

激光与光电子学进展

半导体激光器相干合束技术(特邀)

张超^{1,2}, 林学春^{1,2**}, 赵鹏飞^{1*}, 董智勇¹, 汪楠¹, 杨盈莹¹, 于海娟^{1,2}¹中国科学院半导体研究所全固态光源实验室, 北京 100083;²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 101407

摘要 大功率高光束质量半导体激光器在激光加工、激光通信、科学研究等方面有着广泛的应用,提高半导体激光器的功率和光束质量一直都是国际的研究前沿和学科热点。合束技术是提高半导体激光器输出功率最简单有效的方法。非相干合束技术提高输出功率往往以损失空间、偏振或光谱特性为代价,在对光束特性要求不高的场合应用较为成熟。相干合束技术在提高半导体激光器输出功率的同时还能提高光束质量、压窄频谱宽度,是高亮度窄线宽半导体激光技术发展的重要方向。本文简述了相干合束技术的原理及要求,从锁相技术出发,综述了半导体激光器相干合束技术近年来的发展现状,总结了主动锁相和被动锁相的优缺点,主动锁相技术采用主振荡放大结构通过相位负反馈技术实现锁相,在合束单元数量上具有优势,能获得大功率相干输出,但结构较为复杂。被动锁相技术结构简单,一般通过外腔的衍射效应或者共腔技术实现单元间的相位锁定,具备自组织锁相特点,但不易获得高功率输出。最后对半导体激光器相干合束技术的未来发展进行了展望。

关键词 相干合束; 半导体激光器; 锁相; 高光束质量; 高功率

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232659

Coherent Beam Combining Technology for Diode Lasers (Invited)

Zhang Chao^{1,2}, Lin Xuechun^{1,2**}, Zhao Pengfei^{1*}, Dong Zhiyong¹, Wang Nan¹,
Yang Yingying¹, Yu Haijuan^{1,2}¹Laboratory of All-Solid-State Light Sources, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100083, China;²College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 101407, China

Abstract High-power diode lasers with excellent beam quality are used in various applications in laser processing, laser communication, scientific research, and other fields. Improving the output power and beam quality of diode lasers remains a primary focus of international research and a hot topic in the field. Among numerous strategies to augment diode laser output power, beam combining technology stands out as the simplest and most effective. Incoherent beam combination often increases output power at the expense of decreasing spatial, polarization, or spectral characteristics, making it suitable for applications with less stringent beam requirements. Conversely, coherent beam combination not only increases the output power of diode lasers but also improves the beam quality and narrows the spectral linewidth, presenting an important direction for advancing the development of high-brightness, narrow linewidth diode laser technology. This article concisely delineates the principles and requirements of coherent beam combinations. Starting with phase locking technology, this paper presents a comprehensive review of recent developments in coherent beam combining technology for diode lasers. The advantages and drawbacks of active and passive phase locking are summarized. Active phase locking technology, which employs a master oscillator power amplifier structure and implements a phase-negative feedback, has advantage in the number of combined units. This enables high-power coherent output, even though the technology has a structurally complex nature. Meanwhile, passive phase locking technology, characterized by a simple structure, typically achieves phase locking among units through diffraction effects in an external or a common cavity, demonstrating its self-organizing phase locking characteristics; however, the technology is less effective in realizing high-power output. Finally, the future development of coherent beam combining technology for diode lasers is discussed.

Key words coherent beam combining; diode lasers; phase locking; high beam quality; high power

收稿日期: 2023-12-12; 修回日期: 2023-12-26; 录用日期: 2023-12-28; 网络首发日期: 2023-12-31

基金项目: 国家自然科学基金 (62175232, 62175230, 62275244, 62225507)

通信作者: *pfzhao@semi.ac.cn, **xclin@semi.ac.cn

1 引言

半导体激光器是近些年来发展最快的激光器之一,具有体积小、寿命长、转化效率高、可靠性好和成本低等优点,在激光加工、通信和科学研究等方面有着重要作用。半导体激光器输出功率通常受到热翻转和光学灾变损伤(COD)限制^[1],为了提高输出功率,通常采用高功率密度材料或者对腔面进行特殊处理来提高激光器的损伤阈值^[2-3]。在提高光束质量方面,主要方法是尽可能减小慢轴方向的条宽以形成窄脊形结构,目前半导体激光器的条宽可以达到1~5 μm。在单孔径发射情况下与光纤激光器和全固态激光器相比,半导体激光器的输出功率还远远不足。

激光合束技术是提高半导体激光器功率最有效的方法,合束后的半导体激光器功率高、光束质量好,能达到商用全固态激光器的输出水平^[4],实现“小体积大功率”。美国国防部立项研究将100 kW的直接半导体激光光源用作小型激光武器,德国也将大功率半导体激光器列入国家重大发展计划,以制备出能直接用于材料加工的半导体激光器^[5-7]。激光合束技术是提高半导体激光输出功率最简单有效的方法。根据合束单元的相干性,可分为非相干合束和相干合束技术。非相干合束技术不需要控制发光单元的相位,输出功率的提高往往以空间、偏振和光谱特性变差为代价,技术难度小,发展相对成熟,本文不做赘述。相干合束技术通过控制多个单元激光器之间的相位,使得输出激光在目标位置形成稳定的相长干涉,从而提高能量集中度,理论上不仅能提高输出功率,还能提高光束质量、压窄光谱宽度。相干合束系统要求各单元激光器的相位、偏振态和频率高度一致^[8],在确定增益介质和泵浦源的情况下,通过精确控制各单元输出光束的相位实现锁相是最为关键的部分。美国麻省理工学院(MIT)林肯实验室^[9]利用主动锁相系统对11个具有21个发光单元的半导体激光bar条进行相干合束,合束成功的单元数达到218个,是目前半导体激光器主动锁相的最多单元个数。美国Oak Ridge国家实验室^[10]将两个体布拉格光栅(VBG)应用在被动锁相系统中,相干合束后的光束光谱线宽(FWHM)达到0.07 nm,接近

甚至优于Nd:YAG固体激光器。如今,美国MIT、Oak Ridge国家实验室、法国Fabry实验室、Thales研究所、德国费迪南德-布劳恩(FBH)研究所、新加坡南洋理工大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、北京工业大学等诸多单位都对半导体激光器的相干合束技术进行了深入研究。本文将从相干合束技术的原理出发,介绍近几十年来半导体激光器相干合束的研究进展及方法优缺,并对未来可能的发展趋势进行展望。

2 相干合束原理

两列频率相同、相位差恒定、振动方向一致的电磁波在空间的交叠区域内会产生相干叠加,两列光束叠加后产生的干涉光强分布公式为

$$I = \langle E^2 \rangle = \langle (E_1 + E_2)^2 \rangle = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta, \quad (1)$$

式中: E_1 、 E_2 分别是参与叠加的两束激光的振幅; δ 是两束激光的相位差。当 $\delta = 2m\pi$ (m 为整数),且 $I_1 = I_2 = I_0$ 时,相干叠加后的总光强为 $I = 4I_0$, I_0 为单光束光强。

同理, N 个激光单元的相干合束,在远场叠加区域的复振幅是各束激光在远场所产生振幅的矢量和,即

$$E(x, y) = \sum_{n=1}^N E_n(x, y). \quad (2)$$

在振幅相同且满足相干叠加条件的情况下, N 束激光合束后在远场单瓣输出的光强为单束激光的 $N \times N$ 倍。相干合束是光场的振幅矢量叠加,非相干合束是光强的标量叠加,在理想状态下,相干合束系统出射光光强是非相干合束系统中的 N 倍^[11]。

相干合束系统的输出方式主要分为平铺孔径(TA)输出和填充孔径(FA)输出^[12],其合束方式如图1所示。在TA系统中,激光在远场发生干涉,这种方式可以视为人工合成平面波,因此为了获得最大的远场功率密度,激光单元之间要尽可能排列密集^[13],即占空比要高。在FA系统中,激光光束在近场发生干涉,其合成方式可以看作反向放置的分束器,因此参与合成的每束激光都需要有合适的相位、振幅和偏振关系,才能达到较高的合成效率。TA系统对光束的特性要求没有FA系统严格,因此在合成的单元数量上

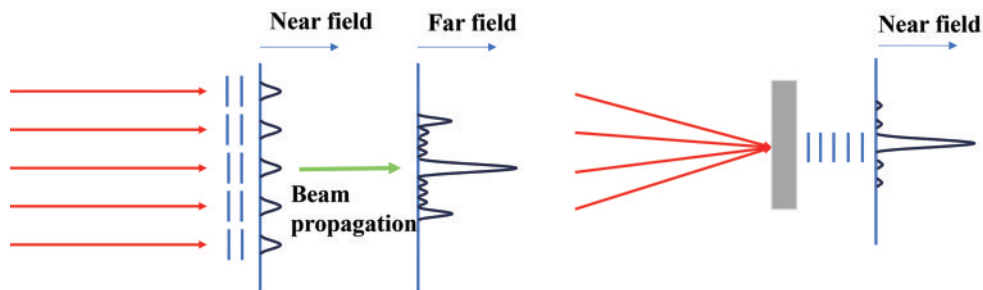


图1 (a)平铺孔径输出和(b)填充孔径输出^[12]

Fig. 1 (a) Tiled aperture output and (b) filled aperture output^[12]

更有优势,但激光单元的占空比无法达到 1,因此 TA 系统的光束会有旁瓣出现^[14],对 TA 系统的研究着眼于降低其旁瓣能量,增高中心波瓣能量。FA 系统的功率受限于耦合系统,对光束的特性要求更高,但系统的合束效率高,且光束质量更好。

通常相干合束的效果主要使用功率合成效率 η 和远场干涉条纹对比度 V 来衡量。 η 体现光束合成中的功率变化, V 体现相干合束的远场干涉效果,但二者均不能直观评价光束合成后的能量集中程度,为了体现每单位面积和单位立体角内的激光功率,直接反映聚焦点的激光功率密度,定义亮度 B ^[15] 为

$$B = \frac{CP}{\lambda^2 (M^2)^2}, \quad (3)$$

式中: P 是输出功率; C 是由光束形状定义的常数(例如高斯光束中, $C = 1$); λ 是波长; M^2 是光束质量因子。在半导体激光器中光束质量一般采用光参量积 Q 来评价,

$$Q = \omega_0 \cdot \frac{\theta}{2}, \quad (4)$$

式中: ω_0 为束腰半径; θ 为远场发散角。 Q 值越小,则半导体激光器的光束质量越好。半导体激光器的亮度^[16]可以定义为

$$B = \frac{P}{\pi^2 \cdot Q_x \cdot Q_y}, \quad (5)$$

式中: Q_x 、 Q_y 分别表示慢轴方向和快轴方向上的光束质量。

评价相干合束系统优劣的另一个参数是斯特列尔比 (SR),其定义为实际的轴上远场峰值光强与相同功率、相位分布均匀的理想光束在轴上的峰值光强的比值。半导体激光器的光斑为椭圆形,理想光斑与实际光斑之间由于热效应、像差等因素,实际功率与理想功率不同,SR 是实际出光过程中各种因素所造成的能

量损失的总体体现。SR 对相对相位控制、相对振幅控制、相对偏振控制、相对元件波束指向中的误差,以及平铺孔径系统中小于单位的填充因子(或者填充孔径系统中的小于理想的近场重叠)等多种因素反应敏感。优秀的相干合束系统最困难的部分在于控制相位,为了维持 SR 恒定, N 个激光单元间的相位差均方根在连续统一条件下应为 $N^{-1/2}$ 量级^[17-18],即参与合束的单元数越多,它们的相位差均方根需要越小。在振幅控制方面,为了提高 SR 的值,孔径光阑处的振幅不均匀性应该尽可能小。在相位锁定时,SR 的数值可以反映为孔径光阑处的平均振幅的平方与振幅平方的平均值的比值^[14]。在两种输出方式的系统中,FA 系统中光束合成时的波前误差和 TA 系统中光束的远场指向也会导致 SR 的变化。通常,将 SR 值的 80% 视为衍射极限,需要对系统中的各项因素进行严格控制,确保各单元光束同相,以达到近衍射极限输出。

3 半导体激光器相干合束技术

相干合束的关键要求是激光必须在空间和时间上相互相干,实现最大的组合效率。根据合束系统对单元相位的控制方式,可将锁相技术分为主动锁相和被动锁相。被动锁相技术是通过外腔反馈和单元间的能量耦合实现相位的自组织锁定,而主动锁相技术是通过检测装置对各单元输出光束进行实时检测,再通过相位调制器控制各单元相位实现相位锁定。半导体激光器相干合束技术的研究热潮在 20 世纪末期达到了顶峰,诸多成果不断涌现^[19-28],合成的光束单元最高达到了 900 路^[29],本节将重点介绍研究热潮之后的锁相技术及其发展状况。

3.1 基于主动锁相的相干合束技术

主动锁相系统由相位检测和相位补偿两部分组成,其原理如图 2 所示,相位检测主要依赖于反馈检测

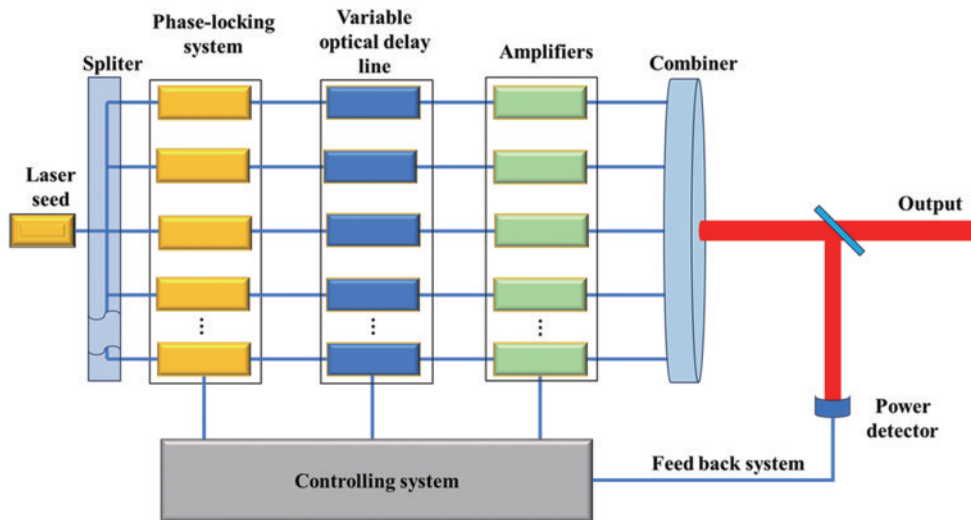


图 2 主动锁相系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of active phase locking system

系统,相位调制则是由电光调制器、液晶调制器和压电制动器实现。主振荡功率放大(MOPA)结构是主动锁相系统中最常用的结构,主振荡器一般采用相干性好的低功率种子源,功率放大是指将种子光分束后通过激光放大器进行功率放大,然后从放大后的光束分出少量作为信号光送入相位检测装置进行检测,再根据检测结果通过相位控制器对各单元相位进行实时调制,使各路激光单元相位一致,在输出端平面上发生干涉,实现相干叠加。在半导体激光器中,可通过控制输入电流的大小实现相位调制^[30]。由于半导体放大器对的电流增益效率不完全一致,因此改变电流所造成的相位响应也不是线性的,在系统建立前期需要将一个激光单元作为对照,不断改变电流以取得驱动电流与相位之间的函数关系,比较典型的值是每 100 mA 的驱动电流变化,会引起 2π 的相位变化,由电流造成的输出功率差异并不会影响振幅的合成效率^[9]。

在半导体激光器主动锁相系统中,控制单元相位的常用方法是随机并行梯度下降(SPGD)算法和外差法,通过检测光束远场中心波瓣能量,再由控制器调整驱动电流,减少相位差。外差法的特点是利用外差光学锁相环(OPLL)来控制半导体激光器的相位,其主要结构如图 3 所示。在外差法中,主激光器作为相位参考,次级激光器输出的光场与主激光器的光场在光电探测器中混合,产生的相位误差经放大后被射频

(RF)偏置信号进行混合并降频,滤波器过滤混合光信号中的降频变换误差信号后反馈回次级激光器,从而完成锁相闭环^[31-32]。半导体激光器的线宽较大,因此需要宽带反馈电子器件和较小的反馈环路延迟,随着半导体激光器的设计和工艺进步,窄线宽半导体激光器制造工艺成熟^[33],研究人员应用外差法成功对分布式反馈半导体激光器(DFB)进行锁相,将两个次级激光器与主激光器进行相干合成^[30]。SPGD算法是一种自适应光学校正,通过对每个激光单元的驱动电流施加小的抖动,从而估计评价函数的斜率和梯度^[34-35],在评价函数达到最大值时,系统中的相位达到一致,实现锁相。该技术受环境扰动的影响较小,能够对激光单元的相位进行实时反馈,但工作带宽有限,只适用于小功率和路数较少的系统。

2009年,美国MIT林肯实验室^[36]将种子光分成两束,利用平板耦合光波导放大器(SCOWA)进行放大,光束在马赫-曾德尔(M-Z)复合腔中进行相干合成,通过控制电流的方法来调整相位,在电流为 1.08 A 时,输出功率达到 4.9 W,如果能对阵列中的每个激光单元的电流进行单独控制,则相位能够 $< \lambda/10$ 。2011年,Redmond等^[9]在装置中接入 SPGD 控制器,其结构如图 4 所示,种子光被衍射光学元件(DOE)分成多个光束,经过 SCOWA 放大后再进行合束,利用 SPGD 算法对 11 个具有 21 个激光单元的半导体激光 bar 条的相位进行控制,控制器能对 231 个单元上的驱动电流施加抖动频率来完成对电流的校正以减小各单元的相位差,最终实现了 218 个单元激光相干合成,连续输出功率达到 38.5 W。但该装置中的光束经过微透镜后填充因子较低,远场产生旁瓣,且半导体解理面所形成的 Fabry-Perot 腔引入模式竞争,限制了对驱动电流的调控。为了解决这些问题,2012年 Montoya 等^[37]在腔内引入 DOE 将单个半导体 bar 条(与文献[9]相同)的合成孔径由 TA 变换为 FA,实现单瓣模输出($M_x^2=1.1, M_y^2=1.6$),但是由于合成单元数量锐减,输出功率只有 1.2 W。同年,

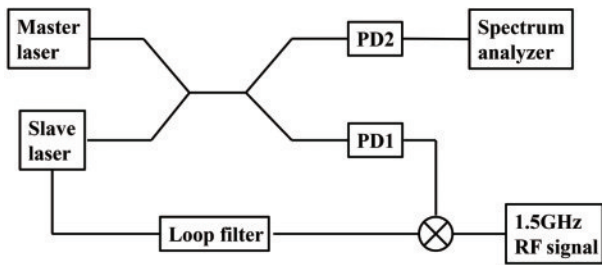


图 3 光学外差法锁相示意图^[31]

Fig. 3 Schematic diagram of optical heterodyne phase locking^[31]

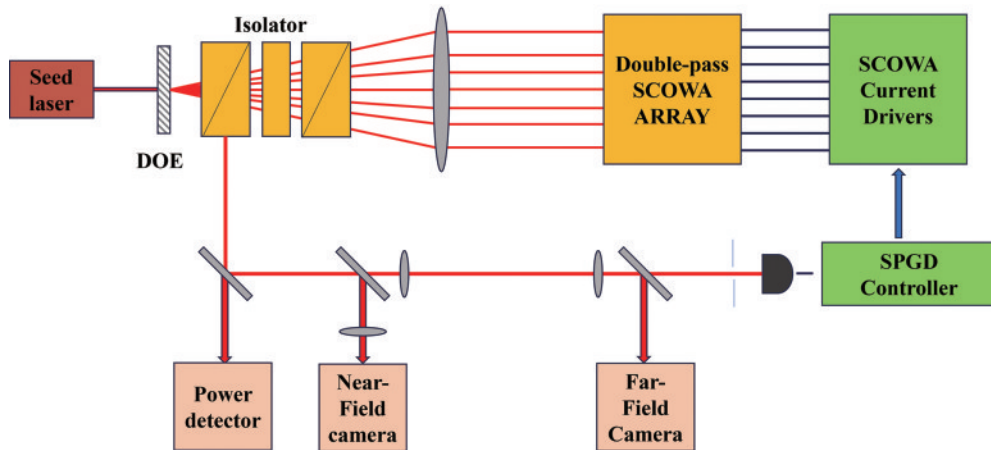


图 4 SCOWA 主动锁相系统示意图^[9]

Fig. 4 Schematic diagram of SCOWA active phase locking system^[9]

Creedon 等^[38]引入掺镱光纤放大器将种子光放大,然后通过 6 路光纤分束器进行分束,每路再经过 8 个二氧化硅波导分路器分束,将种子光直接输送到 SCOWA 的输入面,实验成功实现 47 个 SCOWA 相干合成,在 1 A 的工作电流下输出功率达到 30 W,耦合效率达到 90%,在 1.4 A 的工作电流下输出功率达到 40 W,耦合效率为 87%,快、慢轴方向的 M^2 分别为 1.7 和 1.3。

2017 年,法国光学研究所 Fabry 实验室^[39]将半导体锥形放大器运用到相干合束系统中。相比于 SCOWA,锥形放大器具有明显的优势,能有效避免反馈光所引起的模式竞争,分别对脊形区和锥形区的电流进行控制,可通过调节脊形区的电流调整相位,通过调控锥形区的电流提高增益。2018 年,实验室 Albrodt 等^[40]利用 M-Z 耦合外腔对 3 个锥形放大器进行锁相,利用 976 nm 的 DFB 半导体激光器作为种子光,通过爬山算法控制环对脊形区的电流实现精准控制,在 10 A 的注入电流下,系统获得 12.9 W 的近衍射极限光束输出 ($M_x^2 < 1.1$, $M_y^2 < 2.5$),合成效率为 65%。由于两束光先进行相干合束,然后再与另一路

光进行合束,这导致参与第二步合束的光束振幅存在差异,同时半导体锥形放大器对光束质量的限制也影响了合成效率。2019 年,Albrodt 等^[41]在原有结构上增加了 1 个激光单元,组成如图 5 所示的结构,并实现了脉冲输出,4 个锥形放大器相干合束后的总功率为 22.7 W,合成效率为 64%,快慢轴方向的 M^2 均小于 1.3。2020 年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 Zhu 等^[42]利用液晶相位可变延迟器来实现相位控制,对 4 个锥形放大器进行了相干合束,获得 6.9 W 的连续输出,合成效率 72%。由于 COD 的威胁,单模半导体激光器如分布式布拉格反射激光器 (DBR-RWL) 和分布式反馈脊波导激光器 (DFB-RWL),其功率被限制在几百毫瓦,采用相干合束也可提升单模的输出功率。2022 年德国 FBH 实验室的 Mourikis 等^[43]采用波长为 808 nm 的 DBR-RWL 作为种子源,分成两路被锥形放大器放大,经过反爬山算法对两路光束的相位进行调制,在 3.5 W 的最大输出功率下合成效率为 74%,合成光束近单模输出, $M^2 \approx 1.13$,为实现大功率单模半导体激光器提供了参考。

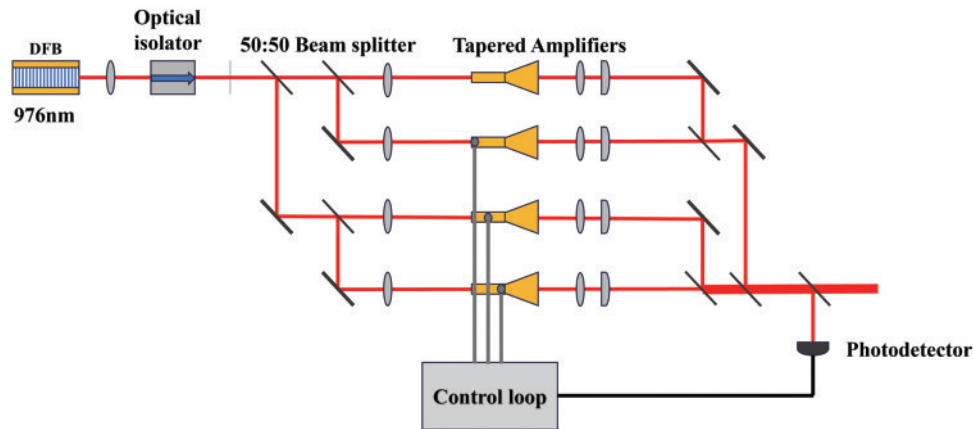


图 5 锥形放大器主动锁相系统示意图^[41]

Fig. 5 Schematic diagram of tapered amplifiers active phase locking system^[41]

为了提高相干合成的效果,还可在主动锁相系统中加入精密机械调节装置。2019 年, Fabry 实验室在主动锁相系统中引入压电镜,通过精密调制压电镜的倾斜角度,成功减小光束的倾斜像差提高了合束效率,如图 6^[44]所示。半导体激光相干合成光束具备良好的光束质量,还可直接用于倍频。2019 年, Fabry 实验室将功率 9.2 W、波长 976 nm 的相干合成光束通过 MgO:PPLN 非线性晶体,获得 2.1 W 的倍频光,倍频效率达到 22%^[45]。半导体激光相干合成也能提高脉冲光的输出能量。2023 年, Fabry 实验室利用光纤耦合器进行准直和光学隔离,将波长为 828 nm 的种子光分成两束,放大后再合成,成功实现微秒级脉冲输出,峰值功率为 10.3 W,单脉冲能量为 10.3 μ J,应用于雷达探测可提升雷达的空间分辨率^[46]。

3.2 基于被动锁相的相干合束技术

被动锁相技术是基于能量耦合机制构成的自适应锁相系统^[47],该技术不需要任何的主动控制元件,而是利用谐振腔的选模特性对激光进行相位调制。辐射定理表明,如果给定了多个不相关的光学模式,任何处于热平衡状态的光学系统都不能增加各个模式的功率。通过在激光器之间建立某种程度的相干性减少系统中的模式数量,能增加辐射亮度。在半导体激光器被动锁相中,使用较多的方法有外腔法、倏逝波耦合法和相干偏振法等。

倏逝波耦合法是半导体激光器阵列中常用的方法之一,半导体激光单元排列较近,光场相互重叠,可通过倏逝波相互耦合,这种方法只在激光阵列间距远小于激光器的输出孔径时才能实现^[21]。早在 1970 年,美国贝尔实验室的 Ripper 等^[48]在 2 路 GaAs 激光中发现倏

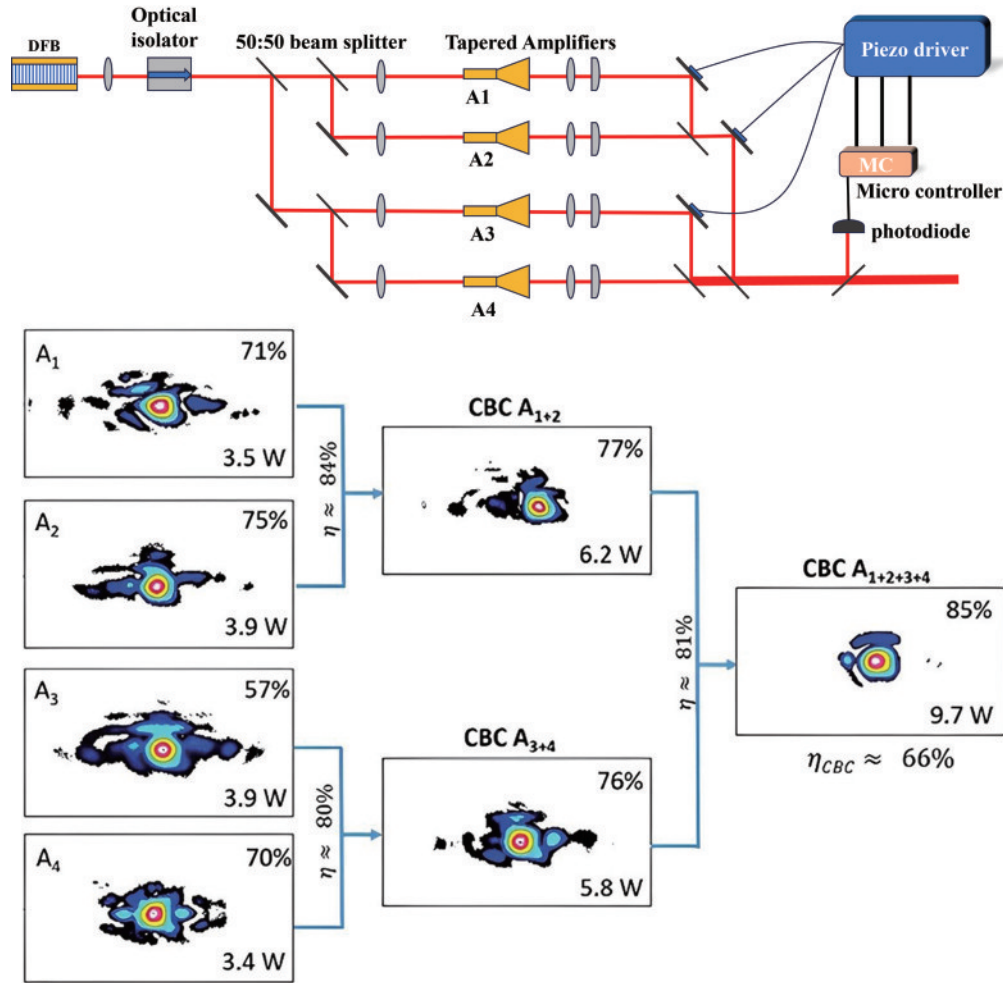


图 6 (a)锥形放大器压电镜相干合束示意图和(b)对应的光斑图^[44]

Fig. 6 (a) Schematic diagram of tapered amplifiers piezoelectric mirror coherent beam combine system and (b) corresponding spot^[44]

逝波能对激光器进行锁相。之后 IBM 公司的 Philipp-Rutz 等^[49]利用倏逝波实现了 3 路 GaAs 激光相干合成, 输出功率达到了 5 W。1978 年, Scifres 等^[50]利用倏逝波耦合合法实现了 5 路 GaAs 激光的相干合成, 但在后续的研究中, 多单元的激光使得倏逝波耦合锁相的理论实验无法对应, 因此研究人员对倏逝波进行锁相的物理机制更有兴趣, 进行了许多理论研究, 但没有实验验证。

相干偏振法利用晶体的双折射效应和腔的偏振损耗实现被动锁相。一束偏振光进入双折射晶体后(以光轴位于入射面内为例)会分成 o 光和 e 光, 透射后成为偏振方向垂直且具有一定相位差的两束光, 由光路可逆原理可知, 具备这种关系的两束光反向通过双折射晶体后将合成为一束偏振光。这样, 在外腔中精心设计一系列特定光轴与厚度的双折射晶体可以让每个单元与外腔构成谐振, 且每个单元在腔内的偏振方向都由自身通过双折射晶体的位置决定, 最终可以合成为一束偏振激光输出。南洋理工大学的 Purnawirman 等^[51-52]搭建 4 个半导体激光单元的外腔, 内置 1 对双折射楔形晶体和 4 个 YVO₄ 晶体, 将 4 个半导体激光单元成功锁定, 相干合成后的亮度提高 50 倍。相干偏振法

的合束效果显著, 但偏振器件的精度要求较高, 很难获得高功率输出, 近二十年来的发展较为缓慢。

外腔法将多个独立的增益介质放置在谐振腔中, 并通过激光单元之间进行能量耦合成为耦合振荡器, 从而产生超模。这时, 可以通过与超模相关的腔损耗来建立相干性, 如果只允许一个超模超过激光阈值, 则参与超模选择过程的所有激光的相位将被锁定, 处于相干状态。在被动锁相系统中, 最常使用的方法是外腔法, 利用外腔锁相后的激光合成效率高, 光束质量好, 还能通过 VBG 窄化光谱^[53], 是锁相技术中最有前景的方法之一, 常见的谐振腔有 Talbot 腔、M-Z 耦合外腔和 Dammann 光栅耦合外腔等。被动锁相技术易受单元数的限制, 很多研究已经证明随着单元数的增加, 合成效率会有很明显的下降^[54-55]。

1) Dammann 光栅法

1987 年, 美国 MIT 林肯实验室^[56]首次提出利用 DOE 对半导体激光阵列进行分束和合束, 将发光单元与 Dammann 光栅的衍射级次相互对应, 光栅能对相位一定的激光进行相干合束。2011 年, 法国 Thales 研究所 Bloom 等^[57]首次将 5 个单模量子级联激光器应用在

以 Dammann 光栅为合束元件的耦合外腔中, 获得了 0.65 W 的连续输出功率, 合束效率达到 70%, 快慢轴方向的 M^2 均小于 1.6。法国 Fabry 实验室在外腔中加入两个 Dammann 光栅, 其结构如图 7 所示, 两个光栅

的相位互相补偿, 后侧扩展腔提高了放大器的利用效率, 在 5 A 的输入电流下, 获得了 7.5 W 的输出功率, 合束效率为 78%, 但在大电流下, 由于扩展腔的腔长固定, 锁相效果会变得不稳定^[39]。

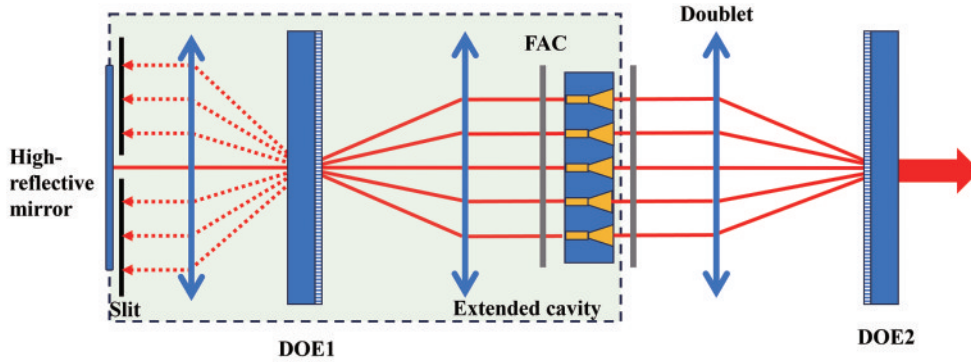


图 7 双 Dammann 光栅外腔示意图^[57]

Fig. 7 Schematic diagram of double Dammann grating external cavity^[57]

2) 干涉仪法

复合谐振腔是实现相干干涉的重要途径, 常见的复合谐振腔包括 Michelson 腔和 M-Z 腔。其锁相原理都是利用输出耦合镜反射的反馈光在激光器的增益区实现模式锁定, 相比于 Michelson 腔, M-Z 腔具有更高的光通量利用率。早在 2006 年, 佛罗里达大学的 Venus 等^[58]将 M-Z 腔应用到相干合成系统中, 并利用 VBG 压窄光谱。2010 年, Thalse 研究所 Bloom 等^[59]利用 Michelson 腔成功相干合成两个量子级联激光器 (QCL), 光路图如图 8(a) 所示, 其中 P 端是光束相长

干涉的耦合输出端, Q 端的输出光束则发生干涉相消。从图 8(b) 中可以看出, P 端与 Q 端的输出功率相加等于两个 QCL 的功率之和。在这个系统中, 功率耦合效率达到 85%, 快慢轴方向的光束质量分别为 1.2 和 1.35。2016 年, Fabry 实验室的 Schimmel 等^[60]利用锥形激光器的后腔面与衍射光栅形成扩展腔, 将锁相和合束分离, 成功合成两路激光, 在 6 A 的电流下实现了 6.7 W 的输出, 耦合效率达到 82%。虽然复合谐振腔合成的光束质量较好, 但其合束功率容易受到耦合镜损伤阈值的限制。

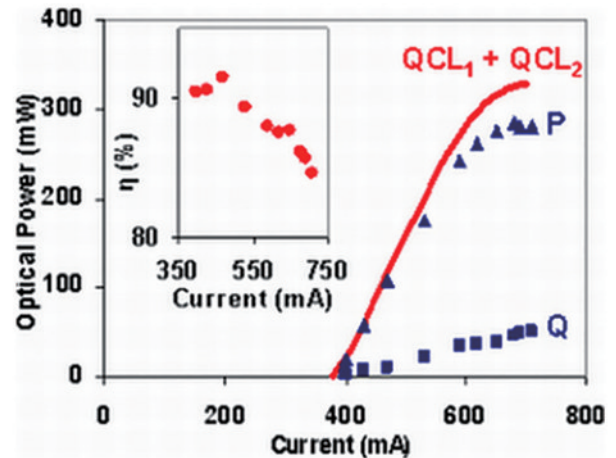
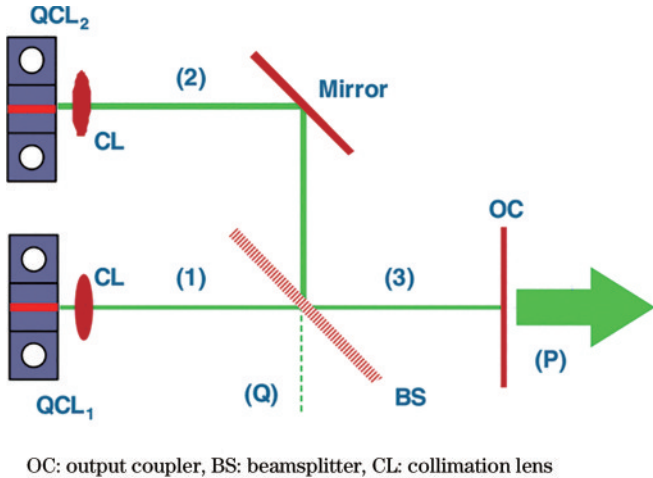


图 8 (a) Michelson 腔被动锁相示意图及 (b) 功率-电流曲线图^[59]

Fig. 8 (a) Schematic diagram of passive phase locking of Michelson cavity and (b) power-current curve diagram^[59]

3) Talbot 外腔法

Talbot 腔是外腔法中最常用的谐振腔之一。其原理是利用 Talbot 效应来限制腔内的激光模式, 使谐振腔中只存在同相模式和异相模式^[61], 具有同相模式的激光光束之间相干加强, 具有异相模式的激光光束则是相干相消。通过将谐振腔中的腔镜倾斜一定角度,

可以抑制异相模式^[62]起振, 因此 Talbot 腔主要应用于半导体激光 bar 条的合成。早在 2006 年, 北京工业大学的赵鹏飞等^[63-65]利用的周期性栅格作为 1/4 Talbot 腔的振幅补偿器, 栅格宽度为 50 μm , 周期为 100 μm , 紧贴外腔镜内壁时刚好能透过同相模式, 以此进行模式选择, 在众多超模中成功分离出同相模。2007 年,

他们还 Talbot 腔中的锁相机理^[66]和相位补偿过程^[67]进行了研究。2008 年,美国 MIT 林肯实验室^[36]利用 Talbot 腔相干合成了 10 个 SCOWA 单元,输出功率达到 7.2 W,相干光束的光束质量较为理想,但其频谱为多模。同年,美国 Oak Ridge 实验室的 Liu 等^[68]利用 V 形 Talbot 腔对高功率宽条半导体激光阵列(BALD)进行相干合束,如图 9 所示,在该装置中通过望远镜形式

的镜片设计,有效消除了激光阵列中的“smile”效应,利用体布拉格光栅实现了压窄光谱,成功合成 49 个激光单元,获得功率为 5.3 W、线宽为 0.1 nm 的相干光束。该装置的填充因子较低,远场的旁瓣能量占比较高。在利用 Talbot 腔进行相干合成时需要激光单元排列较密,即填充因子高,因此一般应用于半导体激光 bar 条合束,以实现更好的效果。

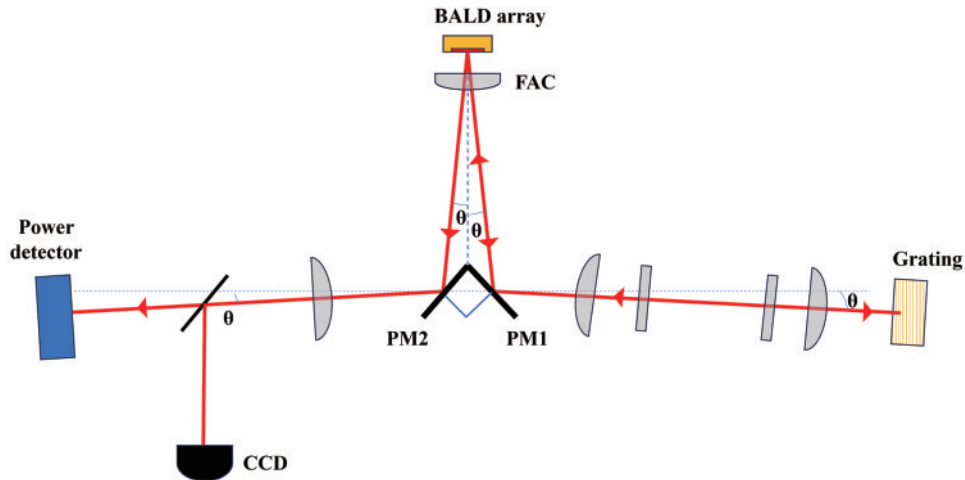


图 9 封闭 V 形外部 Talbot 腔示意图^[68]

Fig. 9 Schematic diagram of closed V-shaped Talbot cavity^[68]

2010 年, Liu 等^[10]在原有结构上再增加了一个光栅,组成双光栅结构,相干合成了 47 个激光单元,线宽更窄,达到 0.07 nm,在 60 A 的电流下,输出功率达到 12.8 W。2013 年,他们通过提高激光阵列的光电转换效率,改进光路进一步降低“smile”效应,成功将 10 个 BALD 相干合成^[69]。在这种架构的基础上, Liu 等^[70]将 Talbot 腔的距离进一步缩短,将相干系统结构简化,设计紧凑型体布拉格光栅 V 形腔成功将 10 个 BALD 单元相干合成,其实物如图 10 所示,外腔的腔长只有 25 mm,整个系统可以放在光具座上,更有利于实现激光光源小型化。Corcoran 公司在 2005 年提出基于自 Fourier 腔的半导体激光阵列相干合成物理模型^[71],并

于 2010 年利用自 Fourier 腔实现 35 个激光单元阵列的相干合成^[72],但在单元数量增多时,相干度较低,大于 20 个单元后,超过 10% 相干度的概率要低于 2%,自 Fourier 腔在激光阵列相干合成中的尝试结果并不理想。

4) 片上集成

与其他类型激光器相比,以芯片为激光单元的半导体激光器在小型化上更具优势。通过改变半导体激光芯片上的波导结构,早在 20 世纪 80 年代就开始对片上集成的相干合成光源研究^[73-74]。随着制造工艺和方法的进步,2012 年,美国 Clemson 大学的 Zhao 等^[75]开始对硅基平台上的相干合成集成系统,设计了如图 11 所示的光栅结构,芯片上的复合激光腔由两组以相同角度对称倾斜的光栅组成。光束的相位锁定是通过两个光栅在重叠区域中的布拉格衍射波耦合过程实现的,通过模型计算输出功率最高达 78.57 mW,耦合效率 90%。2014 年, Clemson 大学根据该模型成功制备出相干光输出的 bar 条^[76],远场测量显示合成光束具有近衍射极限的高对比度干涉条纹。

2016 年, Clemson 大学基于双通道光纤激光器阵列结构^[77],提出在硅光子基片上集成一种具有树杈状相干合成腔的激光阵列芯片^[78-79],通过 2×2 定向耦合器,能实现 4 个单模脊波导激光器的相干合成。2019 年, Zhu 等^[80]制备了一款由两个单元相干合成的硅光子集成芯片,芯片的阈值电流为 60 mA,在 120 mA 时合成效率为 92%。2022 年, Zeng 等^[81]在芯片上实现了 4 路激光

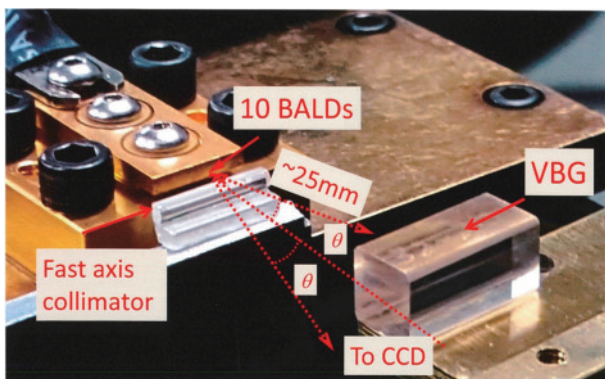
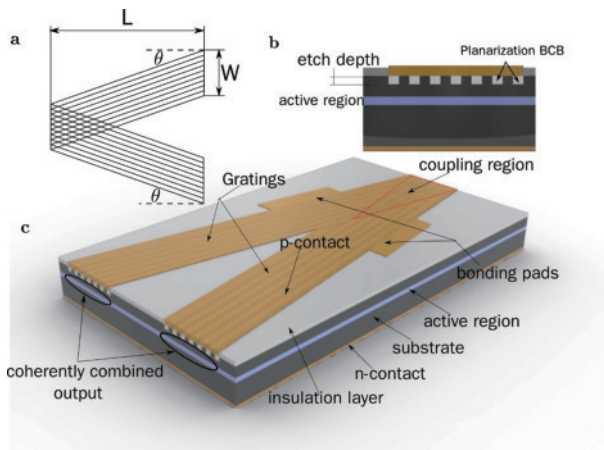


图 10 紧凑 V 形 Talbot 腔相干合束 BALD 示意图^[70]

Fig. 10 Schematic diagram of compact V-shaped Talbot cavity coherent beam combining BALD^[70]

图 11 相干组合倾斜光栅激光器示意图^[75]Fig. 11 Schematic diagram of coherent combination tilted grating laser^[75]

的相干合成,单个芯片的输出功率达到 350 mW。2017年,中国科学院半导体研究所的Jia等^[82]在芯片上集成了基于Talbot效应且带有空间滤波器的谐振腔,实现7路和11路量子级联激光单元相干合束,其中7路单元合束功率为750 mW,11路单元合束功率为1250 mW。北京工业大学Yan等^[83]在2022年提出芯片集成相干合成光源,其方法是通过在半导体激光阵列芯片上刻蚀横向移位半个周期的互注入Talbot腔,实现光束同相合成输出。这种片上集成技术使半导体激光器更易于实现相干合成,利用自成像效应改变波导结构实现锁相^[84],在芯片端就能实现大功率输出。该方法制造工艺简单,为在更多波长范围内实现激光的相干合束提供了可能性。

4 结束语

相干合束技术能够实现更高的亮度并保持较好的光束质量。在相干合束系统中,最常用的架构为MOPA结构,使用的激光放大器主要包括半导体锥形放大器和板条耦合光波导放大器,半导体激光放大器最高可获得30 dB以上的光增益。激光单元之间的相位差是相干合束系统的主要限制因素,单元数量越多,相位控制越复杂。半导体激光bar条的相干合束在单元数量上更有优势,其主要合束方式是平铺孔径合成,利用透镜或光栅进行合束,提高填充因子以减少旁瓣能量。半导体激光单管主要合束方式是填充孔径合成,利用分束镜进行合束,其关键在于保持光束在近场和远场的重合度,同时减少光束合成过程中的能量损失。

相干合成系统中的关键部分在于对各单元光束的相位进行锁定,半导体激光器的主动锁相主要由光电探测器进行间接探测,再控制驱动电流来减少相位误差,但由于激光放大器的热效应等因素,驱动电流与相位之间的函数关系不是线性的,因而需要对每个器件进行单独检测以确定其函数关系,增加了系统的复杂

性。近年来控制器算法在不断改进,例如自适应SPGD算法^[85]、正交编码抖动算法^[86]和深度学习算法^[87]等,以进一步提高控制带宽,减少相位误差,从而实现更多单元的合束。被动锁相系统的结构简单,具有自组织锁相特性,且能通过光栅元件实现窄线宽输出,但多单元的光路设计复杂,难以实现,因此很难获得大功率相干合束输出。

综上所述,主动锁相是实现大功率相干合束的有效途径,但其系统复杂,电流与相位之间关系函数不具备普遍性,只能满足特殊应用需求。被动锁相具有自组织锁相特性,结构简单,更适用于芯片集成,未来将探索更多被动锁相方法的特性,研究“同相模”的选择过程,实现高功率、高光束质量、窄线宽的激光阵列。

参 考 文 献

- [1] Tomm J W, Ziegler M, Hempel M, et al. Mechanisms and fast kinetics of the catastrophic optical damage (COD) in GaAs-based diode lasers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 5(3): 422-441.
- [2] Wade J K, Mawst L J, Botez D, et al. 8.8 W CW power from broad-waveguide Al-free active-region ($\lambda = 805$ nm) diode lasers[J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(11): 1100-1101.
- [3] Morita T, Nagakura T, Torii K, et al. High-efficient and reliable broad-area laser diodes with a window structure[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(4): 1502104.
- [4] Huang R K, Chann B, Burgess J, et al. Teradiode's high brightness semiconductor lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9730: 97300C.
- [5] Stickley C M, Filipkowski M E, Parra E, et al. The future of high-efficiency diode lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 5991: 599110.
- [6] Marmo J, Injeyan H, Komine H, et al. Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7195: 719507.
- [7] Bachmann F. Goals and status of the German national research initiative BRIOLAS (brilliant diode lasers)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6456: 645608.
- [8] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(3): 567-577.
- [9] Redmond S M, Creedon K J, Kansky J E, et al. Active coherent beam combining of diode lasers[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 999-1001.
- [10] Liu B, Liu Y, Braiman Y. Coherent beam combining of high-power broad-area laser diode array in CW and pulsed modes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7583: 75830Z.
- [11] Chinn S R. Review of edge-emitting coherent laser arrays [J]. *Surface Emitting Semiconductor Lasers & Arrays*, 1993: 9-70.
- [12] Leshchenko V E. Coherent combining efficiency in tiled and filled aperture approaches[J]. *Optics Express*, 2015,

- 23(12): 15944-15970.
- [13] Zhi D, Zhang Z X, Ma Y X, et al. Realization of large energy proportion in the central lobe by coherent beam combination based on conformal projection system[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 2199.
- [14] Wacks M, Ryan L, Johannsen D, et al. The alpha program[J]. *Journal of Directed Energy*, 2006, 1: 275-277.
- [15] Coherent laser beam combining[M]. Weinheim: John Wiley & Sons, 2013.
- [16] 王立军, 彭航宇, 张俊. 大功率半导体激光合束进展[J]. *中国光学*, 2015, 8(4): 517-534.
Wang L J, Peng H Y, Zhang J. Advance on high power diode laser coupling[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 517-534.
- [17] Leger J R. External methods of phase locking and coherent beam addition of diode lasers[J]. *Surface Emitting Semiconductor Lasers & Arrays*, 1993: 379-433.
- [18] Nabors C D. Effects of phase errors on coherent emitter arrays[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(12): 2284-2289.
- [19] Botez D. Monolithic phase-locked semiconductor laser arrays[J]. *Diode Laser Arrays*, 1994: 1-71.
- [20] Botez D, Ackley D E. Phase-locked arrays of semiconductor diode lasers[J]. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, 1986, 2(1): 8-17.
- [21] Philipp-Rutz E M. Single laser beam of spatial coherence from an array of GaAs lasers: free-running mode[J]. *Journal of Applied Physics*, 1975, 46(10): 4552-4556.
- [22] Twu Y, Dienes A, Wang S, et al. High power coupled ridge waveguide semiconductor laser arrays[J]. *Applied Physics Letters*, 1984, 45(7): 709-711.
- [23] Corcoran C J, Rediker R H. Operation of five individual diode lasers as a coherent ensemble by fiber coupling into an external cavity[J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 59(7): 759-761.
- [24] Sanders S, Waarts R, Nam D, et al. High power coherent two-dimensional semiconductor laser array[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 64(12): 1478-1480.
- [25] No K H, Blackwell R J, Herrick R W, et al. Monolithic integration of an amplifier and a phase modulator fabricated in a GRINSCH-SQW structure by placing the junction below the quantum well[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(9): 990-993.
- [26] Osinski J S, Mehuys D, Welch D F, et al. Phased array of high-power, coherent, monolithic flared amplifier master oscillator power amplifiers[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 66(5): 556-558.
- [27] No K H, Herrick R W, Leung C, et al. One dimensional scaling of 100 ridge waveguide amplifiers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, 6(9): 1062-1066.
- [28] Krebs D, Herrick R, No K, et al. 22 W coherent GaAlAs amplifier array with 400 emitters[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1991, 3(4): 292-295.
- [29] Levy J L, Roh K. Coherent array of 900 semiconductor laser amplifiers[J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2382: 58-69.
- [30] Liang W, Yariv A, Kewitsch A, et al. Coherent combining of the output of two semiconductor lasers using optical phase-lock loops[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(4): 370-372.
- [31] Grant M, Michie W, Fletcher M. The performance of optical phase-locked loops in the presence of nonnegligible loop propagation delay[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1987, 5(4): 592-597.
- [32] Ramos R T, Seeds A J. Delay, linewidth and bandwidth limitations in optical phase-locked loop design[J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(6): 389-391.
- [33] 张娜玲, 王翠鸾, 熊聪, 等. 宽温度锁定 808 nm 激光器阵列[J]. *中国激光*, 2023, 50(5): 0501001.
Zhang N L, Wang C L, Xiong C, et al. 808 nm laser array with wide temperature-locking range[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(5): 0501001.
- [34] Vorontsov M A, Carhart G W, Ricklin J C. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(12): 907-909.
- [35] 杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法仿真与分析[J]. *光学学报*, 2007, 27(8): 1355-1360.
Yang H Z, Li X Y, Jiang W H. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(8): 1355-1360.
- [36] Huang R K, Chann B, Missaggia L J, et al. Coherent combination of slab-coupled optical waveguide lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7230: 72301G.
- [37] Montoya J, Augst S J, Creedon K, et al. External cavity beam combining of 21 semiconductor lasers using SPGD [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(11): 1724-1728.
- [38] Creedon K J, Redmond S M, Smith G M, et al. High efficiency coherent beam combining of semiconductor optical amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(23): 5006-5008.
- [39] Schimmel G, Janicot S, Hanna M, et al. Coherent beam combining architectures for high power tapered laser arrays[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10086: 100860O.
- [40] Albrodt P, Hanna M, Moron F, et al. Coherent combining of high brightness tapered lasers in master oscillator power amplifier configuration[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10514: 105140T.
- [41] Albrodt P, Niemeyer M, Crump P, et al. Coherent beam combining of high power quasi continuous wave tapered amplifiers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27891-27901.
- [42] Zhu H B, Duan X M, Fan S L, et al. Scalable structure of coherent polarization beam combining based on tapered diode laser amplifiers[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 132: 106470.
- [43] Mourikis C, Blume G, Maaßdorf A, et al. Coherent beam combining progress on diode lasers and tapered amplifiers at 808 nm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 11983: 119830D.
- [44] Hamperl J, Albrodt P, Georges P, et al. Compact

- module for high power coherent beam combining of tapered amplifiers[C]//2019 IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference (HPD), October 9-10, 2019, Coventry, UK. New York: IEEE Press, 2019: 33-34.
- [45] Albrodt P, Jamal M T, Hansen A K, et al. Recent progress in brightness scaling by coherent beam combining of tapered amplifiers for efficient high power frequency doubling[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10900: 10900O.
- [46] Liu Q, Janicot S, Georges P, et al. Coherent combination of micropulse tapered amplifiers at 828 nm for direct-detection LIDAR applications[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(2): 489-492.
- [47] Vysotsky D V, Napartovich A P. Coherent beam combining in optically coupled laser arrays[J]. *Quantum Electronics*, 2019, 49(11): 989-1007.
- [48] Ripper J E, Paoli T L. Optical coupling of adjacent stripe-geometry junction lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1970, 17(9): 371-373.
- [49] Philipp-Rutz E M. Spatially coherent radiation from an array of GaAs lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1975, 26(8): 475-477.
- [50] Scifres D R, Burnham R D, Streifer W. Phase-locked semiconductor laser array[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 33(12): 1015-1017.
- [51] Ng S P, Phua P B. Coherent polarization locking of a diode emitter array[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(13): 2042-2044.
- [52] Purnawirman P, Phua P B. Coherent polarization locking of multimode beams in a diode bar[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7918: 791815.
- [53] Han J L, Zhang J, Shan X N, et al. High-power narrow-linewidth diode laser pump source based on high-efficiency external cavity feedback technology[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(8): 081401.
- [54] Kouznetsov D, Bisson J F, Shirakawa A, et al. Limits of coherent addition of lasers: simple estimate[J]. *Optical Review*, 2005, 12(6): 445-447.
- [55] Fridman M, Nixon M, Davidson N, et al. Passive phase locking of 25 fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(9): 1434-1436.
- [56] Leger J R, Swanson G J, Veldkamp W B. Coherent laser addition using binary phase gratings[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(20): 4391-4399.
- [57] Bloom G, Larat C, Lallier E, et al. Passive coherent beam combining of quantum-cascade lasers with a Dammann grating[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(19): 3810-3812.
- [58] Venus G B, Sevian A, Smirnov V I, et al. Stable coherent coupling of laser diodes by a volume Bragg grating in photothermorefractive glass[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(10): 1453-1455.
- [59] Bloom G, Larat C, Lallier E, et al. Coherent combining of two quantum-cascade lasers in a Michelson cavity[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11): 1917-1919.
- [60] Schimmel G, Doyen-Moldovan I, Janicot S, et al. Rear-side resonator architecture for the passive coherent combining of high-brightness laser diodes[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(5): 950-953.
- [61] Lohmann A W, Silva D E. An interferometer based on the Talbot effect[J]. *Optics Communications*, 1971, 2(9): 413-415.
- [62] Hassiaoui I, Michel N, Lecomte M, et al. In-phase coherent coupling of tapered lasers in an external Talbot cavity[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6485: 64850E.
- [63] Li Q, Zhao P F, Guo W R. Amplitude compensation of a diode laser array phase locked with a Talbot cavity[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(23): 231120.
- [64] Li Q, Zhao P F, Guo W R, et al. The in-phase mode selection of a high-power diode laser array by a Talbot cavity with an amplitude compensator[J]. *Optics Communications*, 2007, 270(2): 323-326.
- [65] Zhao P F, Li Q, Guo W, et al. In-phase output beam from broad-area diode array using Talbot cavity[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(5): 284-285.
- [66] 赵鹏飞, 郭渭荣, 李强. Talbot 外腔锁相相位补偿元件的理论计算[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(1): 19-22.
- Zhao P F, Guo W R, Li Q. Phase compensation of Talbot cavity[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(1): 19-22.
- [67] 赵鹏飞, 李强, 郭渭荣, 等. 二极管激光阵列 Talbot 外腔锁相机理的实验研究[J]. *光电子·激光*, 2007, 18(6): 672-674.
- Zhao P F, Li Q, Guo W R, et al. Phase locking of a high power diode laser array in an external cavity[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2007, 18(6): 672-674.
- [68] Liu B, Liu Y, Braiman Y. Coherent addition of high power laser diode array with a V-shape external Talbot cavity[J]. *Optics Express*, 2008, 16(25): 20935-20942.
- [69] Liu B, Braiman Y. Coherent beam combining of high power broad-area laser diode array with near diffraction limited beam quality and high power conversion efficiency [J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 31218-31228.
- [70] Liu B, Braiman Y. Coherent addition of high power broad-area laser diodes with a compact VBG V-shaped external Talbot cavity[J]. *Optics Communications*, 2018, 414: 202-206.
- [71] Corcoran C J, Durville F. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(20): 201118.
- [72] Corcoran C J, Durville F. Passive coherent combination of a diode laser array with 35 elements[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 8420-8425.
- [73] Dan B. High-power coherent GaAs-based monolithic semiconductor lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4533: 41-46.
- [74] Welch D F, Cross P S, Scifres D R, et al. High-power (cw) in-phase locked "Y" coupled laser arrays[J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 49(24): 1632-1634.
- [75] Zhao Y S, Zhu L. On-chip coherent combining of angled-grating diode lasers toward bar-scale single-mode lasers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(6): 6375-6384.
- [76] Zhao Y S, Zhu L. Integrated coherent beam combining of

- a laser diode mini-bar[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8965: 89650F.
- [77] Wu T W, Chang W Z, Galvanauskas A, et al. Model for passive coherent beam combining in fiber laser arrays [J]. Optics Express, 2009, 17(22): 19509-19518.
- [78] Zhao Y S, Zhu Y Y, Zhu L. Hybrid integration for coherent laser beam combining on silicon photonics platform[C]//2016 IEEE Photonics Conference (IPC), October 2-6, 2016, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE Press, 2017: 633-634.
- [79] Zhu Y Y, Zhu L. Integrated single frequency, high power laser sources based on monolithic and hybrid coherent beam combining[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(6): 8300908.
- [80] Zhu Y Y, Zeng S W, Zhao Y S, et al. Hybrid integration of active semiconductor devices with passive micro/nano optical structures for emerging applications [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11089: 1108908.
- [81] Zeng S W, Zhao X L, Zhu Y Y, et al. Watt-level beam combined diode laser systems in a chip-scale hybrid photonic platform[J]. Optics Express, 2022, 30(13): 23815-23827.
- [82] Jia Z, Wang L, Zhang J, et al. Phase-locked array of quantum cascade lasers with an intracavity spatial filter [J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(6): 061108.
- [83] Yan Y F, Liu Y, Zhang H Y, et al. Principle and numerical demonstration of high power all-fiber coherent beam combination based on self-imaging effect in a square core fiber[J]. Photonics Research, 2022, 10(2): 444-455.
- [84] Wang X F, Lan T, Ruan R J, et al. Dynamics of mutual injection phase-locking of laser diode array with interference effect[J]. Optics Communications, 2022, 522: 128616.
- [85] 陈梅蕊, 姜律, 毛红敏, 等. SPGD 算法高精度静态像差校正方法[J]. 光学学报, 2023, 43(5): 0511001.
Chen M R, Jiang L, Mao H M, et al. High-Precision Static Aberration Correction Method of SPGD Algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(5): 0511001.
- [86] Jiang M, Su R T, Zhang Z X, et al. Coherent beam combining of fiber lasers using a CDMA-based single-frequency dithering technique[J]. Applied Optics, 2017, 56(15): 4255-4260.
- [87] Hou T Y, An Y, Chang Q, et al. Deep-learning-based phase control method for tiled aperture coherent beam combining systems[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2019, 7: e59.