoln实验室的Huang等<sup>[54]</sup>对SCOWL进行了持续研究,在大于1 W连续输出时仍可保持单一空间模式,横向和侧向的限制因子均为1.1,接近衍射极限,亮度高达  $100 \text{ MW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ 。

中国科学院半导体研究所郑婉华研究组在锥形半导体激光器的基础之上加入光子晶体结构,极大地减小了光束的垂直远场发散角<sup>[55]</sup>。同时,对激光器结构进行优化,降低了器件的掺杂浓度,减少了内部光吸收损耗。980 nm器件在3 A电流注入时,横向远场发散角为6.3°,垂直方向远场发散角为11°,光束质量因子分别为1.52和1.54。与此同时,该组采用非对称超大光腔结构,减小了激光束垂直远场发散角,提高了器件的光束质量。具有非对称超大光腔结构的980 nm脊型波导激光器<sup>[56]</sup>,在2 A电

流激励下连续输出功率为1.9 W,横向和垂直方向的  $M^2$  因子分别为1.77和1.47。

激光合束是一个将多束单元激光耦合成一束的过程<sup>[57]</sup>,它基于半导体激光的相位、光强、偏振及光谱等特性,利用光学元件的折射、反射及衍射效应,改变或不改变激光单元的振荡特性,实现提高输出功率、增加激光亮度及改善光束质量目的。当前实用化的高功率半导体激光合束光源<sup>[58]</sup>主要基于非相干合束技术,经历了从传统合束技术(TBC)到密集波长合束(DWDM)和光谱合束(WBC)并行发展的两个阶段。密集波长合束(WBC)和光谱合束(SBC)为半导体激光技术领域注入新的活力,直接使得半导体激光光源的光束质量提高近15倍,达到CO<sub>2</sub>激光器水平。北京凯普林的Xu等<sup>[59]</sup>通过空间叠加激光单管和偏振合束,使用芯径200 μm、数值孔径(NA)0.22的光纤,输出功率为600 W。德国Directphotonics也实现了波长间隔为4 nm的5束激光合束<sup>[60-61]</sup>,目前该公司已推出了功率为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光源产品<sup>[62]</sup>,并应用于金属切割和激光熔覆领域。2015年,FBH研究所的Decker等<sup>[63]</sup>使用密集波长合束技术,单个minibar连续输出功率达到25 W,minibar上的5个管芯波长分别为970~980 nm,相邻管芯波长间距为2.5 nm,对每个管芯进行快慢轴压缩后进行波长合束,单个管芯的光参数乘积  $P_{\text{BPP}}$  约为  $1.6 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ ,波长合束几乎不影响光束质量;OSRAM公司于2015年报道的minibar,功率52 W时  $P_{\text{BPP}}$  为  $11 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ ,慢轴方向线亮度为  $4.5 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{mrad}^{-1}$ <sup>[64]</sup>,并于2017年报道了性能更佳的器件,通过优化minibar的填充因子和腔长等参数,功率输出为50 W时,慢轴方向线亮度达  $4.8 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{mrad}^{-1}$ <sup>[65]</sup>。德国Laserline公司推出了机架固定式大功率激光二极管(LDM)和可移动式大功率激光二极管(LDF)两个系列商用迭阵合束半导体激光器,其参数如表5所示。

过去几十年中,半导体激光器亮度的提高是非常迅速的。1985年,最先进的高功率半导体激光器105 μm芯径光纤仅可输出100 mW,而今天105 μm芯径的光纤可以获得250 W功率输出。摩尔定律指出集成电路上芯片数目每7年增加10倍,巧合的是,半导体激光器的亮度也有相似结论。大功率半导体激光器的亮度和摩尔定律如图5所示,大功率半导体激光器的亮度大约每8年增加10倍<sup>[66]</sup>。

表5 Laserline 公司 LDM 和 LDF 系列激光器的参数  
Table 5 Parameters of Laserline LDM and LDF series lasers

Series	Wavelength range /nm	Maximum output power /kW	Beam quality / (mm · mrad)	Optical fiber diameter / $\mu\text{m}$	Numerical aperture NA	Minimum focus at $f=150\text{ mm}\cdot\mu\text{m}^{-1}$
LDM		1.0	20	400	0.1	300
		2.5	30	600	0.1	450
		3.5	40	400	0.2	600
		5.0	60	600	0.2	900
		6.0	100	1000	0.2	1500
		7.0	30	600	0.1	450
LDF	900-1080	9.0	40	400	0.2	600
		15	60	600	0.2	900
		20	100	1000	0.2	1500
		25	200	2000	0.2	3000

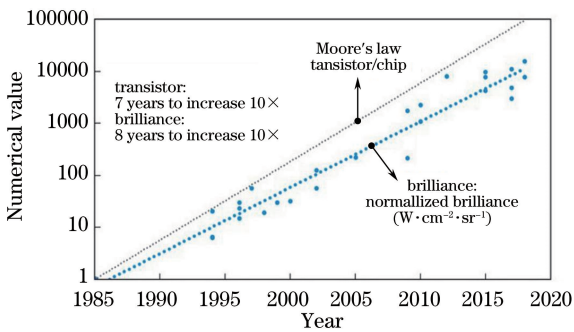


图5 大功率半导体激光器的亮度和摩尔定律<sup>[66]</sup>  
Fig. 5 High power semiconductor laser brilliance and Moore's law<sup>[66]</sup>

### 2.3 半导体激光器的电光转换效率

电光转换效率是评价半导体激光器性能好坏的一个重要参数,定义为输出光功率与输入电功率的比值<sup>[67]</sup>。

目前,提高半导体激光器电光转换效率的手段主要有两种<sup>[68]</sup>。1) 提高载流子注入效率:关键是减少载流子注入到量子阱前的损失,降低量子阱之外载流子的电势,包括串联电阻以及开启电压中的附加势垒。2) 提高量子效率:关键是要减少非辐射复合、阈值电流等载流子损失,减小光在波导中由传输造成的光损耗。激光器的量子效率受结温影响较大,提高激光器量子效率必须尽量降低激光器工作结温,其关键就是减小激光器封装热阻率。

随着材料外延生长技术的成熟、激光器结构的优化以及封装工艺的改进,半导体激光器的输出功率和电光转换效率均得到了显著的提高。图6为nLight公司生产的光纤耦合半导体激光器的输出功率和转换效率随波长的变化图。从图中可以看出,随着输出功率的提高,电光转换效率反而有下降

的趋势。这是因为在高功率输出时,半导体激光器将产生大量的热,这些多余的热量不能及时散发,会导致激光器性能下降,电光转换效率降低。

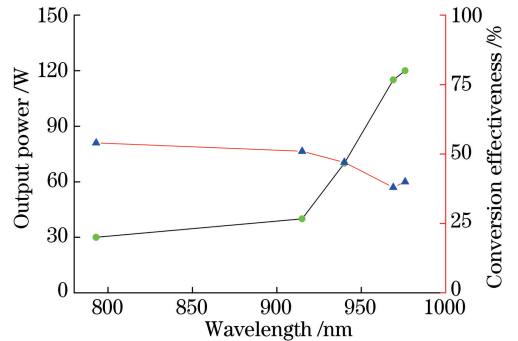


图6 nLight 公司生产的光纤耦合半导体激光器的输出功率和转换效率随波长的变化

Fig. 6 Output power and conversion efficiency of fiber-coupled semiconductor lasers produced by nLight versus wavelength

同时,多家公司及研究机构在提高半导体激光器电光转换效率方面取得了突破性的进展。2004年,美国JDSU公司的Rossin等<sup>[69]</sup>通过增加腔长,优化掺杂浓度和结构,降低了半导体激光器的限制因子和体电阻,910~980 nm波长、100  $\mu\text{m}$ 条宽的半导体激光器,在25  $^{\circ}\text{C}$ 工作条件下输出功率高达13.5 W,斜率效率为1.14  $\text{W}\cdot\text{A}^{-1}$ ,电光转换效率为64%。2006年,德国FBH研究所的Erbert等<sup>[70]</sup>报道了高可靠性、高电光转换效率的砷化镓/砷化铝镓(InGaAs/AlGaAs)半导体激光器巴条,制得的940 nm波长半导体激光器巴条在25  $^{\circ}\text{C}$ 条件下、70 W连续输出时,电光转换效率高达73%,为当时的最高水平;同一时间,美国nLight公司的Crump等<sup>[71]</sup>推出了商用级厘米巴条,通过微通道热沉冷却方式,975 nm波长厘米级半导体激光器巴条在室温

下连续输出功率为 100 W, 电光转换效率大于 73%; 而通过低温冷却方式<sup>[72]</sup>, 将激光器工作温度维持在 -50 °C, 可将电光转换效率提高到 85%; 2007 年, 在美国 DARPA SHEDS 项目的支持下, JSDU 公司的 Peters 等<sup>[40]</sup> 报道了室温下连续输出功率为 100 W 的半导体激光器巴条, 室温下电光转换效率为 76%; 2012 年, 美国 nLight 公司商业报告中指出, 该公司 790~810 nm 波长百瓦级半导体激光器巴条, 在 20 °C 测试条件下, 电光转换效率大于 71%, 而输出波长范围为 915~980 nm 的器件, 20 °C 测试条件下, 电光转换效率稳定在 74% 左右<sup>[73]</sup>。

#### 2.4 半导体激光器的寿命与可靠性

在实际使用过程中, 半导体激光器的寿命和可靠性是重要的技术指标。半导体激光器寿命的定义方式有两种: 1) 在额定工作电流下, 半导体激光器

输出功率下降到初始值的 80% 所需的时间; 2) 在恒定输出功率下, 工作电流上升到初始值的 120% 所需的时间。在光通信等领域, 小功率半导体激光器的可靠性已经基本解决, 工作寿命也能达到使用要求。大功率半导体激光器在大电流下连续工作时, 面临着端面灾变性损伤、烧孔、电热烧毁、光丝效应以及微通道热沉的寿命等基本问题<sup>[74]</sup>。为了解决上述问题, 提高半导体激光器的寿命和可靠性, 一般可以采用以下方法: 提高激光器外延片生长质量, 改进制备工艺流程和封装技术, 增大腔面光斑尺寸, 腔面非吸收窗口技术, 高效热管理技术等。

近年来, 随着半导体激光器制备工艺的成熟和高效热管理技术的进步, 半导体激光器单管报道的寿命已经达到百万小时以上<sup>[75-79]</sup>, 半导体激光器巴条的可靠性也有了显著的提高<sup>[80-84]</sup>。表 6 和表 7 分别给出了半导体激光器单管寿命和巴条寿命的进展<sup>[85-91]</sup>。

表 6 半导体激光器单管的寿命

Table 6 Life of semiconductor laser single emitter

Research unit	Year	Wavelength /nm	Life expectancy
Japanese Fujikura	2015	915	12 W, $1.088 \times 10^6$ h <sup>[85]</sup>
Japanese Hamamatsu	2015	915	13 W, 25 °C, $6.8 \times 10^5$ h <sup>[86]</sup>
German Direct Photonics	2015	976	$1 \times 10^5$ h <sup>[87]</sup>
Russian MIREA	2016	1060	$6 \times 10^4$ h <sup>[88]</sup>
Japanese Mitsubishi Electric	2018	976	$1 \times 10^5$ h <sup>[89]</sup>

表 7 半导体激光器巴条的寿命

Table 7 Semiconductor laser bar life

Research unit	Year	Wavelength /nm	Life expectancy
German Jenoptik	2015	940	200 W, $2 \times 10^4$ h <sup>[90]</sup>
German Jenoptik	2017	808	24 °C, 100 A, 140 W, $2 \times 10^4$ h <sup>[91]</sup>
German Trumpf	2018	938	25 °C, 300 W, $1 \times 10^4$ h <sup>[91]</sup>

### 3 大功率半导体激光器的应用

大功率半导体激光器已经成为光电子产业的核心器件, 输出功率不断提高, 且随着技术的进步, 其转换效率也得到了很大的发展, 高达 70%。相对于其他类型的激光器, 半导体激光器最大的特点就是输出波长的多样性。随着应用领域的不断扩展, 半导体激光器的研究已包含 350~1700 nm 波段<sup>[92]</sup>。对目前市场进行分析可知, 大功率半导体激光器的应用主要分为以下 4 个的方面: 1) 大功率半导体激光器作为泵源; 2) 大功率半导体激光器在工业加工领域的应用; 3) 大功率半导体激光器在医疗美容领域的应用; 4) 大功率半导体激光器在军事领域的应用。

#### 3.1 大功率半导体激光器作泵源应用

大功率半导体激光器作为泵源应用, 主要用于抽运固体激光器、掺铒光纤放大器以及光纤激光器。半导体激光器抽运固体激光器(DPSSL)是大功率半导体激光器应用最多的领域。相较于传统的灯泵固体激光器, 半导体激光器作为抽运源具有众多优点, 如体积小、质量小、光谱范围窄、抽运效率高等。980 nm 和 1480 nm 大功率半导体激光器是掺铒光纤放大器最理想的抽运源, 掺铒光纤放大器应用范围非常广, 可以作为光发射机的功率放大、线路放大、无再生中继、接收机的前置放大等。半导体激光器在光纤激光器的发展和应用中至关重要, 只有半导体激光器, 才能满足光纤激光器对抽运光源的要求。图 7 为 nLight 公司应用于工业加工领域的千



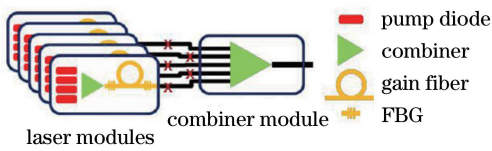


图7 nLight公司应用于工业加工领域的千瓦级光纤激光器系统结构示意图

Fig. 7 Structural diagram of nLight kilowatt fiber laser system for industrial applications

千瓦级光纤激光器系统结构示意图。

### 3.2 大功率半导体激光器在工业加工方面的应用

#### 3.2.1 激光切割

激光切割是利用经聚焦的高功率密度激光束照射工件,使被照射的材料迅速熔化、汽化、烧蚀或达到燃点,同时借助与光束同轴的高速气流吹除熔融物质,从而将工件割开。激光切割可分为激光汽化切割、激光熔化切割、激光氧气切割和激光划片与控制断裂4类。利用激光切割设备可切割4 mm以下的不锈钢,在激光束中加氧气可切割20 mm厚的碳钢,但加氧切割后会在切割面形成薄薄的氧化膜。

#### 3.2.2 激光清洗

传统清洗工业有各种各样的清洗方式,多是利用化学药剂和机械方法进行清洗。在环境保护法规要求越来越严格,人们环保和安全意识日益增强的今天,工业生产清洗中可以使用的化学药品种类将变得越来越少。如何寻找更清洁,且不具损伤性的清洗方式是不得不考虑的问题。激光清洗<sup>[93]</sup>具有无研磨、非接触、无热效应和适用于各种材质的物体等清洗特点,被认为是最可靠、最有效的解决办法。同时,激光清洗可以解决采用传统清洗方式无法解决的问题。

#### 3.2.3 激光熔覆

激光熔覆亦称激光包覆或激光熔敷,是一种新的表面改性技术。它通过在基材表面添加熔覆材料,并利用高能密度的激光束使之与基材表面薄层一起熔融的方法,在基层表面形成与其为冶金结合的添料熔覆层。

#### 3.2.4 激光焊接

激光焊接是利用高能量密度的激光束作为热源的一种高效精密焊接方法。激光焊接是激光材料加工技术应用的重要领域之一。在20世纪70年代,激光主要用于焊接薄壁材料和低速焊接,焊接过程属热传导型,即激光辐射加热工件表面,表面热量通过热传导向内部扩散,通过控制激光脉冲的宽度、能量、峰值功率和重复频率等参数,使工件熔化,形成

特定的熔池。德国已经实现汽车的整体焊接成形,中国的激光焊接处于世界先进水平,具备了使用激光成形超过12 m<sup>2</sup>的复杂钛合金构件的技术和能力,并投入多个国产航空科研项目的原型和产品制造中。2013年10月,中国焊接专家获得了焊接领域最高学术奖——布鲁克奖,中国激光焊接水平得到了世界的肯定。

### 3.3 大功率半导体激光器在医疗美容方面的应用

半导体激光器在医疗美容方面的应用包括:

- 1) 激光手术治疗。半导体激光器已经应用于软组织切除、组织接合、凝固和汽化。普通外科、整形外科、皮肤科等科室均广泛地采用了这项技术。
- 2) 激光动力学医疗。将对肿瘤有亲和性的光敏物质有选择地聚集于癌组织内部,利用半导体激光照射,使癌组织产生活性氧,使其坏死,但对健康组织没有丝毫损伤。
- 3) 激光脱毛。激光脱毛是依据选择性的光热动力学原理(通过合理调节激光波长能量脉宽,激光便能穿过皮肤表层到达毛发的根部毛囊,光能被吸收并转化为破坏毛囊组织的热能),使毛发失去再生能力同时又不损伤周边组织、痛感轻微的技术。激光脱毛是目前最安全快捷长久的去毛技术。
- 4) 生命科学研究<sup>[94]</sup>。使用半导体激光的“光镊”,可以捕捉活细胞或染色体,并移至任意位置,它已经被用于促进细胞合成、细胞相互作用等研究,还可以作为法医取证的诊断技术。

### 3.4 大功率半导体激光器在军事方面的应用

#### 3.4.1 激光雷达

工作在红外和可见光波段,以激光为工作光束的雷达称为激光雷达。激光雷达是以发射激光束探测目标的位置、速度等特征量的雷达系统。它由激光发射机、光学接收机、转台和信息处理系统等组成,激光器将电脉冲变成光脉冲发射出去,光接收机再把从目标反射回来的光脉冲还原成电脉冲,送到显示器。目前,水雷探测激光雷达、化学试剂探测激光雷达、大气监测激光雷达、生化陆战激光雷达等已经有了较好的发展。另外,中国的攻击激光雷达已经相当先进,包含着世界最尖端的5大核心技术:激光材料研究的突破、激光辐射材料物理机理及成像图谱研究的突破、一次性快速跟踪定位控制技术的突破、高密度能量可逆转换载体材料的突破、激光成像技术的突破。

#### 3.4.2 激光制导

大功率半导体激光器可以作为发射光源,直接用于激光驾束制导导弹。从制导站激光发射系统按

一定规律向空间发射经编码调制的激光束,且光束中心线对准目标;在波束中飞行的导弹,当其位置偏离波束中心时,装在导弹尾部的激光探测器接收到激光信号,经信号处理后,调整导弹的飞行方向,直至击中目标。目前,激光制导武器的发展方向主要有以下几个方面:简易制导航空火箭弹、低成本末制导迫弹、精确攻击导弹与寻飞攻击导弹、激光型JDAM制导炸弹。

### 3.4.3 激光引信

通过对激光目标进行探测,对激光回波信息进行处理和计算,判断目标,计算炸点,在最佳位置进行引爆。随着精确打击武器在现代战争中重要地位的显现,智能战斗部及精确引战配合对近炸引信的要求越来越高,使激光引信成为了精确打击武器的重要组成部分,在海防导弹、反辐射导弹、对空导弹、对地导弹、炮弹和反辐射无人机等方面发挥着不可替代的作用<sup>[95]</sup>。

### 3.4.4 激光武器

激光武器<sup>[96]</sup>主要由高能激光器、精密瞄准跟踪系统和光束控制发射系统组成。高能激光器是激光武器的核心,是实现激光武器的基础。美国始终将激光武器作为自己未来武器的发展方向,目前有3大重点激光发展计划:IFX计划、未来机载激光武器、反卫星计划。我国军用激光器也已取得巨大突破,大型激光武器空基化、海基化全面开始。我国超远距离攻击激光武器已实现2.2 MW的输出功率,已解决超远距离瞄准的环控问题。在量子点激光器理论研究方面,中国已处于世界领先地位,超强功率的激光器亦是世界一流。

## 4 结 论

大功率半导体激光器的发展现状代表了光电子产业领域的最高水平,其应用范围逐渐扩展到日常生活的方方面面,受到世界各国的高度重视。从技术层面来看,未来大功率半导体激光器的关键技术主要包括以下5个方面:1) 半导体激光芯片外延技术;2) 半导体激光芯片的封装技术;3) 光学准直技术;4) 激光束整形技术;5) 激光器集成技术。从应用层面来看,大功率半导体激光器的应用将从军事、国防、工业等领域逐步拓展,工业上使用的大功率半导体激光器和以半导体激光器为基础的全光纤激光器已经进入高速发展时期。与此同时,大功率半导体激光器在激光电视、激光医疗、车载激光雷达、激光全息防伪和智能手机等方面将拥有更加广阔的市

场。大功率半导体激光器的研究与应用,必将推动“中国制造2025”飞速发展。

## 参 考 文 献

- [1] Wang L J, Ning Y Q, Qin L, *et al.* Development of high power diode laser [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2015, 36(1): 1-19.  
王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. 发光学报, 2015, 36(1): 1-19.
- [2] Optical research project for the next 10 years launched by Germany [J]. China Science and Technology Information, 2011(6): 5.  
德国推出了光学研究未来10年计划[J]. 中国科技信息, 2011(6): 5.
- [3] Follow the United States: UK Ministry of Defence launches high-energy fiber laser weapon development [J]. Chinese Optics, 2017(7): 878.  
紧追美国: 英国国防部启动高能光纤激光武器研制[J]. 中国光学, 2014(7): 878.
- [4] Chen L. Research on development strategy of Dazhu laser marketing in Shenzhen [D]. Beijing: Renmin University of China, 2008: 1-4.  
陈亮. 深圳市大族激光营销发展战略研究[D]. 北京: 中国人民大学, 2008: 1-4.
- [5] Zhang J. Research on the design, growth and preparation of GaAs-based near-infrared semiconductor lasers [D]. Changchun: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2013: 10-18.  
张建. GaAs基近红外半导体激光器的设计、生长和制备研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2013: 10-18.
- [6] Bachmann F, Loosen P, Poprawe R. High power diode lasers[M]. New York: Springer, 2007.
- [7] Pflug G C, Injeyan H, Vespucci M T. High power laser handbook [M]. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [8] Liu Q K, Kong J X, Zhu L N, *et al.* Failure mode analysis of high-power laser diodes by electroluminescence [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(2): 180-187.  
刘启坤, 孔金霞, 朱凌妮, 等. 电致发光用于大功率半导体激光器失效模式分析[J]. 发光学报, 2018, 39(2): 180-187.
- [9] Borrue L, Odriozola H, Tijero J M G, *et al.* Design strategies to increase the brightness of gain guided tapered lasers[J]. Optical and Quantum Electronics,

- 2008, 40(2/3/4): 175-189.
- [10] Bachmann F G. High-power diode laser technology and applications [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3888: 394-404.
- [11] Chilla J L A, Butterworth S D, Zeitschel A, *et al.* High-power optically pumped semiconductor lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5332: 143-151.
- [12] Gapontsev V, Moshegov N, Trubenko P, *et al.* High-brightness fiber coupled pumps [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7198: 71980O.
- [13] Kaifuchi Y, Yamagata Y, Nogawa R, *et al.* Ultimate high power operation of 9xx-nm single emitter broad stripe laser diodes [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10086: 100860D.
- [14] Taniguchi H, Ishii H, Minato R, *et al.* 25-W 915-nm lasers with window structure fabricated by impurity-free vacancy disordering (IFVD) [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(5): 1176-1179.
- [15] Crump P, Roder C, Staske R, *et al.* Limitations to peak continuous wave power in high power broad area single emitter 980 nm diode lasers [C] // European Conference on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conference, June 14-19, 2009, Munich. New York: IEEE, 2009: 1.
- [16] 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.
- [17] Chen G, Xie L, Wang Y B, *et al.* Photodarkening-induced absorption and fluorescence changes in Yb fibers [J]. Chinese Physics Letters, 2013, 30(10): 104208.
- [18] Chen Z G, Bai J, Dong W M, *et al.* High power and high efficiency kW 88x-nm multi-junction pulsed diode laser bars and arrays [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8965: 896514.
- [19] Hooper L E, Kalita M, Devine A, *et al.* White light 50 W supercontinuum: roadmap to kW truly white lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9344: 93440X.
- [20] Demir A, Peters M, Duesterberg R, *et al.* 29.5 W continuous wave output from 100  $\mu\text{m}$  wide laser diode [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9348: 93480G.
- [21] Morales J, Lehkonen S, Liu G, *et al.* Advances in 808 nm high power diode laser bars and single emitters [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9733: 97330T.
- [22] Xiao X S, Guo H T, Yan Z J, *et al.* Ultra-short wavelength operation in Thulium-doped silica fiber laser with bidirectional pumping [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10256: 102561F.
- [23] Chen Z G, Bao L, Bai J, *et al.* Performance limitation and mitigation of longitudinal spatial hole burning in high-power diode lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8277: 82771J.
- [24] Zeghuzi A, Radziunas M, Wünsche H J, *et al.* Influence of nonlinear effects on the characteristics of pulsed high-power broad-area distributed Bragg reflector lasers [J]. Optical and Quantum Electronics, 2018, 50(2): 88.
- [25] Pietrzak A, Hülsewede R, Zorn M, *et al.* High-power single emitters and low fill factor bars emitting at 808 nm [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9733: 97330R.
- [26] Nlight High-power diode lasers offer efficient answer [EB/OL]. (2005-09-15) [2018-06-15]. [http://www.nlight.net/nlight-files/file/articles/HP\\_May05\\_OLE.pdf](http://www.nlight.net/nlight-files/file/articles/HP_May05_OLE.pdf).
- [27] Pietrzak A, Huelsewede R, Zorn M, *et al.* New highly efficient laser bars and laser arrays for 8xx-10xx nm pumping applications [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8965: 89650T.
- [28] Frevert C, Crump P, Bugge F, *et al.* Low-temperature optimized 940 nm diode laser bars with 1.98 kW peak power at 203 K [C] // 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 10-15, 2015, San Jose. New York: IEEE, 2015: SM3F.8.
- [29] Wang Z F, Li T, Yang G W, *et al.* High power, high efficiency continuous-wave 808 nm laser diode arrays [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 97: 297-301.
- [30] Strauss U, Müller M, Swietlik T, *et al.* Next generation 8xx nm laser bars and single emitters [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7918: 79180T.
- [31] Pietrzak A, Woelz M, Huelsewede R, *et al.* Heading to 1 kW levels with laser bars of high-efficiency and emission wavelength around 880 nm and 940 nm [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9348: 93480E.
- [32] Zorn M, Huelsewede R, Pietrzak A, *et al.* Progress in reliable single emitters and laser bars for efficient CW-operation in the near-infrared emission range [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9348: 93480K.
- [33] Frevert C, Bugge F, Knigge S, *et al.* 940 nm QCW

- diode laser bars with 70% efficiency at 1 kW output power at 203 K: Analysis of remaining limits and path to higher efficiency and power at 200 K and 300 K[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9733: 97330L.
- [34] Ladugin A, Marmalyuk A, Padalitsa A, *et al.* Laser diode bars based on AlGaAs/GaAs quantum-well heterostructures with an efficiency up to 70% [J]. *Quantum Electronics*, 2017, 47(4): 291-293.
- [35] Karow M M, Frevert C, Platz R, *et al.* Efficient 600-W-laser bars for long-pulse pump applications at 940 and 975 nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(19): 1683-1686.
- [36] Pietrzak A, Zorn M, Meusel J, *et al.* Development of highly efficient laser bars emitting at around 1060 nm for medical applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10514: 105140D.
- [37] Zhou M C, Jiang X F, Zhang L F, *et al.* Optical performance of high power laser diode stack [J]. *Chinese Journal of 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.
- [38] Zhou C X, Liu Y H, Xie W M, *et al.* Analysis and design of fiber coupled high power laser diode array [J]. *Chinese Journal of 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.
- [39] Kanskar M, Cai J, Galstad C, *et al.* High power conversion efficiency and wavelength-stabilized narrow bandwidth 975 nm diode laser pumps [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6216: 621609.
- [40] Peters M, Rossin V, Everett M, *et al.* High-power high-efficiency laser diodes at JDSU [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6456: 64560G.
- [41] Piprek J. Inverse thermal lens effects on the far-field blooming of broad area laser diodes [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(10): 958-960.
- [42] Winterfeldt M, Crump P, Wenzel H, *et al.* Experimental investigation of factors limiting slow axis beam quality in 9xx nm high power broad area diode lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(6): 063103.
- [43] Winterfeldt M, Crump P, Knigge S, *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.
- [44] Eckstein H C, Stumpf M, Zeitner U D, *et al.* Mode shaping for enhanced brightness in broad area lasers using monolithically integrated microoptical structures [C] // *International Semiconductor Laser Conference*, September 7-10, 2014, Palma de Mallorca. New York: IEEE, 2014: 17-18.
- [45] Decker J, Winterfeldt M, Fricke J, *et al.* Study of lateral brightness in 20  $\mu\text{m}$  to 50  $\mu\text{m}$  wide narrow stripe broad area lasers [C] // *IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference*, March 24, 2015, Coventry. New York: IEEE, 2015: 21-22.
- [46] Kanskar M, Bao L, Chen Z, *et al.* Continued improvement in reduced-mode (REM) diodes enable 272 W from 105  $\mu\text{m}$  0.15 NA beam [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10086: 1008609.
- [47] Yang Y, Liu Y, Zhang J L, *et al.* Near diffraction limit high-brightness 850 nm tapered laser diodes [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, 32(10): 1064-1068. 杨晔, 刘云, 张金龙, 等. 850 nm 高亮度近衍射极限锥形半导体激光器 [J]. *发光学报*, 2011, 32(10): 1064-1068.
- [48] Li J, Qiu Y T, Cao Y H, *et al.* High brightness tapered diode laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(8): 990-995. 李景, 邱运涛, 曹银花, 等. 高亮度锥形半导体激光器 [J]. *发光学报*, 2016, 37(8): 990-995.
- [49] Dittmar F, Sumpf B, Fricke J, *et al.* High-power 808-nm tapered diode lasers with nearly diffraction-limited beam quality of  $M^2 = 1.9$  at  $P = 4.4$  W [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(4): 601-603.
- [50] Fiebig C, Blume G, Kaspari C, *et al.* 12 W high-brightness single-frequency DBR tapered diode laser [J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(21): 1253-1255.
- [51] Wang X Z, Erbert G, Wenzel H, *et al.* 17-W near-diffraction-limited 970-nm output from a tapered semiconductor optical amplifier [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(2): 115-118.
- [52] Müller A, Fricke J, Bugge F, *et al.* DBR tapered diode laser with 12.7 W output power and nearly diffraction-limited, narrowband emission at 1030 nm [J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(4): 87.
- [53] Müller A, Zink C, Fricke J, *et al.* 1030 nm DBR tapered diode laser with up to 16 W of optical output power [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10123:

- 101231B.
- [54] Huang R K, Donnelly J P, Missaggia L J, *et al.* High-brightness slab-coupled optical waveguide laser [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6485: 64850F.
- [55] Ma X L, Qu H W, Zhao S Y, *et al.* Improved power and efficiency for tapered lasers with optimized photonic crystal structures[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10457: 104571O.
- [56] Zhao S Y, Qi A Y, Wang M J, *et al.* High-power high-brightness 980 nm lasers with >50% wall-plug efficiency based on asymmetric super large optical cavity[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 3518-3526.
- [57] Wang L J, Peng H Y, Zhang J. Advance on high power diode laser coupling [J]. Chinese Optics, 2015, 8(4): 517-534.  
王立军, 彭航宇, 张俊. 大功率半导体激光合束进展 [J]. 中国光学, 2015, 8(4): 517-534.
- [58] Zhang J, Chen Y Y, Qin L, *et al.* Advances in high power high beam quality diode lasers [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(32): 3719-3728.  
张俊, 陈泳屹, 秦莉, 等. 高功率、高光束质量半导体激光器研究进展[J]. 科学通报, 2017, 62(32): 3719-3728.
- [59] Xu D, Guo Z J, Zhang T J, *et al.* 600 W high brightness diode laser pumping source [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10086: 1008603.
- [60] Heinemann S, Fritsche H, Kruschke B, *et al.* Compact high brightness diode laser emitting 500 W from a 100  $\mu\text{m}$  fiber[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8605: 86050Q.
- [61] Fritsche H, Kruschke B, Koch R, *et al.* High brightness direct diode laser with kW output power [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8965: 89650G.
- [62] Ferrario F, Fritsche H, Grohe A, *et al.* Building block diode laser concept for high brightness laser output in the kW range and its applications [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9733: 97330G.
- [63] 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.
- [64] Lauer C, Bachmann A, Furitsch M, *et al.* Extra bright high power laser bars[C]//IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference, October 14-15, Coventry. New York: IEEE. 2015: 37-38.
- [65] Bachmann A, Lauer C, Furitsch M, *et al.* Recent brightness improvements of 976 nm high power laser bars [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10086: 1008602.
- [66] Kanskar M, Keeney S, Martinsen R. The power of brilliance: a brief history of high-power semiconductor lasers[EB/OL]. (2017-12-19) [2018-07-12]. <http://nlight.net/nlight-files/file/The%20Power%20of%20Brilliance%20-%20The%20History%20of%20High-Power%20Semiconductor%20Lasers%20171219.pdf>.
- [67] Lorenzen D, Schröder M, Meusel J, *et al.* Comparative performance studies of indium and gold-tin packaged diode laser bars [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6104: 610404.
- [68] Yang H W, Huang K, Chen H T, *et al.* High efficiency and high power CW semiconductor lasers [J]. Micronanoelectronic Technology, 2010, 47(2): 71-75.  
杨红伟, 黄科, 陈宏泰, 等. 高效率大功率连续半导体激光器[J]. 微纳电子技术, 2010, 47(2): 71-75.
- [69] Rossin V, Zucker E, Peters M, *et al.* High-power high-efficiency 910- to 980-nm broad-area laser diodes [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5336: 196-203.
- [70] Erbert G, Bugge F, Knigge A, *et al.* Highly reliable 75 W InGaAs/AlGaAs laser bars with over 70% conversion efficiency[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6133: 61330B.
- [71] Crump P, Wang J, Patterson S, *et al.* Diode laser efficiency increases enable >400-W peak power from 1-cm bars and show a clear path to peak powers in excess of 1-kW [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6104: 610409.
- [72] Crump P, Grimshaw M, Wang J, *et al.* 85% power conversion efficiency 975-nm broad area diode lasers at -50  $^{\circ}\text{C}$ , 76% at 10  $^{\circ}\text{C}$  [C]//Lasers and Electro-Optics and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference, May 21-26, 2006, Long Beach. New York: IEEE. 2006: 1-2.
- [73] Bai J G, Chen Z G, Leisher P, *et al.* High-efficiency kW-class QCW 88x-nm diode semiconductor laser bars with passive cooling[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8241: 82410W.
- [74] 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 [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6552: 65521E.
- [75] Bao L, Wang J, Devito M, *et al.* Reliability of high performance 9xx-nm single emitter laser diodes [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7583: 758302.

- [76] Bao L, Leisher P, Wang J, *et al.* High reliability and high performance of 9xx-nm single emitter laser diodes [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7918: 791806.
- [77] Bao L, Bai J, Price K, *et al.* Reliability of high power/brightness diode lasers emitting from 790 to 980 nm [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8605: 86050N.
- [78] Kanskar M, Bao L, Bai J, *et al.* High reliability of high power and high brightness diode lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8965: 896508.
- [79] Yamagata Y, Yamada Y, Kaifuchi Y, *et al.* Performance and reliability of high power, high brightness 8xx-9xx nm semiconductor laser diodes [C] // 2015 IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference, October 14-15, 2015, Coventry. New York: IEEE. 2015: 7-8.
- [80] Li X N, Wang J W, Feng F F, *et al.* Effects of packaging on the performances of high brightness 9xx nm CW mini-bar diode lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9346: 93460C.
- [81] Zorn M, Hülsewede R, Schulze H, *et al.* JENOPTIK diode lasers and bars optimized for high-power applications in the NIR range[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7583: 75830U.
- [82] Hemenway M, Bao L, Kanskar M, *et al.* Performance improvements to wavelength stabilized high power 885 nm diode laser modules [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9730: 97300K.
- [83] Strohmaier S G, Erbert G, Rataj T, *et al.* Forward development of kW-class power diode laser bars[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10514: 1051409.
- [84] Liu G L, Li J W, Fan L, *et al.* High power single lateral mode 1050 nm laser diode bar[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10086: 100860Y.
- [85] Yamagata Y, Yamada Y, Muto M, *et al.* 915nm high-power broad area laser diodes with ultra-small optical confinement based on Asymmetric Decoupled Confinement Heterostructure ( ADCH ) [ J ]. Proceedings of SPIE, 2015, 9348: 93480F.
- [86] 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.
- [87] Andreeva E V, Il'Chenko S N, Kurnyavko Y V, *et al.* Highly reliable high-power superluminescent diodes with three single-mode active channels [J]. Quantum Electronics, 2016, 46(7): 594-596.
- [88] Kuramoto K, Abe S, Miyashita M, *et al.* Recent progress of 638-nm high-power broad area laser diodes in Mitsubishi Electric [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10514: 1051404.
- [89] Fritsche H, Ferrario F, Koch R, *et al.* Direct diode lasers and their advantages for materials processing and other applications [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9356: 93560I.
- [90] Deichsel E. Highly-reliable laser diodes and modules for spaceborne applications[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10565: 105650O.
- [91] Heinemann S, McDougall S D, Ryu G, *et al.* Advanced chip designs and novel cooling techniques for brightness scaling of industrial, high power diode laser bars [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10514: 105140Y.
- [92] Ma X Y, Wang J, Liu S P. Present situation of investigations and applications in high power semiconductor lasers [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 189-194.  
马骁宇, 王俊, 刘素平. 国内大功率半导体激光器研究及应用现状 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 189-194.
- [93] Wang L W. Development of semiconductor lasers and their applications[J]. Journal of Chengdu University (Natural Science), 2003, 22(3): 34-38.  
王路威. 半导体激光器的发展及其应用 [J]. 成都大学学报(自然科学版), 2003, 22(3): 34-38.
- [94] Lei Z L, Tian Z, Chen Y B. Laser cleaning technology in industrial fields [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030005.  
雷正龙, 田泽, 陈彦宾. 工业领域的激光清洗技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 030005.
- [95] Ren G G, Yi W W, Qi Y, *et al.* U.S. theater and strategic UVA-borne laser weapon[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 100002.  
任国光, 伊炜伟, 齐予, 等. 美国战区 and 战略无人机载激光武器 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 100002.
- [96] Cheng Y, Guo Y L, Tang H, *et al.* Development trend of tactical laser weapons [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 110004.  
程勇, 郭延龙, 唐璜, 等. 战术激光武器的发展动向 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 110004.