

文章编号:1001-5078(2025)03-0323-08

· 综述与评论 ·

基于离轴与非离轴的外腔谱合成研究进展

丁健^{1,2}, 张迪^{1,3}, 何天浚¹, 邹林¹, 牛文泽¹, 乐文冉¹, 谭镇坤¹, 张珺瑚¹, 占生宝¹

(1. 安庆师范大学 电子工程与智能制造学院, 安徽 安庆 246133; 2. 滁州学院 机械与电气工程学院, 安徽 滁州 239000;
3. 中国人民解放军 93160 部队, 北京 100076)

摘要: 谱合成是一种将多个不同波长的激光束合成以实现高功率激光输出的方法。鉴于当前半导体激光器外腔谱合成的研究现状, 本文以非离轴、离轴谱合成为线索, 综述了各方案的研究进展; 总结了各种方法的设计思路; 分析了各方案在提升功率与光束质量方面的优势; 并展望了谱合成在提升光束性能方面可能的发展趋势。

关键词: 半导体激光器; 外腔; 谱合成; 非离轴; 离轴

中图分类号: TN248.4; O436 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.03.001

Research progress on spectral beam combining with an external cavity based on off-axis and non-off-axis method

DING Jian^{1,2}, ZHANG Di^{1,3}, HE Tian-jun¹, ZOU Lin¹, NIU Wen-ze¹, YUE Wen-ran¹,
TAN Zhen-kun¹, ZHANG Jun-hu¹, ZHAN Sheng-bao¹

(1. College of Physics and Electrical Engineering, Anqing Normal University, Anqing 246133, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China;
3. 93160 Unit of PLA, Beijing 100076, China)

Abstract: Spectral beam combining (SBC) is a method of combining multiple laser beams of different wavelengths to achieve high-power laser. According to the current research status of SBC with external cavity for semiconductor lasers, the research progress of various schemes by using non-off-axis and off-axis approaches is reviewed firstly, and then the design ideas of different methods are summarized. Further, the advantages of each scheme for raising power and beam quality of combined laser beam are analyzed, and the possible development trends in the future is prospected for improving beam performance.

Keywords: diode lasers; external cavity; spectral beam combining; non-off-axis; off-axis

1 引言

半导体激光器以其高转换效率、小体积和轻量化等优势, 在军事、通信等领域得到了广泛应用^[1-2]。然而, 由于其自身结构限制, 单个激光器的

输出功率较低。为增大输出功率、并确保较好的光束质量, 一种利用多个半导体激光器进行激光合成的方法应运而生, 并逐渐形成相干^[3-4]与谱合成^[5-6]两类方案。由于结构简单、成本较低, 谱合成

基金项目: 安徽省高校拔尖人才项目 (No. gxbjZD2021063) 资助。

作者简介: 丁健 (1981 -), 男, 回族, 硕士, 高级实验师, 主要从事激光技术方面的研究。

通讯作者: 何天浚 (2002 -), 男, 硕士研究生, 主要研究工作是光纤激光技术研究。E-mail: tianjun025566@163.com

收稿日期: 2024-05-30

方案一直是人们的研究热点,并呈现出众多的设计技巧。然而,从目前所占有的资料看,这些设计方案目前大部分还是零散地分散于各文献之中。

鉴于上述情况,本文以非离轴、离轴谱合成为线索,对零散分布于各研究文献中的研究进展进行综述;对其取得成果、以及涉及研究技巧进行归纳与分析;并对其未来发展趋势进行展望。

2 非离轴、离轴谱合成原理

半导体激光器的谱合成通常是一种通过外腔,将多路不同波长的激光、合成为一束更高功率激光的方法。该方法能确保功率提升的同时,光束质量不会出现明显劣化^[7]。其合成示意图如图 1 所示。整个装置包括:半导体激光阵列(DLA),快轴、慢轴准直镜(FAC、SAC),变换透镜(TL),光栅(Grating)以及输出耦合镜(OC)。

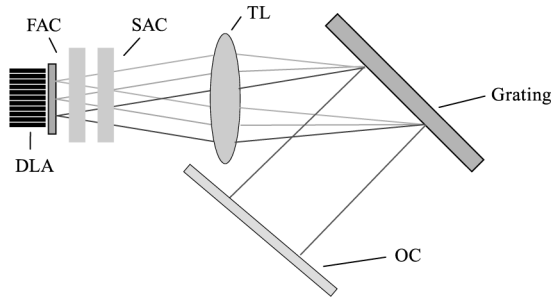


图 1 半导体激光器外腔谱合成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of external cavity spectral beam combining of semiconductor laser

其实现谱合成的原理是:激光阵列与光栅分别位于变换透镜的一倍焦距处。每个阵元发出的光束,经变换透镜变换为具有一定的入射角度,再经光栅衍射进入耦合镜。此时,只有垂直于耦合镜的光束,才能经原路反馈回激光阵元,从而引起激光振荡。依据该原理,将反馈回激光阵元的光束,按照其是否垂直于阵元表面的情形,归纳为非离轴与离轴两种实现途径。对于垂直于激光阵元表面的反馈方式,我们将其命名为非离轴工作方式,如图 2(a)所示。图中,输出耦合镜是一个部分反射镜。其实现谱合成的原理是:由阵元发出的多波长光束,在垂直入射至输出耦合镜后,部分光束沿原路返回,经光栅与变换透镜变换后,反馈光束垂直入射至阵元表面,形成稳定的激光振荡。

研究表明:该方案具有系统稳定、且调节简单的优点^[8]。然而,半导体激光器最强的振荡方向,通

常偏离中心轴方向,由此垂直于阵元表面的反馈光束偏离最强振荡方向,导致激光模式竞争不明显,从而对输出的光束质量产生影响^[9]。针对该问题,研究人员提出了一种以最大强度振荡模式方向、作为半导体激光器反馈入射方向的方案^[10]。由于最大振荡模式方向与中心轴之间存在一个夹角 α_{FB} ,为此称该反馈方式为离轴反馈方式,如图 2(b)所示。图中,高反射镜(HR Mirror)反馈回阵列的光束,其传输路径定义为反馈支路(Feedback branch);而合成光束输出的光路,通常定义为输出支路(Outcoupling branch)。在该合成方案下:以 α_{FB} 角度偏离阵元法线的一部分多波长光束,经高反射镜沿原路反馈回激光阵元,在高反射镜与阵元后端面之间形成激光振荡;而与反馈光束对称方向即 $\alpha_{extract} = \alpha_{FB}$ 方向输出的光束合成输出。

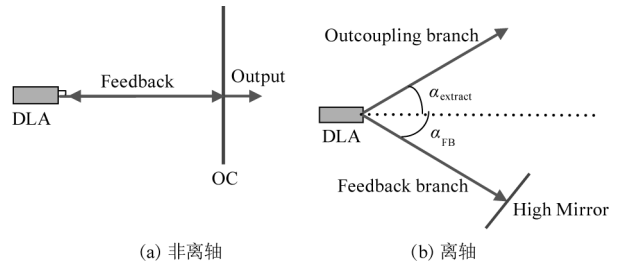


图 2 非离轴、离轴谱合成原理图
Fig. 2 Schematic diagram of non-off-axis and off-axis spectral beam combining principles

3 非离轴谱合成进展

3.1 基于反射式光栅的谱合成

半导体激光器的非离轴谱合成方案,最早由林肯实验室的 V. Daneu 等人提出^[11],如图 3 所示。图中,衍射光栅是一个反射式光栅(Reflective Grating)。实验结果表明,当二极管阵列的数量为 11 阵元时,测得的光束质量 M^2 大约是 20,与单个阵元输出光束的质量相近似。

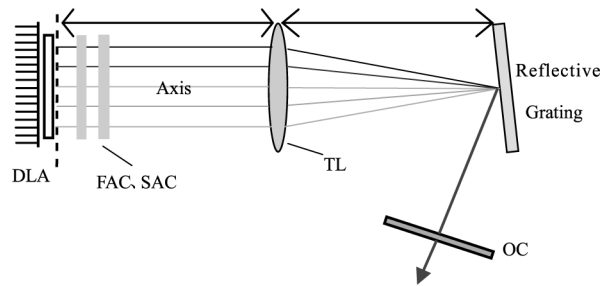


图 3 基于反射式光栅的非离轴谱合成示意图
Fig. 3 Schematic diagram of non-off-axis spectral beam combining based on reflective grating

上述合成方案,虽能既提升激光输出功率,又能确保光束质量劣化不明显,然而,该合成方式必然导致光谱带宽的增大,由此降低光谱亮度。针对该问题,文献[12]提出一种采用光束收束系统(SBS)来缩短光谱带宽、提升光谱亮度的方案,如图4所示。图中,光束收束系统由 $F=100\text{ mm}$ 和 $F'=20\text{ mm}$ 的凸透镜构成。该系统具有5倍光束收束能力,由此可将原光谱宽度缩小五分之一。实验结果表明,在泵浦电流为70 A时,收束后的光谱亮度,相较于收束前提高了4.5倍以上。

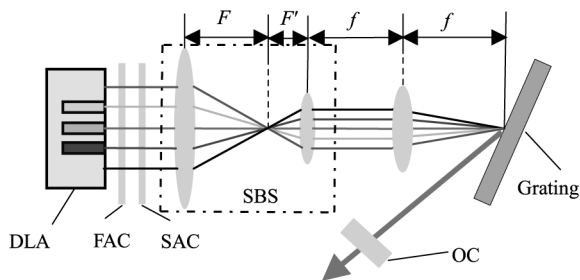


图4 基于SBS提升亮度的谱合成示意图

Fig.4 Schematic diagram of spectral beam combining based on SBS for brightness enhancement

上述方案中,由于反馈光束包含多个波长,当其经过光栅再次衍射时,必然会引起串扰,从而导致光束性能的降低。针对该问题,文献[13]提出了一种将9.6倍的光束收束系统放置于光栅与输出耦合镜之间,来抑制串扰的方案,如图5所示。图中,由于经光栅与外腔镜衍射后,杂散光的反馈光束不垂直于阵元表面,因此该方案利用SBS将杂散光的偏差角放大,使其无法通过外腔反馈放大。实验结果表明,在工作电流为70 A的情况下,该方法可以完全消除旁瓣,并获得优于 $8\text{ mm} \times \text{mrad}$ 的光束质量。

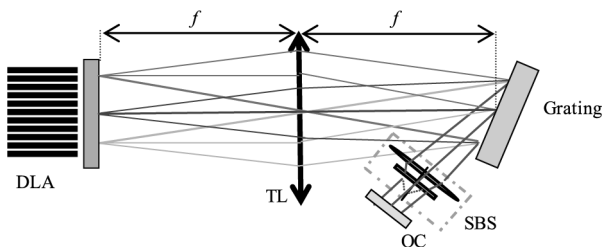


图5 基于SBS消串扰的谱合成示意图

Fig.5 Schematic diagram of spectral beam combining based on SBS for crosstalk elimination

上述系统结构,由于视场较小,导致谱合成的阵元数量受到限制。针对该问题,文献[14]提出了一种利用偏振耦合技术,将两路外腔谱合成输出的光

束,经过偏振片转化为S、P偏振光后,由偏振分束器合成一路光束的方案,如图6所示。图中,来自SBC1的合成光束,被高反射镜直接反射至偏振合束器(PBC),其中P偏振光束直接透射过PBS。SBC2中光束通过半波片(HWP),旋转 90° 形成S偏振,首先被高反射镜完全反射,然后被PBS反射。来自两个外腔的两束输出光束由此被PBC进行合成。实验结果表明,在工作电流为70.3 A时,可得到 $252\text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的亮度,并测得快慢轴光束质量 M^2 分别为10.27和13.55。实验中测得的光束质量低于理论预期值,主要归因于入射角、衍射角相对于利特罗角存在偏差。

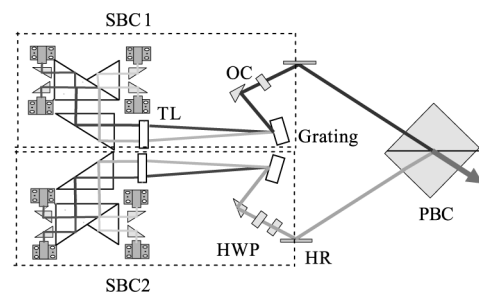


图6 将PBC与SBC相结合的谱合成示意图

Fig.6 Schematic diagram of combining PBC and SBC for spectrum synthesis

3.2 基于透射式光栅的谱合成

上述反射式光栅外腔谱合成方案,其入射角可能偏离光栅的利特罗角;此外,入射、衍射光束在光栅同一侧的出现,还限制合成阵元的数量。这两方面的因素,必然导致合成功率受限^[15]。针对上述问题,研究人员提出了一种采用透射式光栅(Transmitted Grating)的外腔谱合成方案^[16],如图7所示。图中,光束的入射、衍射端分别位于透射光栅的两侧,由此增大了衍射光束与入射光束之间的夹角,从而使得合成阵元的数量进一步增加。此外,该方案还可保证阵元入射角等于利特罗角,从而使得光栅衍射效率始终处于最高状态,由此提高了激光阵元的光电转换效率。实验结果表明:当工作电流为72.5 A时,对19个阵元的激光器进行谱合成,测得其光电转换效率为45%,当工作电流调节到60 A时,整体 M^2 为10.9。

二极管激光芯片的封装,由于工艺原因,“smile”效应不可避免。“smile”效应的存在,增大了由快轴准直镜引入的离轴像差。该像差必然会影

强度明显降低。为确保激光振荡,输出耦合镜通常采用较高的反射率,由此降低了合成光束的输出功率,进而影响光电转换效率。针对上述问题,文献[17]提出了一种通过在变换透镜与激光阵列之间,加入光束整形系统(BTS),从而矫正“smile”效应的方案,如图8所示。图中,BTS是一个将激光的不对称远场分布转换为近似对称的光学元件。该元件将来自激光器的激光束旋转90°,从而使得垂直方向“smile”效应引起的位置误差,部分转换到水平方向,由此减小了“smile”效应。由于“smile”效应的改善,输出耦合镜的反射率可大为降低。实验结果表明:当输出耦合镜反射率仅为4%、工作电流为65 A时,测得的光电转换效率达到51%,该结果对比于原实验方案得到明显的提高。

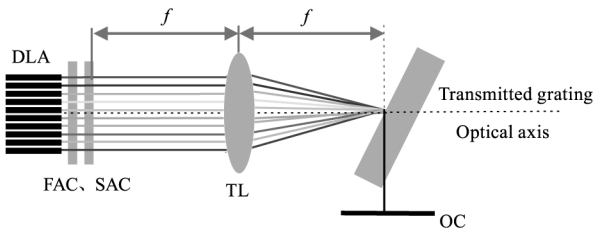


图7 基于透射式光栅的非离轴谱合成示意图
Fig. 7 Schematic diagram of non-off-axis spectral beam combining based on a transmission grating

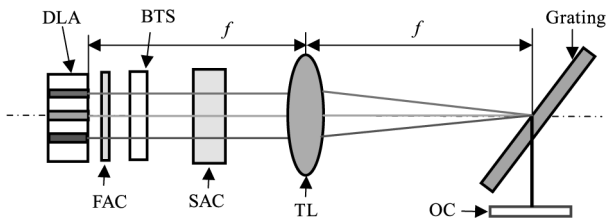


图8 基于BTS矫正“smile”效应的谱合成示意图
Fig. 8 Schematic diagram of spectral beam combining using BTS to correct the “smile” effect

上述实验表明:输出耦合镜的反射率对合成功率、光电转换效率具有较大影响。为进一步提高输出功率和转换效率,TeraDiode公司提出了一种无输出耦合镜的外腔谱合成思路^[18],如图9所示。图中,从半导体激光器发出的光束,通过透镜A叠加到衍射光栅上,经光栅衍射的1级衍射光作为输出光束,0级光束经过透镜B后,在反射镜A处形成光源实像。该实像被反射镜A反射后沿原路返回,经变换透镜B再次聚焦至光栅上。此时,一部分反馈光经光栅透射回激光器实现波长锁定,另一部分被反射镜B反射并再次经光栅衍射回到反射镜A,其

经光栅透过的部分作为输出光输出。由此可以看出:该方案中,输出光束包含了透射、衍射两部分光束。仿真结果显示,该设计系统可获得大于51%的光电转换率。依据该设计方案,文献进行了实验验证^[19],结果表明:当工作电流为70 A时,测得的输出功率为578 W;计算的光电转换率为46.5%。对比于其他谱合成的设计系统,该系统的输出功率和光电转换率均有提高。

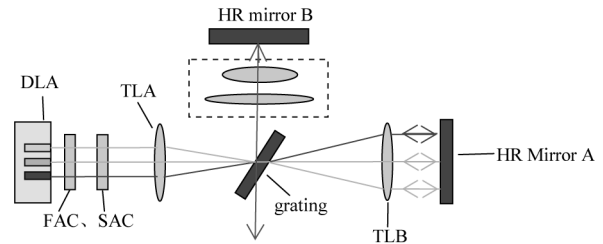


图9 开环式非离轴谱合成示意图
Fig. 9 Schematic diagram of open-loop non-off-axis spectral beam combining

上述设计方案虽能提升合成功率率和光电转换效率,但输出光束质量问题依然没有得到解决。为进一步改善光束质量,文献[20]针对影响光束质量的“smile”效应问题,开展了较为深入的研究,并设计出一种在光路中插入双分离式FAC的改进方案,如图10所示。图中,双分离式FAC结构分为两部分,这两部分依据“smile”效应的结果,通过调整两部分FAC之间的夹角,从而精确校正“smile”效应的抛物线形状;此外,每部分FAC还对其对应阵元的发出光束进行准直,由此减小发散角。仿真结果表明,该方案对“smile”效应进行有效校正。

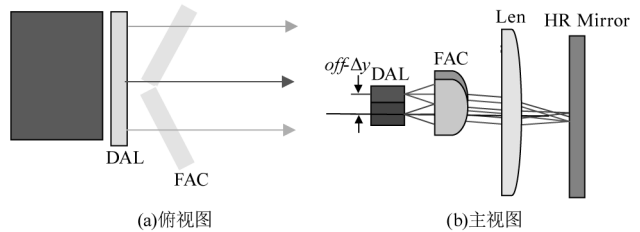


图10 基于双分离式FAC校正“smile”效应的谱合成示意图

为进一步提高合成光束亮度、并提升光束质量,文献[21]在总结上述合成功率、光束质量提升方案的基础上,提出一种双波分复用外腔结构的合成方案,如图11所示。图中,两个波分复用腔(WD-MEC1、WD-MEC2)分别放置在阵元的前后侧。WD-

MEC1 利用全反射镜的强反馈将三个阵元锁定在特定波长,并加入了由两个圆柱透镜(CL)组成的图像中继系统,以减少反馈的耦合损耗。同时,WDMEC2 在不影响光束质量的前提下,将三个阵元发出的光束进行合成。由于 WDMEC2 中没有输出耦合镜,因此减少了输出功率和光电转换效率的损失。实验结果表明,测得慢轴光束质量为 $M_x^2 = 5.382$,快轴光束质量为 $M_y^2 = 1.469$,与前文实验方案相比,光束质量得到了一定改善。此外,实验成功获得了 $100 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的光束亮度,对比于没有外腔的激光器,其亮度提升 3 倍以上。

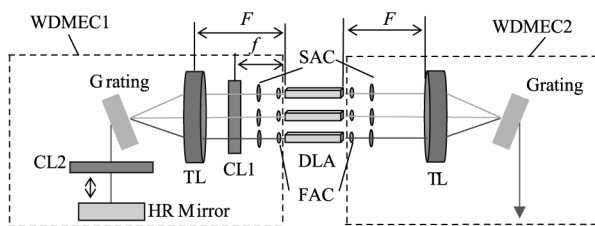


图 11 双波分复用外腔结构示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the dual-wavelength multiplexing external cavity structure

4 离轴谱合成进展

虽然,非离轴谱合成方案具有系统稳定、调节简单等优点。但由于反馈回阵元表面的光束,偏离激光器的最强振荡方向,导致激光模式竞争不明显,从而对输出的光束质量产生影响。因此,一种可以选择最强振荡方向的光束进行反馈的离轴反馈方案应运而生。

4.1 非对称式离轴谱合成

依据图 2(b) 的反馈原理,文献[10]设计了一种非对称式离轴谱合成结构。实验结果表明,在驱动电流为 2.5 A 的情况下,获得 400 mW 的输出功率,测得光束质量因子约为 $M^2 = 1.03 \pm 0.06$,由 M^2 可知,该系统的合成光束已接近衍射极限。然而,由于高反射镜的使用,当输出光束的所有模式反馈回激光阵元时,必然会导致合成光束性能的下降。针对该问题,文献[22]提出了一种采用光栅代替高反射镜的实验方案,如图 12 所示。图中,反馈支路由小尺寸 FAC、HWP 与衍射光栅构成,其实现方法为:当光束以偏离主光轴 2.8° 的方向通过 FAC 后,再经 HWP 旋转 90° 射入光栅。由于 FAC 尺寸较小,导致光束经光栅衍射后,只有小部分频谱能通过 FAC 反馈回阵元,从而实现激光振荡。实验结果表明,当工

作电流为 2.8 A 时,测得慢轴方向上光束质量为 $M^2 = 1.3$,与无外部腔的激光器相比,慢轴光束质量提升了 44 倍。

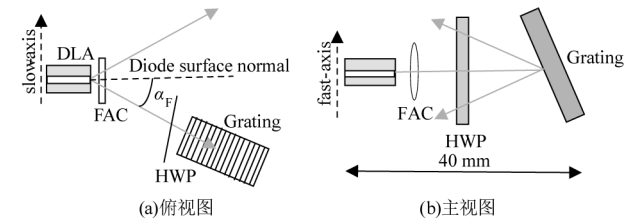


图 12 基于光栅实现模式选择的离轴谱合成示意图

Fig. 12 Schematic diagram of grating-based mode-selective off-axis spectral beam combining

基于上述两种实验结构,文献[23]提出了一种在反馈支路上利用高反射镜、光栅实现反馈的双光栅离轴谱合成方案,如图 13 所示。图中,反馈支路由光栅、高反射镜与狭缝光阑等光学元件组成,其实现方法为:由阵元发出的光束,经光栅衍射后,只有满足光栅色散关系的光束才能通过狭缝光阑,并被高反射镜反馈回阵元,狭缝光阑(Slit aperture)严格确保入射光束与输出耦合镜垂直。实验结果表明,当工作电流为 40 A 时,获得大于 10 W 的输出功率,测得在快轴方向光束质量 M^2 小于 3,慢轴方向光束质量 M^2 小于 14。

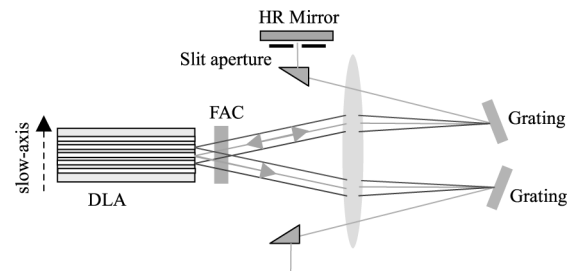


图 13 双光栅结构的谱合成示意图

Fig. 13 Schematic diagram of spectral beam combining with a double-grating structure

上述合成系统,由于使用的元器件较多,必然存在光路对准困难、能量转换效率低等问题。为此,文献[24]提出了一种开环式谱合成方案,如图 14 所示。图中,高反射镜通过调整其沿慢轴方向的位置,由此选取出最强振荡方向的光束反馈回阵元。由于该实验设计取消了输出耦合镜和滤波器,从而有效降低了损耗。实验结果表明,当工作电流为 30 A 时,测得快、慢轴光束质量 M^2 分别为 2.31 和 3.76,此外,该方案可实现 41% 的能量转换效率。

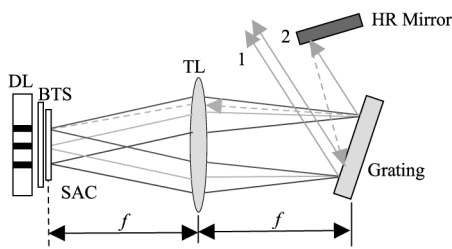


图 14 开环式离轴光谱合成示意图
Fig. 14 Schematic diagram of open-loop off-axis spectral beam combining

为获得更好的光斑亮度,文献[25]基于上述开环式结构,提出了一种将开环式谱合成与束腰分裂偏振组合(BSPC)相结合的实验方案,图 15 所示。图中,开环式谱合成所获得的输出光束,被棱镜(prism)分为两束,再利用 PBC 技术将其重新耦合。实验结果表明,当工作电流为 40A 时,测得输出功率为 16.2 W;在快、慢轴上光束质量 M^2 为 1.79×3.9 ;亮度为 $263 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$,对比于未使用该方法的离轴谱合成方案,亮度提高了 136%。

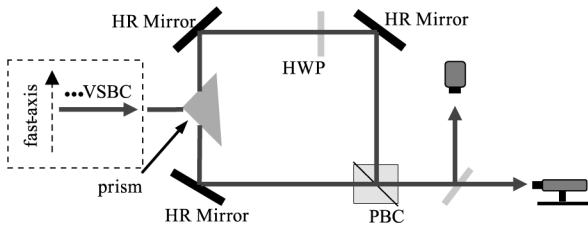


图 15 PBC 与 SBC 相结合的离轴谱合成示意图
Fig. 15 Schematic diagram of off-axis spectrum synthesis by combining PBC and SBC

4.2 对称式离轴谱合成

前述已经提到,由于高反射镜的使用,当输出光束的所有模式反馈回激光阵元时,必然会导致合成光束性能的下降^[22]。为此,文献[26]提出了一种对称式的离轴谱合成方案,如图 16 所示。图中,一个边缘锋利的镀金镜片(Gold-coated Mirror)和一个空间滤波器(Filter)被放置于光栅与输出耦合镜之间,由激光阵列发出的光束经准直镜准直后射入光栅,由于光束的不同模式以不同角度入射光栅,此时,若以光栅作为反射镜,则各光束将在远场分离;而当光栅衍射时,这些不同光束的部分模式将有可能同向传输。在这种情况下,调整镀金镜和滤波器,从而将部分模式中特定的几个模式反馈回激光器,由此实现模式选择。实验结果表明:当工作电流为 2.2 A 时,测得光束质量 M^2 为 2.4,对比于无离轴反

馈的外腔谱合成,光束质量提升四倍。

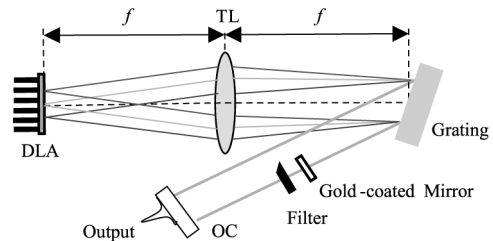


图 16 对称式离轴谱合成示意图
Fig. 16 Schematic diagram of symmetric off-axis spectral beam combining

上述实验,虽然通过反馈支路,能实现对特定振荡模式的选择,从而为提升合成光束质量打下基础。然而,由于增益和模式轮廓之间的几何不匹配,必然会致使光束质量退化。为此,文献[27]提出了一种在光路中加入两个空间滤波器(SFs)的实验方案,如图 17 所示。图中,两个分离的空间滤波器被放置在输出耦合镜前,由于高阶侧模位于横向远场模式的边缘,因此,通过调整两个空间滤波器之间的角度,则可将高阶侧模过滤,从而使得慢轴方向的光束质量达到最佳值,并形成稳定振荡。实验结果表明:当工作电流为 50 A 时,该方案不仅保持了与传统 SBC 相当的输出功率,而且产生的慢轴光束质量对比于前方案提升了 17%。

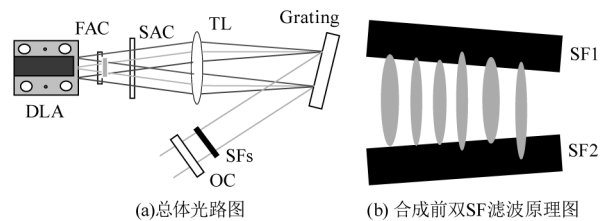


图 17 双 SF 的谱合成示意图

Fig. 17 Schematic diagram of spectral beam combining with dual SF

为进一步改善光束质量、并提高合成光束亮度, Sun 等人在总结上述文献优势的基础上,提出一种扩束系统(BES) + 条形反射镜(SM) + 空间滤波器组合的改进方案^[28],如图 18 所示。图中,BES 其作用是在慢轴上对光束进行扩束,由此使得光学模式更容易被选择;SM 其功能为选择性地将侧向模式耦合回阵列;SF 其效果是过滤高阶横向模式,防止其射入 OC 后反馈回阵元。实验结果表明,在工作电流为 55A 时,测得的慢轴光束质量为 4.4,光束亮度达到 $190 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。与单个激光器相比,光束质量提高了大约三到四倍,而光束亮度则比之前的报告提高了大约 2.4 倍。

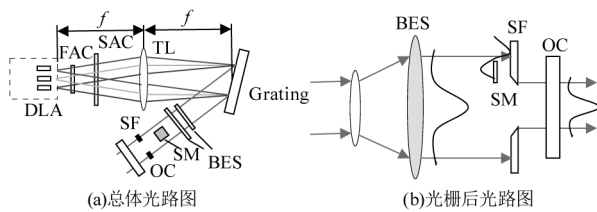


图 18 基于 BES、SM 实现模式选择的谱合成示意图
Fig. 18 Schematic diagram of spectral beam combining for mode selection based on BES and SM

5 总结与展望

基于当前半导体激光器外腔谱合成的研究现状,本文以非离轴、离轴谱合成为线索,综述了谱合成的最新进展。针对非离轴谱合成方案中串扰、“smile”效应等问题,归纳了这些文献实现抑制串扰、减小“smile”效应的设计思路、与其取得的阶段性成果。针对离轴谱合成方案中存在的光束质量退化等问题,总结了各文献提高光束质量的设计构思与技巧,并展示了在这些设计构思下、光束质量改善的效果。依据非离轴与离轴谱合成所取得的阶段性成果,可以预测:随着新技术、新材料、新工艺的不断涌现,光栅的性能也会随之提高,由此使得谱合成技术向获得更高功率、光束质量激光的方向发展,并在未来拥有更广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Zhang Q S, Wu Z, Cai W, et al. Spectral-combined beam characteristics based on external cavity feedback diode laser array [J]. *Optical Engineering*, 2023, 62(5): 056101–056101.
- [2] Marie Z, Kate S, M. D B. Low-cost laser detection system with a 360-deg horizontal field of view [J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(2): 027106.
- [3] Li X, Zhao H, Peng C, et al. Improvement of four-beam coherent beam combining system for high-power lasers [J]. *Optics Communications*, 2024, 558–130356.
- [4] Mourikis C, Sahn A, Hildenstein P, et al. Miniaturizing a coherent beam combining system into a compact laser diode module [J]. *Applied Optics*, 2024, 63(9): 2212–2217.
- [5] Fei L, Fanglin C, Maohua J, et al. Modulated spectral beam combining of diode laser array stack in an external cavity for the enhancement of beam quality [J]. *Journal of Optics*, 2023, 52(4): 1775–1781.
- [6] Zhang W Q, Cao P, Ting F, et al. High-efficiency spectral beam combining of an individual laser diode bar with polarization multiplexing [J]. *Optics Letters*, 2023, 48(4): 1080–1083.
- [7] Chann B, et al. Near-diffraction-limited diode laser arrays by wavelength beam combining [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(16): 2104–6.
- [8] Meng Huicheng, Tan Hao, Li Jianmin, et al. Development of spectral beam combining of diode laser by grating and external cavity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(2): 39–46. (in Chinese)
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): 39–46.
- [9] Pillai R M R, Garmire E M. Paraxial-misalignment insensitive external-cavity semiconductor-laser array emitting near-diffraction limited single-lobed beam [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1996, 32(6): 996–1008.
- [10] Raab V, Menzel R. External resonator design for high-power laser diodes that yields 400 mW of TEM₀₀ power [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(3): 167–169.
- [11] Daneu V, Sanchez A, Fan T Y, et al. Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(6): 405–407.
- [12] Meng H C, Ruan X, Wang Z, et al. Spectral bandwidth narrowing of high brightness spectral beam combining diode laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 1–6.
- [13] Lu F, Chen F L, Jiang M H, et al. Modulated spectral beam combining of diode laser array stack in an external cavity for the enhancement of beam quality [J]. *Journal of Optics*, 2023, 52(4): 1775–1781.
- [14] Lin X C, Lin G Y, Zhao P F, et al. Generation of high brightness diode laser by using spectral and polarization beam combination [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 116: 219–223.
- [15] Peng Hangyu, Zhang Jun, FU Xihong, et al. High-efficiency external cavity spectral-beam-combined diode laser array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(7): 84–88. (in Chinese)
彭航宇, 张俊, 付喜宏, 等. 高效外腔光谱合束半导体激光器阵列 [J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 84–88.
- [16] Zhang J, Peng H Y, Fu X H, et al. CW 50 W/M² = 10.9 diode laser source by spectral beam combining based on a transmission grating [J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 3627–3632.
- [17] 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.
- [18] Huang Robin K, Chann B, Burgess J, et al. Tera diode's high brightness semiconductor lasers [C]//Component & Packing for Laser System II, International Society for Optics and Photonics, 2016.
- [19] Sun Sujuan, Tan Hao, Meng Huichen, et al. Coupler free grating external cavity spectral beam combining of diode laser stacks [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10):45–51. (in Chinese)
孙舒娟, 谭昊, 孟慧成, 等. 半导体激光器叠阵无输出耦合镜光栅外腔光谱合束 [J]. 中国激光, 2018, 45(10):45–51.
- [20] Zhuang J, Kailin S, Liu Y H, et al. Correction of smile effect in external cavity spectral beam combining system without output coupler for diode laser array [C]//Advanced Fiber Laser Conference 21 March 2023, Changsha, China; SPIE 12595:108–118.
- [21] Zhang W Q, Liu W Z, Wang J, et al. High-brightness and high-efficiency diode laser module based on double wavelength division multiplexing external cavities [J]. Optics Letters, 2022, 47(19):5012–5015.
- [22] Jechow A, Raab V, Menzel R, et al. 1 W tunable near diffraction limited light from a broad area laser diode in an external cavity with a line width of 1.7 MHz [J]. Optics Communications, 2007, 277(1):161–165.
- [23] Jechow A, Raab V, Menzel R. High cw power using an external cavity for spectral beam combining of diode laser-bar emission [J]. Applied Optics, 2006, 45(15):3545–3547.
- [24] Zhao Y F, Sun F Y, Tong C Z, et al. Going beyond the beam quality limit of spectral beam combining of diode lasers in a V-shaped external cavity [J]. Optics Express, 2018, 26(11):14058–14065.
- [25] Zhao Y F, Tong C Z, Wei Z P, et al. High brightness diode laser based on V-shaped external cavity and beam-waist splitting polarization combining [J]. Applied Sciences, 2023, 13(4):2125.
- [26] Jensen O B, Thestrup B, Andersen P E, et al. Near-diffraction-limited segmented broad area diode laser based on off-axis spectral beam combining [J]. Applied Physics B, 2006, 83:225–228.
- [27] Sun F Y, Zhao Y F, Shu S L, et al. High beam quality broad-area diode lasers by spectral beam combining with double filters [J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(1):011401.
- [28] Sun F Y, Shu S L, Zhao Y F, et al. High-brightness diode lasers obtained via off-axis spectral beam combining with selective feedback [J]. Optics Express, 2018, 26(17):21813–21818.