

# 半导体激光器波分复用合束技术研究进展

孙舒娟<sup>1,2,3</sup>, 郭林辉<sup>1,2\*</sup>, 谭昊<sup>1,2</sup>, 孟慧成<sup>1,2</sup>, 阮旭<sup>1,2,3</sup>, 闫雪静<sup>1,2,3</sup>, 张旭光<sup>1,2,3</sup>,  
武德勇<sup>1,2</sup>, 高松信<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

<sup>2</sup>中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900;

<sup>3</sup>中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

**摘要** 受波导结构和芯片封装等因素的限制, 半导体激光器快慢轴方向上的光束质量差距较大。半导体激光器主要用作抽运源, 即亮度转换器, 很难作为高亮度光源被直接应用。介绍了提高半导体激光器输出光功率密度和输出光束质量的非相干合束技术——波分复用合束技术, 并总结了其国内外发展现状及若干重要动向。该研究为半导体激光器波分复用合束技术的发展提供了参考。

**关键词** 激光器; 半导体激光器; 波长复用合束; 波长锁定; 波长间隔

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.020002

## Progress on Wavelength Division Multiplexing Beam Combining Technology for Diode Lasers

Sun Shujuan<sup>1,2,3</sup>, Guo Linhui<sup>1,2</sup>, Tan Hao<sup>1,2</sup>, Meng Huicheng<sup>1,2</sup>, Ruan Xu<sup>1,2,3</sup>,  
Yan Xuejing<sup>1,2,3</sup>, Zhang Xuguang<sup>1,2,3</sup>, Wu Deyong<sup>1,2</sup>, Gao Songxin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

<sup>3</sup>Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

**Abstract** Due to the limitations of waveguide structure, chip packaging and other factors, the beam quality of diode lasers in fast axis is different from that in slow axis. Diode lasers are usually used as pumping source, i. e., luminance converter, and cannot directly act as a high-brightness laser source. We introduce an incoherent beam combining technology, called wavelength division multiplexing (WDM) beam combining technology, and it can improve the output optical power density and output beam quality of diode lasers. We summarize its development status and some important trends at home and abroad. The study provides a reference for the development of diode laser WDM beam combining technology.

**Key words** lasers; diode laser; wavelength division multiplexing beam combining; wavelength locking; wavelength interval

**OCIS codes** 140.2020; 140.3298; 050.1970; 140.3490

收稿日期: 2017-07-10; 收到修改稿日期: 2017-08-06

基金项目: 中国工程物理研究院重大项目课题(AL01020103)

作者简介: 孙舒娟(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事半导体激光器合束技术方面的研究。

E-mail: shujuan0807@163.com

导师简介: 武德勇(1968—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事高功率半导体激光技术方面的研究。

E-mail: wdy@caep.com.cn

\* 通信联系人。E-mail: glh863@163.com

# 1 引言

半导体激光器具有效率高、结构紧凑、波长范围宽、成本低、可靠性高等优良特性。然而,传统的半导体激光器存在光谱特性差、光束质量差、直接输出功率和亮度低等不足。为减小光纤激光器的非线性效应、简化固体激光器谐振腔设计并扩展半导体激光器在工业加工和碱金属激光器抽运等方面的应用,需要解决一个重要技术问题,即获得高功率、高亮度、高光束质量的直接半导体激光光源。美国、德国已将该技术问题列入国家重大计划<sup>[1-2]</sup>,而激光合束技术被证明是解决该难题的有效方法之一。

对半导体激光输出进行合束,常用的方法有空间合束<sup>[3]</sup>、偏振合束<sup>[4]</sup>和波长合束<sup>[5]</sup>。空间合束在提高功率的同时会在一定程度上降低光束质量和亮度;偏振合束利用偏振合束器件将偏振方向互相垂直的两束光合成一束,可在不改变光束质量的情况下将功率和亮度翻倍<sup>[6]</sup>;波长合束又称波分复用(WDM),是将两个或两个以上不同波长的半导体激光器出射的光合成一束,得到与单束光光束质量相当、亮度提高数倍的激光输出,WDM技术已逐渐成为研究热点,并取得了一些突破,输出功率达到了数千瓦级。美国 TeraDiode 公司在 2012 年运用波长合束技术获得光纤芯径为  $50\ \mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.15、输出功率为 2030 W 的光纤耦合半导体激光模块,激光亮度达到  $1468\ \text{MW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ ,该激光模块可以与同等量级工业应用的光纤激光器及二氧化碳激光器相比拟<sup>[7]</sup>。德国 DirectPhotonics 公司于 2013 年采用多单管堆叠模块化方式,利用分色镜对间隔为 2.5 nm 的 4 个波长进行复用,展示了电光效率超过 30% 的 1 kW 和 2 kW 产品,其光束质量达到  $7.5\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ <sup>[8]</sup>。国内对波分复用合束技术的研究



起步较晚,北京工业大学<sup>[9-11]</sup>、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所<sup>[12-13]</sup>、四川大学<sup>[14]</sup>、中国工程物理研究院应用电子学研究所<sup>[15-17]</sup>进行了相关的研究,但都只是在技术可行性方面做了初步验证。半导体激光器的波分复用合束技术被证明是提高半导体激光器光束质量、实现高亮度输出、改善光谱特性有效的合束技术之一。

## 2 半导体激光器波分复用合束技术原理及分类

相比空间合束、偏振合束,波分复用合束技术以窄合束波长间隔为目标,从半导体激光器内部或外部波长选择光学元件间相互作用出发,采用半导体激光器芯片内置或外置波长选择元件及合束元件的方式实现单个合束单元波长锁定和多个合束单元合束输出。

### 2.1 波分复用合束技术原理

图 1 为合束原理示意图。图 1(a)所示为空间合束,光束的空间堆叠能够成倍提高输出功率,输出功率与合束单元数量成正比,即

$$P = NP_0, \quad (1)$$

式中  $P$  为合束后光功率,  $N$  为合束单元数量,  $P_0$  为合束单元光功率。合束后,光参数积随合束单元数量的增大而增大,可表示为

$$J_{\text{BPP}} = N\omega_0\theta_0, \quad (2)$$

式中  $J_{\text{BPP}}$  为合束后的光参数积,  $\omega_0$  为合束单元束腰半径,  $\theta_0$  为合束单元光束发散角。合束后光束的亮度为

$$B = P/J_{\text{BPP}} \approx NP_0/A\Omega, \quad (3)$$

式中  $A$  为合束后发光面积,  $\Omega$  为光束空间角,  $B$  为合束后光束亮度。可见空间合束中亮度不随合束单元数量的增加而增大<sup>[18]</sup>。

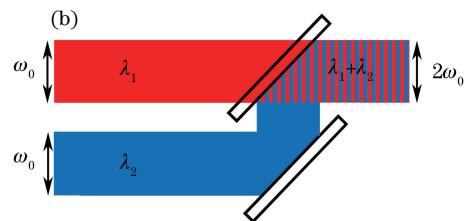


图 1 合束原理示意图。(a)空间合束;(b)波分复用合束

Fig. 1 Schematic of beam combining. (a) Spacial beam combining; (b) wavelength division multiplexing beam combining

如图 1(b)所示,波分复用将两个波长( $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ )或两个以上不同波长的半导体激光器出射光束合成一束,能够同时使亮度和功率成倍提高,且保持光参数积不变<sup>[18]</sup>。从合束的波长间隔 $\Delta\lambda$ 来

看,波分复用分为稀疏和密集波分复用两种,其典型波长间隔 $\Delta\lambda$ 的变化范围为 $15\sim 30\ \text{nm}$ 或 $0.2\sim 3\ \text{nm}$ <sup>[18-19]</sup>。

密集波分复用需要对每一个合束单元进行波长

锁定,压窄子束的光谱线宽  $\delta\lambda$ ,使其在  $0.1\sim 1\text{ nm}$  范围内,这样能够在总线宽不变的情况下对更多不同波长的光进行合束,从而提高亮度。密集波分复用合束原理示意图如图 2 所示<sup>[18-19]</sup>。

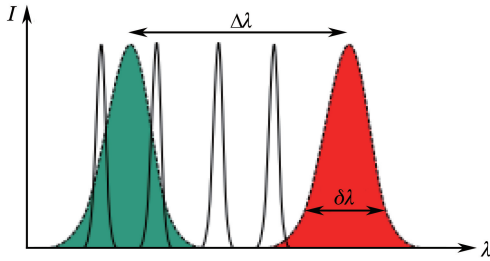


图 2 密集波分复用合束原理示意图

Fig. 2 Schematic of dense wavelength division multiplexing beam combining

半导体激光器波分复用合束技术中常采用啁啾波长锁定,使每一个发光单元在不同波长下激射,如图 3 所示。每种颜色代表一种波长<sup>[18]</sup>,此类波长锁定可以通过啁啾体布拉格光栅(C-VBG)、平面衍射光栅(SDG)和陷波滤波器等实现。

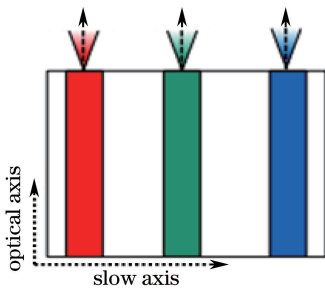


图 3 啁啾波长锁定示意图

Fig. 3 Schematic of chirped wavelength locking

## 2.2 波分复用合束技术分类

在一个半导体激光器波分复用合束系统中,波长锁定和波分复用是两个必不可少的步骤,从实现途径来看通常有两种方式。一种是波长锁定和波分复用分开进行,通常先将用于波长锁定的色散元件置于外腔中或集成在半导体激光器内部来提供反馈[如分布反馈半导体激光器(DFB-DL)和分布布拉格反馈半导体激光器(DBR-DL)],之后再滤波器或色散光栅将不同波长的子束进行合束<sup>[20-24]</sup>,这种结构不需要外腔反馈,不存在互锁现象。另一种是波长锁定、波分复用在同一个腔中同时进行,色散元件不仅对发光单元投射到其上的光束进行波长选择,还将不同入射角的光束进行衍射后以相同衍射角衍射合束,例如平面衍射光栅与部分反射外腔镜构成的光栅外腔光谱合束技术<sup>[8,20]</sup>,这种结构对调节精度要求低,能够获得更窄的波长间隔,但是需要采取

互锁抑制措施来减小互锁对光束质量的影响。

目前用于实现波分复用合束的器件主要有以下 4 种:

1) 体布拉格光栅(VBG)。VBG 是在光热折变(PTR)玻璃上进行紫外光的热加工制作而成。结合激光全息技术,紫外光引起 PTR 折射率的永久性改变,在 PTR 内部形成一定规律的内部折射率分布,其波长选择性可通过光栅厚度、入射角和折射率调制度等参数进行调整,具有高温稳定( $400\text{ }^\circ\text{C}$ )、高激光损伤阈值( $40\text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ )等优良特性,且易与激光阵列条或叠阵相匹配<sup>[25-26]</sup>。采用基于 VBG 的波分复用合束技术进行合束时的波长间隔为  $1\sim 1.5\text{ nm}$ , VBG 波长选择特性存在较大旁瓣,因此合束波长间隔的进一步减小受到限制。此外,温度变化会引起 Bragg 条件改变,散射和吸收等会引起功率损耗,特别是当 VBG 用在大型时序级联复用中时,这种功率损耗更为明显<sup>[20,27]</sup>。

2) 平面衍射光栅。平面衍射光栅能够同时实现波长稳定和复用,且波长间隔小。但平面衍射光栅外腔合束结构较大,且需要进行稳频互锁抑制。在光栅外腔波长合束结构中,如果不采取互锁抑制手段,合束后光束质量将会严重下降<sup>[28]</sup>。美国中央佛罗里达大学最早对光栅外腔光谱合束开展研究<sup>[29]</sup>,国内苏州大学<sup>[30]</sup>、华中科技大学<sup>[31-32]</sup>开展了对 VBG 光谱特性的研究。美国 ONDAX、OptiGrate 公司,德国 Edmund 公司等皆有非常成熟的 VBG、SDG 产品。

3) 窄带薄膜滤波器及超窄带薄膜滤波器(TFF & U-TFF)。这种滤波器通常用于波长锁定和复用分别进行的结构中,能够避免外腔波长锁定中不同发光单元间的互锁,但是需要一个与滤光片有相同频率分布的衍射光栅进行衍射合束输出。由发光单元出射、经 TFF 波长选择和反馈作用实现波长锁定的合束单元光束以一定角度入射到光栅上衍射合束,为了提高复用效率和光束质量,要求经 TFF 后的每一路合束光束角度与光栅衍射角精确匹配<sup>[33]</sup>。TFF 能够将合束波长间隔压窄到约  $0.2\text{ nm}$ ,适用于密集波分复用合束技术,但其在激光作用下的损伤特性及热致光学特性失效都将显著影响器件性能。

4) 陡边绝缘截止滤波器及超高陡直度绝缘截止滤波器(SDDG & U-SDDG)。使用这种滤波器时,针对每一个合束波长都需要使用一个截止带与截止宽度相匹配的滤波器<sup>[34]</sup>。与 TFF 器件相比,其波

长间隔较大,典型值约为 2.5 nm。SDDG 薄膜的精确制备较困难,其制备技术被国外少数几家公司垄断。国内同济大学于 2016 年申请了“连续工作体制高抗损伤超窄带截止薄膜技术研究”项目,正在进行技术攻关。

### 3 国内外发展状况

国内外研究机构近年来开展了许多半导体激光器波分复用合束技术方面的研究工作。下文对不同波长锁定和波分复用元件及基于这些元件的波分复用合束技术的发展现状进行了介绍。

#### 3.1 基于平面光栅的波分复用合束技术

基于平面光栅的波分复用合束技术最早由美国麻省理工学院林肯实验室提出<sup>[35]</sup>,其子公司(TeraDiode 公司)拥有相关技术的专利。2014 年 TeraDiode 公司将半导体激光阵列条与变换透镜、平面衍射光栅及输出耦合镜相结合,构成外腔,如图 4 所示<sup>[36]</sup>。不同合束单元的出射光束经变换透镜后,以不同的入射角投射到光栅上,再经光栅衍射后以相同衍射角合束,最后由耦合镜输出。理想情况下叠加后的光束与每个合束单元光束具有相同的光束质量。输出耦合镜具有部分反馈作用,入射到该镜上的光束按照一定的比例反射至激光器单元,反馈回每个单元的波长略有差异,因此每个单元以不同的波长运转。TeraDiode 公司在该合束技术领域一直处于先进水平,2014—2016 年他们用这种合束方式实现了世界上第一个亮度和光束质量可以与光纤激光器、固体激光器相提并论的超高亮度千瓦级光纤耦合输出半导体激光系统,在 180 A 电流下得到功率为 4 kW、电光效率为 44%、光束质量约为 5 mm·mrad 的激光输出<sup>[37]</sup>。

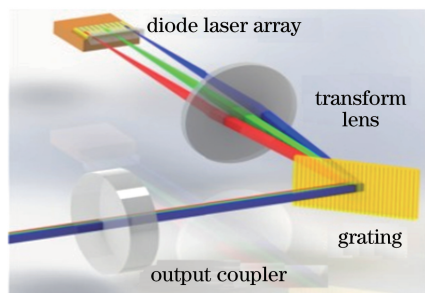


图 4 TeraDiode 公司波长合束结构示意图

Fig. 4 Schematic of wavelength beam combining structure of TeraDiode company

该合束结构中的衍射光栅同时作为波长选择元件和合束元件,存在严重的互锁问题。互锁是同时

进行波长锁定和复用的外腔结构的寄生效应,是指从一个发光点反馈回腔面的光会对另一个发光点产生干扰,这种光反馈会导致额外的纵模并大大降低复用效率。

为进一步提高输出功率和转换效率,TeraDiode 公司还提出了一种无输出耦合镜的外腔波长合束结构,如图 5 所示<sup>[37-38]</sup>。传统多波长光束组合(WBC)结构利用输出耦合镜反射一部分输出光,并将该输出光作为反馈来对发光单元进行波长锁定,在无输出耦合镜外腔结构中,利用两个 0°全反镜将衍射光栅透射光的一部分反馈回发光单元进行波长锁定,另一部分反射到输出光路作为输出,进而提高合束效率,获得了大于 51% 的电光效率,但该公司并未给出合束的波长间隔。

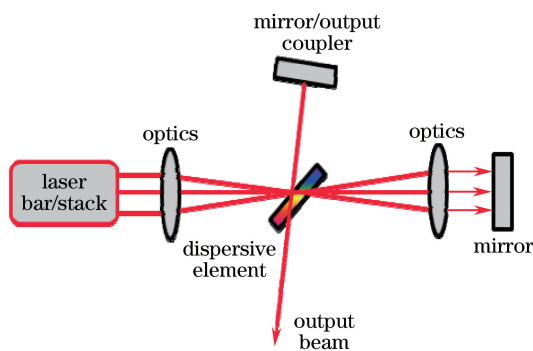


图 5 无输出耦合镜的外腔波长合束结构示意图

Fig. 5 Structural diagram of coupler-free resonator wavelength beam combining

#### 3.2 基于体布拉格光栅的波分复用合束技术

在通信系统中,波分复用合束技术以不同波长加载不同信息,以提高信息容量。半导体激光器波分复用以实现高功率、高亮度、高光束质量激光输出为目的。德国夫朗和费实验室的 Hengesbach 等<sup>[27]</sup>对此进行了深入研究,并于 2013 年提出了一种基于 VBG 的高功率密集波分复用(HP-DWDM)结构,采用 5 个 VBG 波长锁定的宽面发射半导体激光器阵列条,每个阵列条的光谱线宽小于 120 pm,用峰值衍射效率为 99% 的透射式 VBG 进行波分复用合束,如图 6 所示。图 6 中①代表宽面发射半导体激光光源和快慢轴准直镜的输入孔,②③⑤代表绝缘反射镜,④代表高衍射效率 VBG,⑥代表快慢轴聚焦镜和耦合输出镜的输出孔。5 个阵列条使用 4 个光谱特性完全相同的 VBG,每一路光经反射镜反射后以各自特定的布拉格角投射到 VBG 上并发生反射性衍射,在下一个 VBG 上发生透射并与下一路光叠加合束。当电流为 120 A 时可得到功率大于



200 W、亮度大于  $70 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$  的激光输出, 质量因子约为 45, 复用效率为 85%。

实验系统的 5 路合束光束波长分别为 973.0, 974.5, 976.0, 977.5, 979.0 nm, 各光路间噪声较低且不存在互锁问题。该系统的波长间隔为 1.5 nm, 与平面衍射光栅合束效果相比, 间隔较大。VBG 波长选择特性存在较大旁瓣, 使得用 VBG 作为复用元件的波分复用技术的波长间隔进一步减小受到限制。切趾 VBG 是一种抑制了旁瓣的光栅<sup>[39]</sup>, 这种光栅能够将合束光谱亮度提高 5~10 倍, 基于 VBG 的密集波分复用的波长间隔也可减小到 1.5 nm 以下<sup>[40]</sup>。

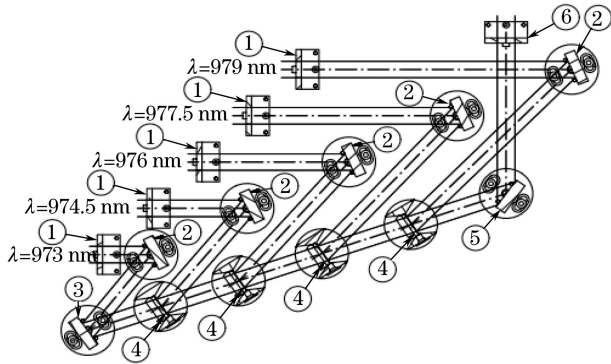


图 6 高功率密集波分复用实验装置示意图

Fig. 6 Diagram of high power dense wavelength division multiplexing setup

以上密集波分复用技术是基于 VBG 波长锁定的宽面发射半导体激光器, 这种激光器本身的光束质量比较差, 且能量损耗随着每个单元光路中衍射元件数目的增加而增大, 所以总复用效率较低。提高输入光束的光束质量或减小衍射角有望将复用效率进一步提高到 90% 以上, 新型的发光点设计能够在不进行光束转换的情况下实现较小的光参数积<sup>[41]</sup>。Hengesbach 等<sup>[24]</sup>于 2013 年提出了一种基于 DFB 短阵列条的密集波分复用结构, 如图 7 所示。合束装置由啁啾 DFB 短阵列条、快轴准直镜、慢轴准直镜、伽利略望远镜扩束系统、合束元件和光纤耦合输出模块组成, 其中扩束系统既可以是 U-SDDG 也可以是 VBG。阵列条中的每一个发光单元以各自特定的波长运转, 光束经过准直和扩束后以特定的衍射角入射到合束元件上, 经衍射在下一个合束元件上与下一路光进行合束, 以此类推完成多波长合束。

Witte 等<sup>[21,41]</sup>使用新型 DFB 窄条宽区短阵列条对图 7 所示的合束结构进行进一步研究, 采用直径为  $35 \mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.2 的光纤进行耦合, 获得了 10 W 的功率输出, 并提出了对高功率啁啾半导

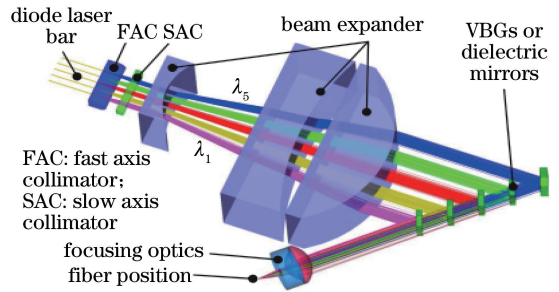


图 7 啁啾 DFB 短阵列条 WDM 合束光路

Fig. 7 Optical path of chirped DFB mini-bar WDM beam combining

体激光阵列条进行波分复用的概念, 复用效率高达 97%; 但该课题组在 2015 年的实验中得到的复用效率只有 65%<sup>[41]</sup>, 效率下降的原因主要有两个方面: 1) 滤波器边缘散射和准直效果不佳; 2) 滤波器本身是一种偏振敏感元件, 而这种新型窄条宽区半导体激光器芯片的光束偏振度较低, 造成了极大的能量损耗。因此发展性能更优的滤波器是提高复合效率的一个亟待解决的问题。如果进行更好地准直, 并在快轴方向再叠加一个阵列条, 则有望获得 30 W 的功率输出。此外, 啁啾 DFB 阵列条发光单元间的波长间隔为 2.5 nm 左右, 合束波长间隔的进一步减小受到芯片内部光栅布拉格波长温漂和滤波器容差的限制。

2016 年 Witte 等<sup>[21]</sup>提出了两种小型化的光学设计结构, 如图 8 所示, 这两种结构能够有效消除滤波器边缘衍射产生的损耗。

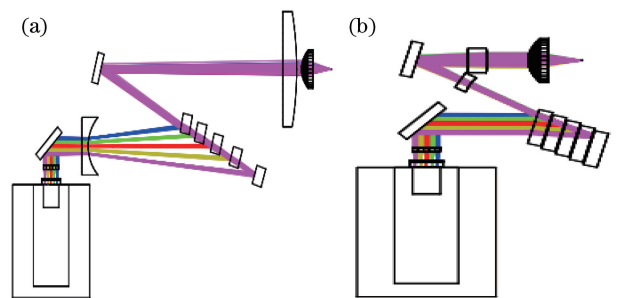


图 8 两种降低滤波器边缘散射损耗的结构。

(a) 单个滤波片结构; (b) 双通道结构

Fig. 8 Two structures for reducing scattering loss at the edge of filters. (a) Single filter structure; (b) dual-channel structure

### 3.3 基于多种器件的波分复用合束技术

基于多种器件是指波分锁定与波长复用合束分别用不同器件来实现。近年来, 对低功率宽面发射半导体激光单元进行密集波长合束的技术逐渐发展起来。与传统波长合束技术相比, 密集波长合束技

术要求更窄的合束单元线宽和更窄的波长间隔,能够在相同的带宽中容纳更多不同的波长。在光束质量恒定的情况下,功率和亮度更高。

2014年美国 Trumpf Laser 公司使用 TFF 与宽发射面半导体激光阵列条构成外腔,并进行波长锁定,接着用一个透射式衍射光栅进行波长合束,获得了功率为 350 W、光束质量小于  $5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  的激光输出,并将输出光耦合进包层直径为  $100 \mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.12 的光纤,结构如图 9 所示<sup>[42]</sup>。图中  $f_T$  为傅里叶变换柱透镜焦距,  $f_1$  为光束准直柱透镜焦距,  $f_2$  为望远镜系统中的透镜焦距。如图 9(a) 所示,将傅里叶变换柱透镜放置在半导体激光器阵列条前,将每个单元发出的同轴光线进行聚焦变换,使其以不同的角度入射到 TFF(透射带宽为  $0.1 \text{ nm}$ )上,光束经过 TFF 波长选择后经柱透镜准直,并由外腔镜输出。由于外腔镜的部分反馈作用,同轴光束按照一定比例反馈到半导体激光阵列条,以进行波长锁定,从而使不同合束单元以不同的波长运转。由外腔镜输出的光再次经过柱透镜变换,如图 9(b)所示,以不同的入射角度投射到透射式光栅上,不同角度的光束经过光栅衍射后以相同的衍射角衍射并合束输出。通过采用更高功率的半导体激光器芯片、改善冷却方式并进行后续空间合束和偏振合束等,有望获得功率大于  $4 \text{ kW}$ 、光束质量小于  $5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  的激光输出。

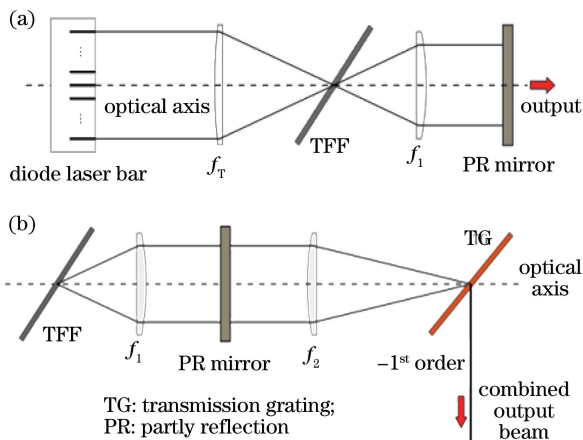


图 9 (a) 新型 TFF 外腔结构示意图; (b) 透射光栅合束结构示意图  
Fig. 9 (a) Structural diagram of novel TFF external cavity;  
(b) structural diagram of transmission grating beam combining

在波分复用合束中,将光栅置于外腔中同时进行波长锁定和复用发光,单元间的互锁会严重降低合束后的光束质量。这种基于 TFF 外腔和透射光栅合束的结构,避免了发光点的互锁,从而得到较高的光束质量。此外, TFF 色散效果较强,使用短焦

距柱透镜就能得到约  $0.2 \text{ nm}$  的窄波长间隔,合束后的光谱宽度为  $35 \text{ nm}$ 。

2015年,美国 Trumpf Laser 公司在前面工作的基础上,采用透射带宽更窄的 TFF,用波长锁定与合束分开进行的方式将功率提高到  $500 \text{ W}$ ,结构如图 10 所示<sup>[43]</sup>。图中  $f_{TL}$  为前傅里叶变换柱透镜焦距,  $f_{FB}$  为后变换柱透镜焦距,  $\theta_0$  为 TFF 法线方向与光轴的夹角,  $\beta_{n,k}$  为不同位置不同起振波长激光单元光束入射到 TFF 上与光轴的夹角,  $f_{C1}$ 、 $f_{C2}$  分别为望远镜系统中两个柱透镜的焦距,  $\theta_L(\lambda_0)$  为中心波长光束入射到光栅时与光栅面的夹角。该结构最大的不同是光束从 TFF 处耦合到腔外,因此波长锁定的激光器光谱带宽与 TFF 透射带宽之比决定了耦合输出比。

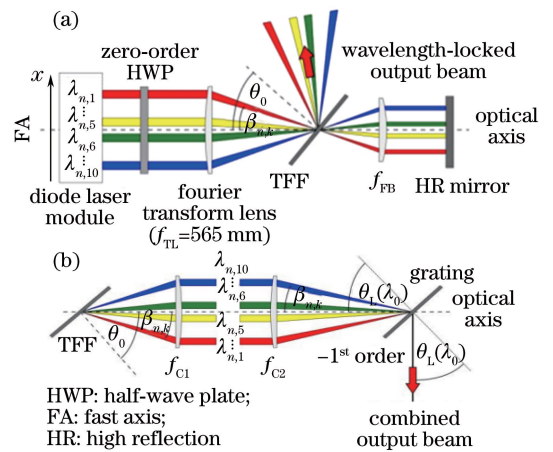


图 10 (a) 改进的 TFF 外腔结构示意图; (b) 透射光栅对波长锁定的扇形散射分光束进行波长合束

Fig. 10 (a) Schematic of improved TFF external cavity structure; (b) wavelength beam combining for wavelength-locked fan scattering split-beam by transmission grating

TFF 和光栅的波长-角度色散特性的精确匹配对合束后光束质量的提高有着很大影响。这种光束经 TFF 耦合到腔外的结构,能准确反映不同发光单元在整个阵列中的位置信息,使后续合束光栅的匹配更易实现。但实际上,由于 TFF 和光栅的波长-角度色散特性本身是非线性的,色散匹配只能在某一特定角度上得到满足,剩余的色散不匹配会导致产生远场指向误差,当该远场指向误差角度小于单元光束远场发散角时,其对合束后光束质量下降带来的影响可以忽略。

2015年 DILAS Diodenlaser 为了提高亮度,采用一种改进的低填充因子 ( $5\%$ ) T-Bar (Tailored Bar),用 VBG 将三个波长分别锁定在  $972, 976, 980 \text{ nm}$ ,每个带宽小于  $0.5 \text{ nm}$ ,光谱如图 11 所

示<sup>[44]</sup>。用陡直度约为1 nm的陡边绝缘截止滤波器以波长间隔为4 nm进行密集波长合束,结构如图12所示<sup>[44]</sup>。合束后在35 A的电流下获得410 W的激光输出,将输出光耦合到包层直径为100  $\mu\text{m}$ 、数值孔径为0.2的光纤中,电光效率约为40%。通过优化光学元件,系统的电光效率可以提高到45%,功率达到500 W,利用该系统进行偏振合束和稀疏波长合束,能够在光束质量保持10  $\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 不变的情况下将功率提高到数千瓦。

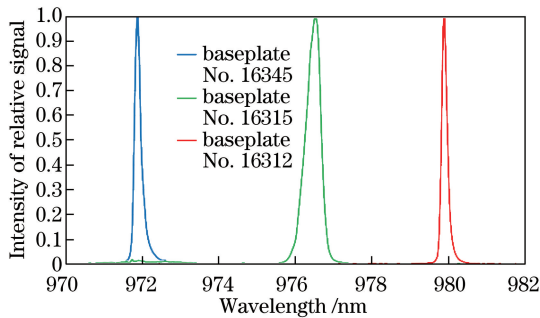


图 11 波长锁定光谱图

Fig. 11 Wavelength-locked spectra

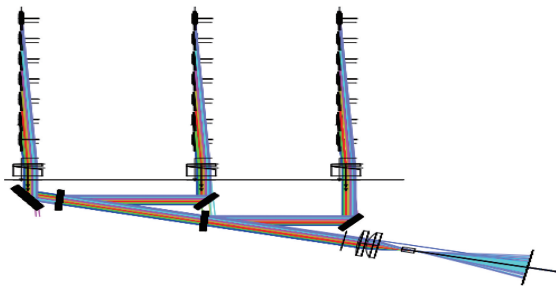


图 12 密集波长合束结构示意图

Fig. 12 Diagram of dense wavelength beam combining

2013年德国 DirectPhotonics 公司利用标准宽面发射半导体激光器单管(功率为12 W),先进行快轴方向空间堆叠,再用 VBG 将4个合束单元波长分别锁定在939, 943, 947, 951 nm,每个线宽为0.7 nm,之后用 TFF 以4 nm的波长间隔进行密集波长合束,获得功率为450 W、光束质量为7.5  $\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 的激光输出,继续使用稀疏波长合束,可获得2~4 kW的功率<sup>[7]</sup>。

国内关于半导体激光器波分复用合束技术的研究起步较晚。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所提出了基于透射式光栅的外腔波分复用合束技术<sup>[45]</sup>,2013年该实验组实现了中心波长为970 nm的单个半导体激光阵列条的光谱合束,合束光束慢轴质量因子为10.9,光电效率为45%。同年研制出了中心波长为970 nm、含三个激光阵列条的

光栅外腔反馈光谱合束半导体激光光源,实现了连续激光功率为140.6 W、光束质量为4.367  $\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 的激光输出<sup>[12-13]</sup>。

自2008年起,中国工程物理研究院应用电子研究所开展了光栅外腔光谱合束的研究<sup>[15-17]</sup>。该课题组于2015年基于衍射光栅外腔结构,提出了用柱透镜代替部分反射镜作为耦合输出元件的方法,利用柱透镜对光栅衍射光束进行二次准直,以消除相邻发光点间的互锁,对包含3个短阵列条的激光叠阵进行光谱合成,在75 A电流下获得159 W的功率输出,快慢轴质量因子分别为11.5和10.2<sup>[46]</sup>;同年,该课题组提出了通过在外腔反馈镜前增加空间滤波装置并切断发光单元间互相耦合锁定模式的增益放大回路来抑制单元间互锁的措施<sup>[47]</sup>。实验结果表明,互锁导致的旁瓣效应被完全抑制,合成光光束质量大幅提高,且合成效率由60%提高至70%,获得的合成光束的功率为268 W,光束质量优于8  $\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ,谱宽约3 nm,综合指标处于国内领先水平。2017年,该课题组使用三个叠阵,结合空间合束和光谱合束,在70 A电流下获得了579 W的连续输出,快慢轴质量因子分别为18.4和17.4,亮度达到232  $\text{MW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ <sup>[48]</sup>;同年,该课题提出了通过在衍射光栅外腔结构加入5倍缩束系统来减小阵列条上发光点间的距离,以减小合束波长间隔并获得合束光的光谱窄化,实验得到合束的谱宽为2.7 nm,是不加缩束系统的1/5,将该技术与空间合束、偏振合束、粗谱合束等技术结合,可实现千瓦级半导体激光输出<sup>[49]</sup>。2014年北京工业大学将光束整形器件(BTS)引入到外腔反馈波分复用中,减小了 Smile 效应和慢轴发散角对合束的影响,实现了单个发光单元的反馈锁定<sup>[9-11]</sup>。对19个发光单元半导体激光阵列条进行波分复用实验,获得了58.8 W的连续激光输出,光电效率高达51%。合束后的快慢轴质量因子分别为1.3和11.6,光束质量等同于单个发光单元的光束质量。另外,四川大学<sup>[14,50]</sup>和安庆师范大学<sup>[51-52]</sup>也进行了相关技术的探索研究。

国内外有很多关于波分复用合束技术的研究,但大都处于实验室研究阶段,没有相应产品。美国 TeraDiode 公司在2012年推出了基于波分复用合束技术的2 kW 直接半导体激光光源<sup>[8]</sup>,并展示了4,6,8 kW 高亮度光纤输出光源产品<sup>[32-33]</sup>。

## 4 总 结

半导体激光器波分复用合束技术中,输出功率



和亮度与加入光束中的合束单元数目呈正相关,其优势在于容易通过波长实现对光的控制。波分复用合束技术能使半导体激光直接用于新的领域,如铜焊、切割及其他精密应用。

直接半导体激光器将在功率和光束质量方面获得进一步提高。一方面,具有高光束质量的单元器件不断发展,如锥形半导体激光器、板条耦合光波导激光器、模式控制半导体激光器等;另一方面,波长锁定和光束整形合束技术的水平不断提高。因此,多种合束方法相结合的组合式合束技术将为半导体激光器输出功率和光束质量的提高提供新思路。

### 参 考 文 献

- [1] Stickley C M, Filipkowski M E, Parra E. Overview of progress in super high efficiency diodes for pumping high energy lasers[C]. SPIE, 2006, 6104: 610405.
- [2] Bachmann F. Goals and status of German national research initiative BRIOLAS (brilliant diode lasers) [C]. SPIE, 2007, 6456: 645608.
- [3] Gao X, Ohashi H, Saitoh M, *et al.* Beam combining for three high-power laser-diode stacks with a stripe mirror technique [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 43(8B): L1097-L1098.
- [4] Tan H, Guo L H, Gao S X, *et al.* Experimental study on fiber coupling based on polarization folding [J]. Laser & Infrared, 2014, 44(4): 361-365.  
谭昊, 郭林辉, 高松信, 等. 基于偏振折叠的光纤耦合实验研究 [J]. 激光与红外, 2014, 44(4): 361-365.
- [5] Li L B, Lou Q H. Spectral combining techniques of fiber lasers[J]. Lasers & Optoelectronics Progress, 2006, 43(10): 37-41.  
李立波, 楼祺洪. 光纤激光器的谱叠加技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(10): 37-41.
- [6] Zhou Z P, Gao X, Bo B X, *et al.* Fiber coupling analysis of multi-chip laser diodes [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(3): 031013.  
周泽鹏, 高欣, 薄报学, 等. 多芯片半导体激光器光纤耦合设计 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(3): 031013.
- [7] Huang R K, Chann B, Burgess J, *et al.* Direct diode lasers with comparable beam quality to fiber, CO<sub>2</sub>, and solid state lasers[C]. SPIE, 2012, 8241: 824102.
- [8] Heinemann S, Fritsche H, Kruschke B, *et al.* Compact high brightness diode laser emitting 500 W from a 100 um fiber[C]. SPIE, 2013, 8605: 86050Q.
- [9] Liu B, Zhang X, Han J T, *et al.* Wavelength beam combining of laser diode array by wavelength  $\lambda$ -chirped volume Bragg grating external cavity [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(7): 1057-1062.  
刘波, 张雪, 韩军婷, 等. 波长啁啾体布拉格光栅外腔实现激光二极管阵列的波长光束组合 [J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(7): 1057-1062.
- [10] Liu B, Li Q, Zhang X, *et al.* Wavelength beam combining of laser diode array to get 20 W CW circle spot emission [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(11): 1633-1638.  
刘波, 李强, 张雪, 等. 808 nm 激光二极管阵列波长光束组合 20 W 输出 [J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(11): 1633-1638.
- [11] Zhu Z D, Gou L, Jiang M H, *et al.* High beam quality in two directions and high efficiency output of a diode laser array by spectral-beam-combining [J]. Optics Express, 2014, 22(15): 17804-17809.
- [12] Zhang J, Peng H Y, Fu X H, *et al.* CW 50 W/M<sup>2</sup> = 10.9 diode laser source by spectral beam combining based on a transmission grating [J]. Optics Express, 2013, 21(3): 3627-3632.
- [13] Peng H Y, Zhang J, Fu X H, *et al.* High-efficiency external cavity spectral-beam-combined diode laser array [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(7): 0702015.  
彭航宇, 张俊, 付喜宏, 等. 高效外腔反馈光谱合束半导体激光器阵列 [J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702015.
- [14] Zhang Y, Zhang B. Analysis of the spectral beam combining efficiency of diode laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(5): 864-872.  
张艳, 张彬. 半体激光器光束谱合成效率的分析 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 864-872.
- [15] Yu Y, Wang W M, Lu Y H, *et al.* Simulation of spectrally beam combined diode laser based on grating-cavity [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(2): 189-192.  
于益, 王卫民, 鲁燕华, 等. 二极管激光光栅外腔光谱合成技术模拟研究 [J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(2): 189-192.
- [16] Meng H C, Wu D Y, Tan H, *et al.* Experimental study on high brightness and narrow band of diode laser by spectral beam combining of grating-external cavity [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0302003.  
孟慧成, 武德勇, 谭昊, 等. 窄光谱高亮度半导体激



- 光器光栅-外腔光谱合束实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0302003.
- [17] Meng H C, Tan H, Li J M, *et al.* Development of spectral beam combining of diode laser by grating and external cavity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 020003.  
孟慧成, 谭昊, 李建民, 等. 半导体激光器光栅外腔光谱合束技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 020003.
- [18] Witte U, Hengesbach S. Dense wavelength division multiplexing - An introduction. Tutorial on dense wavelength division multiplexing [OL]. [2017-07-10]. [http://www.eee.nottingham.ac.uk/bridle/downloads/BRIDLE\\_DWDM\\_Tutorial.pdf](http://www.eee.nottingham.ac.uk/bridle/downloads/BRIDLE_DWDM_Tutorial.pdf).
- [19] Witte U, Schneider F, Holly C, *et al.* kW-class direct diode laser for sheet metal cutting based on commercial pump modules[C]. SPIE, 2017, 10086: 1008608.
- [20] Hengesbach S, Klein S, Holly C, *et al.* Simultaneous frequency stabilization and high-power dense wavelength division multiplexing (HP-DWDM) using an external cavity based on volume Bragg gratings (VBGs)[C]. SPIE, 2016, 9733: 97330K.
- [21] Witte U, Traub M, Di Meo A, *et al.* Compact 35 um fiber coupled diode laser module based on dense wavelength division multiplexing of NBA mini-bars [C]. SPIE, 2016, 9733: 97330H.
- [22] Holly C, Westphalen T, Traub M, *et al.* High power dense wavelength division multiplexing (HP-DWDM) of frequency stabilized 9xx diode laser bars with a channel spacing of 1.5 nm[C]. SPIE, 2014, 8965: 89650C.
- [23] Hengesbach S, Klein S, Traub M, *et al.* Simultaneous frequency stabilization, wavelength multiplexing and improvement of beam quality using a self-optimizing external cavity diode laser[J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 595-598.
- [24] Hengesbach S, Witte U, Traub M, *et al.* Design of a DFB/DBR Diode Laser Module including spectral multiplexing based on VBGs[C]. High Power Diode Lasers and Systems Conference, 2013: 14029598.
- [25] Ondax Inc. Volume holographic gratings (VHG) [OL]. [2017-07-10]. <http://www.ondax.com/Downloads/Publications/whitepaper-VHG.pdf>.
- [26] Hieta T, Vainio M, Moser C, *et al.* External-cavity lasers based on a volume holographic grating at normal incidence for spectroscopy in the visible range [J]. Optics Communications, 2009, 282(15): 3119-3123.
- [27] Hengesbach S, Krauch N, Holly C, *et al.* High-power dense wavelength division multiplexing of multimode diode laser radiation based on volume Bragg gratings[J]. Optics Letters, 2013, 38(16): 3154-3157.
- [28] Yang L, Wu Z, Zhong Z, *et al.* Effect of crosstalk on combined beam characteristics in spectral beam combining systems[J]. Optics Communications, 2017, 384: 30-35.
- [29] Andrusyak O G. Dense spectral beam combing with volume Bragg gratings in photo-thermo-refractive glass[D]. Orlando: University of Central Florida, 2004.
- [30] Wang H, Yuan X, Zhang X, *et al.* Influence of volume Bragg grating reflectivity on spectrum of external cavity laser diode array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(6): 0602004.  
王浩, 袁孝, 张翔, 等. 体布拉格光栅反射率对外腔半导体激光阵列输出光谱的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602004.
- [31] Zhang X. Angular filtering and beam control with volume Bragg gratings[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011.  
张翔. 基于体布拉格光栅的角选择滤波与光束控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [32] Feng Y. The relationship of angular, wavelength sensitivities and grating parameters in volume Bragg gratings[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011.  
冯宇. 体布拉格光栅中角度、波长选择性与光栅参数的关系[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [33] Haas M, Killi A, Tillkorn C, *et al.* Thin-film filter, wavelength-locked, multi-laser cavity for dense wavelength beam combining of broad-area laser diode bars[J]. Optics Letters, 2015, 40(17): 3949-3952.
- [34] Kruschke B, Fritsche H, Kern H, *et al.* Beam combining techniques for high-power high-brightness diode lasers[C]. SPIE, 2015, 9346: 934614.
- [35] Fan T Y, Sanchez A, Daneu V, *et al.* Laser beam combining for power and brightness scaling [C]. IEEE Aerospace, 2000, 3: 49-54.
- [36] Huang R K, Chann B, Tayebati P. Direct diode lasers for industrial sheet metal cutting and welding [C]. Photonics Conference (IPC), 2014: 232-233.
- [37] Huang R K, Chann B, Burgess J, *et al.* Teradiode's high brightness semiconductor lasers[C]. SPIE, 2016, 9730: 97300C.

- [38] Tayebati P, Chann B. Two-dimensional multi-beam stabilizer and combining systems and methods: US20160268761 A1[P]. (2016-09-15)[2016-07-10]. <https://www.google.com/patents/US20160268761>.
- [39] Nippgen S, Hengesbach S, Traub M, *et al.* Apodized holographic beam combiners for dense wavelength multiplexing based on Gaussian-beam interference[J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5205-5207.
- [40] Nippgen S, Hengesbach S, Traub M, *et al.* Apodized holographic beam combiners for dense wavelength multiplexing based on Gaussian-beam interference [J]. Optics Letters, 2012, 37 (24): 5205-5207.
- [41] Witte U, Rubel D, Traub M, *et al.* Dense wavelength multiplexing and 35um-fiber coupling of wavelength chirped high power diode laser bars[C]. Advanced Solid State Lasers, 2015: AF1A.6.
- [42] Zimer H, Haas M, Ried S, *et al.* Thin film filter wavelength-locked laser cavity for spectral beam combining of diode laser arrays[C]. Photonics Conference, 2014: 230-231.
- [43] Zimer H, Haas M, Nagel S, *et al.* Spectrally stabilized and combined diode lasers[C]. High Power Diode Lasers and Systems Conference (HPD), 2015: 31-32.
- [44] Unger A, Uthoff R, Stoiber M, *et al.* Tailored bar concepts for 10mm-mrad fiber coupled modules scalable to kW-class direct diode lasers [C]. SPIE, 2015, 9348: 934809.
- [45] Wang L J, Peng H Y, Zhang J, *et al.* Development of beam combining of high power high brightness diode lasers [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(4): 1-10.
- 王立军, 彭航宇, 张俊, 等. 高功率高亮度半导体激光器合束进展[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 1-10.
- [46] Meng H, Sun T, Tan H, *et al.* High-brightness spectral beam combining of diode laser array stack in an external cavity [J]. Optics Express, 2015, 23 (17): 21819-21824.
- [47] Lu F. Theoretical and experimental study on spectral beam combining of diode laser based on grating external cavity [C]. 2015 Annual Report of China Academy of Engineering Physics(II). 2015, 2: 192-193.
- 卢飞. 光栅外腔法二极管激光器光谱合成理论与实验研究[C]. 2015年版中国工程物理研究院科技年报(II). 2015: 192-193.
- [48] Meng H, Ruan X, Du W, *et al.* Scaling the spectral beam combining channel by multiple diode laser stacks in an external cavity [J]. Laser Physics Letters, 2017, 14(4): 045811.
- [49] Meng H, Ruan X, Wang Z, *et al.* Spectral bandwidth narrowing of high brightness spectral beam combining diode laser [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 16772281.
- [50] Yang L, Wu Z, Zhong Z, *et al.* Effect of crosstalk on combined beam characteristics in spectral beam combining systems[J]. Optics Communications, 2017, 384: 30-35.
- [51] Zhan S, Wu Z, Zhang J, *et al.* Comparison of spectral beam combining based on an external cavity with and without microlens array[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 77: 215-220.
- [52] Zhan S, Wu Z, He F, *et al.* Influence of transform-lens focal length on spectral beam combining in an external cavity with a microlens array [J]. Optics Communications, 2017, 387: 223-229.