

文章编号: 1000-7032(2015)01-0001-19

大功率半导体激光器研究进展

王立军*, 宁永强, 秦 莉, 佟存柱, 陈泳屹

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

摘要: 对半导体激光器的发展历史和发展现状进行了综述,并具体介绍了长春光学精密机械与物理研究所近年来在大功率半导体激光器方面所取得的主要进展,特别是在大功率半导体激光器的激光光源、垂直腔面发射激光器和新型激光器芯片等方面。

关键词: 大功率; 半导体激光器; 边发射激光器; 垂直腔面发射激光器; 芯片

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20153601.0001

Development of High Power Diode Laser

WANG Li-jun*, NING Yong-qiang, QIN Li, TONG Cun-zhu, CHEN Yong-yi

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

* Corresponding Author, E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn

Abstract: This paper reviews on the history and the development status for semiconductor lasers, meanwhile focuses on the high power semiconductor laser achievements acquired by Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics(CIOMP) in recent years, especially at the aspects of high power semiconductor laser sources, vertical cavity surface emitting lasers(VCSEL) and novel laser chips.

Key words: high power; diode laser; edge emitting laser; vertical cavity surface emitting laser; chip

1 引 言

激光是20世纪以来继原子能、电子计算机、半导体之后人类的又一重大发明。半导体激光科学与技术在以半导体激光器件为核心,涵盖研究光的受激辐射放大的规律、产生方法、器件技术、调控手段和应用技术,所需知识综合了几何光学、物理光学、半导体电子学、热力学等学科。

半导体激光历经五十余年发展,作为一个世界前沿的研究方向,伴随着国际科技进步突飞猛进的发展,也受益于各类关联技术、材料与工艺等

的突破性进步。半导体激光的进步在国际范围内受到了高度的关注和重视,不仅在基础科学领域不断研究深化,科学技术水平不断提升,而且在应用领域上不断拓展和创新,应用技术和装备层出不穷,应用水平同样取得较大幅度的提升,在世界各国的国民经济发展中,特别是信息、工业、医疗和国防等领域得到了重要应用。

当前,国际上半导体激光的发展正处于新一阶段的快速发展时期,而我国的激光科学技术基本保持了与国际同步发展的态势。从社会全面发展、产业经济提升、国防安全应用和经济结构转型

收稿日期: 2014-10-12; 修订日期: 2014-11-16

基金项目: 国家863计划(2012AA040210); 科技部重大仪器专项(2011YQ04007702); 国家自然科学基金(61234004, 61176045, 61306086, 61376070, 61434005, 11404327, 61204055); 吉林省科技厅项目(20140101172JC, 20130206006GX, 20140101206JC-02, 20140520132JH)资助

等各方面,从国家竞争性发展的角度,对包括半导体激光科技的全面创新和产业应用的转型发展提出了更为明确的需求。本文对半导体激光器的发展历史和现状进行了综述,并且具体介绍了长春光学精密机械与物理研究所近年来在大功率半导体激光器,特别是在大功率半导体激光器的激光光源、垂直腔面发射激光器和新型激光器芯片等方面所取得的成就。

2 大功率半导体激光器的发展历程

1962年,美国科学家宣布成功研制出了第一代半导体激光器——GaAs 同质结构注入型半导体激光器^[1-2]。由于该结构的激光器受激发射的阈值电流密度非常高,需要 $5 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ A/cm²,因此它只能在液氮制冷下才能以低频脉冲状态工作^[3]。从此开始,半导体激光器的研制与开发利用成为人们关注的焦点。

1963年,美国的 Kroemer 和前苏联科学院的 Alferov 提出把一个窄带隙的半导体材料夹在两个宽带隙半导体之间,构成异质结构,以期在窄带隙半导体中产生高效率的辐射复合。随着异质结构材料的生长工艺,如气相外延(VPE)、液相外延(LPE)等的发展,1967年,IMB公司的 Woodall 成功地利用 LPE 在 GaAs 上生长了 AlGaAs。在 1968—1970年期间,美国贝尔实验室的 Panish, Hayashi 和 Szymanski 成功研究了 AlGaAs/GaAs 单异质结激光器,室温阈值电流密度为 8.6×10^3 A/cm²,比同质结激光器降低了一个数量级。

正当美国学者们致力于单异质结激光器的研究时,前苏联科学院约飞物理研究所的 Alferov 等宣布研制成功双异质结半导体激光器(HD-LD)。该结构是将 p-GaAs 半导体有源区夹在宽禁带的 n-AlGaAs 层和 p-AlGaAs 层之间,使得室温下的阈值电流降低到 4×10^3 A/cm²。双异质结半导体激光器阈值电流密度之所以能够明显降低,主要是依靠双异质结的两个作用:(1)有源区两边包层材料的带隙宽于有源区材料的带隙,这使得注入双异质结半导体激光器的载流子被有效地限制在有源区内,以利于产生高的增益;(2)有源区材料的折射率大于两边包层材料的折射率,形成的光波导结构能将大部分光限制在有源区内^[4-5]。

双异质结激光器^[6-7]的问世标志着半导体

激光器的发展进入了新时期。1978年,半导体激光器成功地应用于光纤通讯系统中。随着新材料、新结构的不断涌现,半导体激光器的电学和光学性能有了很大的提高。进入 20 世纪 80 年代以后,由于引入了半导体物理研究的新成果——能带工程理论,同时晶体外延材料生长新工艺如分子束外延(MBE)、金属有机化学气相沉积(MOCVD)和化学束外延(CBE)等取得重大成就,使得半导体激光器成功地采用了量子阱和应变量子阱结构,制备出了许多性能优良的激光器件,如各类量子阱激光器、应变量子阱激光器、垂直腔面发射激光器和大功率半导体激光器阵列等,实现了大功率输出。

量子阱激光器窄带隙有源区材料的厚度通常小于电子在该材料的德布罗意波长(一般小于 10~20 nm),这样能使注入的电子被势阱有效地吸收。在量子阱中电子和空穴沿着垂直阱壁方向的运动呈现量子化的特点,电子的态密度也变为阶梯状,这时只需要很小的注入电流就可以实现粒子数反转,因此量子阱激光器具有很小的阈值电流、很高的微分量子效率和高输出功率。

1977年,日本东京工业大学的伊贺健一(Kenichi Iga)提出垂直腔面发射激光器(Vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL)的概念^[8],其工作原理如图 1 所示。这种激光器由于光学谐振腔与半导体芯片的衬底垂直,因此能够实现芯片表面的激光发射,有着低阈值电流、稳定单波长工作、可高频调制、容易二维集成、没有腔面阈值损伤等优点^[9]。随着材料生长工艺的成熟和器件结构的优化,VCSEL 器件在低阈值电流及室温工作等方面取得了一系列进展^[10-11],并于 1988 年实现了室温连续激射^[12]。目前,VCSEL 已经在光通信^[13-14]、光互连^[15]、激光引信^[16]、激光显示^[17]、光信号处理^[18]以及芯片级原子钟^[19]等领域获得了广泛的应用。

随着理论研究和制备工艺的发展,尤其是在美国 SHEDS、ADHEL^[20-21]和德国 BRIOLAS^[22]等项目的支持下,半导体激光器芯片结构、外延生长和器件封装等技术均有了很大的发展。半导体激光器以其转换效率高、寿命长、体积小、重量轻、可靠性高、能直接调制及易与其他半导体器件集成等特点,在军事、工业加工、激光医疗、光通信、光存储和激光打印等信息领域中有着非常广泛的应用^[23-24]。

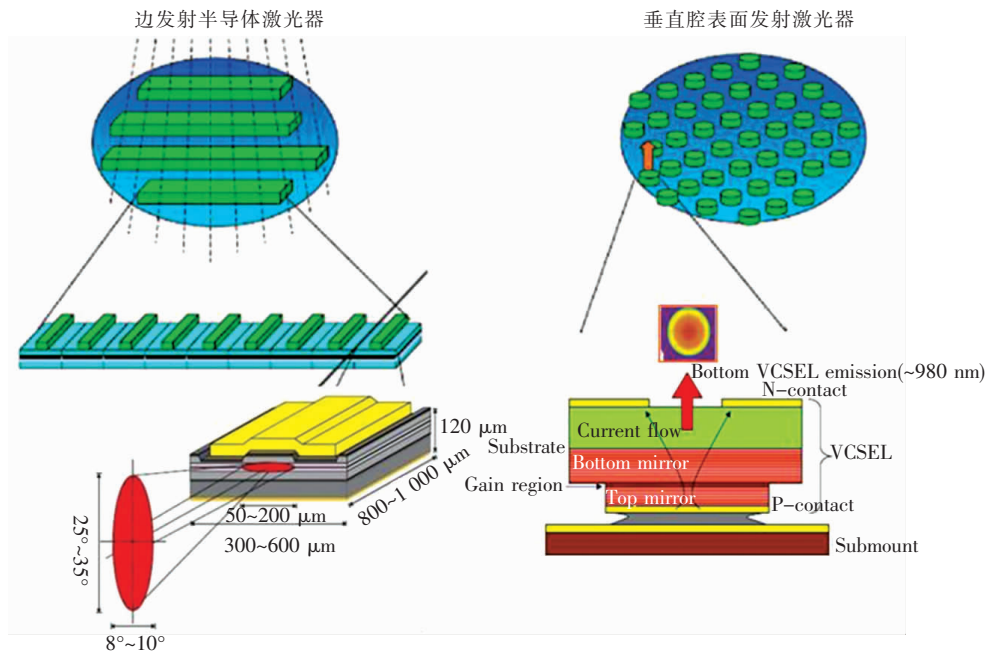


图 1 边发射激光器和面发射激光器

Fig. 1 Edge emitting laser and vertical cavity surface emitting laser

3 大功率半导体激光器的研究现状

现在国际上半导体激光器研究的重大技术问题是:如何同时获得高功率、高可靠性和高能量转换效率,同时提高光束质量并拥有良好的光谱特性^[25]。随着材料生长技术和器件制备工艺的发展和进步,新的有源材料不断涌现,更好的器件结构和工艺日趋成熟,半导体激光器的功率、可靠性和能量转换效率都得到了迅速提高;以往相比于其他激光器的劣势,如光束质量差、光谱线宽过大等问题也得到了相当程度的改善,半导体激光器的性能得到不断的提升,在很多领域正在逐渐取代其他激光光源,并且其应用前景也越来越广泛。

3.1 半导体激光器的输出功率

商用大功率半导体激光器主要工作在近红外波段,其波长范围在 800 ~ 1 100 nm 之间。目前,提高半导体激光器的输出功率主要有两种方式:一种是提高半导体激光器芯片上单管激光的输出功率^[26],另一种是增加半导体激光器的发光点个数。

提高单管激光的输出功率,需要改进激光器的芯片结构,提升材料生长、芯片制备、腔面镀膜及封装散热等关键技术。增加激光器发光点的个数则主要表现为激光器线阵(多个激光单元在外延层方向同芯片集成,也叫做激光器 bar 条)、迭

阵、单管模组、面阵等激光合束技术。传统激光合束(Traditional beam combining, TBC)技术基于半导体激光器的光斑、偏振和光谱特性,单纯从外部光学系统考虑,利用空间合束、偏振合束和波长合束对单管、线阵和迭阵进行能量合束和光束整形。外腔光谱合束(External cavity feedback wavelength beam combining, ECFWBC)技术利用光栅进行外部光学反馈实现光谱合束,可以在提高功率的基础上保证良好的光束质量。

3.1.1 单管输出功率及单管合束光源

近几年来,半导体激光器近红外波段的输出功率得到了显著提高,目前单管激光器的连续输出功率已超过 10 W,最高可达到 25 W,如表 1 所示。

表 1 单管半导体激光器的连续输出功率

Table 1 CW output power of semiconductor single emitter laser

工作波长/ nm	最大功率/ W	最大转换效率/ %	研究单位
788	10	65	nLight, 2011 ^[27]
808	25	53	LPI, 2009 ^[28]
885	25	>61	nLight, 2011 ^[28]
980	24.6	54	FBH, 2009 ^[30]
1 060	16	74	Ioffe, 2007 ^[31]

半导体激光器单管合束是由激光单管组成的最小光学模组,可以直接合束实现光纤输出。激光器单管合束的优点是:寿命长、可靠性高,慢轴光束质量比较好,可耦合进芯径 $\leq 100\ \mu\text{m}$ 的光纤;由于热源分散且发热量小,可以采用传导冷却或风冷,因而光源模组整体体积小,重量轻;无需高电流驱动,可以采用并联方式,对电源要求也比较低。但是,相对于线阵和迭阵,激光单管经过合束后输出的功率一般为数百瓦,因此一般用在功率需求为几十瓦至数百瓦、或者对体积和可靠性要求非常高的场合,如光纤激光器泵浦、激光医疗等。

表 2 半导体激光器 bar 条输出功率

Table 2 Output power of semiconductor laser bar

年份	功率/W	波长/nm	工作条件	效率/%	填充因子/%	公司
2000	240	940	CW	>50	72	OPC ^[38]
2004	255	808	CW, 10 °C	49.1	67	Hamamatsu Photonics ^[39]
2000	267	980	CW, 22 °C	52.5	50	Fraunhofer-IAF ^[40]
2005	325	920	CW, 16 °C	62	50	Bookham ^[41]
2005	364	790	CW, 6 °C	58	80	nLight ^[42]
2005	509	940	CW, 5 ~ 8 °C	>60	50	Jenoptik ^[43]
2007	700	940	CW, 25 °C	65	77	Spectra-Physics ^[44]
2007	928	940	CW, 10 °C	65	77	Spectra-Physics ^[45]
2007	1 005	980	QCW, 15 °C	70	44	Jenoptik ^[46]
2010	940	940	CW, 20 °C	70	77	SRL ^[47]

半导体激光器线阵合束,指的是若干传导冷却或大通道热沉封装的激光器线阵,通过光学元件实现分立空间位置上的激光能量叠加^[48]。这种激光器线阵合束技术的优点是线阵光路独立,装调简便精度高,不存在公差积累问题;热源分散,可以采用传导冷却或大通道水冷,散热要求低;线阵之间的电连接与冷却液隔绝,因而可以采用普通纯净水作为冷却液;被准直的线阵光束不受热沉厚度影响,合束光斑无暗区叠加。但是,由于半导体激光器线阵排布比较分散,所以相同功率的线阵合束光源体积明显大于迭阵合束光源。考虑到总体积和光路复杂性,参与合束的激光器线阵一般不超过 50 个,因此该技术适用于输出功率为数百瓦级至 3 000 W 级的应用场合。

近年来,半导体激光器线阵合束的研究也有了很快的发展^[49-53]。德国 Limo 采用 38 个传导热沉封装激光器线阵,形成 8 个线阵合束单元,实现了 200 μm 芯径、0.22 数值孔径的光纤的 1 200 W

近年来,单管耦合光源的应用范围越发广泛,发展迅速^[26,32-37]。美国 Fraunhofer USA 采用 120 个单管耦合进 200 μm 光纤,功率输出 > 700 W。美国 nLight 采用 72 个 940 nm 波长的单管,排列成 4 个单元,实现光纤输出 700 W 连续功率。

3.1.2 激光器线阵输出功率与线阵合束光源

随着技术发展和单管输出功率的提高,半导体激光 bar 条的输出功率也显著增加。厘米 bar 条的输出功率从 2000 年时的 240 W 已经提高至 1 000 W 左右,增大到原来的 4 倍,增长非常迅速,如表 2 所示。

功率输出。德国 Dilas 采用 28 个激光器线阵,实现了 200 μm 芯径、0.22 数值孔径的光纤的 775 W 功率单波长激光输出,然后通过波长合束,实现了 500 μm 芯径、0.12 数值孔径的光纤的 3 835 W 连续功率输出。德国 Trumf 采用低填充因子的激光器线阵,制成 100 μm 芯径、0.12 数值孔径的光纤的 100 W 线阵合束模块,然后以 19 个模块经过光纤捆绑方式实现空间合束,再通过波长合束方式实现 600 μm 芯径、0.12 数值孔径的光纤的 3 000 W 连续功率输出。

3.1.3 激光器迭阵合束光源

半导体激光器迭阵是通过若干微通道热沉封装的 bar 条在快轴方向直接堆叠而成,激光器迭阵合束技术是高功率半导体激光光源最常采用的合束方式。

在保证单层激光器 bar 条连续输出数百瓦激光功率的情况下,受限于热沉内微通道的水压降,激光器迭阵中激光器 bar 条数一般不能超

过50层。这样,单个激光器迭阵能够实现连续工作数千瓦的激光输出。通过增加激光器迭阵数量进行激光合束,能够实现上万瓦甚至数十万瓦的半导体激光输出。激光器迭阵光源具有结构紧凑、体积小(包括微通道热沉在内,单个激光器bar条体积为 0.6 cm^3 左右,50层bar条不超过 30 cm^3)的优点,是目前半导体激光光源实现高功率输出的主要封装方式。

激光器迭阵通过热沉与激光芯片之间的串联加电,另外,微通道热沉中水道截面直径在微米量级,容易发生堵塞,这就要求激光器迭阵的冷却液必须采用高度绝缘性的纯净去离子水,并定期维护更换,因而对冷却液和热沉的要求非常高。

综合考虑输出功率和可靠性等方面,在要求连续输出 $3\ 000\text{ W}$ 甚至更高功率的应用场合,应该使用基于激光器迭阵的半导体激光合束技术。

德国Laserline公司基于激光器迭阵,结合平行平板堆整形方法和激光合束技术,已研制出了多种半导体激光直接加工机,代表参数如表3所示。 15 kW 功率的光束质量为 $100\text{ mm}\cdot\text{mrad}$, 2 kW 功率的光束质量为 $20\text{ mm}\cdot\text{mrad}$,后者超过了相同功率下灯泵Nd:YAG激光的光束质量。该公司半导体激光光源保质期长达5年($43\ 800\text{ h}$),是灯泵Nd:YAG激光($<2\ 000\text{ h}$)的数十倍,这使得它在材料加工市场非常具有竞争力。目前该公司产品已直接应用在熔覆、表面强化、金属焊接和深熔焊等材料加工领域。

表3 德国Laserline公司的半导体激光器迭阵合束光源参数

Table 3 Semiconductor laser stack source parameters from German Laserline company

连续功率/ W	光束质量/ ($\text{mm}\cdot\text{mrad}$)	光斑大小/ mm ($f=100\text{ mm}$)	功率密度/ ($\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)
2 000	20	$\varphi 0.2$	6.37×10^6
4 000	30	$\varphi 0.3$	5.66×10^6
6 000	40	$\varphi 0.4$	4.78×10^6
10 000	60	$\varphi 0.6$	3.54×10^6
15 000	100	$\varphi 1.0$	1.91×10^6

3.2 半导体激光器的转换效率

半导体激光器的功率转换效率是半导体激光器非常重要的指标之一。高转换效率的半导体激光器产生的废热少、能量利用率高,可以大大延长器件的工作寿命,提升可靠性;同时也意味着可以采用更小、更轻、更经济的冷却系统,使得半导体激光系统的移动平台具有无可比拟的优点^[54]。

随着技术的发展和各国科研项目的支持(美国国防先进技术研究计划署(DARPA)专门设立了提高半导体激光器的电光转换效率到80%为目标的超高效率激光器光源(SHEDS)项目),高功率半导体激光器光源的效率已经达到很高的水平^[55-60]。红外波段可达到70%以上。目前国际上关于高功率半导体激光器件的转换效率与波长对应关系如表4所示。

表4 半导体激光器的转换效率

Table 4 Wall plug efficiency of semiconductor laser

年份	单位	波长/ nm	类型	转换效率
2005	俄罗斯 Ioffe 实验室	1 080	单管	72% ^[56]
2005	美国威斯康星大学	970	bar 条	73% ^[57]
2006	美国 nLight 公司	975	单管	$-50\text{ }^\circ\text{C}$ 最大为 85%, $10\text{ }^\circ\text{C}$ 为 76% ^[60]
2007	美国 nLight 公司	790,795,808,880	bar 条	50 W 时 70% ^[59]
2007	美国 JDSU 公司	940	bar 条	100 W 时 76% ^[58]
2008	德国 FBH 研究所	808	bar 条	80 W 时 70% ^[59]

3.3 半导体激光器的可靠性

半导体激光器的可靠性在应用中是一个重要的技术指标。在通信、光存储等领域,小功率半导体的可靠性已基本解决,工作寿命可以达到实用要求。高功率半导体激光器在大电流工作连续输出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^[60]等基本问题。解决这些问题一般通过以下方法:提高晶体生长质量;改进制备工艺和封装技术;增大光斑尺寸;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升和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十万小时以上^[61-66],线阵的可靠性也有了非常明显的提高^[67-71]。单管和 bar 条的研究进展如表 5 和表 6 所示。

表 5 半导体激光器单管的可靠性

Table 5 Reliability of semiconductor laser single emitter

单位	年份	波长/nm	预计温度和寿命
美国 JDSU	2006	9xx	35 °C 热沉温度, 1.5 × 10 ⁶ h ^[72]
美国 Axcel	2007	808	10 W, 100 000 h ^[73]
美国 Axcel	2008	915	8 W, 25 °C, > 220 000 h ^[74]
美国 nLight	2010	915/976	结温 80 °C, 10 W 连续工作可超过 30 年 ^[71]

表 6 半导体激光器 bar 条的可靠性

Table 6 Reliability of semiconductor laser bar

单位	年份	波长/nm	功率和寿命
德国 Jenoptik	2008	940	120 W, > 15 000 h ^[75]
德国 Jenoptik	2009	940	100 W, 10 000 ~ 20 000 h ^[76]
德国 Jenoptik	2010	885	120 W, > 25 000 h ^[74]

3.4 半导体激光器的光束质量

在激光医疗、显示、自由空间光通信、泵浦光纤激光器、直接材料加工等应用领域,需要激光光源同时满足高输出功率和高光束质量。传统的宽条结构的半导体激光器虽然具有高功率、高效率的优点,但其易于产生光丝效应和复杂多瓣的近场图案,光束质量不高。

为了改善半导体激光器单管的光束质量,通常可以通过改变芯片结构和加工工艺,使得出射激光在侧向和横向受到一定的限制,从而保持出光模式单一稳定;而采用外腔反馈光谱合束 (Wavelength beam combining, WBC) 技术,则可以改善半导体激光器合束光源的光束质量。

3.4.1 半导体激光器单管的侧向模式限制

改善半导体激光器单管的侧向模式,最简单的方法是采用脊形波导 (Ridge waveguide, RW),在激光器侧向引入选模设计,改善光束质量并提

高亮度。但是脊形波导对侧向模式限制比较弱,在大电流高功率工作时,高阶模容易激射。

在提高侧向光束质量方面,当前的代表性器件是种子振荡功率放大器 (Master oscillator power amplifier, MOPA) 结构的锥形激光器,如图 2 所示。MOPA 结构^[77-80]是指将具有较小功率和极高光束质量的单模种子振荡源 (Master oscillator, MO) 激光注入到半导体放大器 (Power amplifier, PA) 中进行放大,当采用整个芯片作为谐振腔单片集成时就是所说的锥形激光器。其优点是只需一次外延生长,易于制造而且结构紧凑,还可以集成光栅等结构用于进行光谱线宽的调制。

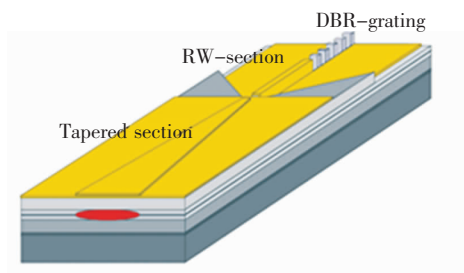


图 2 带有 DBR 光栅的锥形激光器示意图

Fig. 2 Typical tapered laser with DBR gratings

锥形激光器诞生已将近 20 年,其性能提升非常快。德国 FBH 研究所先后报道了多种波长的锥形激光器^[81-84]。其中,808 nm 波长器件的近衍射极限连续输出功率可达 4.4 W,光束质量为 1.9 mm · mrad,在 3.9 W 功率下光束质量为 1.3 mm · mrad,亮度为 460 MW · cm⁻² · sr⁻¹^[85];在脉冲条件下工作输出功率可达 27 W,近衍射极限输出功率可达 9 W^[86]。979 nm 波长的 DBR 锥形激光器连续输出功率达到了 12 W,转换效率约为 44%,在 11.4 W 时光束质量为 1.1 mm · mrad,亮度可达 1 100 MW · cm⁻² · sr⁻¹^[87]。1 060 nm 波长的 DBR 锥形激光器的输出功率达到了 12.2 W,10 W 时光束质量仅为 1.2 mm · mrad,线宽只有 17 pm (FWHM),亮度达到了 800 MW · cm⁻² · sr⁻¹^[88]。

其他用于激光器单管的侧向模式限制的方法还有倾斜光栅分布反馈激光器^[89]以及平板耦合波导半导体激光器^[90-92]等。

3.4.2 半导体激光器单管的横向模式限制

2002 年, Ledentsov 等^[93]提出了一种基于纵向光子带晶体波导的新型激光器结构,它在激光器垂直方向采用周期性生长的半导体层构成有带隙的光子晶体进行光限制。随着这一技术的提出,传统

芯片光束质量差的问题得到了很大的改善。半导体激光器可以从芯片上实现大模式光斑尺寸、低腔面损伤阈值、单横模、低发散角、近圆形光斑工作,

因而更容易获得高光束质量和高亮度激光。近几年来,这种基于光子带晶体波导的新型激光器得到了快速的发展,性能指标如表 7 所示。

表 7 光子带晶体波导激光器的性能指标

Table 7 Parameters of photonic crystal waveguide semiconductor laser

波段/nm	年份	制作者	远场发散角	其他
980	2002	Ledentsov	快轴 6° ^[94]	
	2003	Maximov	快轴 $5.5^\circ \sim 6^\circ$ ^[95]	
	2005	Maximov	快轴 $9.7^\circ \sim 10.7^\circ$ ^[96]	连续 1.8 W, 脉冲 10 W
	2008	Maximov	快轴 4.5° , 慢轴 3.5°	连续 1.3 W
	2008	Novikov	快轴 $<5^\circ$ ^[97]	
	2010	D. Bimberg	快轴 6° , 慢轴 5° ^[98]	连续 2.2 W, 脉冲微分效率 74%, 电光转换效率 60%, 光参量积 $0.47 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 亮度 $8.7 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 为当时 980 nm 半导体激光器单管最高亮度
850	2006	Karachinsky	快轴 9° ^[99]	连续 270 mW
	2006	Kettler	快轴 10° , 慢轴 5° ^[100]	光束质量为 $1.4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 效率 86%
	2008	Posilovic	快轴 11.3° , 慢轴 9.5° ^[101]	脉冲 20 W, 亮度 $3 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 为当时单管半导体激光器的最大值
	2009	Kettler	快轴 7° ^[102]	连续 1.5 W
650	2005	Maximov	快慢轴均为 8° ^[103]	脉冲 20 W, 效率 85%
	2005	Maximov	快轴发散角 $7^\circ \sim 8^\circ$ ^[104]	脉冲 6 W
	2006	Novikov	快轴 8° ^[105]	连续 115 mW, 侧向光束质量为 $1.44 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
	2006	Shchukin	快轴 7° , 慢轴 4° ^[106]	效率 85%, 连续 150 mW

3.4.3 半导体激光器外腔反馈光谱合束技术

由 TBC 原理,通过空间合束增加激光功率,会导致激光系统整体的光束质量降低。偏振合束和波长合束技术只能在维持光束质量不变的情况下,以一定的倍数提高激光功率。TBC 光源的光束质量一般远大于激光单元的光束质量。

ECFWBC 技术结合半导体激光内部振荡与外部光学系统反馈,实现每个激光单元的谐振波长均与外部光栅色散和外腔反馈匹配,使得所有激光单元沿相同方向谐振,以保持近场和远场相重合的方式输出^[107]。合束激光的光束质量与单个激光单元一致,激光功率为所有激光单元总和,其原理如图 3 所示。因此只要激光单元具有高光束质量,半导体激光合束光源也可实现近衍射极限的高功率激光输出。这种 ECFWBC 技术有着衍射效率高、损伤阈值高、耦合单元多、更容易输出高功率等优点。

美国麻省理工 (MIT)、美国 Teradiode、美国 Coherent、美国 Aculight、法国 Thales 和丹麦科技大学 (DTU) 在 ECFWBC 技术的研究上取得了重

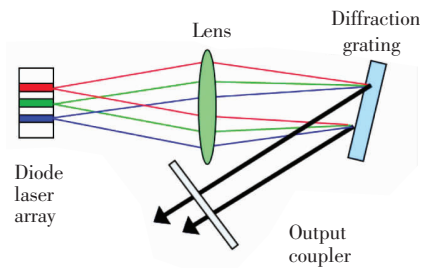


图 3 外腔反馈光谱合束技术原理图

Fig. 3 Schematic diagram of external cavity feedback spectrum beam combining technology

表 8 基于 ECFWBC 技术的半导体激光光源

Table 8 Semiconductor laser sources based on ECFWBC technology

单位	连续功率/ W	光束质量/ (mm · mrad)	波长/ nm
Teradiode	2 000	4	976
	500	3.75	976
	370	3.75	976
	2 030	3.75	976
Coherent	360	0.6	976
	146	10	976
MIT	89.5	2.41	915
Aculight	27	1.5	800

要进展^[108-115],如表 8 所示。美国 Teradiode 公司已达到商品化水平,2012 年,其 2 030 W 半导体激光合束光源产品已达到相同功率条件下商用全固态激光水平。

3.4.4 高功率半导体激光合束光源的光束质量

图 4 为近年来高功率半导体激光器合束光源的光束质量发展进程。从 1998 年至 2007 年,相同功率激光的光束质量提高近 10 倍。从 2007 年到 2012 年,基于传统激光合束的光源光束质量在千瓦至万瓦量级提高 3 倍左右,接近并部分达到灯泵 Nd:YAG 激光器水平。光谱合束技术大大提高了合束光源的光束质量,在百瓦至千瓦量级提高 10 倍左右,其中 940 W 光束质量为 $3.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,2 030 W 光束质量为 $3.75 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,达到 CO_2 激光器的光束质量水平;360 W 光束质量为 $0.6 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (2 倍衍射极限),超过 CO_2 激光器的光束质量,接近全固态激光器的光束质量水平。现在半导体激光器合束光源可以胜任包括金属切割、深熔焊等对功率和光束质量要求严格的应用领域,其中基于传统合束的半导体激光合束光源可以用于激光熔覆、深熔焊等,基于光谱合束的半导体激光合束光源达到金属切割的加工要求。

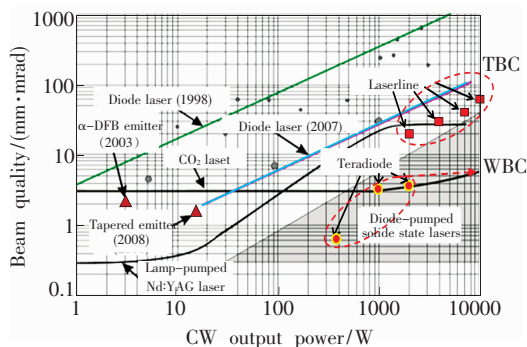


图 4 高功率半导体激光合束光源的光束质量研究进展

Fig. 4 Research status of the beam quality of high power semiconductor laser beam combining source

3.5 半导体激光器的窄光谱线宽

窄线宽半导体激光器在激光通信、光互联、非线性频率转换等领域有着重要的应用。一般通过在半导体激光器上制备布拉格光栅进行选频,光栅可以放在半导体激光器一端的腔面处作为波长反射器(分布布拉格反射, DBR)选择激射波长,或者分布在沿整个半导体激光器谐振腔(分布反馈,DFB),也可以采用外部光栅(例如体布拉格光栅——VBG,或体全息光栅——VHG)。

3.5.1 分布布拉格反射激光器

DBR 激光器采用布拉格光栅代替激光器的一个解理腔面,不需要二次外延技术。2010 年,德国 FBH 研究所采用表面布拉格光栅获得了高功率 DBR 激光器,90 μm 条宽单管输出功率达到 14 W,最大转换效率为 50%,波长偏移为 0.074 nm/K ^[116]。同年,该单位又报道了一种窄线宽脊形波导 DBR 激光器,采用六阶表面光栅,激射波长为 974 nm,单模输出功率超过 1 W,3 dB 光谱线宽仅为 1.4 MHz^[117]。2011 年,该单位报道了窄线宽 1 064 nm 波长 DBR 激光器,半高全宽 (FWHM)为 180 kHz,在 180 mW 功率下本征线宽仅为 2 kHz,波长偏移为 0.083 nm/K ^[118]。

3.5.2 分布反馈激光器

DFB 激光器最早由贝尔实验室的 H. Kogelink 等于 1972 年提出^[119]并在 1975 年实现室温连续工作^[120],之后在光通信领域得到了重视并迅速发展,其研究进展如表 9 所示。DFB 激光器的特点是光栅分布在整個谐振腔中,光波在反馈的同时获得增益和激射,依靠光栅的选频原理来实现波长选择。它的制作方法有两种:一种是在生长完一部分 p 型波导层时中断,外延一层低折射率光栅层,然后将晶片移出生长反应室,采用光刻和刻蚀形成统一的光栅,然后重新外延生长反应室,在光栅上继续生长,最终形成 DFB 激光器,这种

表 9 DFB 半导体激光器研究进展

Table 9 Research status of DFB semiconductor laser

单位	年份	波长/nm	线宽	其他指标
美国 Alfalight	2009	808	0.3 nm ^[121]	4 W,温漂 0.062 nm/K
德国 FBH 研究所	2010	976	0.4 nm ^[122]	转换效率 58%
德国 FBH 研究所	2010	1 064	最小本征线宽 22 kHz,最小 FWHM 线宽 234 kHz ^[123]	
法国 Thales 公司	2010	852	215 kHz ^[124]	寿命大于 500 000 h(或 50 年)
芬兰坦佩雷理工大学	2011	1 300,1 550	直接调制带宽大于 20 GHz ^[125]	

方法需要二次外延生长,对工艺要求比较高;另一种方法是外延生长全部结束后,通过刻蚀形成表面光栅,不需要二次外延技术。

3.5.3 外腔光栅激光器

外腔光栅激光器是通过外部光栅元件的反馈

和激光器腔体的谐振实现稳定波长的目的。通常外腔激光器由于采用了比较长的腔长和针对特定纵模有选择性反射的外腔光栅,可以窄化激光射线宽并且工作在单频率状态。其研究进展如表10所示。

表10 外腔光栅半导体激光器研究进展

Table 10 Research status for semiconductor laser based on external cavity gratings

单位	年份	波长/nm	激光类型	线宽及其他指标
美国佛罗里达大学	2008	780	bar 条	线宽 10 GHz, 30 W ^[126]
德国 FBH 研究所	2009	808	单管	线宽 0.2 nm, 1 W ^[127]
德国 Dilas	2009	808	bar 条	线宽 0.3 nm, 69 W ^[128]

3.6 VCSEL 半导体激光器

由于 VCSEL 有着低阈值电流、稳定单波长工作、可高频调制、容易二维集成、没有腔面阈值损伤等优点,因而在半导体激光器中占有很重要的地位。VCSEL 器件基于 GaAs 衬底可以做到高质量的材料生长,从而获得很高的材料增益,还可以在单片上通过外延生长晶格匹配、高折射率差、较低电阻的 AlAs 和 GaAs 材料来构成 DBR。从器件性能和实用化程度来看,850 nm 波段和 980 nm 波段的器件始终代表着 VCSEL 半导体激光器研究的最高水平。

3.6.1 850 nm 波段 VCSEL

850 nm 是石英系光纤的第一个低损窗口,高速调制的 850 nm VCSEL 可以用于中短距离的局域网、自由空间光通信和光互连。随着信息时代的巨大应用需求,VCSEL 的低功耗和高速调制等性能在 20 世纪 90 年代末和 21 世纪初得到迅速提高。

1998 年,ULM 大学制作了电光转换效率达到 57% 的 VCSEL 器件,该指标一直保持了近 10 年的最高转换效率记录^[129]。2004 年,ULM 大学采用表面浮雕结构的器件单模达到了 6 mW^[130],单模抑制比达到了 40 dB^[131];2009 年,数据传输速率达到了 32 Gbit/s^[132]。在这些进展的推进下,850 nm 的 VCSEL 器件最早进行商业化生产。

随后,850 nm 的 VCSEL 器件在短距离光纤通信方面开始取代边发射激光器。2002 年 1 月,Ulm Photonics 公司采用 flip-chip 方法制备的 VCSEL 列阵和分立器件速率已达 10 Gbit/s,并已大批量生产;同期,日本 FujiXerox 开始批量生产 VCSEL。

2003 年,Petar Pepeljugoski 等进行了多模光纤 15.6 Gb/s、1 km 和 20 Gb/s、200 m 的传输试验,结果显示其指标符合粗波分复用(CWDM) 2 × 20 Gbit/s 以太网标准^[133]。2010 年,瑞士的 Westbergh 等^[134]进行了直接调制的多模高速器件的无错码大容量通信,拥有高达 40 Gbit/s 的传输速率。目前,850 nm 的 VCSEL 可以实现最长 1 000 m、25 GHz 的高速通讯^[135],通信能耗低至 69 fJ/bit。在市场上,美国的 Coherent、Honeywell、EMCORE 和 AXT 等公司以及韩国和日本的一些光通信设备制造商都有商品化的 VCSEL 器件和芯片。

3.6.2 980 nm 波段 VCSEL

由于受到光纤激光和固体激光器泵浦、激光照明、倍频等应用方向的牵引^[136],980 nm 波段的 VCSEL 在过去的 10 年发展非常迅速^[137]。最近几年的研制主要集中于提高面发射半导体激光器的功率和效率^[23]、实现高功率密度和高光束质量方面。

2001 年,德国 Ulm 大学报道了单管连续输出 890 mW 的器件,并且使用 19 个单管并联集成了连续输出 1.4 W 的二维面阵^[138]。2004 年,Ulm Photonics 公司实现了连续输出 6 W 的集成单元面阵,共有 224 个 VCSEL,斜率效率为 0.6 W/A,转换效率为 22%。

美国 Princeton Optronics 公司是专门从事高功率近红外 VCSEL 的企业。该公司于 2005 年实现了 3 W 连续输出的 980 nm 器件^[139]。2007 年,该公司推出了面积为 0.22 cm²、连续输出功率超过 230 W 的面阵,转换效率为 50%,温度漂移系数小于 0.07 nm/°C。2010 年,该公司推出了用于近红外主动激光照明的百瓦级高功率列阵^[140],

实现了 500 m 的无散斑成像。2012 年,该公司又推出了用于固态激光泵浦的 980 nm 高功率 VC-SEL 面阵和面阵组合模块产品,面阵组合模块连续输出超过 1.4 kW。

4 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研究进展

经过研究人员的辛勤努力,长春光学精密机械与物理研究所(简称长春光机所)在过去几十年中在大功率半导体激光器方面取得了令人瞩目的成就。

4.1 新材料量子阱激光器

1996 年,长春光机所在国际上率先研制出 808 nm 连续输出功率 3.6 W、肖特基势垒电流限制的 InGaAsP/InGaP/GaAs 无铝量子阱新材料高功率激光器,工作寿命超过 10 000 h。808 nm 激光器线阵连续输出功率最高达 150 W,准连续输出超过 150 W,器件寿命超过 10 000 h。

2000 年,长春光机所在国际上首次研制出 InGaAsP/InGaP/GaAs 无铝量子阱 808 nm 激光阵列及激光光纤耦合模块。与 GaAlAs/GaAs 半导体激光器相比,该激光器具有寿命长、可靠性高等优点。2004 年,该激光器基本满足了大功率器件的要求,达到连续光功率输出 60 W/bar,脉冲输出 100 W/bar,发射波长偏差控制在 3 nm。

4.2 大功率激光器合束光源

单纯从外部光学系统考虑,激光合束分为空间合束、偏振合束和波长合束。结合几何光学整形方式,我们研制出基于单管、线阵、选阵 3 种传统激光器件的合束光源。

4.2.1 基于 TBC 技术的单管合束激光光源

激光单管是半导体激光器的最小组成单元,光束质量好、亮度高。单管合束光源无需光束整形,通过空间阶梯排列、快慢轴准直后,由各自的空间合束镜转折光路直接进行合束,然后通过扩束聚焦耦合进光纤,具有易散热、体积小、重量轻、可靠性高和成本低等优点,是光纤泵浦、激光显示和激光医疗等领域的有效光源。由于每个激光单管输出功率一般不超过 10 W,且需配备独立的快慢轴准直镜、空间合束镜,因此该光源输出功率不宜过高,一般不超过 300 W。若功率进一步增加,

则涉及的元件非常多,装调变得非常复杂,失去成本和体积等优势。

基于单管合束技术,我们采用多只高亮度激光单管,结合其热分散布局,研制出风冷结构的多种合束光源:105 $\mu\text{m}/0.2NA$ 光纤连续输出 30 ~ 70 W;200 $\mu\text{m}/0.2NA$ 光纤连续输出功率 80 ~ 120 W。

4.2.2 基于 TBC 技术的线阵合束激光光源

激光线阵合束是采用若干传导冷却热沉封装的激光线阵,在物理位置上分离,通过空间合束镜实现光叠加,然后再进行偏振波长合束,可实现数百瓦至 3 kW 范围的功率输出。该结构可以通过整体的工业用水进行传导冷却,具有可靠性高、便于维护等优点。由于传导热沉的散热限制,单个线阵输出功率不宜过高,一般为 40 ~ 80 W。常规的厘米线阵由于光束质量差,需要额外的光束整形结构,光学系统复杂,因此线阵合束常采用条宽变小的迷你线阵或低填充因子的厘米线阵。

基于线阵合束光源,我们研制出 200 $\mu\text{m}/0.2NA$ 光纤连续 400 W 功率输出的激光器,可用于薄不锈钢板的切割;研制出 200 $\mu\text{m}/0.2NA$ 光纤连续 3 000 W 功率输出的激光器,用于金属板焊接。设备照片如图 5 所示。

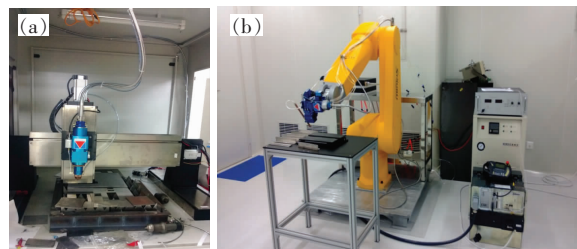


图 5 激光线阵光源激光设备。(a)激光切割;(b)激光焊接。

Fig. 5 Laser bar beam combining source devices for laser cutting (a) and laser welding (b)

4.2.3 基于 TBC 技术的选阵合束激光光源

激光选阵是采用微通道热沉封装去离子水冷却的半导体激光线阵在快轴方向物理位置堆叠而成。由于其优异的散热特性,单层选阵可工作在 100 ~ 300 W,具有易实现高功率输出和结构紧凑等优点,是目前半导体激光器实现数千瓦甚至上万瓦激光功率输出最主要的合束形式。激光选阵通常采用厘米线阵,因此需要进行光束整形后再激光合束。我们采用多组激光选阵,研制出 6 kW

球栅表面强化光源及万瓦级激光熔覆光源,如图6所示。

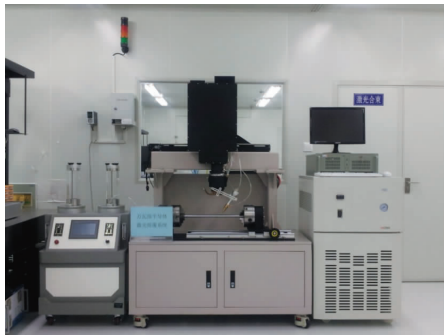


图6 万瓦级激光熔覆设备

Fig. 6 Laser cladding device at 10 kW level

常规 TBC 技术受限于合束机理,合束后的激光光束质量均差于激光单元光束质量。为了进一步提高光束质量,从半导体激光器和外部光学系统结合考虑,WBC 被证明是解决该难题的有效途径之一。它采用前腔面镀增透膜的半导体激光芯片与外部光学系统整体构成谐振腔,通过外部光栅调节,激光芯片上所有激光单元沿相同方向谐振,并在近场和远场完全重合,实现整体光束质量仅为单元光束质量的激光输出,相同高功率下的光束质量较常规方法提高数十倍。

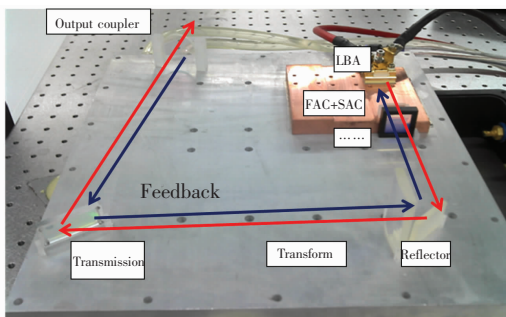


图7 光谱合束的实验装置

Fig. 7 Experimental setup of spectral beam combining

我们利用基于透射光栅的外腔 WBC 技术,先后研制出 808 nm、970 nm 的几十瓦至数百瓦的光谱合束光源,光束质量仅为 $3 \sim 5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,接近激光单元的光束质量。图7为光谱合束的实验装置。

4.3 VCSEL 单管及面阵

长春光机所打破传统观念束缚,提出了多增益区、调制掺杂 DBR、大出光孔径等新思想,理论上预期了瓦级以上大功率 VCSEL 的可能性,并在

国内最早开展了大功率 980 nm VCSEL 的研究工作,取得了一系列突破性的成果。2003 年,我们采用 3 个应变补偿的 InGaAs/GaAsP 量子阱为有源区得到高性能的 987 nm VCSEL^[141]:口径为 $430 \mu\text{m}$ 的器件在室温下的连续输出超过 1.5 W,激射峰半高宽仅为 0.8 nm,瓦级输出器件远场发散角低于 10° ,特征温度超过 220 K。随后通过优化器件结构和工艺,2004 年在国际上将 980 nm VCSEL 的输出功率刷新到 1.95 W,脉冲输出为 10.5 W,是当时国内外报道中的最高水平^[142]。2009 年,我们研制出连续输出超过 2.5 W 的单管(效率 20%)和脉冲输出达到千瓦的高密度集成阵列^[143]。

2010 年,我们在国际上首次提出并实现了大功率 VCSEL 集成面阵与其微透镜面阵的单片集成, 6×6 VCSEL 集成微透镜阵列实现了 1.0 W 基模激光输出,发散角由 14.8° 降到 6.6° ,光束质量获得成倍改善,为发展高光束质量大规模集成阵列激光开辟了新方向。图8为集成微透镜阵列照片。

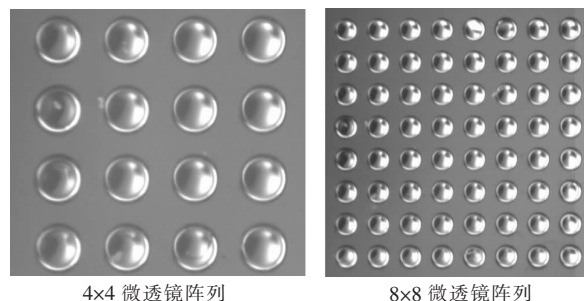


图8 集成微透镜阵列

Fig. 8 Micro lens array

2010 年,我们研制出 5×5 、 10×10 、 20×20 的脉冲输出 138,319,510 W ($60 \text{ ns} \times 100 \text{ Hz}$) 的 VCSEL 面阵。2011 年,我们发明了两种偏振控制的 VCSEL 激光结构和激光器制备方法,研制出 30×30 最高集成度 ($64 \text{ 个}/\text{mm}^2$) 的大功率 VCSEL 面阵(图9),在 $3.75 \text{ mm} \times 3.75 \text{ mm}$ 的面积共集成 900 个器件,单管器件连续输出功率为 2.9 W,为发展兆瓦乃至更大功率激光光源开辟了新途径。

2011 年,我们研制的 VCSEL 在 110 A、60 ns 电流驱动下,峰值功率高达 92 W,为当年国际报道的最好水平,创造了当年单管激光器的世界纪录。

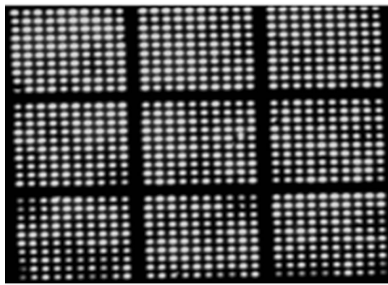


图 9 30 × 30 VCSEL 面阵
Fig.9 30 × 30 VCSEL array

2013 年,我们提出并设计了 AlGaAs/In-GaAlAs 宽势垒结构,实现了 795 nm 和 894 nm 高温工作(75 °C) VCSEL^[144],适用于低功耗芯片尺寸整合微型原子钟、原子陀螺仪等传感器,同时实现授时、定位、导航等功能。芯片体积仅为 0.05 mm³,器件高稳定单模态激光输出高于 0.2 mW,工作电流低于 1.5 mA,功耗低于 3 mW。

2014 年,我们针对大功率 VCSEL 面阵低电压(4 V,大电流 50 ~ 500 A)驱动问题,发明了一种面阵混合封装结构及其制备方法,如图 10 所示。利用 4 个高功率 VCSEL 单管串接,形成 980 nm 波段高功率准列阵模块,尺寸为 2.2 mm × 2.2 mm,输出功率高达 210 W^[145]。该突破使得微小

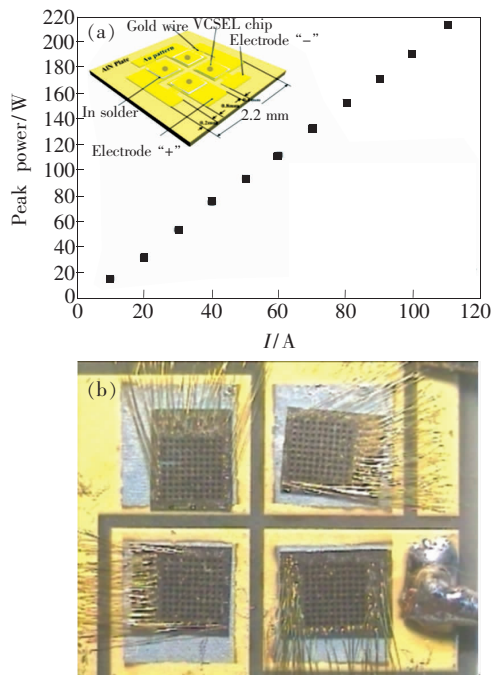


图 10 新型面阵混合封装结构(a)及实际器件图(b)
Fig.10 Novel array hybrid packaging structure (a) and the actual devices (b)

型高功率 VCSEL 模块有望在激光引信、激光测距及激光面阵雷达系统中实现实用化。

4.4 新型激光器芯片

4.4.1 高亮度布拉格反射波导光子晶体激光器

我们开展了 808 nm 波长布拉格反射波导光子晶体激光器(图 11)的研究。利用光子晶体调控光学模式,实现了近圆形光束出光,成功地将传统半导体激光快轴(垂直)发散角从 40°压缩到 10°以下(半高全宽),实现了稳定的圆形光斑激光输出,其中优化的三量子阱激光器含 95% 功率的垂直发散角可低至 9.8°,为当前报道的最低值,

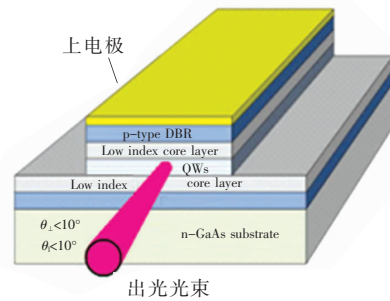


图 11 布拉格反射波导激光器结构示意图
Fig.11 Schematic diagram of Bragg reflective waveguide laser

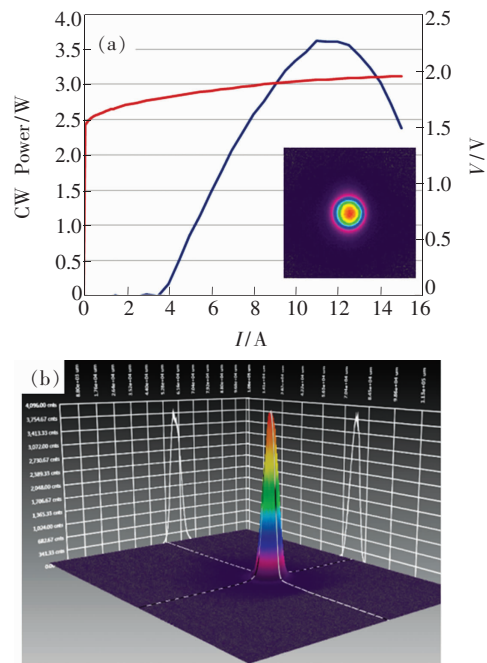


图 12 (a) 808 nm 布拉格反射波导激光器的 L-I-V 特性,内插图为测得的远场光斑;(b) 测量的激光器三维远场光斑图。
Fig.12 (a) L-I-V characteristics of 808 nm Bragg reflective waveguide laser, inset is the image of the far field spot. (b) 3D far field spot.

如图12所示。由于这种激光器垂直方向的模式尺寸增大,因此可有效抑制灾变光损伤。在腔面未钝化条件下,宽条激光器单管连续和脉冲输出功率分别可超过3.5 W和11 W,bar条脉冲输出功率>70 W,10 μm 条宽脊形器件压测条件下的单模连续功率也超过了1.1 W。

4.4.2 布拉格反射波导双光束激光器

双光束激光器在高速激光扫描、高精度激光检测、原位深度监控及离轴外腔激光等领域具有重要的应用。传统的方法是将一束激光分成两束或将两束激光合在一起,但这种方式需要精确的光学对准,结构不紧凑,难以批量生产。

在半导体激光器的垂直方向引入布拉格反射

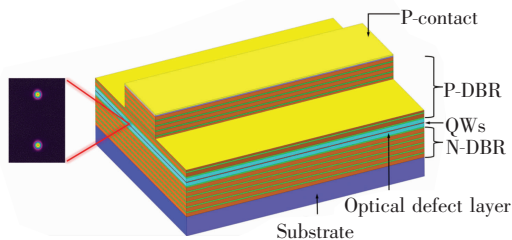


图13 布拉格反射波导双光束激光器结构示意图

Fig. 13 Schematic diagram of two beam Bragg reflective waveguide laser

波导结构,利用布拉格反射波导调控激光器工作在完全光子带隙导引模式,可从芯片层次实现稳定的对称双光束激光输出,该方法结构简单、价格低廉,易于批量生产。我们在国际上首次研制出布拉格反射波导双光束激光器(图13),激光器输出两束对称的、近圆形的激光,单光束激光垂直发散角和水平发散角分别低至 7.2° 和 5.4° 。另外,这种激光器还具有明显的光谱调制效应。

5 大功率半导体激光器的发展趋势

为满足各行各业对半导体激光器的需求,大功率半导体激光器必须具有更高的功率、转换效率、可靠性、光束质量和更好的光谱特性,需要从以下几个方面入手:

(1) 发展新结构和工艺,提高半导体激光器单管的各项指标;

(2) 发展新材料、新结构的半导体激光器,实现从紫外到远红外各波段的激光输出;

(3) 发展新的激光合束技术,提高半导体激光器的输出功率;

(4) 拓展半导体激光器的应用领域,如3D打印、超短脉冲加工、纳米光学等新兴领域,促进半导体激光器应用技术的发展。

参 考 文 献:

- [1] Basov N G, Krokhin O N, Popo Y M. Production of negative-temperature states in p-n junctions of degenerate semiconductors [J]. *Sov. Phys. JETP*, 1961, 13:1320-1321.
- [2] Hall R N, Fenner G E, Kingsley J D, et al. Coherent light emission from GaAs junctions [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1962, 9(9):366-368.
- [3] Wang Q M. Development of semiconductor laser [J]. *Physics (物理)*, 1996, 25(2):67-75 (in Chinese).
- [4] Alferov Z I, Kazarinov R F. Semiconductor laser with electric pumping: Soviet Union Patent, N181737 [P]. 1963.
- [5] Kroemer H. A proposed class of heterojunction injection lasers [J]. *Proc. IEEE*, 1963, 51:1782-1783.
- [6] Panish M B, Hayashi I, Sumski S. Double-heterostructure injection with room-temperature thresholds as low as $2\ 300\ \text{A}/\text{cm}^2$ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, 16:326-328.
- [7] Alferov Z I. Semiconductor laser with extremely low divergence of radiation [J]. *Sov. Phys. Semicond.*, 1974, 8: 541-545,
- [8] Soda H, Iga K, Kitahara C, et al. GaInAsP/InP surface emitting injection lasers [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1979, 18 (12):2329-2330.
- [9] Iga K. Surface-emitting laser—Its birth and generation of new optoelectronics field [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2000, 6(6):1201-1215.
- [10] Iga K, Kinoshita S, Koyama F. Microcavity GaAlAs/GaAs surface-emitting laser with $I_{th} = 6\ \text{mA}$ [J]. *Electron. Lett.*, 1987, 23(3):134-136.
- [11] Jewell J, McCall S, Scherer A, et al. Transverse modes, waveguide dispersion and 30-ps recovery in submicron GaAs/

- AlAs microresonators [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, 55(1):22-24.
- [12] Koyama F, Kinoshita S, Iga K. Room-temperature continuous wave lasing characteristics of GaAs vertical cavity surface-emitting laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, 55(3):221-222.
- [13] Chen J, Wang J, Soderstrom D, *et al.* High volume 850 nm oxide VCSEL development for high bandwidth optical data link applications [J]. *SPIE*, 2009, 7229:722904-1-11.
- [14] Kern A, Wahl D, Haidar M T, *et al.* Monolithic integration of VCSELs and PIN photodiodes for bidirectional data communication over standard multimode fibers [J]. *SPIE*, 2010, 7720:77200B-1-9.
- [15] Gatto A, Boletti A, Boffi P, *et al.* Adjustable-chirp VCSEL-to-VCSEL injection locking for 10-Gb/s transmission at 1.55 μm [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(24):21748-21753.
- [16] Geib K M, Serkland D K, Keeler G A, *et al.* Photonics technology development for optical fuzing [J]. *SPIE*, 2005, 5871:58710J-1-12.
- [17] Shechegrov A V, Watson J P, Lee D, *et al.* Development of compact blue-green lasers for projection display based on Novalux extended-cavity surface-emitting laser technology [J]. *SPIE*, 2005, 5737:113-119.
- [18] Hoghooghi N, Ozdur I, Bhooplapur S, *et al.* Direct demodulation and channel filtering of phase-modulated signals using an injection-locked VCSEL [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, 22(20):1509-1511.
- [19] Al-Samaneh A, Renz S, Strodl A, *et al.* Polarization-stable single-mode VCSELs for Cs-based MEMS atomic clock applications [J]. *SPIE*, 2010, 7720:772006-1-14.
- [20] Stickley C M, Filipkowski M E, Parra E, *et al.* Super high efficiency diode sources (SHEDS) and architecture for diode high energy laser systems (ADHELs): An overview [J]. *Adv. Solid-State Photon.*, 2006:TuA1.
- [21] Stickley C M, Filipkowski M E, Parra E, *et al.* Overview of progress in super high efficiency diodes for pumping high energy lasers [J]. *SPIE*, 2006, 6104:610405-1-5.
- [22] Bachmann F. Goals and status of the German national research initiative BRIOLAS (brilliant diode lasers) [J]. *SPIE*, 2007, 6456:PSI645608-1-11.
- [23] Diehl R. *High-power DiodeLasers: Fundamentals, Technology, Applications* [M]. Berlin: Springer, 2000:preface.
- [24] Bachmann F. Industrial applications of high power diode lasers in materials processing [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2003, 208-209:125-136.
- [25] Bachmann F, Loosen P, Poprawe R. *High Power Diode Lasers Technology and Applications* [M]. New York: Springer, 2007:535-536.
- [26] Price K, Karlsen S, Leisher P, *et al.* High brightness fiber coupled pump laser development [J]. *SPIE*, 2010, 7583:758308-1-7.
- [27] Bao L, Wang J, De Vito M, *et al.* Performance and reliability of high power 7xx nm laser diodes [J]. *SPIE*, 2011, 7953:79531B-1-12.
- [28] Bezotosnyi V V, Bondarev V Y, Krokhin O N, *et al.* Laser diodes emitting up to 25 W at 808 nm [J]. *Quant. Electron.*, 2009, 39(3):241-243
- [29] Leisher P, Price K, Bashar S, *et al.* Mode control for high performance laser diode sources [J]. *SPIE*, 2008, 6952:69520C-1-11.
- [30] Crump P, Blume G, Paschke K, *et al.* 20 W continuous wave reliable operation of 980 nm broad-area single emitter diode lasers with an aperture of 96 μm [J]. *SPIE*, 2009, 7198:719814-1-7.
- [31] Tarasov I S, Pikhtin N A, Slipchenko S O, *et al.* High power CW (16 W) and pulse (145 W) laser diodes based on quantum well heterostructures [J]. *Spectrochim. Acta Part A*, 2007, 66(4-5):819-823.
- [32] Heinemann S, Lewis B, Regaard B, *et al.* Single emitter based diode lasers with high brightness, high power and narrow linewidth [J]. *SPIE*, 2011, 7918:79180M-1-6.
- [33] Duesterberg R, Xu L, Skidmore J A, *et al.* 100 W high-brightness multi-emitter laser pump [J]. *SPIE*, 2011, 7918:79180V-1-7.
- [34] Gapontsev V, Moshegov N, Trubenko P, *et al.* High-brightness 9xx-nm pumps with wavelength stabilization [J]. *SPIE*, 2010, 7583:75830A-1-6.
- [35] Pierer J, Lützelshwab M, Grossmann S, *et al.* Automated assembly processes of high power single emitter diode lasers for

- 100 W in 105 $\mu\text{m}/\text{NA}$ 0.15 fiber module [J]. *SPIE*, 2011, 7918:79180I-1-9.
- [36] Schröder D, Werner E, Franke A, *et al.* Roadmap to low cost, high brightness diode laser power out of the fiber [J]. *SPIE*, 2010, 7583:758309-1-5.
- [37] Werner M, Wessling C, Hengesbach S, *et al.* 100 W/100 μm passively cooled, fiber coupled diode laser at 976 nm based on multiple 100 μm single emitters [J]. *SPIE*, 2009, 7198:71980P-1-7.
- [38] Treusch H G, Harrison J, Morris B, *et al.* Compact high-brightness and high-power diode laser source for materials processing [J]. *SPIE*, 2000, 3945:23-31.
- [39] Miyajima H, Kan H, Kanzaki T, *et al.* Jet-type, water-cooled heat sink that yields 255-W continuous-wave laser output at 808 nm from a 1-cm laser diode bar [J]. *Opt. Lett.*, 2004, 29(3):304-306.
- [40] Braunstein J, Mikulla M, Kiefer R, *et al.* 267 W CW AlGaAs/GaInAs diode laser bars [J]. *SPIE*, 2000, 3945:17-22.
- [41] Ichtenstein N, Manz Y, Mauron P, *et al.* 325 watt from 1-cm wide 9xx laser bars for DPSSL- and FL-applications [J]. *SPIE*, 2005, 5711:1-11.
- [42] Crump P, Wang J, Crum T, *et al.* > 360 W and > 70% efficient GaAs-based diode lasers [J]. *SPIE*, 2005, 5711:21-29.
- [43] Lorenzen D, Schröder M, Meusel J, *et al.* Comparative performance studies of indium and gold-tin packaged diode laser bars [J]. *SPIE*, 2006, 6104:610404-1-12.
- [44] Li H X, Chyr I, Jin X, *et al.* >700 W continuous-wave output power from single laser diode bar [J]. *Electron. Lett.*, 2007, 43(1):27-28.
- [45] Li H X, Chyr I, Brown D, *et al.* Ongoing development of high-efficiency and high-reliability laser diodes at spectra-physics [J]. *SPIE*, 2007, 6456:64560C-1-9.
- [46] Schröder D, Meusel J, Hennig P, *et al.* Increased power of broad area lasers (808 nm/980 nm) and applicability to 10 mm-bars with up to 1 000 watt QCW [J]. *SPIE*, 2007, 6456:64560N-1-10.
- [47] Knapczyk M T, Jacob J H, Eppich H, *et al.* 70% efficient, near 1 kW, single 1-cm laser-diode bar at 20 °C [J]. *SPIE*, 2011, 7918:79180F-1-6.
- [48] Neukum J. Laser diodes pump up the power [J]. *Nat. Photon.*, 2007, 1:385-386.
- [49] Timmermann A, Bartoschewski D, Schlüter S, *et al.* Intensity increasing up to 4 MW/cm² with BALB's *via* wavelengths coupling [J]. *SPIE*, 2009, 7198:71980X-1-10.
- [50] Voss M, Meinschien J, Bruns P, *et al.* High brightness fibre coupled diode lasers of up to 4-kW output power for material processing [J]. *SPIE*, 2012, 8241:824103-1-7.
- [51] Wolf P, Köhler B, Rotter K, *et al.* High-power, high-brightness and low-weight fiber coupled diode laser device [J]. *SPIE*, 2011, 7918:79180O-1-9.
- [52] Köhler B, Segref A, Wolf P, *et al.* Multi-kW high-brightness fiber coupled diode laser [J]. *SPIE*, 2013, 8605:86050B-1-7.
- [53] Strohmaier S, Tillkorn C, Olschowsky P, *et al.* High-power, high-brightness direct-diode lasers [J]. *OPN Opt. Photon. News*, 2010, 21(10):25-29.
- [54] Bonati G F, Hennig P, Schmidt K, *et al.* Passively cooled diode laser for high power applications [J]. *SPIE*, 2004, 5336:71-76.
- [55] Leers M, Scholz C, Boucke K, *et al.* Expansion-matched passively-cooled heatsinks with low thermal resistance for high-power diode laser bars [J]. *SPIE*, 2006, 6104:610403-1-10.
- [56] Vinokurov D A, Zorina S A, Kapitonov V A, *et al.* High-power laser diodes based on asymmetric separate-confinement heterostructures [J]. *Semiconductors*, 2005, 39(3):370-373.
- [57] Kanskar M, Earles T, Goodnough T, *et al.* High-power conversion efficiency Al-free diode lasers for pumping high-power solid-state laser systems [J]. *SPIE*, 2005, 5738:47-56.
- [58] Peters M, Rossin V, Everett M, *et al.* High power, high efficiency laser diodes at JDSU [J]. *SPIE*, 2007, 6456:64560G-1-11.
- [59] 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 Photon. Technol. Lett.*, 2008, 20(16):1378-1380.
- [60] Hodges A, Wang J, De Franza M, *et al.* A CTE matched, hard solder, passively cooled laser diode package combined with nXLTTM facet passivation enables high power, high reliability operation [J]. *SPIE*, 2007, 6552:65521E-1-9.

- [61] Rossin V, Peters M, Zucker E, *et al.* Highly reliable high-power broad area laser diodes [J]. *SPIE*, 2006, 6104: 610407-1-8.
- [62] Bao L, Wang J, De Vito M, *et al.* Reliability of high performance 9xx-nm single emitter diode lasers [J]. *SPIE*, 2010, 7583:758302-1-11.
- [63] Gapontsev V, Berishev I, Chuyanov V, *et al.* 8xx – 10xx nm highly efficient single emitter pumps [J]. *SPIE*, 2008, 6876:687601-1-7.
- [64] Levy M, Rappaport N, Klumel G, *et al.* High-power single emitters for fiber laser pumping across 8xx nm - 9xx nm wavelength bands [J]. *SPIE*, 2012, 8241:82410A-1-11.
- [65] Pawlik S, Guarino A, Matuschek N, *et al.* Improved brightness on broad-area single emitter (BASE) modules [J]. *SPIE*, 2009, 7198:719817-1-9.
- [66] Gao W, Xu Z, Cheng L, *et al.* High power high reliable single emitter laser diodes at 808 nm [J]. *SPIE*, 2007, 6456: 64560B-1-8.
- [67] Zorn M, Hülsewede R, Schulze H, *et al.* Jenoptik diode lasers and bars optimized for high-power applications in the NIR range [J]. *SPIE*, 2010, 7583:75830U-1-10.
- [68] Crump P, Wang J, Crum T, *et al.* Reliable 800-nm 125 W bars and 83.5% efficient 975-nm single emitters [C]// Proceedings of The 18th Solid State and Diode Laser Technology Review, Los Angeles: IEEE, 2005:1-5.
- [69] Krejci M, Gilbert Y, Müller J, *et al.* Power scaling of bars toward 85 mW per 1 μm stripe width reliable output power [J]. *SPIE*, 2009, 7198:719804-1-10,
- [70] Feeler R, Junghans J, Remley J, *et al.* Reliability of high-power QCW arrays [J]. *SPIE*, 2010, 7583:758304-1-9.
- [71] Fan L, Cao C, Thaler G, *et al.* Reliable high-power long-pulse 8xx-nm diode laser bars and arrays operating at high temperature [J]. *SPIE*, 2011, 7918:791805-1-11.
- [72] Rossin V, Peters M, Zucker E, *et al.* Highly reliable high-power broad area laser diodes [J]. *SPIE*, 2006, 6104: 610407-1-10.
- [73] Gao W, Xu Z T, Cheng L S, *et al.* High power high reliable single emitter laser diodes at 808 nm [J]. *SPIE*, 2007, 6456:64560B-1-5.
- [74] Xu Z T, Gao W, Cheng L S, *et al.* Highly reliable, high brightness, 915 nm laser diodes for fiber laser applications [J]. *SPIE*, 2008, 6909:69090Q-1-10.
- [75] Lorenzen D, Meusel J, Schroder D, *et al.* Passively cooled diode lasers in the CW power range of 120 to 200 W [J]. *SPIE*, 2008, 6876:68760Q-1-12.
- [76] Schröder D, Schröder M, Werner E, *et al.* Improved laser diode for high power and high temperature applications [J]. *SPIE*, 2009, 7198:719809-1-8.
- [77] Schwertfeger S, Wiedmann J, Sumpf B, *et al.* 7.4 W continuous-wave output power of master oscillator power amplifier system at 1 083 nm [J]. *Electron. Lett.*, 2006, 42(6):346-347.
- [78] Wenzel H, Paschke K, Brox O, *et al.* 10 W continuous-wave monolithically integrated master-oscillator power-amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 2007, 43(3):160-162.
- [79] Lammert R M, Osowski M L, Elarde V C, *et al.* High-power single-mode laser diodes with tapered amplifiers [C]//Proc. of IEEE LEOS, 2008:850-851.
- [80] Spiessberger S, Schiemangk M, Sahm A, *et al.* Micro-integrated 1 watt semiconductor laser system with a linewidth of 3.6 kHz [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(8):7077-7083.
- [81] Feise D, Blume G, Dittrich H, *et al.* High-brightness 635 nm tapered diode lasers with optimized index guiding [J]. *SPIE*, 2010, 7583:75830V-1-12.
- [82] Sumpf B, Adamiec P, Zorn M, *et al.* 650 nm tapered lasers with 1 W maximum output power and nearly diffraction limited beam quality at 500 mW [J]. *SPIE*, 2008, 6876:68760M-1-8.
- [83] Sumpf B, Adamiec P, Zorn M, *et al.* Nearly diffraction-limited tapered lasers at 675 nm with 1-W output power and conversion efficiencies above 30% [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, 23(4):266-268.
- [84] Erbert G, Fricke J, Hülsewede R, *et al.* 3 W-high brightness tapered diode lasers at 735 nm based on tensile strained GaAsP-QWs [J]. *SPIE*, 2003, 4995:29-38.

- [85] 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 Photon. Technol. Lett.*, 2006, 18(4):601-603.
- [86] Jensen O B, Klehrb A, Dittmarb F, *et al.* 808 nm tapered diode lasers optimised for high output power and nearly diffraction-limited beam quality in pulse mode operation [J]. *SPIE*, 2007, 6456:64560A-1-10.
- [87] Fiebig C, Blume G, Kaspari C, *et al.* 12 W high-brightness single-frequency DBR tapered diode laser [J]. *Electron. Lett.*, 2008, 44(21):1253-1254.
- [88] Sumpf 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, 2009:56-63.
- [89] Fricke J, Matalla M, Paschke K, *et al.* Fabricating and testing of Bragg gratings for 1 060 nm α -DFB lasers [J]. *SPIE*, 2003, 4947:223-231
- [90] Walpole J N, Donnelly J P, Taylor P J, *et al.* Slab-coupled 1.3- μm semiconductor laser with single-spatial large-diameter mode [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, 14(6):756-758.
- [91] Huang R K, Donnelly J P, Missaggia L J, *et al.* High brightness slab-coupled optical waveguide lasers [J]. *SPIE*, 2007, 6485:64850F-1-9.
- [92] Huang R K, Chann B, Missaggia L J, *et al.* High-power coherent beam combination of semiconductor laser arrays [C]//Lasers and Electro-Optics, 2008 and 2008 Conference on Quantum Electronics and Laser Science, 2008:23-32.
- [93] Ledentsov N N, Shchukin V A. Novel concepts for injection lasers [J]. *Opt. Eng.*, 2002, 41(12):3193-3203.
- [94] Ledentsov N N, Shchukin V A. Novel approaches to semiconductor lasers [J]. *SPIE*, 2002, 4905:222-234.
- [95] Maximov M V, Shernyakov Y M, Novikov I I, *et al.* Narrow vertical beam divergence laser diode based on longitudinal photonic band crystal waveguide [J]. *Electron. Lett.*, 2003, 39(24):1729-1731.
- [96] Maximov M V, Shernyakov Y M, Novikov I I, *et al.* Low divergence edge-emitting laser with asymmetric waveguide based on one-dimensional photonic crystal [J]. *Phys. Stat. Sol. (c)*, 2005, 2(2):919-922.
- [97] Novikov I I, Gordeev N Y, Shernyakov Y M, *et al.* High-power single mode (>1 W) continuous wave operation of longitudinal photonic band crystal lasers with a narrow vertical beam divergence [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92(10):103515-1-3.
- [98] Shchukin V, Ledentsov N, Kalosha V, *et al.* Modeling of photonic crystal based high power high brightness semiconductor lasers [J]. *SPIE*, 2010, 7597:75971A-1-11.
- [99] Karachinsky L Y, Novikov I I, Shernyakov Y M, *et al.* High power GaAs/AlGaAs lasers (850 nm) with ultranarrow vertical beam divergence [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(23):231114-1-3.
- [100] Kettler T, Posilovic K, Schulz O, *et al.* Single transverse mode 850 nm GaAs/AlGaAs lasers with narrow beam divergence [J]. *Electron. Lett.*, 2006, 42(20):1157-1158.
- [101] Posilovic K, Kettler T, Shchukin V A, *et al.* Ultrahigh-brightness 850 nm GaAs/AlGaAs photonic crystal laser diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93(22):221102-1-3.
- [102] Kettler T, Posilovic K, Karachinsky L Y, *et al.* High-brightness and ultranarrow-beam 850-nm GaAs/AlGaAs photonic band crystal lasers and single-mode arrays [J]. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*, 2009, 15(3):901-908.
- [103] Maximov M V, Shernyakov Y M, Novikov I I, *et al.* High power GaInP/AlGaInP visible lasers ($\lambda = 646$ nm) with narrow circular shaped far-field pattern [J]. *Electron. Lett.*, 2005, 41(13):741-742.
- [104] Maximov M V, Shernyakov Y M, Novikov I I. High-performance 640-nm-range GaInP-AlGaInP lasers based on the longitudinal photonic bandgap crystal with narrow vertical beam divergence [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2005, 41(11):1341-1348.
- [105] Novikov I I, Shernyakov Y M, Maximov M V, *et al.* Single mode CW operation of 658 nm AlGaInP lasers based on longitudinal photonic band gap crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88(23):231108-1-3.
- [106] Shchukin V A, Ledentsov N N, Gordeev N Y, *et al.* High brilliance photonic band crystal lasers [J]. *SPIE*, 2006, 6350:635005-1-9.
- [107] 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.
- [108] TeraDiode [OL]. <http://teradiode.com>

- [109] Huang R K, Chann B, Burgess J, *et al.* Direct diode lasers with comparable beam quality to fiber, CO₂, and solid state lasers [J]. *SPIE*, 2012, 8241:824102-1-11.
- [110] Hecht J. Making direct laser diodes shine more brightly [J]. *Laser Focus World*, 2013, 48(6):21-22.
- [111] Huang R K, Chann B, Missaggia L J, *et al.* High-brightness wavelength beam combined semiconductor laser diode arrays [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, 19(4):209-211.
- [112] Chann B, Goyal A K, Fan T Y, *et al.* Efficient, high-brightness wavelength-beam-combined commercial off-the-shelf diode stacks achieved by use of a wavelength-chirped volume Bragg grating [J]. *Opt. Lett.*, 2006, 31(9):1253-1255.
- [113] Roh S D, Grasso D M, Small J A. Very high brightness, fiber coupled diode lasers [J]. *SPIE*, 2009, 7198:71980Y-1-9.
- [114] Hamilton C, Tidwell S, Meekhof D, *et al.* High power laser source with spectrally beam combined diode laser bars [J]. *SPIE*, 2004, 5336:1-10.
- [115] Vijayakumar D, Jensena O B, Ostendorf R, *et al.* Spectral beam combining of a 980 nm tapered diode laser bar [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(2):893-898.
- [116] Fricke J, Bugge F, Ginolas A, *et al.* High-power 980-nm broad-area lasers spectrally stabilized by surface Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, 22(5):284-286.
- [117] Paschke K, Spiessberger S, Kaspari C, *et al.* High-power distributed Bragg reflector ridge-waveguide diode laser with very small spectral linewidth [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(3):402-404.
- [118] Spiessberger S, Schiemangk M, Wicht A, *et al.* DBR laser diodes emitting near 1 064 nm with a narrow intrinsic linewidth of 2 kHz [J]. *Appl. Phys. B*, 2011, 104(4):813-818.
- [119] Kogelnik H, Shank C V. Coupled-wave theory of distributed feedback lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, 43(5):2327-2335.
- [120] Nakamura M, Aiki K, Umeda J, *et al.* CW operation of distributed-feedback GaAs-GaAlAs diode lasers at temperatures up to 300 K [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, 27(7):403-405.
- [121] He Y, An H, Cai J, *et al.* 808 nm broad area DFB laser for solid-state laser pumping application [J]. *Electron. Lett.*, 2009, 45(3):163-164.
- [122] Schultz C M, Crump P, Wenzel H, *et al.* 11 W broad area 976 nm DFB lasers with 58% power conversion efficiency [J]. *Electron. Lett.*, 2010, 46(8):580-581.
- [123] Spiessberger S, Schiemangk M, Wicht A, *et al.* Narrow linewidth DFB lasers emitting near a wavelength of 1 064 nm [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, 28(7):2611-2616.
- [124] Cayron C, Ligeret, Resneau V P, *et al.* High-power, high-reliability, and narrow linewidth, Al-free DFB laser diode, for Cs pumping (852 nm) [J]. *SPIE*, 2010, 7616:76160Z-1-11.
- [125] Dumitrescu M, Telkkälä J, Karinen J, *et al.* Development of high-speed directly-modulated DFB and DBR lasers with surface gratings [J]. *SPIE*, 2011, 7953:79530D-1-12.
- [126] Venus G, Gourevitch A, Smirnov V, *et al.* High power volume Bragg laser bar with 10 GHz spectral bandwidth [J]. *SPIE*, 2008, 6952:69520D-1-5.
- [127] Wenzel H, Häusler K, Blume G, *et al.* High-power 808 nm ridge-waveguide diode lasers with very small divergence, wavelength-stabilized by an external volume Bragg grating [J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(11):1627-1629.
- [128] Köhler B, Brand T, Haag M, *et al.* Wavelength stabilized high-power diode laser modules [J]. *SPIE*, 2009, 7198:719810-1-12.
- [129] Jager R, Grabherr M, Jung C, *et al.* 57% wallplug efficiency oxide-confined 850 nm wavelength GaAs VCSELs [J]. *Electron. Lett.*, 1997, 33(4):330-331.
- [130] Haglund A, Gustavsson J, Vukusic J, *et al.* Single fundamental-mode output power exceeding 6 mW from VCSELs with a shallow surface relief [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, 16(2):368-370.
- [131] Furukawa A, Sasaki S, Hoshi M, *et al.* High-power single-mode vertical-cavity surface-emitting lasers with triangular holey structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85(22):5161-5163.
- [132] Westbergh P, Gustavsson J, Haglund A, *et al.* 32 Gbit/s multimode fibre transmission using high-speed, low current density 850 nm VCSEL [J]. *Electron. Lett.*, 2009, 45(7):366-368.
- [133] Pepeljugoski P, Kuchta D, Kwark Y, *et al.* 15.6-Gb/s transmission over 1 km of next generation multimode fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, 14(5):717-719.

- [134] Westbergh P, Gustavsson J, Kogel B, *et al.* 40 Gbit/s error-free operation of oxide-confined 850 nm VCSEL [J]. *Electron. Lett.*, 2010, 46(14):1014-1016.
- [135] Moser P, Lott J, Wolf P, *et al.* Energy-efficient oxide-confined 850 nm VCSELs for long distance multimode fiber optical interconnects [J]. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*, 2011, 99:1-8.
- [136] Seurin J F, Xu G, Miglo A, *et al.* High-power vertical-cavity surface-emitting lasers for solid-state laser pumping [J]. *SPIE*, 2012, 8276:827609-1-10.
- [137] Miller M, Grabherr M, King R, *et al.* Improved output performance of high-power VCSELs [J]. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*, 2001, 7(2):210-216.
- [138] Miller M, Grabherr M, Jager R, *et al.* High-power VCSEL arrays for emission in the watt regime at room temperature [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, 13(3):173-175.
- [139] Dasaro L A, Seurin J F, Wynn J D. High-power, high-efficiency VCSELs pursue the goal [J]. *Photon. Spectra*, 2005, 39(2):62-66.
- [140] Seurin J F, Xu G, Guo B, *et al.* Efficient vertical-cavity surface-emitting lasers for infrared illumination applications [J]. *SPIE*, 2010, 7952, 79520G-1-10.
- [141] Yan C, Ning Y, Qin L, *et al.* A high power InGaAs/GaAsP vertical-cavity surface-emitting laser and its temperature characteristics [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2004, 19(6):685-689.
- [142] Yan C, Ning Y, Qin L, *et al.* High-power vertical-cavity surface-emitting laser with an extra Au layer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, 17(8):1599-15601.
- [143] Cui J, Ning Y, Zhang Y, *et al.* Design and characterization of a nonuniform linear vertical-cavity surface-emitting laser array with a Gaussian far-field distribution [J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(18):3317-3321.
- [144] Zhang J, Ning Y Q, Zeng Y G, *et al.* Design and analysis of high-temperature operating 795 nm VCSELs for chip-scale atomic clocks [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2013, 10(4):045802-1-7.
- [145] Zhang J W, Ning Y Q, Zhang X, *et al.* High-peak-power vertical-cavity surface-emitting laser quasi-array realized using optimized large-aperture single emitters [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2014, 53(7):070303-1-5.



王立军(1946 -),男,吉林舒兰人,中国科学院院士,研究员,博士生导师,1982年于吉林大学获得硕士学位,主要从事大功率半导体激光器及其应用方面的研究。
E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn



宁永强(1965 -),男,吉林图们人,研究员,博士生导师,1999年于中科院长春物理所获得博士学位,主要从事半导体光电子器件等方面的研究。
E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn



秦莉(1969 -),女,黑龙江鹤岗人,研究员,博士生导师,1999年于吉林大学获得博士学位,主要从事大功率半导体激光及应用方面的研究。
E-mail: qinl@ciomp.ac.cn



佟存柱(1976 -),男,吉林伊通人,研究员,博士生导师,2005年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,主要从事大功率高亮度布拉格反射波导光子晶体激光器、单量子点激光器、单光子发射器件、中波红外激光及合束技术的研究。
E-mail: tongcz@ciomp.ac.cn



陈咏屹(1986 -),男,吉林长春人,博士,助理研究员,2013年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事表面等离子体与半导体激光器方面的研究。
E-mail: cyy2283@126.com