

# 利用全光纤耦合环实现三路光纤激光器的相位锁定\*

雷 兵<sup>†</sup> 冯 莹 刘泽金

(国防科技大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(2007 年 9 月 20 日收到, 2008 年 4 月 21 日收到修改稿)

利用三个  $2 \times 2$  的光纤耦合器按一定规则联接成一个全光纤耦合环, 该耦合环将三个独立的掺铒光纤激光器连成一个锁相阵列. 由于耦合环的引入, 锁相阵列的整体损耗减小, 且三个单元激光器之间可以进行有效的能量相互注入耦合, 进而实现阵列的锁相输出. 实验中观察到的远场干涉图样和锁相前后的输出光谱均表明三路光纤激光器实现了相位锁定, 当三路抽运源的功率均为 100 mW 时, 获得了 92 mW 的稳定相干输出.

关键词: 光纤激光器, 相干合成, 光纤耦合器, 相位锁定

PACC: 4281W, 4225K, 4281M

## 1. 引 言

光纤激光器由于具有结构简单、散热容易、转换效率高、输出光束质量好、运行成本低等优点, 在自由空间通讯、激光雷达、定向能、工业加工等领域具有广泛的应用. 然而, 目前单根光纤能够输出的最大功率为 1960 W, 光束质量因子为  $1.2^{[1]}$ , 进一步提高单纤功率所面临的纤芯及端面的光学损伤、热损伤以及光学非线性效应等问题, 极大的阻碍了光纤激光器成为大功率高亮度的激光源. 相干组束多个中等输出功率且光束质量良好的光纤激光被认为是克服上述困难以获得高亮度高平均功率光纤激光源的良好途径<sup>[2,3]</sup>.

近年来, 各国研究人员提出了多种光纤激光器的相干合成方案<sup>[4-24]</sup>, 并做了大量的理论与实验研究工作. 利用光纤耦合器构建全光纤结构的合成阵列首先掀起了这一领域的热潮<sup>[4-11]</sup>, 但是这些阵列几乎都采用单一的公共光纤端输出, 因此最终的输出功率仍然像单纤输出一样受限. 为了避免单一光纤端输出的限制, 随后人们发展了带公共外腔的合成阵列<sup>[12-18]</sup>, 如泰伯腔, 自成像腔, 自傅里叶变换腔, 维纳-迈克尔逊腔等, 然而这些外腔一般调整难度大, 合成效率不高, 且较难扩展为多单元阵列. 由于光纤激光器一般增益介质横向尺寸小, 腔长较长,

其相位噪声受本身热效应和外界干扰的影响大, 因此构建基于主振荡功率放大(MOPA)结构的有源相位控制阵列被认为是实现稳定锁相输出的有效办法<sup>[19-22]</sup>, 目前已有 4 单元合成获得 470 W 相干输出<sup>[19]</sup>和 48 单元小功率合成<sup>[20]</sup>的实验报道, 但是该方案需要复杂快速的相位探测与校正技术, 且必须采用制造难度及成本很高的大功率保偏光纤放大器. 最近, 文献<sup>[23, 24]</sup>采用一种相互注入锁定技术分别实现了多路光纤放大器与激光器的相位锁定, 其中前一方案的核心是引入一段公共腔并采用单模光纤对远场光斑进行空间滤波, 后一方案的核心是通过引入多端口光纤分束器实现相邻激光器的能量相互耦合, 二者均通过相互注入锁定或自组织机理实现了无源相位锁定. 此类合成方案用于构建光纤激光器的锁相阵列, 具有无需有源相位探测与校正、输出功率不受单纤限制、扩展性好、合成效率高、技术上易于实现等优点, 是目前该领域的重要发展方向之一, 因此本文在此基础上又提出了基于光纤耦合环的新型全光纤结构自组织锁相光纤激光器阵列.

本文提出利用多个  $2 \times 2$  的光纤耦合器构建一个光纤耦合环, 将各个单元激光器与耦合环恰当联接使得它们之间可以通过耦合环实现能量的相互注入耦合, 进而达到锁相输出的目的. 实验上实现了三单元光纤激光器阵列的锁相输出, 观察到了明显

\* 国防科技大学优秀研究生创新资助项目(批准号: B070702)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: leibing\_2000@126.com

的远场干涉图样和锁相后各单元以一致波长激光的输出光谱,且阵列输出功率稳定.理论上计算了不同近场排布方式时三路锁相输出的远场干涉图样,与实验结果一致.最后给出了两种可构成  $n$  单元光纤激光器锁相阵列的扩展结构.

## 2. 实验原理与装置

本方案的核心部分是引入的全光纤耦合环,它为各个单元激光器之间的能量相互注入耦合提供了一个全光纤通道,同时光纤环还可以起到光学滤波器的作用,只有满足原有线性腔和光纤环行腔谐振条件的模式才具有最低的损耗而起振.将  $2 \times 2$  的熔拉型光纤耦合器的两个端口(一个输入,一个输出)按一定规则与相邻耦合器的端口两两相连以构成耦合环,每个耦合器余下的两个端口中一个与单元激光器相连,另一个作为激光器的输出端口,如图 1 所示.每个激光器均有部分能量通过耦合器进入光纤环,而光纤环中的能量在经过每个耦合器时,一部分注入耦合到与该耦合器相连的单元激光器,一部分耦合到输出端直接输出,即进入光纤环的能量在环内不断循环要么输出要么耦合回单元激光器,因此除了耦合器的熔接损耗和插入损耗,恰当的引入光纤环没有带来额外的合成损耗.

单元激光器之间通过能量的相互注入耦合实现相互注入锁定,进而达到锁相输出的机理可以初步的解释如下:由于掺稀土增益光纤的增益谱一般较宽,且光纤激光器的腔长较长导致纵模间隔很小,因此单个光纤激光器可以起振的纵模数非常多,通过单元激光器之间的能量相互注入耦合,那些各个激光器均能起振的频率相同或仅有少许差别的纵模将会作为阵列的公共模优先起振,这些公共模将会消耗粒子数反转而抑制其他模式的起振,也就是说具有能量相互注入耦合机理的各个激光器可以自动调整其工作频率和相位以形成阵列公共模.一般说来,上述自调整过程在由具有宽的增益带宽、长且不等的腔长以及低  $Q$  值谐振腔的光纤激光器组成的阵列中较易发生<sup>[16]</sup>.关于通过能量相互注入耦合实现自组织锁相运行的详细机理研究,参考文献[25].

利用全光纤耦合环实现三路光纤激光器锁相输出的实验装置如图 1 所示.三个单元激光器均采用典型的线性腔结构,该腔由光纤布拉格光栅(FBG)与光纤输出端面 4% 的菲涅耳反射构成.三个 FBG

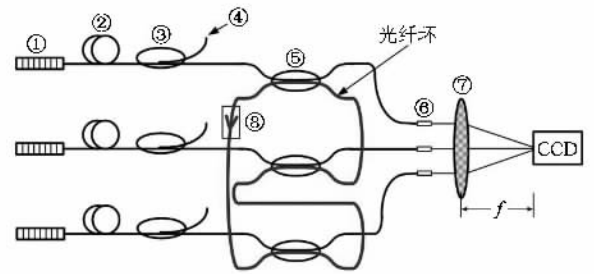


图 1 利用光纤环实现三路光纤激光器锁相输出的实验装置图(其中①为光纤布拉格光栅,②为掺铒光纤,③为波分复用器,④为 980 nm 抽运源,⑤为光纤耦合器,⑥为光纤准直器,⑦为会聚透镜,⑧为光隔离器)

的布拉格中心波长分别为 1550.06, 1550.17, 1550.23 nm;增益光纤为单模掺铒光纤(EDF),其长度互不相同;三个独立的 980 nm 激光二极管(LD)分别抽运三路激光器.三个耦合比为 80/20 的  $2 \times 2$  的偏振不敏感熔拉型光纤耦合器按图 1 所示连成光纤环,其中 80% 用于直接输出,20% 进入光纤环用于能量耦合,三个输出端均接上光纤准直器(FC)对输出光束进行准直,FC 的间距约为 5 mm,随后用一个焦距 50 cm 的会聚透镜来聚焦三束输出光,并用位于其后焦平面上的红外 CCD 相机(Spiricon, LBA-PC300)拍摄远场干涉图样.此外,为提高整个阵列的输出稳定性,光纤环中加入了一个光隔离器(ISO)以保证注入耦合光单向运行,实验结果表明加入此 ISO 对提高系统稳定性是必要的.

## 3. 结果与讨论

利用图 1 所示的实验装置,首先研究了锁相阵列的远场干涉图样.当三个输出准直器排布成间距约为 5 mm 的“品”字和“一”字形时,CCD 记录的远场干涉图样分别如图(a)和(b)所示.

为进行对比,理论上对输出光束采用高斯近似模型,假定三束激光的相位完全锁定,且不考虑它们各自相位的随机变化,计算它们在远场相干叠加形成的干涉图样.对于摆成“品”字和“一”字形的三路高斯光束,其近场(光纤输出端面,即  $z = 0$  处)光场分布<sup>[26]</sup>可分别写为

$$E_p(x, y, 0) = \sum_{n=-1, 1} \exp\left[-\frac{(x - nd/2)^2 + y^2}{\omega_0^2}\right] + \exp\left[-\frac{x^2 + (y - \sqrt{3}d/2)^2}{\omega_0^2}\right] \quad (1)$$

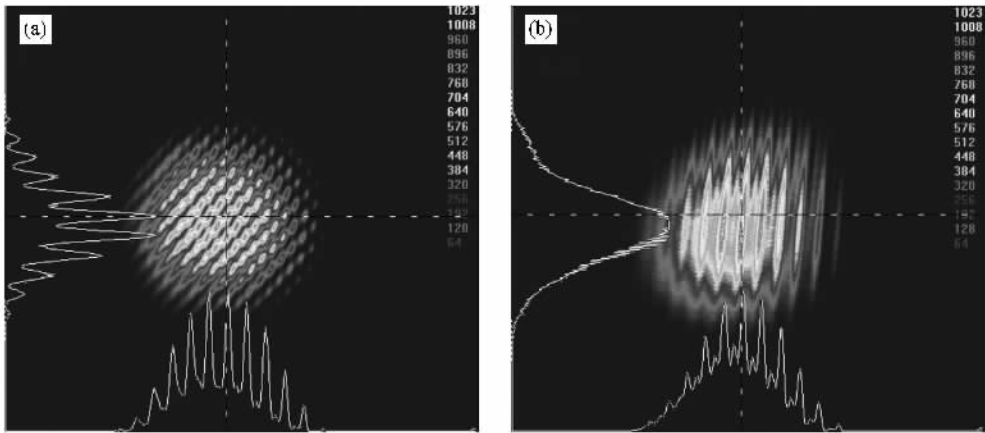


图2 CCD拍摄的远场干涉图样(a)品"字形;(b)一"字形

$$E_1(x, y, \rho) = \sum_{n=-1,0,1} \exp\left[-\frac{(x - nd)^2 + y^2}{\omega_0^2}\right]. \quad (2)$$

为简化起见,略去了幅度常数系数,式中 $\omega_0$ 为高斯束的束腰半径, $d$ 为各光束的中心间隔.而(1)和(2)式描述的离轴高斯束经过一阶光学ABCD系统传输时遵从方程

$$E(x, y, z) = \frac{C_0}{A + B/q_0} \exp\left\{\frac{ik}{2q_1(z)}\left[(x - Ax_0)^2 + (y - Ay_0)^2\right] - ikC(xx_0 + yy_0) + \frac{ik}{2}AC(x_0^2 + y_0^2)\right\}, \quad (3)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, $C_0$ 为与 $\omega_0$ 有关的常数, $x_0, y_0$ 为光束中心与坐标原点的偏离量, $q_0 = i\pi\omega_0^2/\lambda$ , $q_1 = \frac{Aq_0 + B}{Cq_0 + D}$ 其中 $A, B, C, D$ 是高斯束所经历光学系统的变换矩阵 $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ 的矩阵元.考虑到本光学系统中输入高斯束已由FC预准直,且会聚透镜离FC很近,因此仅考虑高斯束经过透镜后在其后焦平面会聚这一过程,相应的矩阵为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & f \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

联立方程(1)–(4)利用 $I = EE^*$ ,可得透镜后焦平面处( $z = f$ )的光强分布为

$$I_p(x, y) = \pi^2 N_f^2 C_0^2 \exp\left[-\frac{2\pi^2 N_f^2}{\omega_0^2}(x^2 + y^2)\right] \times \left[1 + 4\cos\left(\frac{\pi N_f}{\omega_0^2} dx\right) \cos\left(\sqrt{3} \frac{\pi N_f}{\omega_0^2} dy\right)\right], \quad (5)$$

$$I_1(x, y) = \pi^2 N_f^2 C_0^2 \exp\left[-\frac{2\pi^2 N_f^2}{\omega_0^2}(x^2 + y^2)\right] \times \left[1 + 2\cos\left(\frac{2\pi N_f}{\omega_0^2} dx\right)\right]^2, \quad (6)$$

式中 $N_f = \omega_0^2/\lambda f$ 为菲涅耳数.采用本实验中的各项具体参数,根据(5)和(6)式计算得到的远场干涉图样如图3(a)和(b)所示,图中 $x, y$ 轴坐标的单位为输出高斯束的束腰半径 $\omega_0$ .

由图2和3可知,实验结果与理论计算结果基本一致,除了实验中记录的干涉图样的对比度较低以外,实验上得到的干涉图样的轮廓与理想情况下计算的结果几乎完全相同,包括三路摆成“一”字形时两个干涉极大值之间非常小的次极大值,实验拍摄的照片中亦清晰可辨(图3(b)中的次级大并不明显,主要是由于干涉极大与次极大值的差别过大,且图片的对比度不高所致).参照文献[27]中计算得到光强分布剖面图及实验结果,亦可发现它与图2(b)所示的实验结果符合得很好.

实验中获得的远场干涉图样的对比度不高主要有以下两个原因:一是三个单元激光器没有采取任何偏振控制措施,而要获得高对比度的稳定远场干涉图样,需要各束光的频率相同、偏振一致、光强相同且相位关系一定,而频率和相位关系可以通过相互注入锁定产生的自调整过程基本达到一致,光强大小也可通过抽运源进行调整,因此在单元激光器中加入偏振控制器(PC)或使用全保偏器件搭建单元激光器,可以提高本方案中远场干涉图样的对比度;二是通过相互注入锁定实现自组织锁相的是一

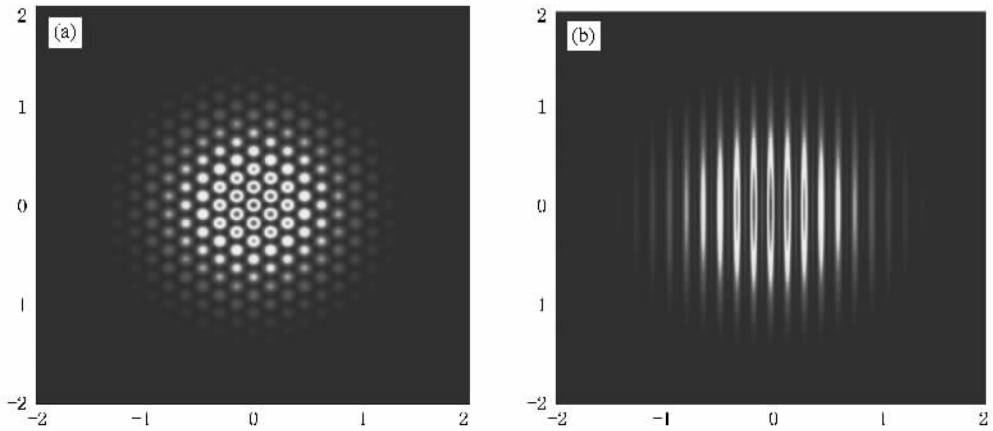


图3 理论计算的远场干涉图样(a)品'字形;(b)一'字形

种无源方案,而光纤激光器的相位噪声起伏较大,无源自组织过程不一定能完全有效的及时调整相位的随机变化.干涉图样中旁瓣和小光斑的大量出现主要是由于各束光在近场时的填充比太低(准直后输出光束的直径约0.4 mm,而光束间距约为5 mm),提高输出光束的近场填充比,可以在远场获得能量集中的高亮度激光束.

将红外 CCD 换为光谱仪(Agilent 86142A)和功率计(ILX Lightwave, FPM 8210H),进一步研究了锁相阵列的相干输出特性.锁相阵列以及单元激光器的输出光谱如图4所示.图中锁相阵列的输出光谱已按照功率计的测量结果作了等比例放大处理,单元激光器的光谱是在去掉光纤环之后,直接接入光谱仪测得的,并用功率计的测量结果作了校正.光谱数据表明,三个激光器单独运行时的激光波长分别为1550.06, 1550.17, 1550.23 nm,而锁相阵列的工作波长为1550.19 nm,位于激光器2和激光器3的激光波长之间.据此可以认为,由于光纤环的引入,三个激光器之间的确发生了有效的能量相互注入耦合,并且选择了它们的公共模起振,最终实现了同频锁相输出.当三个抽运源的输出功率均为100 mW时,单元激光器的输出功率分别为30, 35.6, 39.4 mW,经过光纤环耦合而合成后,锁相阵列的输出功率为92 mW,且稳定性很好,相应的组合效率约为87.6%.

由于本方案采用光纤环构成相互注入耦合环路,整个系统中既没有多余的磨了 $8^\circ$ 斜角的光纤损耗端<sup>[5-11]</sup>,也没有用于形成反馈耦合的分立光学元件<sup>[13-18]</sup>,因此除了引入光纤耦合器带来的熔接损耗和插入损耗外,锁相阵列的整体损耗和以往方案相

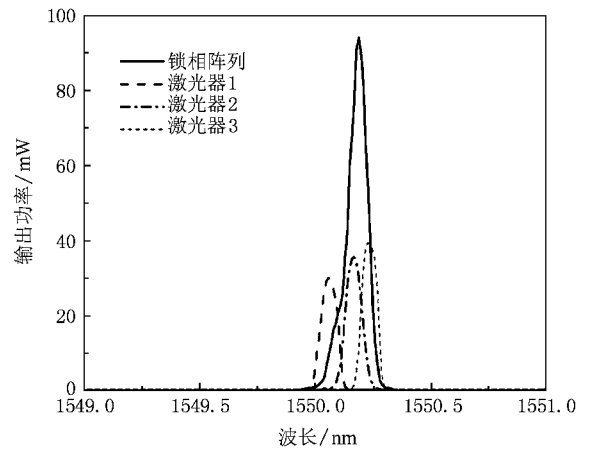


图4 锁相阵列以及单元激光器的输出光谱

比明显减小了,因而可以获得较高的合成效率.同时,由于锁相阵列采用全光纤结构,因此阵列的可靠性、稳定性等有了提高,实验上也容易实现.此外,本方案的扩展性也很好,可以很方便的按照图5和图6所示的结构进行扩展,只需增加耦合器的个数即可.对于图5所示的扩展方案,主要是奇数路激光器与偶数路激光器的能量相互进行注入耦合,可用相同耦合比(如80/20或90/10)的 $n$ 个 $2 \times 2$ 耦合器来构成光纤环,锁相阵列的对称性较好,预计可以实现有效的锁相输出.对于图6所示的扩展方案,主要是激光器1注入到激光器2—激光器 $n$ ,宜用一个较大耦合比(如80/20或70/30)的 $2 \times 2$ 耦合器和 $(n-1)$ 个相同较小耦合比(如90/10或95/5)的 $2 \times 2$ 耦合器来构成光纤环,同时适当增加激光器1的输出功率,此时锁相阵列的对称性被破坏,根据文献<sup>[25]</sup>的理论研究结果,破坏对称性可提高锁相阵列的稳

定性,因而预计此时阵列的稳定性会提高,但其总体合成效率可能会有少许下降。尽管如此,具体锁相效果的好坏以及阵列究竟可以扩展到多大的数目 $n$ ,还有待于进一步的理论研究与实验验证。

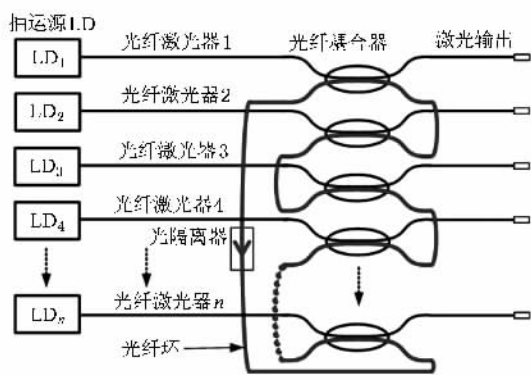


图5  $n$ 路光纤激光器锁相阵列结构一

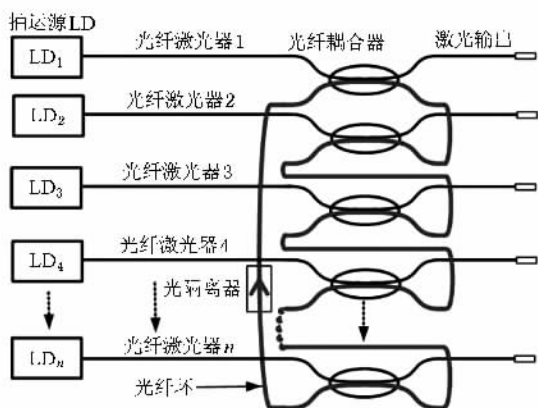


图6  $n$ 路光纤激光器锁相阵列结构二

此外,与文献[24]报道的利用相互注入锁定实现多个光纤激光器锁相输出的方案相比,本文所提方案也是采用多端口光纤耦合器使单元激光器间产生能量耦合,最终实现锁相的物理机理也可以统一解释为注入锁定或自组织。但是,本方案仍有以下三个特点:1)在结构上采用 $2 \times 2$ 耦合器构建光纤环,耦合器没有多余的磨 $8^\circ$ 斜角的损耗端存在( $1 \times 3$ 耦合器有两个多余的损耗端),因而系统损耗较低,合成效率较高;2)本锁相阵列的对称性较低,文献[25]的理论研究成果表明对称性较低的系统具有较

高稳定性,因而锁相输出的稳定性较高,而文献[24]报道的锁相阵列的对称性极高,每个激光器在阵列中的地位几乎等同;3)本方案的能量注入耦合方式也有所不同,通过一个公共环行通道实现所有激光器间的能量相互注入耦合,如前所述扩展结构中的几乎所有单元激光器间均可通过光纤环实现能量耦合,而文献[24]所提方案主要是与相邻的两个激光器发生耦合,具体何种耦合方式较优有待进一步的研究工作证实。

尽管本方案易于实现且有上述诸多优点,但也存在一些问题:远场干涉图样不是很稳定且对比度不高,在单元激光器中加入偏振控制器或采用保偏光纤元器件应该可以在一定程度上解决此问题(至少小功率情形下可行,参见文献[23]);组成光纤环的光纤耦合器可承受的功率一般还不高,目前国内的多模光纤耦合器最多只能承受几十瓦的输入功率,因此设计新型的能承受大功率的光纤耦合器或者寻找新的可以构建耦合环路的光纤元器件将是影响此方案向大功率方向扩展的重要因素。此外,根据系统整体锁相稳定性和合成效率的要求优化耦合器的耦合输出比,深入研究相互注入锁定或自组织锁相的机理及影响因素,非线性耦合发生的条件与过程,功率及阵列单元数的扩展性等工作,均是下一步需要重点研究的内容。

## 4. 结 论

本文提出了基于全光纤耦合环结构的光纤激光器锁相阵列,分析了单元激光器通过耦合环进行能量相互注入耦合的过程,实验上采用此方案实现了三路光纤激光器的锁定输出,观察到了明显的远场干涉图样和锁相后各单元激光器以一致波长激射的输出光谱,且阵列输出功率稳定,计算了不同近场排布方式时三路锁相输出的远场干涉图样,理论计算与实验结果一致,最后讨论了本方案的优缺点并建议了问题可能的解决方法和下一步的工作,给出了两种扩展为 $n$ 路光纤激光器锁相阵列的结构。研究表明,基于全光纤耦合环的锁相阵列是一个低损耗、高可靠、易于扩展、易于实现的锁相阵列。



- [ 1 ] Gapontsev V P , Gapontsev D , Platonov N , Shkurikhin O , Fomin V , Mashkin A , Abramov M , Ferin S 2005 *CLEO* **6** 508
- [ 2 ] Fan T Y 2005 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron* **11** 567
- [ 3 ] Augst S J , Ranka J K , Fan T Y , Sanchez A 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1707
- [ 4 ] Kozlov V A , Hernandez-Cordero J , Morse T F 1999 *Opt. Lett.* **24** 1814
- [ 5 ] Sabourdy D , Kermene V , Desfarges-Berthelemot A , Lefort L , Barthelemy A , Mahodaux C , Pureur D 2002 *Electron. Lett.* **38** 692
- [ 6 ] Sabourdy D , Kermene V , Desfarges-Berthelemot A , Lefort L , Barthelemy A , Even P , Pureur D 2003 *Opt. Express* **11** 87
- [ 7 ] Shirakawa A , Matsuo K , Ueda K 2004 *SPIE* **5662** 482
- [ 8 ] Minden M L , Bruesselbach H , Rogers J L , Mangir M S , Jones D C , Dunning G J , Hammon D L , Solis A J , Vaughan L 2004 *SPIE* **5335** 81
- [ 9 ] Chen S P , Li Y G , Lu K C 2005 *Opt. Express* **13** 7878
- [ 10 ] Bruesselbach H , Jones D C , Mangir M S , Minden M , Rogers J L 2005 *Opt. Lett.* **30** 1339
- [ 11 ] Bouillet J , Sabourdy D , Desfarges-Berthelemot A , Kermene V , Pagnoux D , Roy P 2005 *Opt. Lett.* **30** 1962
- [ 12 ] Morel J , Woodtli A , Dandliker R 1992 *SPIE* **1789** 13
- [ 13 ] Bruesselbach H , Minden M , Rogers J L , Jones D C , Mangir M S 2004 *CLEO CMDD4*
- [ 14 ] Huo Y , Cheo P 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 2345
- [ 15 ] Corcoran C J , Durville F 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 201118
- [ 16 ] Liu L , Zhou Y , Kong F , Chen Y , Lee K K 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4837
- [ 17 ] He B , Lou Q , Zhou J , Dong J , Wei Y , Xue D , Qi Y , Su Z , Li L , Zhang F 2006 *Opt. Express* **14** 2721
- [ 18 ] Fridman M , Eckhouse V , Davidson N , Friesem A A 2007 *Opt. Lett.* **32** 790
- [ 19 ] Anderegg J , Brosnan S , Cheung E , Epp P , Hammons D , Komine H , Weber M , Wickham M 2006 *SPIE* **6102**
- [ 20 ] Yu C X , Kansky J E , Shaw E J , Murphy D V , Higgs C 2006 *Electron. Lett.* **42** 1024
- [ 21 ] Shay T M , Benham V , Baker J T , Ward C B , Sanchez A D , Culpepper M A , Pilkington S D , Spring L J , Lu L C 2006 *Opt. Express* **14** 12015
- [ 22 ] Xiao R , Hou J , Jiang Z F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 184 ( in Chinese ) [ 肖 瑞、侯 静、姜宗福 2006 物理学报 **55** 184 ]
- [ 23 ] Lhermite J , Desfarges-Berthelemot A , Kermene V , Barthelemy A 2007 *Opt. Lett.* **32** 1842
- [ 24 ] Chen Z L , Hou J , Zhou P , Liu L , Jiang Z F 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7046 ( in Chinese ) [ 陈子伦、侯 静、周 朴、刘 亮、姜宗福 2007 物理学报 **56** 7046 ]
- [ 25 ] Peles S , Rogers J L , Wiesenfeld K 2006 *Phys. Rev. E* **73** 026212
- [ 26 ] Liu B D , Ma H 1999 *Opt. Commun.* **171** 185
- [ 27 ] Xiao R , Hou J , Jiang Z F 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4550 ( in Chinese ) [ 肖 瑞、侯 静、姜宗福 2007 物理学报 **56** 4550 ]

## Phase locking of three fiber lasers using an all-fiber coupling loop<sup>\*</sup>

Lei Bing<sup>†</sup> Feng Ying Liu Ze-Jin

( College of Optoelectric Science and Engineering , National University of Defense Technology , Changsha 410073 , China )

( Received 20 September 2007 ; revised manuscript received 21 April 2008 )

### Abstract

An all-fiber coupling loop is constructed by three  $2 \times 2$  fiber couplers according to certain rules , which connects three independent erbium-doped fiber lasers to form a coupled array . Thanks to the specially designed all-fiber coupling loop , the total loss of the phase locking array is reduced remarkably , and effective mutual injection coupling occurs between the component fiber lasers , so that the phase locking of the array is achieved . The far field interference patterns and output spectrum observed in experiment indicate that the array has achieved phase locking states . When the pump power of three component fiber lasers is 100 mW each , the phase locking array gives 94 mW stable coherent output .

**Keywords** : fiber laser , coherent addition , fiber coupler , phase locking

**PACC** : 4281W , 4225K , 4281M

<sup>\*</sup> Project supported by the Innovation Foundation of National University of Defense Technology , China ( Grant No. B070702 ).

<sup>†</sup> E-mail : leibing\_2000@126.com