

高亮度窄线宽的激光二极管阵列研究进展

苏宙平¹ 周军² 楼祺洪²

¹江南大学理学院, 江苏 无锡 214122

²中国科学院上海光学精密机械研究所先进激光技术与应用系统实验室, 上海 201800

摘要 阐述了高亮度、窄线宽的激光二极管阵列研究进展。重点介绍了外腔反馈技术在改善激光二极管阵列的线宽和激光亮度中的应用, 这些技术包括利特罗(Littrow)外腔反馈技术, 光谱组束技术, 离轴外腔反馈技术, 离轴外塔尔博特(Talbot)腔技术。

关键词 激光二极管; 亮度; 线宽; 外腔

中图分类号 TN248.4

OCIS 140.2020 140.3460 140.3480

文献标识码 A

Progress of High-Brightness and Linewidth-Narrowed Laser Diode Bar

Su Zhouping¹ Zhou Jun² Lou Qihong²

¹School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

²Novel Laser Technique and Application System Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract The progress of high brightness, linewidth-narrowed laser diode bar is demonstrated in detail. Popular techniques used to improve the brightness and reduce the linewidth of laser diode bar are introduced in detail. These techniques include Littrow external cavity feedback technique, spectrum beam combination, off-axis external cavity feedback technique, and off-axis external Talbot cavity technique.

Key words laser diode; brightness; linewidth; external cavity

1 引言

激光二极管阵列具有功率高、效率高、结构紧凑、使用寿命长等优点, 因此在许多领域得到了广泛的应用^[1~5]。然而, 高功率激光二极管阵列的谱线宽比较宽(典型值 2~4 nm)^[6], 并且慢轴方向的光束质量比较差, 约为 1000 倍衍射极限^[7]。这两个缺点制约了高功率激光二极管阵列在许多方面的应用, 例如: 宽的光谱影响了自旋交换的光学抽运效率^[6]; 差的光束质量影响了激光二极管在材料加工、抽运固体或光纤激光器等领域的应用^[1]。激光的亮度是一个能够综合反映激光特性的参数^[8]。因此对于激光器而言, 要想获得高亮度的激光输出, 不仅要有高的功率, 而且要有好的光束质量。为了能够高效地使用高功率激光二极管阵列, 开展高亮度、窄线宽激光二极管阵列的关键技术研究是非常必要的。根据高功率激光二极管阵列的应用目标, 应开展的技术研究可以分为四类: 1) 窄线宽激光二极管光源^[4,6,9]; 2) 高亮度的激光光源^[5,10]; 3) 同时实现高亮度、窄线宽的激光光源^[11,12]; 4) 窄线宽的相干的激光光源^[1,13]。

2 窄线宽激光二极管

激光二极管阵列的典型的线宽 2~4 nm^[6]。然而, 在许多应用中, 均要求激光光谱具有窄线宽和大的调

收稿日期: 2010-03-25; 收到修改稿日期: 2010-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(60908041)资助课题。

作者简介: 苏宙平(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光学设计和激光技术等方面的研究。

E-mail: szpciomp@yahoo.com.cn

谐范围。外腔反馈的技术能有效地压缩二极管或二极管阵列的线宽。外腔中的频率选择元件通常选用光栅。光栅可以是平面衍射光栅,也可以是体光栅^[14]。选用平面衍射光栅作反馈元件时,通过转动光栅可以实现调谐。常用的外腔结构有 Littrow 结构^[15]和 Littman-Metcalf 结构^[16]。

图 1 为 B. Chann 等^[15]设计的外腔反馈的激光二极管阵列的实验装置,这种外腔是典型的 Littrow 结构。激光二极管发出的光经过一个扩束系统,这一系统主要是对激光二极管发出的光在两个方向进行准直,准直后的光经过一个半波片耦合到一光栅上,光栅按 Littrow 结构放置,光栅的 1 阶衍射沿原路返回,光栅的零阶作激光输出。光栅具有选频的作用,因此一阶反馈的光为某个特定的波长,根据模式竞争的理论,得到反馈的那个特定波长的光振荡加强,而其他波长的光被有效地抑制,这样输出的激光也将是某个特定的波长。通过调节光栅的角度,改变一阶衍射提供的反馈光的波长,进而使输出波长发生改变,来实现调谐。B. Chann 等^[15]应用这一技术将一个 20 W 的商用激光激光二极管阵列,从线宽 670 GHz 压缩到了 50 GHz,输出功率为 14 W。

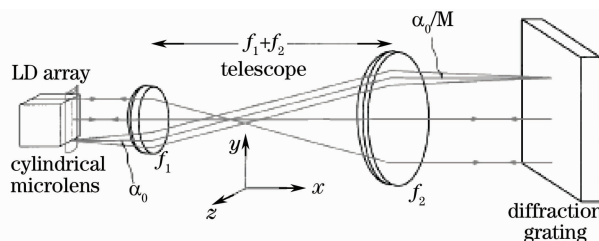


图 1 Littrow 外腔结构

Fig. 1 Littrow external cavity feedback laser diode bar

Littman-Metcalf 结构与 Littrow 结构相似,没有将光栅的一级衍射直接沿原路返回作反馈,而是一级输出光路上放一个平面反射镜,将光栅衍射的 1 阶光由平面镜反馈后沿原路反馈到激光二极管,零阶光作输出^[16]。Littman-Metcalf 外腔结构由于光栅要经过两次衍射,因此功率损失比较多,而 Littrow 结构在这方面具有一定的优势。

使用外腔反馈技术后,可以获得窄线宽的激光输出,然而激光的输出线宽并不是可以无限制地压缩,最主要的影响因素如下^[15]:1)激光二极管慢轴方向的发散角;2)激光二极管阵列的“smile”效应。所谓的“smile”效应就是二极管阵列中的各个发光单元由于受到生产和制造工艺的制约,很难将所有发光单元完全排列在一条直线上,肯定会存在一定的弯曲,把这一效应称为“smile”效应。其实“smile”效应对谱线展宽的影响也可以更直观地理解^[4,17]:在外腔反馈的激光二极管阵列中,每个发光单元有自己的外腔,经过外腔压缩后各个发光单元都可以获得窄线宽的激光输出,最后输出的激光光谱是每个发光单元输出光谱的叠加,因此输出激光光谱线宽也是比较窄的。当阵列的各发光单元不能完全排列在一条直线上,这样每个发光单元的光束以不同的角度入射到光栅上,这样光栅反馈到发光单元的光中心波长就有所不同,最后输出的激光光谱是每个发光单元输出光谱的叠加,尽管每个发光单元输出的光谱线宽很窄,但是由于其中心波长不同,这样叠加后的光谱就有所展宽。当采用具有更大倍率的准直系统,这两个因素对谱线展宽的影响将会进一步减小,有助于谱线宽度的进一步压缩。然而,准直系统的放大倍率进一步增大,光束的宽度被进一步扩大,因而需要更大面积的光栅作反馈,大面积的光栅制造起来难度较大。此外,使用大倍率的准直系统,也使实验装置的体积变得更大。

随着体光栅的制造技术与工艺的发展,体光栅也可被用作外腔元件来改善激光二极管的光谱线宽或光束质量。2005 年 Yujin Zheng 等^[14]设计了一种外腔装置,反馈元件为两个体光栅,如图 2 所示。外腔中包含了快轴准直镜、光束变换系统和两个体光栅。快轴准直镜把快轴方向发散角压缩到约为 0.35° 。激光二极管发出的光慢轴方向约为 8° 左右,因此相邻两个发光单元在传输了几毫米远就会相交。为了避免这种光束之间的交叠,在该实验系统中使用了光束变换系统,将每个发光单元发出的光束旋转 90° ,也就是在垂直于阵列方向的发散角变为 8° ,而在阵列方向的发散角变为 0.35° 。这样在阵列方向的大的发散角就变成了小的发散角了。两个体光栅距离激光二极管的距离分别为 7 mm 和 10 mm。系统形成的共振腔如下:VBG1→二极管的后端面→VBG2→二极管的后端面→VBG1。两个体光栅的有不同中心波长,VBG1 中心波长 $\lambda = 808.26$ nm,带宽 $\Delta\lambda < 0.5$ nm,反射率 $R = 45\%$; VBG2 中心波长 $\lambda = 808.01$ nm,带宽 $\Delta\lambda < 0.5$ nm,反射率 $R = 40\%$ 。两个体光栅公共的带宽部分能够反馈到激光二极管的最多,其他部分波长的光被有效地抑制掉了,因此最后输出的激光线宽很窄。

使用平面光栅将会产生很宽的调谐范围,通过转动平面光栅,将会实现输出激光的调谐。当使用反射式

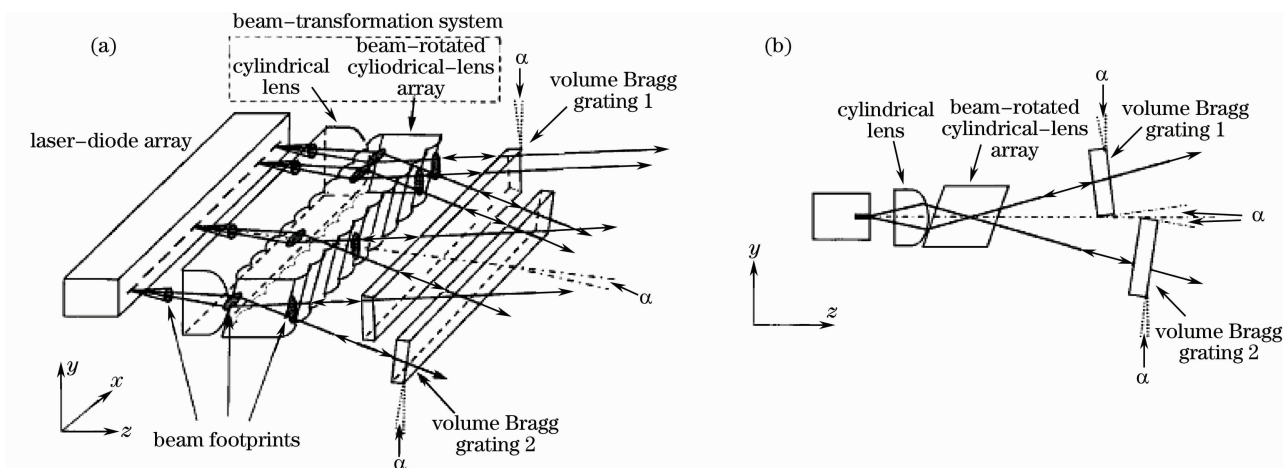


图2 体光栅外腔结构图

Fig. 2 Volume Bragg gratings feedback laser diode bar

体光栅作为反馈元件,由于反射式体光栅不是色散性元件,更像是一个单波长的反射镜^[18]。因此体光栅作为反馈元件可以获得更窄的线宽输出,但是无法实现调谐输出。光栅作为外反馈元件时,还能有效地锁定输出激光的中心波长。在自由运转的情况下,激光二极管输出激光的中心波长随温度的变化而漂移,大约 $0.25 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。由于光栅的反馈作用,输出激光的中心波长与光栅反馈的波长有关,因此当光栅的位置保持不变时,也就是反馈的波长保持不变,即使激光工作温度变化时,输出激光的中心波长仍然能被有效地锁定。

目前,国外在大功率的激光二极管阵列的线宽压缩技术方面研究非常活跃。在美国国家基金的支持下,威斯康星州—麦迪逊大学物理系和药学院的肿瘤学系,以及麻省理工学院的林肯实验室联合开展了对该技术的研究^[19],将一个由49个发光单元构成的激光二极管阵列,线宽由 1000 GHz 窄化为 64 GHz ,输出功率为 30 W ,这样就可以满足对惰性气体的光学抽运。美国新罕布什尔州大学^[6]对商用的 279 W 激光二极管二维阵列,谱线宽度压缩到 0.4 nm ,输出功率达 115 W ,这将能够高效、低价产生磁共振成像用的超偏振惰性气体。

3 高亮度激光二极管

在材料加工和抽运固体激光器的应用时,为了使能量能够高效率地传输,提高激光二极管的亮度(即改善激光二极管的光束质量)是必要的。然而,常用的整形技术往往都是通过降低快轴方向的光束质量而提高慢轴方向的光束质量,输出激光的亮度几乎没有变化^[7]。通过注入锁定技术能有效地提高激光二极管输出激光的亮度。注入锁定技术包括种子注入锁定和自注入锁定技术,种子注入锁定对种子源的要求比较高,自注入锁定技术就是通过加外反馈装置,将激光器输出的某个特定模式反馈回来。自注入锁定常用技术主要有以下几种。

3.1 光谱组束技术

光谱组束(或波长组束)^[20~22]技术也是改善二极管阵列光束质量的一种很有效的方法。这种方法能够提高激光的亮度,然而却使输出的激光光谱线宽展得很宽。其核心思想就是以牺牲光谱的宽度,来提高空间的亮度。2000年V. Daneu等^[23]设计了一种光谱组束的装置如图3所示。在实验装置中,一个量子阱激光二极管阵列,含有11个发光单元,快轴方向有一个准直镜。光栅、变换透镜和镀有10%反射率的平面输出耦合镜构成了一个外腔。变换透镜是把阵列的位置变换为在光栅上的入射角。光栅放在透镜的焦平面上,以确保来自不同发光单

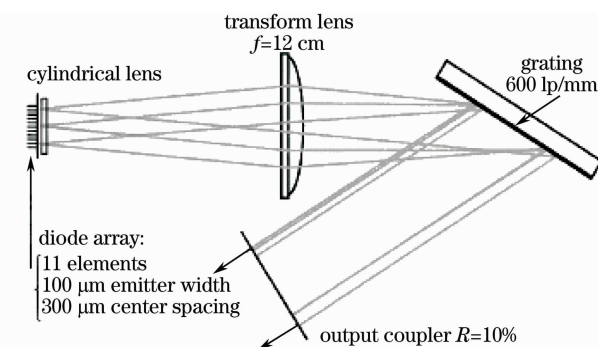


图3 光谱组束装置

Fig. 3 Spectral beam combining setup

元的光束在空间上完全叠加。二极管阵列的后端面与部分反射的输出耦合镜就形成了一个共振腔。因为使用了公共的反馈镜(即,输出耦合镜)进行反馈,根据模式竞争的理论,最后各发光单元发出的光束将共轴传播,光束的光束质量将会有很大的提高。不同的发光单元以不同的角度打到光栅上,为了确保共轴传播,外腔将会选不同波长作反馈,因此最后输出的光束在不同的位置上(慢轴方向)波长是不一样的。运用这一技术取得了 $M^2=20$ 的激光输出,这样的光束质量与单个发光单元在自由运转时输出的激光光束质量差别很小。输出激光的光谱展宽 $\Delta\lambda=21.9\text{ nm}$,光-电转换效率为 50%,输出功率为 1.7 W 左右。在 2005 年 B. Chann 等^[19]用几乎相同的实验装置,实现了对一个含有 100 个发光单元板条耦合的光波导二极管阵列进行了光谱组束,获得了 $M^2\approx 1.35$,峰值功率为 35 W 的激光输出,光-电转换效率为 35% 左右。2008 年 Juliet T 等^[24]对一个中心波长为 1450 nm 的激光二极管阵列,应用光谱组束技术取得了光束质量因子 M_x^2 (快轴方向) M_y^2 (慢轴方向)分别为 1.9 和 10,输出功率为 20 W。

对于光谱组束,阵列中的每个发光单元得到的反馈波长是不一样的,因此每个发光单元最后激光的波长是不同的,所以光谱组束技术是非相干组束技术。当然,相干组束技术也可以用来改善激光阵列的光束质量,这要求所有的发光单元都激光相同的波长,并且相位被锁定。相干组束技术在光纤激光阵列中,报道的比较多^[25,26]。

3.2 离轴外腔反馈技术

离轴外腔的设计基于以下的原理:对一个单管,在自由运转条件下一般都会有几十个侧模在振荡(二极管的慢轴方向),每个模的远场分布都是一个双瓣结构。不同阶数的侧向空间模,其空间辐射角不同,第 m 阶模的空间辐射角可表示为^[27]

$$\theta_m = \pm \frac{m\pi}{2x_0 k_0}, \quad (1)$$

由于不同阶数的空间模,辐射角不同,因此可以通过调节反馈元件的倾角,来选定某个空间模的一个瓣,将其反馈到二极管的有源区,使其继续振荡放大,另一瓣作激光输出,根据模式竞争的理论,得到反馈的模式振荡被加强,其他的模式被有效地抑制,这样输出激光的空间模式数量就减少了很多,输出的光束质量就会提高。

Volker Raab 等^[28]设计了一种离轴外腔如图 4 所示,用来改善激光二极管慢轴方向的光束质量。在慢轴方向分为两个支路,一个支路为反馈支路,反馈元件为平面反射镜,另一支路作激光输出。调整平面反射镜的倾角,可以选择不同的模式注入到有源区进行放大。为了加强选模能力,在反馈支路靠近反射镜的位置放置一个小孔进行空间滤波。在几倍阈值电流情况下取得了近衍射极限的激光输出,平均输出功率为 0.4 W。

对单个激光二极管进行外腔反馈的实验,能够获得小功率的、高光束质量的激光。为了获得高功率、高亮度的激光输出,Xin Gao 等^[10]针对一个激光二极管阵列设计了一种如图 5 所示的外腔装置。

二极管阵列发出的光首先要经过一个快轴准直镜进行准直。为了避免相邻两个发光单元在慢轴方向上的交叉,反馈镜放在距离阵列几毫米远的地方。反馈镜上镀有高反与高透周期性交错的膜,膜的周期为 $500\ \mu\text{m}$ 宽,其中高反膜为 $250\ \mu\text{m}$ 宽。仔细调整反馈镜的位置,使形成一个离轴外腔。条形镜的高反区的反馈使二极管在一个很窄的模空间里振荡。激光从镀有高透膜的区域输出,由于使用了公共的反馈镜,所以整个阵列的激光输出的发散角都被有效地压缩。通过使用这种方法,在三倍阈值电流情况下,输出功率为 14 W,光束质量提高了 4.4 倍,功率效率为 70.4%。

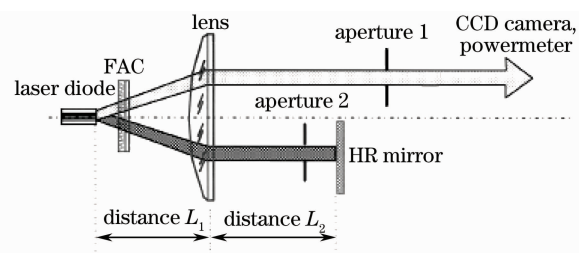


图 4 单管的离轴外腔装置

Fig. 4 Off-axis external cavity feedback laser diode

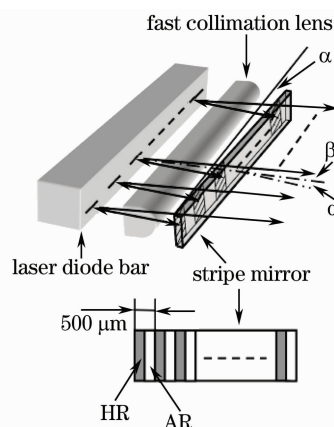


图 5 二极管 bar 的外腔结构

Fig. 5 Off-axis external cavity feedback laser diode bar

3.3 离轴光谱组束技术

图 6 是 Deepak Vijayakumar 等^[29]设计的一个典型的离轴光谱组束装置,与常规的光谱组束最大区别在于,该装置在输出耦合镜与衍射光栅之间插入一个 D 型尖边缘平面反射镜。阵列中的每个发光单元远场分布是双瓣结构,使用一个 D 型平面反射镜,空间模中的一个远场瓣被反馈到激光器中,通过改变 D 型平面反射镜的倾角,可以选择性地反馈其中的某个模式,这样就能进一步有效改善激光光束质量。

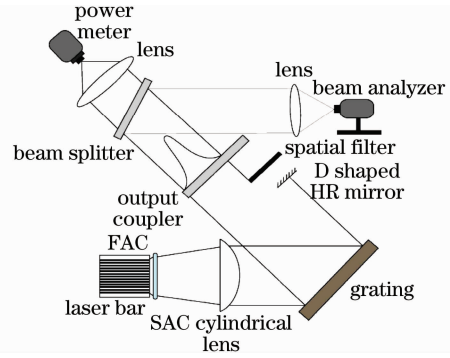


图 6 离轴光谱组束装置

Fig. 6 Off-axis spectral beam combining experimental setup

4 同时实现高亮度窄线宽的激光输出

如果离轴外腔反馈装置中反馈支路中的反馈元件用光栅,或在两个支路中分别用平面反射镜和光栅作反馈,这样可以同时实现高亮度窄线宽的激光输出。陈军^[11,30~31]等对一个单管实现了光束质量和谱线宽度的同时改善,实验装置如图 7 所示。

这种装置由两个支路构成,闪耀光栅和平面高反镜在系统中作为反馈器件。激光二极管发出的光经过柱面透镜 L1 和 L2 准直后分为两路。一路被透镜 L3 直接会聚到平面高反镜上,而另一路被棱镜反射到闪耀光栅上。通过调节光栅的倾角,高反镜的倾角分别来选定某一个空间模的两个瓣,将其反馈到二极管的有源区,使其继续振荡放大,其他模式能有效被抑制。在光栅反馈支路中插入一个输出耦合镜,作为激光输出。这样输出激光的空间模式被有效改善,激光亮度得到提高。此外,光栅还具有频率选择功能,光栅按 Littrow 结构放置,可以选定某个特定波长注入激光器的有源区中,使激光器输出波长带宽变窄。运用这一装置 Jun Chen 等获得了 0.02 nm 带宽,光束质量达到衍射极限的输出激光。

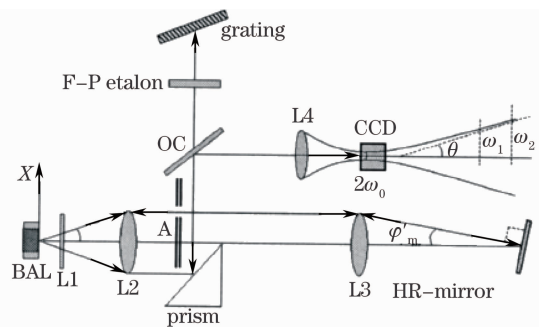


图 7 双反馈外腔装置

Fig. 7 Double external cavity feedback laser diode bar

5 窄线宽、相干的激光二极管阵列输出

为了获得窄线宽的相干的激光光源, B. Liu 等^[1]采用离轴外 Talbot 腔进行相位锁定来实现了窄线宽的相干的激光光源,实验装置如图 8 所示。这种装置是一种 V 型结构,上支路是一个反馈支路,下支路作输出支路。

对于反馈支路, GRIN 透镜和柱面镜 CL2 对激光束在快轴方向准直,柱面镜 CL1 和柱面镜 CL3 是一对共焦系统,将二极管阵列的像成在 CL3 的焦平面上,即图 8 所示。因此对整个外腔的分析,可以简化为光线从成像焦平面到光栅成像焦平面的过程。使光栅的位置满足这样的条件, $D = f_3 + z_t/2$, 其中 z_t 是 Talbot 距离, $z_t = 2d^2/\lambda$, 其中 d 是发光单元之间的中心距离。光栅仍然是按 Littrow 结构放置,通过其一阶衍射反馈进行波长锁定,压缩线宽。光栅的零阶光使阵列中的各发光单元之间相互耦合,实现相干输出(关于发光单元之间的

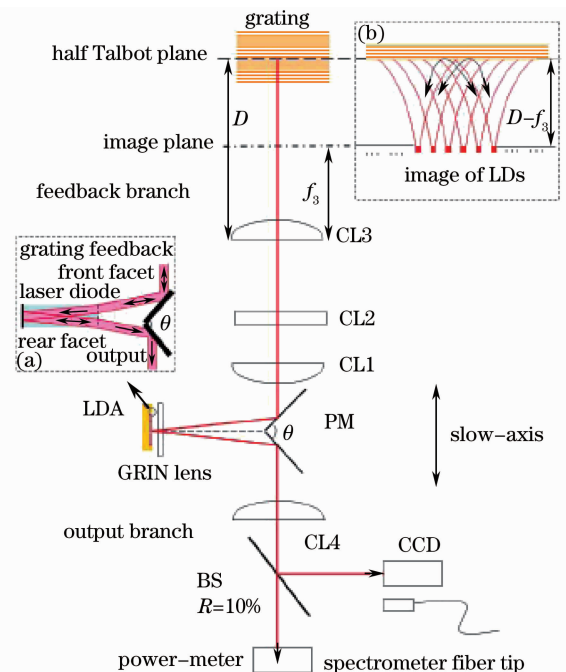


图 8 离轴外 Talbot 腔装置

Fig. 8 Off-axis external Talbot cavity feedback laser diode bar

相互耦合,以二极管阵列的像,作为周期性发光体就很容易理解)。通过这样的装置就可以实现激光窄线宽、相干输出。这种方法是将离轴外腔反馈技术与相干组束技术有效地结合起来,能同时有效地改善输出激光的光束质量和光谱线宽。激光二极管阵列在自由运转情况下,空间相干性很差,因此直接实现相干组束很难,因此需要空间滤波器。B. Liu 等^[1]采用了 V 型结构的外腔,这种结构的外腔的一个支路能够有效地改善激光的光束质量,压缩空间发散角,提高激光的相干性,相当于空间滤波器。这样,不需要额外的空间滤波器就可以实现相干输出。

6 外腔反馈技术的优、缺点分析

外腔反馈技术,可以改善激光二极管的输出激光的光束质量,光谱线宽,以及相干性。然而,商用的激光二极管输出端面有大约 5% 的反射率,在抽运电流不断增加的时候,腔内的振荡抑制了外腔的振荡效应,因此,输出激光的光束质量以及光谱线宽的改善效果会减弱。这样,用外腔反馈技术对商用激光二极管来改善其输出激光的光束质量或光谱特性时,很难获得高功率的激光输出。因此,用作外腔反馈的激光二极管,其输出端面需要镀有特殊的增透膜,使输出端面的透射率可以达到 99% 左右,这样,外反馈的效果就会比较明显,然而,激光二极管的阈值就会提高。此外,外腔反馈装置的体积比较大,不适合在一些小型化、便携式的仪器上应用。此外,激光二极管阵列的“smile”效应也会影响外反馈的效果。所以,尽量挑选“smile”效应小的阵列,作外反馈实验的激光器。外腔反馈技术,用来改善二维激光二极管阵列光束质量和光谱线宽可以获得更高功率输出激光。

7 结束语

根据高功率激光二极管阵列的不同应用目标,将改善激光二极管阵列的线宽和亮度的研究领域分为四类:1)窄线宽激光二极管光源;2)高亮度的激光光源;3)同时实现高亮度、窄线宽的激光光源;4)窄线宽的相干的激光光源。这些研究领域运用的主要技术就是外腔反馈技术,这些技术包括 Littrow 外腔反馈技术,光谱组束技术,离轴外腔反馈技术,离轴外 Talbot 腔技术。

参 考 文 献

- 1 B. Liu, Y. Liu, Y. Braiman. Coherent addition of high power laser diode array with a V-shape external Talbot cavity[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(25): 20935~20942
- 2 Bo Liu, Yun Liu, Yehuda Braiman. Linewidth reduction of a broad-area laser diode array in a compound external cavity[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(2): 365~370
- 3 E. Samsøe, P. E. Andersen. Improvement of spatial and temporal coherence of a broad area laser diode using an external-cavity design with double grating feedback[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(4): 609~616
- 4 C. L. Talbot, M. E. J. Freese, D. Eang *et al.*. Linewidth reduction in a large-smile laser diode array[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(29): 6264~6268
- 5 Su Zhouping, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Beam quality improvement of laser diode array by using off-axis external cavity[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(19): 11776~11780
- 6 H. Zhu, I. C. Ruset, F. W. Hersman. Spectrally narrowed external-cavity high-power stack of laser diode arrays[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(11): 1342~1344
- 7 W. A. Clarkson, D. C. Hanna. Two-mirror beam-shaping technique for high-power diode bars[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(6): 375~377
- 8 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. Principle of lasers[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000, 86~88
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000, 86~88
- 9 A. Gourevitch, G. Venus, V. Smirnov *et al.*. Continuous wave, 30 W laser-diode bandwidth 10 GHz linewidth for Rb laser pumping[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(7): 702~704
- 10 X. Gao, Y. Zheng, H. Kan *et al.*. Effective suppression of beam divergence for a high-power laser diode bar by an external-cavity technique[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(4): 361~363
- 11 J. Chen, X. Wu, J. Ge *et al.*. Broad-area laser diode with 0.02 nm bandwidth and diffraction limited output due to double

- external cavity feedback[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(4): 525~527
- 12 Volker Raab, Danilo Skoczowsky, Ralf Menzel. Tuning high-power laser diodes with as much as 0.38 W of power and $M^2=1.2$ over a range of 32 nm with 3 GHz bandwidth[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(22): 1995~1997
- 13 Q. Li, P. Zhao, W. Guo. Amplitude compensation of a diode laser array phase locked with a Talbot cavity[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(23): 231120
- 14 Yujin Zheng, Hirofumi Kan. Effective bandwidth reduction for a high-power laser-diode array by an external-cavity technique[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(18): 2424~2426
- 15 B. Chann, I. Nelson, T. G. Walker. Frequency-narrowed external-cavity diode-laser-array bar[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(18): 1352~1354
- 16 S. B. Bayrama, T. E. Chupp. Operation of a single mode external-cavity laser diode array near 780 nm[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2002, **73**(12): 4169~4171
- 17 Su Zhouping, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Line-width reduction of a laser diode array using an external cavity with two feedback mirrors[J]. *Chin. Phys. Lett.*, **24**(9): 2587~2589
- 18 B. L. Volodin, S. V. Dolgy, E. D. Melnik *et al.*. Wavelength stabilization and spectrum narrowing of high-power multimode laser diodes and arrays by use of volume Bragg gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(16): 1891~1893
- 19 E. Babcock, B. Chann, I. A. Nelson *et al.*. Frequency-narrowed diode array bar[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(18): 3098~3104
- 20 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(3): 567~577
- 21 B. Chann, R. K. Huang, L. J. Missaggia *et al.*. Near-diffraction-limited diode laser arrays by wavelength beam combining [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(16): 2104~2106
- 22 R. K. Huang, B. Chann, L. J. Missaggia *et al.*. High-brightness wavelength beam combined semiconductor laser diode arrays[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(4): 209~211
- 23 V. Daneu *et al.*. Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **25**(6): 405~407
- 24 Juliet T. Gopinath, Bien Chann, T. Y. Fan *et al.*. 1450 nm high-brightness wavelength-beam combined diode laser array [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(13): 9405~9410
- 25 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Coherent beam combination of fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(9): 46~54
何 兵, 楼祺洪, 周 军 等. 光纤激光器相干组束技术[J]. 激光与光电子学展, 2006, **43**(9): 46~54
- 26 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Phase-locking and high coherent power output of two fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1153~1158
何 兵, 楼祺洪, 周 军 等. 两个光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出[J]. 中国激光, 2006, **33**(9): 1153~1158
- 27 M. Chi, B. Thestrup, P. M. Petersen. Self-injection locking of an extraordinarily wide broad-area diode laser with a 1000 μm -wide emitter[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(10): 1147~1149
- 28 V. Raab, R. Menzel. External resonator design for high-power laser diodes that yields 400 mW of TEM₀₀ power[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(3): 167~169
- 29 Deepak Vijayakumar, Ole Bjarlin Jensen, Birgitte Thestrup. 980 nm high brightness external cavity broad area diode laser bar[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(7): 5684~5690
- 30 Wu Xiaodong, Chen Jun, Ge Jianhong. Broad-area laser diode with 0.02 nm bandwidth and diffraction limited output due to double external cavity feedback[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(11): 1605~1609
吴晓冬, 陈 军, 葛剑虹. 0.02 nm 带宽近衍射极限输出的双外腔反馈半导体激光器[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(11): 1605~1609
- 31 Liu Chong, Ge Jianhong, Chen Jun. Investigation of loss and threshold characteristics in the laser diode with external feedback[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1413~1416
刘 崇, 葛剑虹, 陈 军. 外腔反馈半导体激光器的损耗和阈值特性研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(12): 1413~1416