

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0151-04

使用位相共轭注入法对高功率宽面积多条结构 半导体激光器的带宽压缩

王 锋¹ Andreas Hermerschmidt² Hans Joachim Eichler²

¹ 凌云光电科技有限责任公司, 武汉 430030
² Optisches Institut P1-1, Technische Universität Berlin, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

提要 提出一种由两块光折变晶体组成的高效相位共轭装置。使用这种装置和一个小功率单模半导体激光器, 对一个由三个条形阵列组成的大功率半导体激光器进行注入波长锁定。驱动电流在阈值电流的 2.25 倍以下时, 大功率半导体激光器的波长可以被有效地锁定在小功率的单模半导体激光器的波长上, 带宽由 2 nm 压缩到 0.034 nm, 输出功率高达 1.5 W。

关键词 光折变位相共轭, 注入锁定, 主激光器, 从激光器, 带宽

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A

High-power Narrowed-bandwidth Output of a Broad-area Multiple-stripe Diode Laser with Photorefractive Phase-conjugated Injection

WANG Feng¹ Andreas Hermerschmidt² Hans Joachim Eichler²

¹ Lingyun Photoelectronics System Co., Ltd., Wuhan 430030
² Optisches Institut P1-1, Technische Universität Berlin, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

Abstract By using a new mutually pumped phase-conjugation setup consisting of two photorefractive crystals, a broad-area three-stripe diode laser is locked to a single-mode diode laser at a drive current up to 2.25 times the threshold current. The bandwidth is narrowed from about 2 nm to 0.034 nm, with an available output power of 1.5 W.

Key words mutually pumped phase-conjugation, injection-locking, master laser, slave laser, bandwidth

许多领域都需要高功率、窄带宽、可调谐半导体激光器(laser diode, 简称 LD), 如激光冷却^[1]、旋转交换光抽运^[2]、二次谐波产生^[3]等。宽面积 LD 和 LD 阵列一直作为高功率连续激光源使用, 但由于光束质量差, 它们的应用受到了很大的局限性。对于自由运转的大功率 LD 来说, 除了空间模式(横模)是多模外, 纵模也是多模。典型的带宽为 2 nm 左右。

迄今为止, 注入锁定技术已经成功地用于 LD 激光光束质量改善方面。从注入源来说, 注入锁定可以分为两种。一种可以称为主-从注入锁定, 即把一个小功率单模激光(主激光)注入到大功率多模激光器(从激光器)中, 实现从激光的锁定。另一种可以称为自注入锁定, 即使用一个带有模式选择的反馈系统, 对自身进行模式锁定。

研究表明, 不论在主-从注入^[4-6]还是自注入^[7-9]中, 光折变位相共轭注入由于其自对准的特性都是一种行之有效的方法。然而, 有效的输出功率都局限在数百毫瓦^[4-8]的水平。究其原因, 不仅是因为所使用的主-从激光器功率的限制^[4-6, 9], 还因为一种叫做饱和的效应限制了共轭输出的功率。

光折变互抽运位相共轭(MPPC)频繁地使用在 LD 的主-从注入系统中^[4-6]。对于抽运光束分别为互不相干的光束 1 和光束 2 的双作用区的 MPPC 来说, 作用原理可以大致描述如下: 光束 1 和 2 在不同的作用区域内分别和它们自己的散射光束作用并形成各自的散射光栅。当光束 1(2)的散射光到达另一个作用区, 将擦除大部分光束 2(1)的散射光栅。但当其入射角正好符合光束 2(1)的某个散射光栅的布拉格角时, 这个光栅不但不被擦除, 相反,

将被增强,同时产生光束 2(1)的共轭光。对于光束 1 反之亦然。这样,最终在两个作用区中形成两个非常强的光栅,产生出光束 1 和光束 2 的位相共轭光。值得强调的是,光束 1(2)的共轭光来自于光束 2(1)。

本文涉及的多条宽面积 LD 是一种介于单条宽面积 LD 和 LD 巴(bar)之间的结构。为了把主激光同时注入所有的条状结构里,我们首先设计了一个包括二元衍射器件和几何光学元件在内的光学系统。然而,由于所谓的“smile”效应,并不是所有的条形结构都位于同一个平面内,而是形成一个曲线。一般来说,这种“smile”效应是在封装过程中产生的。因此,很难把主激光同时注入所有的条状结构

里。实验结果也表明注入并没有引起显著的变化。

对于使用光折变 MPPC 的主-从注入系统,可以通过增加主激光器的功率或增加 MPPC 的透过率来达到增大注入光强的目的。然而,增加主激光器的功率是非常昂贵的有时甚至是不可能的;而 MPPC 的透过率又受到主要由 2K 光栅引起的饱和效应的制约。本文中,我们将首先介绍一种由两块光折变晶体组成的高效的 MPPC。其对主激光束的共轭透过率和一块晶体相比增加了一倍以上。用上述装置对大功率宽面积多条结构的 LD 进行注入锁定,激光器的激光带宽由约 2 nm 压缩到约 0.034 nm,有效输出功率高达 1.5 W。

图 1 所示为试验装置。

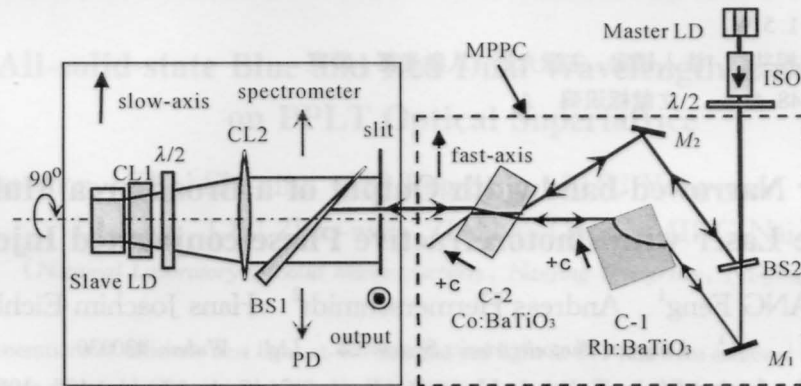


Fig. 1 使用两块光折变晶体组成的互抽运共轭 MPPC 的主-从激光器注入锁定的实验装置图。LD: 半导体激光器; CL: 柱面透镜; $\lambda/2$: $\lambda/2$ 波片; BS: 分光镜; ISO: 光学隔离器; M: 反射镜。狭缝由两个发射镜组成,同时当作系统的输出镜。实线框中的装置应当旋转 90° ,如图中箭头所标注的

Fig. 1 Experimental setup for the injection locking using a mutually pumped phase-conjugation (MPPC) setup consisting of two photorefractive crystals. LD's: laser diodes; CL's, cylindrical lenses; $\lambda/2$'s: $\lambda/2$ wave plates; BS's: beam splitters; ISO: isolator, M's: mirrors. Note that the slit consists of two mirrors, which act also as the output couplers. The part in the solid frame should be rotated by 90°

从激光器是一个由三个宽面积条结构组成的大功率 LD,型号为 SLI-CW-SLD-C1-808-7M-R,尺寸为 $1 \mu\text{m} \times 700 \mu\text{m}$ 。每个条状结构的尺寸为 $1 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 。每个条状结构行为就象巴中的一个独立的 LD,有着自己的中心波长和纵、横模结构。阈值电流 I_{th} 为 1.8 A。主激光器为光栅稳定的 Littrow 结构的 LD,型号为 DL 100 (TuiOptics, Munich)。单模最大输出为 43 mW,中心波长为 807 nm。主激光器的快、慢轴分别用两个柱面透镜准直。一个可调节的狭缝放在慢轴柱面透镜的焦点处。狭缝由两个反射镜组成,同时用作系统的输出镜。在主激光器的前面,首先放置了一个 Faraday 隔离器,以防止从激光器的光对单模的主激光器造成干扰。由于 LD 的光的偏振垂直于快轴方向,两个 $\lambda/2$ 波片分别

插入主、从光路中,以便在光折变晶体中得到非常偏振光。主、从激光器的光谱用一个光谱仪测量,并用高动态范围的 CCD 阵列纪录。纪录的信号由一个计算机内置的 12-bit A/D 图像转换卡转换为数字信号。我们已经提出了一种有两块光折变晶体组成的 MPPC^[10],如图 1 的虚线框中所示。一块晶体是典型的小鸟结构的 MPPC,产生出弱的共轭信号。此共轭信号在第二块晶体中通过二波混频得到放大^[10]。主激光的激光束被分成功率比为 3:1 的两束。弱的光束到晶体 C-1 (0° -cut Rh:BaTiO₃) 中,作为一束抽运光产生主激光束的共轭光,强的主激光束输入到另一块晶体 C-2 (0° -cut Co:BaTiO₃) 中,作为抽运光以放大主激光束的共轭光。图 2 为使用两块晶体和只使用一块晶体所产生的共轭光动态特

性的比较。在使用一块晶体时,从光路中取出 C-2 和 BS2 即可。可以看出,使用两块晶体,不仅共轭功率增加了一倍以上,而且共轭光的稳定性得到了很大的改善。另外,实验中还发现使用两块晶体时共轭光的质量也得到了很大的改善,详细情况请参阅文献[10]。只使用一块晶体时,由于共轭注入光强度低且不稳定,无法实现对从激光器的完全锁定。

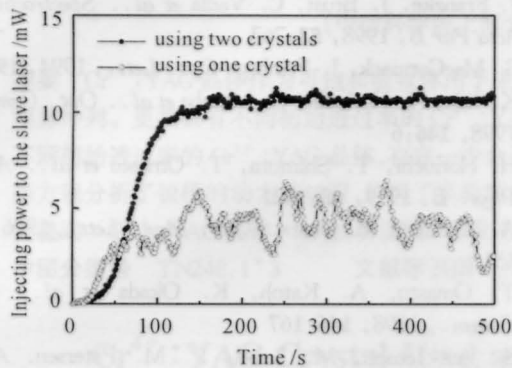


图2 两块晶体和一块晶体组成的光折变位相共轭器产生的共轭注入光的动态过程比较。两块晶体的注入光功率是一块晶体的两倍,且时间稳定性得到了很大的改善

Fig.2 Build-up of the phase-conjugated injection beam power using MPPC configurations including two crystals and only crystal, respectively. Using two crystals the injection power is two times that using only one crystal with significantly improved temporal stability

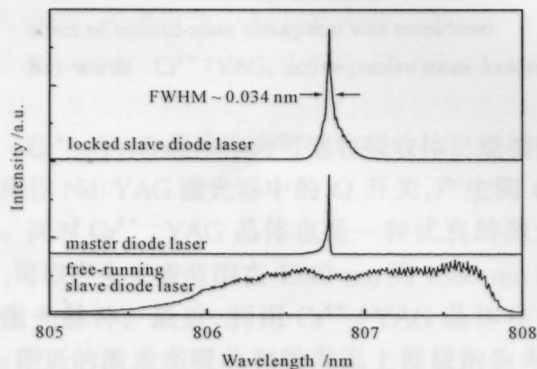


图3 驱动电流为 4.05 A ($2.25 I_{th}$) 时,从激光器的光谱在有注入锁定时的比较。为方便对比,图中也给出了主激光器的光谱

Fig.3 Spectra of the slave diode laser at a current of 4.05 A ($2.25 I_{th}$) when it is free-running and locked to the master diode laser, respectively. For comparison, the spectrum of the master laser is also shown

使用上述的两块晶体作为 MPPC 进行主-从注入锁定,在从半导体激光器的驱动电流高达阈值电流 I_{th} 的 2.25 倍以下时,从激光器都可以被完全锁定。光谱如图 3 所示:从激光器的带宽(FWHM)从

2 nm 降到了 0.034 nm,系统的有效输出功率高达 1.5 W。为了便于比较,图 3 中还给出了主激光器的光谱。由于单色仪系统的分辨率为 0.015 nm,无法测出主激光器的带宽。需要说明的是,在实验中,尽管在慢轴的 Fourier 面上进行了空间模式(横模)的选择,我们并没有实现横模的改善。

我们也尝试了用几何光学元件(成像光学)进行主-从激光器锁定。结果表明,可以在高达 $3.5 I_{th}$ 以下的任何工作电流时锁定单个发光条;在 $1.7 I_{th}$ 以下任何工作电流时锁定两个发光条。在任何工作电流下我们都无法实现三个发光条的激光的同时锁定。这是因为:1) 从激光器的在快轴方向上的发光体尺寸只有 $1 \mu\text{m}$,而注入的主激光束在此方向上的尺寸远大于此,这是由成像光学系统的衍射极限造成的,无法克服;2) 要同时锁定三个条结构,主激光必须同时覆盖具有所谓的“smile”效应三个条结构表面,导致非常低的有效注入光密度。使用两个晶体组成的共轭注入系统,由于共轭的自对准特性,可以极大地提高有效注入光密度。这就是我们可以在高电流情况下实现从激光器的完全锁定的原因。

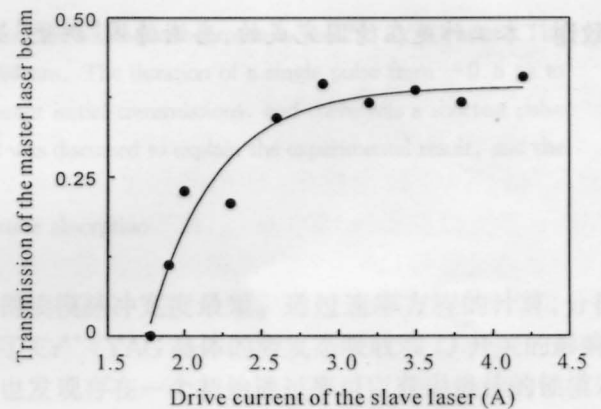


图4 主激光光束的透过率和从激光器的驱动电流的依赖关系。主激光光束的功率为 43 mW

Fig.4 Transmission of the master laser beam as a function of the drive current of the slave diode laser. The total power of the master laser is 43 mW. The solid line is only for guiding eyes

测量了从激光器在不同驱动电流下位相共轭注入光功率。首先定义主激光束的透过率为从激光束的位相共轭光和主激光束的功率比。扣除光路中几何光学元件以及晶体表面的损耗,从激光器不同驱动电流下主激光束的透过率如图 4 所示。从激光器的阈值电流为 $I_{th} = 1.8 \text{ A}$ 。增加此驱动电流,主激光束的透过率首先表现出强的增加趋势。随着电流

的进一步增加,此趋势逐渐减弱,最后在 2.9 A (约 $1.6I_{th}$) 时透过率达到一个饱和值(约 40%)。我们相信,如果增加主激光器的激光功率,或从激光器的输出面镀上增透膜,从激光器可以在更高的电流下实现锁定,从而得到更大有效输出功率的、波长锁定的从激光光束。

近来 Nelson 等使用光栅外腔对一个由两个宽面积条结构组成的大功率 LD 进行自注入,得到了 2.5 W 的输出^[11]。我们也用光栅和标准具组成的外腔进行了自注入实验,得到了 2.3 W 的有效输出^[12]。但是, Nelson 的带宽是 0.15 nm, 我们的外腔法得到带宽为 0.07 nm。都大于本实验的 0.034 nm。换句话说,从谱强度的角度来说,本实验结果要高于上述两例。

本实验装置最大的优点是可以扩展到高功率半导体激光器阵列(array)、巴(bar)甚至堆栈(stack)的注入锁定中。在这种高功率场合,需要大功率的主激光器,这往往是造价昂贵甚至不现实的。我们认为一个现实的解决办法是使用一个半导体激光放大器放大主激光束,或使用多个串联的注入锁定系统。

致谢 本工作是在德国完成的,感谢德国“洪堡”基

金会对作者的资助,同时感谢德国 BMBF 对本项目的资助。

参 考 文 献

- 1 A. C. Fey-den Boer, H. C. W. Beijerinck, K. A. H. van Leeuwen. *Appl. Phys. B*, 1997, **64**:415
- 2 T. G. Walker, W. Happer. *Rev. Mod. Phys.*, 1997, **69**:629
- 3 J. Franzke, J. Brust, C. Vadla *et al.*. *Spectrochimica Acta Par B*, 1998, **53**:763
- 4 S. MacCormack, J. Feinbrg. *Opt. Lett.*, 1994, **19**:120
- 5 K. Iida, H. Horiuchi, O. Matoba *et al.*. *Opt. Comm.*, 1998, **146**:6
- 6 H. Horiuchi, T. Shimura, T. Omastu *et al.*. *Appl. Phys. B*, 1999, **68**:1021
- 7 A. Shiratori, M. Obara. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**:1515
- 8 T. Omastu, A. Katoh, K. Okada *et al.*. *Opt. Comm.*, 1998, **146**:167
- 9 S. Juul Jensen, M. Lobel, P. M. Petersen. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**:535
- 10 F. Wang, A. Hermerschmidt, P. Pogany *et al.*. *Appl. Phys. B*, 2001, **72**:755
- 11 I. A. Nelson, B. Chann, T. G. Walker. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**:1356
- 12 F. Wang, A. Hermerschmidt, H. J. Eichler. Submitted to *Opt. Comm.*,

