

文章编号: 0253-2239(2009)09-2479-07

用于光纤激光器阵列锁相的光纤环特性研究

雷 兵 冯 莹 魏立安 刘泽金

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 光纤环特性对基于公共光纤环的光纤激光器锁相阵列的性能具有重要影响。介绍了利用公共光纤环构建光纤激光器锁相阵列的结构、特征以及光纤环的作用。建立了研究该光纤环特性的理论模型,分别采用光强叠加和光场叠加法分析了光纤环的能量传输与谐振选模特性,并在考虑输入光波谱宽的情况下证明了两种方法的一致性。研究表明增加成环耦合器的耦合比可以增强锁相阵列各单元激光器间的能量耦合,且在光纤环损耗较低时不会明显降低输出功率和组合效率。实验中观察到了光纤环的滤波选模效应,而输出功率随着耦合比的增加有规律的略微减小,两者均与理论分析结果一致。

关键词 光纤激光器; 锁相; 光强叠加法; 光场叠加法; 光纤环; 光纤耦合器

中图分类号 TN243; TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092909.2479

Characteristics of Fiber Loop Applied to Phase Locking Array of Fiber Lasers

Lei Bing Feng Ying Wei Li'an Liu Zejin

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

Abstract The characteristics of fiber loop have important effect on the performance of the phase locking array of fiber lasers based on a common fiber loop. The configuration, properties of the array and the functions of the loop are introduced. The theoretical model of the loop is established, and its power transmission and resonance properties are analyzed by the intensity and amplitude addition methods respectively. It is proved that they are consistent when the line-width of input light-wave is considered. The research results indicate that increasing the fiber coupler's coupling ratio can increase the coupling strength among component lasers of the phase locking array, and the output power and combining efficiency will not decrease obviously if the loop's loss is low. The filtering effect of fiber loop is observed in experiment, and the output power decreases slightly and regularly with the increase of coupling ratio, which is consistent with the conclusions obtained from theoretical analysis.

Key words fiber laser; phase locking; intensity addition method; amplitude addition method; fiber loop; fiber coupler

1 引 言

光纤激光器由于结构紧凑、散热容易、转换效率高、输出光束质量好并采用光纤柔性传输等优点,非常适合于构建锁相阵列以获得高功率高亮度的激光源。近年来,国内外研究人员已经提出并实现了多种光纤激光器或放大器的锁相阵列,包括采用主振荡功率放大(MOPA)结构的有源相位控制阵

列^[1,2],通过倏逝波耦合^[3]、衍射耦合^[4~6]和光纤耦合器干涉组合^[7~9]等机理实现的无源自组织锁相阵列。基于MOPA结构的相控阵方案需要复杂快速的相位探测与控制电路以及全保偏的光纤元器件,系统复杂、成本高且实施难度大。现有无源自组织方案中,用于倏逝波耦合的多芯光纤制造难度较大;衍射耦合需要的各种外腔一般调节及扩展难度大,

收稿日期: 2008-09-24; **收到修改稿日期**: 2009-01-05

基金项目: 国防科技大学优秀研究生创新项目(B070702)资助课题。

作者简介: 雷 兵(1981—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器及其相干组束技术等方面的研究。

E-mail: leibing_2000@126.com

导师简介: 冯 莹(1956—),女,教授,博士生导师,主要从事光纤光源、光纤激光器等方面的研究。

E-mail: csfengying@sina.com

且合成效率不高;通过光纤耦合器干涉组合由于采用单一的公共光纤端输出,最终输出功率仍然像单纤输出一样受限。

构建基于公共光纤环的光纤激光器自组织锁相阵列^[10],具有无需有源相位探测与控制、扩展性好、合成效率高、输出功率不受单纤限制、技术上易于实现等优点,是目前光纤激光器自组织锁相领域的重要研究方向之一。为获得好的锁相效果和高的组合效率,对该锁相阵列中的关键器件光纤环的特性进行研究具有重要意义。由于实际自组织锁相阵列中光纤激光器的输出光束谱宽较宽^[7~10](GHz 量级甚至更宽),因而在准单色光条件下适用的分析光纤环谐振腔特性的耦合模理论^[11,12],不适合用来分析自组织锁相阵列中的光纤环特性。本文建立了该结构中光纤环的理论模型,分别采用光强叠加和光场叠加法分析了光纤环的能量传输与谐振选模特性,重点研究了成环耦合器的耦合比和光纤环损耗对锁相性能的影响。

2 基于公共光纤环的锁相阵列

利用公共光纤环实现三单元光纤激光器自组织锁相的典型结构如图 1 所示。将 2×2 的偏振不敏感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全光纤耦合环,每个耦合器余下的两个端口中一端与单元激光器相连,另一端与光纤准直器相连作为激光器的输出端口。该公共光纤环一方面为各单元激光器之间的能量相互注入耦合提供了一个公共通道,为通过相互注入锁定或自组织实现锁相提供物理基础;另一方面它可以作为光学滤波器对单元激光器起到纵模选择与稳定的作用,同时满足多个线性腔与公共环形腔谐

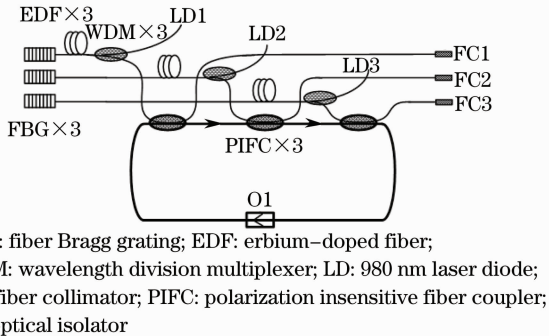


图 1 基于公共光纤环的三单元光纤激光器锁相阵列的结构

Fig. 1 Configuration of phase locking array of three fiber lasers by a common fiber loop

振条件的纵模具有最低的损耗将被选为阵列的公共模而起振。采用图 1 所示的结构在实验上已经实现了小功率情形下三单元光纤激光器的相位锁定,并获得了明显的远场干涉图样和稳定的输出功率^[10]。

3 光纤环特性分析

从理论上研究该结构中光纤环的能量传输、谐振选模等特性,弄清成环耦合器的耦合比和光纤环损耗对锁相性能的影响,对如何构建一个适于锁相的光纤环具有重要的指导作用。为获得明显且稳定的锁相输出,各单元激光器之间需要通过公共光纤环产生足够的能量耦合;为获得较高的组合效率,需要保证进入光纤环的绝大部分能量能够从输出端耦合输出。

3.1 模型建立与简化

对图 1 所示的三单元光纤激光器锁相阵列结构,可以直观的提取出三耦合器构成的包含三个输入(1,5,9)及输出(3,7,11)端口的直接耦合光纤环,如图 2 所示。设耦合器 C_i 的耦合比为 k_i ,损耗为 γ_i ,相邻两耦合器间连成光纤环时的熔接损耗为 α_i ,其间传输光纤长度为 $l_i (i = 1, 2, 3)$,则光纤环总长度 $L = l_1 + l_2 + l_3$ 。设成环光纤单位长度的传输损耗为 α ,则相邻两耦合器间部分光纤环包含熔接与传输损耗的能量传输率可写为 $T_i = (1 - \alpha_i) \exp(-\alpha l_i)$ 。

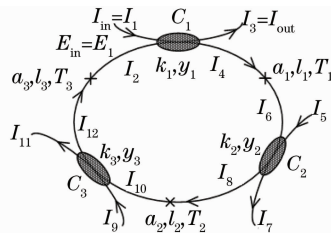


图 2 三耦合器构成的光纤环

Fig. 2 Fiber loop constructed by three fiber couplers

考虑到该光纤环在结构上具有很高的对称性,实际构建该环时也可以尽量保证三个耦合器的耦合比、损耗及成环时三个熔接点的损耗尽可能一致,且三个输入端口的光强几乎相等。因此,不失一般性,可以令 $k_i = k, \gamma_i = \gamma_0, \alpha_i = \alpha_0, l_i = l, T_i = T_l, I_1 = I_5 = I_9 = I_{in}, I_3 = I_7 = I_{out}$,即 $T_i = T_1 T_2 T_3 = T_l^3, I_{out} = I_3 = I_7 = I_{11}$,其中 I_{in}, I_{out} 分别为光纤环的输入、输出光强, T_l 为光纤环的总能量传输率。不难证明,若多个耦合器构成的复杂光纤环满足上述完全对称性条件,其能量传输及谐振选模等特性与单耦合器构成的光纤环的特性完全一致。为描述方便,下面考虑简化的单耦合器构成的直接耦合光纤环,模型如图 3 所示。设耦合

器的耦合比为 k , 损耗为 γ_0 , 连成光纤环时的熔接点损耗为 α_0 , 光纤环长度为 L , 成环光纤单位长度的传输损耗为 α , 则包含熔接与传输损耗的光纤环能量传输率 $T_l = (1 - \alpha_0) \exp(-\alpha L)$ 。

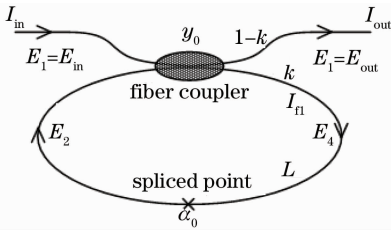


图 3 光纤环特性分析模型

Fig. 3 Model used to analyze the properties of fiber loop

3.2 能量传输特性

为弄清光纤环的环内能量、输出能量和输入能量与其结构参数之间的依赖关系, 暂不考虑输入光波的相干性, 采用光强叠加法分析光纤环的能量传输特性。基本思想是: 某一时刻按耦合器耦合比进入光纤环的能量, 经过光纤环无数次的耦合传输之后, 除了各种损耗因素导致一定的衰减外, 进环的绝大部分能量最终还是从光纤环输出了, 只不过它们是在随后 $\tau = nL/c, 2\tau, 3\tau \dots$ 等一系列间隔为 τ 的时刻输出的 (n 为光纤折射率, c 为真空中的光速), 它们的非相干叠加构成了光纤环最终的输出能量值。同理, 光纤环内传输的能量也可通过类似的叠加方法得到。

设光纤环的输入光强为 I_{in} , 经过多次耦合传输后输出的光强为 I_{out} , 则有

$$\begin{aligned} I_{out} = & (1 - k)(1 - \gamma_0)I_{in} + k^2(1 - \gamma_0)^2 T_l I_{in} + \\ & k^2(1 - \gamma_0)^2 T_l I_{in}(1 - k)(1 - \gamma_0) T_l + \\ & k^2(1 - \gamma_0)^2 T_l I_{in}(1 - k)^2(1 - \gamma_0)^2 T_l^2 + \dots, \end{aligned} \quad (1)$$

化简整理得:

$$I_{out} = I_{in} \frac{(1 - k)(1 - \gamma_0) - (1 - 2k)(1 - \gamma_0)^2 T_l}{1 - (1 - k)(1 - \gamma_0) T_l}, \quad (2)$$

同理, 可得光纤环内的光强 I_{in} 为

$$\begin{aligned} I_{in} = & k(1 - \gamma_0)I_{in} + k(1 - \gamma_0)I_{in}(1 - k)(1 - \gamma_0) T_l \\ & + k(1 - \gamma_0)I_{in}(1 - k)^2(1 - \gamma_0)^2 T_l^2 + \dots \\ = & I_{in} \frac{k(1 - \gamma_0)}{1 - (1 - k)(1 - \gamma_0) T_l}, \end{aligned} \quad (3)$$

取典型参数: 耦合器的损耗 $\gamma_0 = 0.02$, 光纤环的能量传输率 $T_l = 0.98, 0.95, 0.9$, 根据(2), (3)式可得光纤环输出光强和环内光强随耦合比 k 的变化关系, 分别如图 4 中的实线与虚线所示。

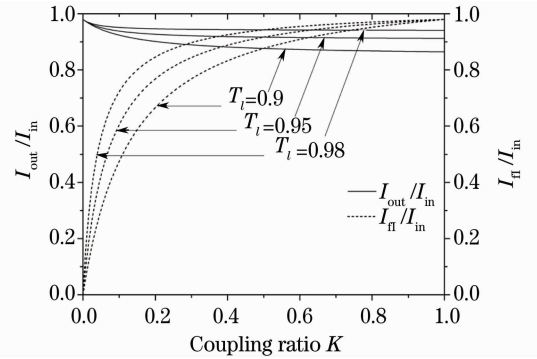


图 4 输出光强和环内光强随耦合比的变化关系

Fig. 4 Output intensity and circulation intensity evolution with coupling ratio

光强叠加法对能量传输特性的分析结果表明, 成环耦合器的耦合比越大, 光纤环中的能量也越多, 而经由光纤环输出的能量则越少, 但在光纤环的损耗不是太大时 ($\gamma_0 \leq 0.02, T_l \geq 0.95$), 还是可以保证 90% 以上的输入能量从光纤环输出, 且当耦合比 $k \geq 0.5$ 后, 输出光强随耦合比增加而减小的量已经很小。因此, 适度增加成环耦合器的耦合比有利于增强锁相阵列各单元间的能量耦合; 而减小光纤环的各种损耗则对增强耦合和提高效率均是有利的。

3.3 谐振选模特性

分析光纤环的滤波选模特性, 不能忽略输入光波的频率、相位等特性, 需要采用光场叠加法, 即不同循环次数的多个光场进行相干叠加。依然采用图 3 所示的模型, 设光纤环的输入光场为 E_1 , 经过多次耦合传输并叠加后的输出光场和环内光场分别为 E_3, E_4 , 则有

$$\begin{aligned} E_3 = & E_1 [(1 - k)(1 - \gamma_0)]^{1/2} - E_1 k(1 - \gamma_0) (T_l)^{1/2} \exp(j\beta L) - \\ & E_1 k(1 - \gamma_0) [(1 - k)(1 - \gamma_0)]^{1/2} T_l \exp(j2\beta L) - \dots = \\ & E_1 [(1 - k)(1 - \gamma_0)]^{1/2} \left\{ 1 - \frac{[k/(1 - k)] A^{1/2} \exp(j\beta L)}{1 - A^{1/2} \exp(j\beta L)} \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} E_4 = & E_1 [k(1 - \gamma_0)]^{1/2} \{ 1 + [(1 - k)(1 - \gamma_0) T_l]^{1/2} \exp(j\beta L) + \\ & (1 - k)(1 - \gamma_0) T_l \exp(j2\beta L) + \dots \} = \frac{E_1 [k(1 - \gamma_0)]^{1/2}}{1 - A^{1/2} \exp(j\beta L)}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $A = (1 - k)(1 - \gamma_0)(1 - \alpha_0)\exp(-\alpha L)$, $\beta = 2\pi/\lambda$ 为传播常数, 经过适当运算可得光强的传输表达式为

$$\left| \frac{E_3}{E_1} \right|^2 = (1 - \gamma_0) \left[1 - \frac{k(1 - k - A)/(1 - k)}{1 + A - 2A^{1/2} \cos(\beta L)} \right]$$

$$\left| \frac{E_4}{E_1} \right|^2 = \frac{k(1 - \gamma_0)}{1 + A - 2A^{1/2} \cos(\beta L)}, \quad (6)$$

当光纤环发生谐振时, 满足相位条件 $\beta L = 2q\pi$, q 为正整数, 因此 $\cos(\beta L) = 1$, (6) 式简化为

$$\left| \frac{E_3}{E_1} \right|^2 = (1 - \gamma_0) \left[1 - \frac{k(1 - k - A)/(1 - k)}{1 + A - 2A^{1/2}} \right]$$

$$\left| \frac{E_4}{E_1} \right|^2 = \frac{k(1 - \gamma_0)}{1 + A - 2A^{1/2}}, \quad (7)$$

若发生谐振时光纤环输出的能量为 0, 即输出电场 $E_3 = 0$, 由(7)式可得:

$$k_r = 1 - (1 - \gamma_0)(1 - \alpha_0)\exp(-\alpha L), \quad (8)$$

(8) 式确定的耦合比称为由光纤环损耗决定的最佳耦合比, 而这一关系式则称为光纤环谐振腔的最佳谐振条件, 满足此条件时光纤环发生最佳谐振, 谐振峰值达到极大且谐振峰最为锐利, 输出光强为 0。

根据(6)式研究不同成环耦合比对光纤环谐振特性的影响。取耦合器的损耗 $\gamma_0 = 0.02$, 光纤环的能量传输率 $T_l = 0.95$, 耦合比 $k = 0.8, 0.5, 0.2, 0.069$, 其中 $k = 0.069$ 为最佳耦合比, 结果如图 5

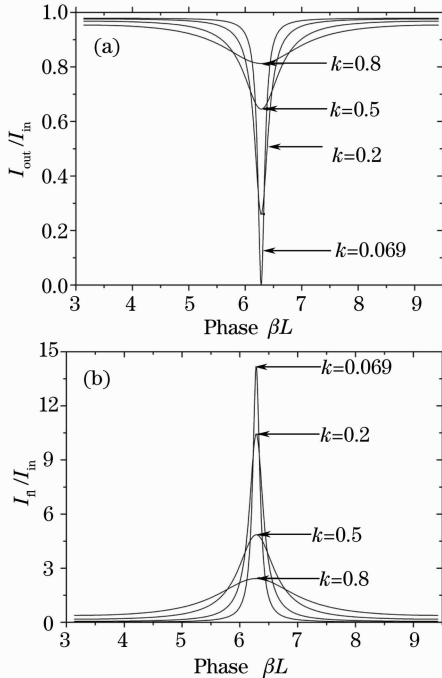


图 5 不同耦合比下的谐振特性 (a) 输出光强; (b) 环内光强

Fig. 5 Resonance properties with different coupling ratios, (a) output intensity; (b) circulation intensity

所示。

由光纤环谐振特性的仿真结果图 5 可知, 只有在最佳耦合比时, 输出光强才恰好为零, 环内光强达到极大值, 谐振峰最锐利, 谐振深度最大, 此时光纤环的滤波选模效应最为显著; 而在非最佳耦合比情况下, 也可以产生谐振, 只是谐振深度不大而已, 因此普通耦合比的光纤环也具有滤波选模效应, 且耦合比与最佳耦合比越接近, 谐振效应越显著。总之, 在谐振相位条件 $\beta L = 2q\pi$ 满足时, 输出光强产生极小值, 光纤环内形成谐振峰, 满足谐振条件的模式起振。

根据(7)式可以对谐振发生时输出光强与环内光强随耦合比的变化情况进行分析, 取耦合器的损耗 $\gamma_0 = 0.02$, 光纤环的能量传输率 $T_l = 0.98, 0.95, 0.9$, 分析结果如图 6 所示。

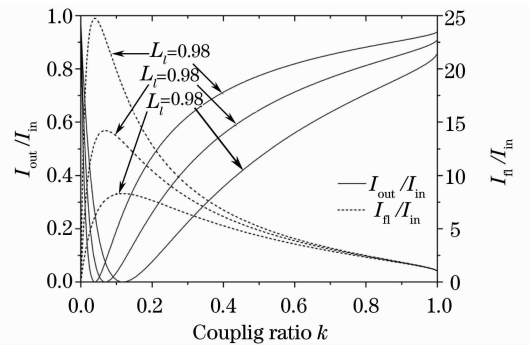


图 6 谐振条件下光强随耦合比的变化关系
Fig. 6 Intensity evolution with coupling ratios under resonance

通过图 6 对谐振条件下光纤环能量传输特性的仿真分析可知: 在最佳耦合比时输出光强恰好为零, 环内光强达到极大值; 而在大于最佳耦合比时, 随着耦合比的增加, 输出光强不断增加, 而环内光强不断减小; 随着光纤环损耗的增加, 输出光强与环内光强均显著减小。此时得到的输出光强与环内光强随耦合比的变化关系, 与光强叠加法所得的结果图 4 并不自洽, 出现这一问题的原因下面有专门论述。

值得指出的是, 光纤环的谐振特性通常采用耦合模理论进行分析^[11,12], 为弄清它与光场相干叠加法的关系, 进行了以下对比研究。对于图 3 所示的模型, 由耦合模理论可得耦合器各端口的光场满足

$$E_3 = (1 - \gamma_0)^{1/2} [(1 - k)^{1/2} E_1 + jk^{1/2} E_2]$$

$$E_4 = (1 - \gamma_0)^{1/2} [jk^{1/2} E_1 + (1 - k)^{1/2} E_2], \quad (9)$$

而光纤环内的光场 E_2, E_4 遵从以下关系

$$E_2 = E_4 (1 - \alpha_0)^{1/2} \exp(-\alpha L/2) \exp(j\beta L). \quad (10)$$

联立(9), (10)式, 解得输出光强与环内光强随输入

光强的变化关系式,不难发现它与(6)式给出的结果完全一致,即两种出发点完全不同的方法推导出的结果一致,这也从另一个角度证明了采用多波相干叠加法分析光纤环谐振特性的正确性。需要指出的是,这两种分析方法考虑的输入光纤环的光波都是理想单色波,而实际输入光波总是有一定谱宽的。

3.4 两种分析方法的统一

如前所述,光场相干叠加法和光强叠加法对光纤环能量传输特性的分析结果并不自洽,且光场叠加的前提是输入光波为谱宽无限窄的单色光,而光强叠加是非相干叠加,意味着输入光波为相干性很差甚至没有的宽谱光源。为证明两种分析法的合理性与一致性,指出它们在分析基于公共光纤环锁相阵列不同特性时的适用性,下面在理论上对它们进行统一研究。

对于具有一定谱宽的实际输入光波,参照文献[13]对光纤谐振环特性的研究方法,可推导出依赖于输入光波谱宽的输出光强与环内光强的表达式

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = (1 - \gamma_0) \left\{ 1 - \frac{k(1 - R_f^2) [1 - (1 - \gamma_0)(1 - \alpha_0)e^{-\alpha L}]}{(1 - A) [1 + R_f^2 - 2R_f \cos(\beta L)]} \right\}$$

$$\frac{I_{in}}{I_{in}} = (1 - \gamma_0) \frac{k(1 - R_f^2)}{(1 - A) [1 + R_f^2 - 2R_f \cos(\beta L)]}, \quad (11)$$

$$R_f = A^{1/2} \exp(-2\pi\Delta f\tau)$$

$$A = (1 - k)(1 - \gamma_0)(1 - \alpha_0)e^{-\alpha L}, \quad (12)$$

式中 Δf 为输入光波的谱宽, $\tau = nL/c$ 为光波在光纤环内传输一周所需的时间,其他参量的含义与前面申明的一致。

下面依据(11),(12)式研究输入光波的谱宽对光纤环特性的影响,各参数设置如下: $\gamma_0 = 0.02$, $T_1 = 0.95$, $k = 0.2$, $L = 10$ m, $n = 1.5$, $c = 3 \times 10^8$ m/s, 输入光波的谱宽 Δf 分别为 5 kHz, 50 kHz, 500 kHz 及 5 MHz。图 7 所示为给定光纤环损耗及耦合比的情况下,输入光波的有限谱宽对谐振特性的影响。图 8 为光纤环发生谐振且损耗给定的条件下,输出光强与环内光强随耦合比的变化关系。

由仿真结果可知,输入光波的谱宽对谐振峰的锐利程度和输出光强及环内光强的变化趋势均有很大影响。当谱宽 $\Delta f \geq 5$ MHz 时,谐振峰几乎消失(即未发生谐振),输出光强与环内光强随耦合比的变化趋势也演变为图 4 中光强叠加法给出的结果,谐振条件下存在的最佳谐振点也自然消失;而当

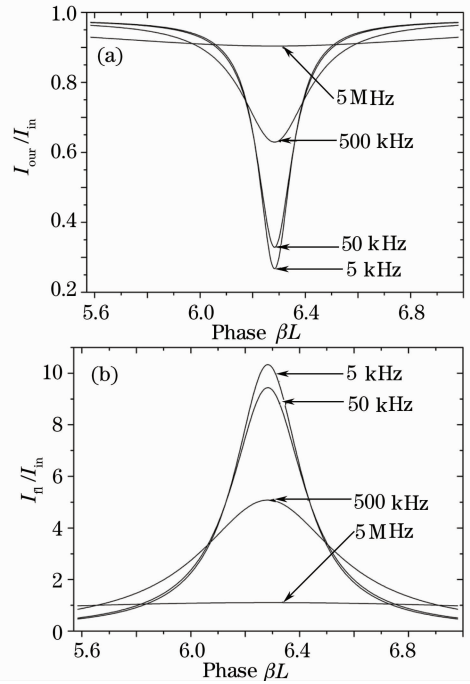


图 7 不同谱宽下的谐振特性(a) 输出光强; (b) 环内光强

Fig. 7 Resonance properties with different line-widths, (a) output intensity; (b) circulation intensity

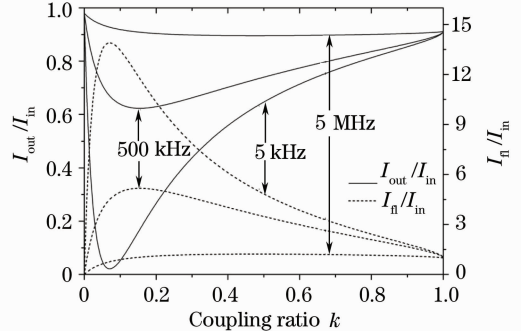


图 8 考虑谱宽时谐振条件下光强随耦合比的变化关系

Fig. 8 Intensity evolution with coupling ratios under resonance when line-width is considered

$\Delta f \leq 5$ kHz 时,谐振峰则会像理想单色光输入时一样较为锐利地出现,有效谐振可以明显的发生,输出光强与环内光强随耦合比的变化趋势也变得与图 6 给出的结果一致。

总之,当输入光波为相干性很差甚至没有的宽谱光源时,光纤环内不同循环次数的光波之间只能发生非相干叠加,即光强叠加;而当输入光波为谱宽很小的准单色光时(相干长度远大于光纤环长),不同循环次数的光场之间发生的则是场强的相干叠加,这在物理上很容易理解,在数学上也是很容易证明的。当 $\Delta f \rightarrow \infty$ 时, $R_f \rightarrow 0$, (11) 式简化为(2),

(3) 式-光强叠加法得出的结果;当 $\Delta f \rightarrow 0$ 时, $R_f \rightarrow A^{1/2}$, (11) 式则简化为 (7) 式-光场相干叠加法给出的结果。因此,考虑输入光波谱宽的分析方法是普适的,是前面两种特殊研究方法的一般性描述。在分析基于公共光纤环锁相阵列的不同特性时,应根据具体情况选择合适的方法,特别是在输入光波的谱宽很宽或很窄时,选择光强叠加或光场叠加法是简单直观且有效的。

4 实验研究

在利用公共光纤环构建多个光纤激光器的锁相阵列时,光纤环主要起到了滤波选模和能量相互注入耦合两个方面的作用。利用光纤耦合器构建的光纤环滤波器已经在制作单纵模窄线宽激光源的实践中发挥了重要作用^[14~16],实验中光纤环插入前后及插入个数不同时测得的输出光谱和零拍谱有力的证实了光纤环具有明显的滤波选模功能。

对于单个激光器接上光纤环输出的基本锁相单元,采用图 9 所示的装置对光纤环的滤波选模和能量传输特性进行了初步的实验研究。激光器采用典型的线形腔结构,光纤布拉格光栅(FBG)的中心反射波长在 1550 nm 附近,掺铒光纤(EDF)长度约为 6.3 m,激光从垂直切割的具有约 4% 反射的光纤端面输出。光纤环接在激光器的输出端,其长度约为 2 m。激光器单独工作时,在①处测得输出光束的 3 dB 谱宽为 0.060 nm,接上光纤环后在②处测得的谱宽变为 0.055 nm(实际值可能低于此值,因所用光谱仪 Agilent 86142 A 的最小分辨率为 0.06 nm),因此光纤环确实具有滤波选模作用。当光谱宽度为 0.055 nm 时,相应的频谱宽度 $\Delta\nu = \Delta\lambda c/\lambda^2 \approx 6.87$ GHz,即输入光纤环的光波为相干性较差的激光束,研究能量传输特性时采用光强叠加法比较合适。

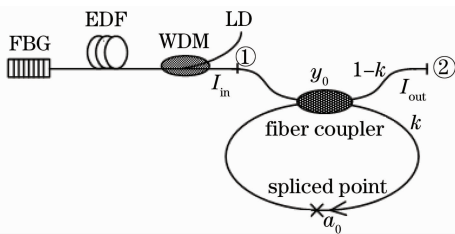


图 9 研究光纤环特性的实验装置

Fig. 9 Experimental setup of investigating the properties of fiber loop

当激光器的抽运功率为 72 mW 时,在①处获得了 21.42 mW 的输出功率(记为 I_{in}),此后保持抽运

源的功率不变,依次测试了耦合比 k 为 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.8 和 0.9 的 7 个光纤环的能量传输特性。为直观看成环耦合器的耦合比 k 对输出功率影响,构建光纤环时选取了损耗 γ_0 一致的光纤耦合器,并尽量保证熔接损耗 α_0 也一致,实验中 $\gamma_0 \approx 0.06$ dB, $\alpha_0 \approx 0.02$ dB。接入 7 个不同的光纤环后②处测得的输出功率 I_{out} ,依据 k, γ_0, α_0 并利用 (2) 式计算出的 $(I_{out}/I_{in})_T$,由实验测得的输入、输出功率值计算的 $(I_{out}/I_{in})_E$ 及它与理论值的百分比误差,均列于表 1。

表 1 光纤环能量传输特性的实验结果
Table 1 Experimental results of the power transmission property

k	I_{out}/mW	$(I_{out}/I_{in})_E$	$(I_{out}/I_{in})_T$	Error/%
0.1	20.95	0.9781	0.9705	0.78
0.2	20.89	0.9753	0.9692	0.63
0.3	20.86	0.9739	0.9687	0.54
0.5	20.82	0.9720	0.9682	0.39
0.7	20.77	0.9697	0.9681	0.17
0.8	20.73	0.9678	0.9680	0.02
0.9	20.71	0.9669	0.9680	0.11

分析表 1 的数据可知,插入光纤环后激光器经过耦合器输出的能量值不再是由耦合比确定的值,而是由光强叠加法导出的 (2) 式确定的值。实验测得的输出输入功率比与理论计算值的最大偏差不超过 1%,因此光强叠加法可以对输出功率进行较高精度的预测。在损耗因素基本一致的前提下,随着成环耦合器耦合比的增加,输出功率有规律的减小,但减小幅度不大。因此在光纤环的损耗较小时,增加成环耦合器的耦合比不会明显降低输出功率。

5 结 论

分别采用光强叠加和光场叠加法研究了用于光纤激光器阵列锁相的光纤环的能量传输与谐振选模特性,并在考虑输入光波谱宽的条件下证明了两种方法的一致性。研究表明:在输入光波谱宽不是足够窄的情况下,需要采用光强叠加法来分析光纤环的能量传输特性;提高输入光波的相干性、降低光纤环的损耗并采用最佳耦合比成环时,可以获得最佳的滤波选模效果;适度增加成环耦合器的耦合比可以增强锁相阵列各单元激光器间的能量耦合,进而获得较好的锁相效果,并且在光纤环损耗较小时,增加耦合比不会明显降低输出功率,即不会明显影响锁相阵列的组合效率。

参 考 文 献

- 1 J. Anderegg, S. Brosnan, E. Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays [C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020U
- 2 Xiao Rui, Hou Jing, Jiang Zongfu *et al.*. Experimental investigation of phase detection and compensation in coherent combining of fiber laser array [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(12): 6464~6469
肖 瑞, 候 静, 姜宗福等. 三路光纤放大器相干合成技术的实验研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(12): 6464~6469
- 3 E. J. Bochove, P. K. Cheo, G. G. King. Self-organization in a multicore fiber laser array [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14): 1200~1202
- 4 M. Wrage, P. Glas, D. Fischer *et al.*. Phase locking in a multicore fiber laser by means of a talbot resonator [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(19): 1436~1438
- 5 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Coherent output power of 60 W from two large-core double-cladding fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1279~1280
何 兵, 楼祺洪, 周 军等. 两根大芯双包层光纤激光器获得 60 W 相干输出[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1279~1280
- 6 C. J. Corcoran, F. Durville. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-fourier cavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**: 201118
- 7 F. Liu, B. Liu, B. Huang *et al.*. Investigation on characteristics of self-organization in mach-zehnder erbium-doped fiber laser cavity [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 186~188
- 8 A. Shirakawa, T. Saitou, T. Sekiguchi *et al.*. Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(21): 1167~1172
- 9 H. Bruesselbach, D. C. Jones, M. S. Mangir *et al.*. Self-organized coherence in fiber laser arrays [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(11): 1339~1341
- 10 B. Lei, Y. Feng. Phase locking an array of three fiber lasers by an all-fiber coupling loop [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(25): 17114~17119
- 11 F. Zhang, J. W. Y. Lit. Direct-coupling single-mode fiber ring-resonator [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1988, **5**(8): 1347~1355
- 12 Y. H. Ja. Generalized theory of optical fiber loop and ring resonators with multiple couplers [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(24): 3517~3529
- 13 Yao Qiong, Song Zhangqi, Xie Yuanping *et al.*. Study on the characteristics of fiber optic resonator ring for resonator fiber optic gyroscope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 676~680
姚 琼, 宋章启, 谢元平等. 谐振腔光纤陀螺光纤谐振环特性研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(4): 676~680
- 14 C. C. Lee, Y. K. Chen, S. K. Liaw. Single-longitudinal-mode fiber laser with a passive multiple-ring cavity and its application for video transmission [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(5): 358~360
- 15 C. H. Yeh, T. T. Huang, H. C. Chien *et al.*. Tunable S-band erbium-doped triple-ring laser with single-longitudinal-mode operation [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(2): 382~386
- 16 Zhang Xin, Chen Wei, Liu Yu. Single longitudinal mode fiber laser with multiple ring cavities and its frequency stabilization [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 48~52
张 欣, 陈 伟, 刘 宇等. 单纵模多环形腔掺铒光纤激光器及其稳定性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 48~52