

文章编号: 0258-7025(2009)01-0077-05

角锥腔互注入锁相光纤激光器

程勇¹ 刘洋¹ 许立新² 郑睿²

(¹ 武汉军械士官学校光电研究所, 湖北 武汉 430075)
(² 中国科学技术大学物理系, 安徽 合肥 230026)

摘要 提出一种基于角锥互注入锁相的多路光纤激光器相干合成新技术, 分析了其锁相原理, 设计了基于球面角锥和平面角锥的两种多光束光纤激光器相干合成方案。开展了基于平面角锥互注入锁相的两路光纤激光器的相干合成实验, 成功实现了两路独立光纤激光器的注入锁定, 观察到波长锁定(中心波长稳定在 1085.22 nm)、远场干涉条纹(可见度约 0.5)、线宽压缩(44%)和功率合成效率大于 1(120%)等现象, 获得了超过 2.4 W 的相干合成激光输出。在两路光纤激光器不同功率比例注入条件下, 研究了波长漂移的规律, 得到了波长漂移量与注入功率成反比的定性规律。

关键词: 激光器; 光纤激光器; 激光相干合成; 互注入锁相; 角锥腔

中图分类号: TN 248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CJL20093601.0077

Mutual-Injection Phase-Locking Fiber Laser with Corner-Cube Cavity

Cheng Yong¹ Liu Yang¹ Xu Lixin² Zheng Rui²

(¹ Opto-Electronics Facility, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan, Hubei 430075, China)
(² Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract A novel mutual-injection phase-locking fiber laser combination technology based on corner-cuber was proposed. The phase-locking principle was theoretically analyzed and two coherent combination schemes respectively utilizing spherical corner-cuber and planar corner-cuber were introduced. The mutual-injection phase-locking coherent combination experiment of two fiber lasers based on planar corner-cuber was demonstrated, and the locked wavelength centered at 1085.22 nm, the steady interference strips with visibility about 0.5 and the line-width of compression of 44% are experimentally observed. The combined output power is more than 2.4 W with a power combination efficiency of 120%. The relationship between the wavelength shift and the injecting power is found to be in the inverse proportion pattern for two fiber lasers with different injecting power ratio.

Key words lasers; fiber laser; laser coherent combination; mutual-injection phase-locking; corner-cube cavity

1 引言

高亮度是激光器研究及应用的永恒追求, 光纤激光器相干合成是提高亮度的有效途径。相干合成的关键在于获得窄线宽, 除光纤激光器之外的其他激光器均难以做到这一点。光纤激光器还具有效率高、光束质量好; 柔性好、易于空间耦合、重量轻; 环境适应性好、免维护、无需复杂的冷却和调试等特点。因此, 人们对光纤激光器相干合成产生了浓厚的兴趣, 提出了许多相干合成的研究方案^[1~9]。

从已报道的文献来看, 光纤激光相干合成按相

位锁定的方式分主要有主动锁相和被动锁相两种。基于主振荡-功率放大(MOPA)结构的主动锁相方案^[2]需要对每个子激光器进行相位探测和补偿, 结构过于精密和复杂, 系统特别庞大, 很难实现多个光纤激光器的相干合成。而被动锁相则是多个激光器通过某种方式^[3~9](如激光束之间倏逝波的耦合、共用端面反射镜及非线性效应等)组成一个自适应系统, 当系统稳定工作时各个激光器的工作波长及相位被锁定, 具有合成效率高、相干度高等特点, 是光束合成技术发展的新动向^[10,11]和最有前途的新途

收稿日期: 2008-05-06; 收到修改稿日期: 2008-08-11

基金项目: 军用光电技术国防预研(51302010206)资助课题。

作者简介: 程勇(1961—), 男, 教授, 博士, 主要从事军用激光技术与装备工程研究。E-mail: cy@jxsg.net

径之一。但现已报道的被动锁相方案都很难实现多光纤合成和高亮度输出的目标。

本文提出了一系列基于角锥互注入被动锁相方案和模型,并开展了基于角锥的两路光纤激光器的相干合成实验研究。在实验中,观察到了波长锁定稳定、线宽压缩明显和功率合成效率大于1(达120%)等现象。

2 设计方案

角锥也被称为角反射器(CCR),形状相当于一个立方体切割下来的一个角。理想情况下,角锥的三个内反光面互相垂直,在有效入射角内的入射光线都可以严格地按平行于入射光线的相反方向反射回去。角锥的反射光线与入射光线在位置上有一定平移,两者关于棱镜的顶点中心对称。角锥分为球面角锥、平面角锥和空心角锥等,在各自的应用领域均得到了极大的应用,本文提出了两种基于角锥实现多路光纤激光器相干合成的设计方案。

2.1 球面角锥互注入锁相光纤激光器模型

如图1(a)所示, N 个光纤激光器并行排列,每一个光纤激光器由平面输出镜和另一端的布拉格光纤光栅或介质膜组成谐振腔,每一个光纤激光器均有少部分激光从后腔镜输出,这些输出激光经过耦合透镜阵列输出,可近似看成平行光,经球面角锥反射后则为一发散的光束,并耦合进入 $N-1$ 个光纤激光器中(如图1(b)所示),这样由于球面角锥的反馈注入,使各个光纤激光器之间实现有效互注入锁定。

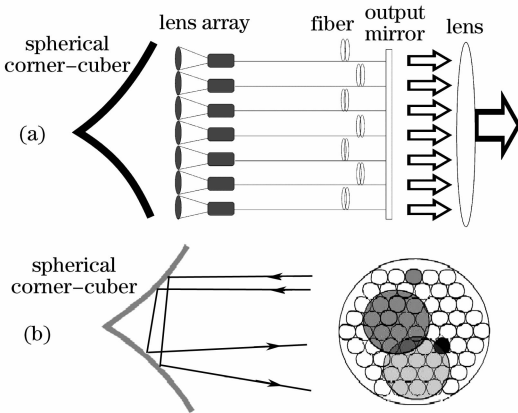


图1 球面角锥互注入锁相耦合谐振腔(a)及其切面示意图(b)

Fig. 1 Sketch map of mutual-injection-locking cavity based on spherical corner-cuber (a) and its face section (b)

假定 N 个光纤激光器在自由振荡状态下,工作

频率、偏振状态和相位各不相同。经角锥互注入实现频率锁定时,第 i 个光纤激光器将会有来自其他的 $N-1$ 个激光束注入,利用含有注入项的范得珀耳(Van der Pol)方程,在旋波近似下,第 i 个光纤激光器单纵模激光振荡方程可写为

$$\frac{dE_i}{dt} - (g_i - \alpha_i)E_i = \frac{1}{2\tau_p} \sum_{k \neq i}^N E_k, \quad (1)$$

其中

$$E_i = |E_i| \exp[j(\omega_i t + \varphi_i t)], \quad (2)$$

$$E_k = |E_k| \exp[j(\omega_k t + \varphi_k t)], \quad (3)$$

式中, E 为光纤激光器内的光场, g 为增益系数, α 为衰减系数, ω 为光纤激光器的运转频率, φ 为光纤激光器的初始相位, τ_p 为光子在谐振腔内往返一次所需的时间,下标 i, k 表示不同的光纤激光器,由(1)~(3)式得

$$\frac{d|E_i|}{dt} - (g_i - \alpha_i)|E_i| = \frac{1}{2\tau_p} \sum_{k \neq i}^N |E_k| \cos \theta_k, \quad (4)$$

$$|E_i| \left[\omega_i + \frac{d\varphi_i(t)}{dt} \right] = \frac{1}{2\tau_p} \sum_{k \neq i}^N |E_k| \sin \theta_k, \quad (5)$$

$$\theta_k = (\omega_k - \omega_i)t + (\varphi_k - \varphi_i), \quad (6)$$

式中 θ_k 表示能量互注入光纤激光器在时域上的相位差。在互注入锁相实现过程中,是将原本工作频率、相位彼此独立的光纤激光器,在同一个谐振腔内达成相位与频率一致,必定有一个自选择、自调整的弛豫振荡过程。

当互注入锁定达到稳定时,即达到锁定状态时,(4),(5)式右边项为常数,由(6)式则有: $\omega_k = \omega_i$ 。由于 i, k 是任意的两束激光,即有

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 \dots = \omega_N = \omega_0, \quad (7)$$

$$\theta_k = \varphi_k - \varphi_i. \quad (8)$$

此时,各个激光器输出具有相同的频率、相位、偏振的激光,这些激光将在远场产生相干叠加,极大地提高激光器的输出光强。

该方案主要特点是,实现了真正意义上的互注入锁相、完全相干结构,组束效率高,结构简洁,容易实现多光纤组束和大功率输出。但球面角锥加工困难,侧面抽运密接布阵结构复杂。

2.2 平面角锥互注入锁相光纤激光器模型

利用平面角锥,通过 6×1 光纤耦合器将6个平行的双包层光纤激光器和一个光纤光栅组成互注入锁定结构,如图2所示。从每个光纤激光器出来的光,经角锥反射器反射后耦合进入对称的另一个光纤激光器中,同时,6个双包层光纤激光器也通过

6×1光纤耦合器实现能量的相互耦合,并且由于光纤光栅的反射作用,使能量再分别注入到各个双包层光纤激光器中,使得6束输出光具有相同的相位、偏振和波长,在输出端形成相干叠加。由于角锥存在退偏效应,可以在腔内插入起偏器实现单偏振耦合输出。

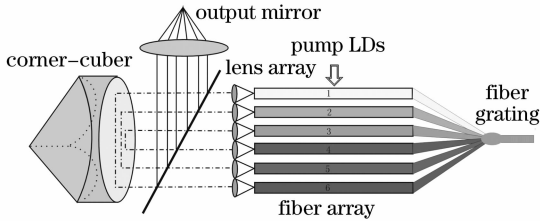


图2 平面角锥反射器互注入锁定光纤激光器模型示意图

Fig. 2 Sketch of mutual injection-lock cavity based on planar corner-cuber

该方案主要特点是,实现了真正意义上的互注入锁相偏振光输出,组束效率高,结构简洁,无需复杂的相位补偿措施和保偏光纤。

3 两路光纤激光器互注入锁相实验

由于受实验条件的限制,为了验证上述方案,仅做了基于平面角锥的两路光纤激光器互注入锁相实验,实验方案及其装置如图3所示。两台光纤激光器的准直器输出端与角锥底面顶点对称排列,角锥与准直器之间插入一块偏振片,偏振片以布鲁斯特角放置。第一台光纤激光器 FL1 输出激光与偏振片相遇,其激光中的 s 分量被偏振片反射, p 光则穿过偏振片,经过角锥的对称反射,注入到第二台光纤激光器 FL2,由于光纤激光器的后光栅反射率较低,使得注入的部分 FL1 的 p 光进入到 FL2 的增益区,对其激光振荡产生注入影响。同样,FL2 输出激光与偏振片相遇,其激光中的 s 分量被偏振片反射, p 光则穿过偏振片,经过角锥的对称反射,注入到 FL1,对其激光振荡产生注入影响。此过程称之为激光互注入。由于角锥具有一定的退偏效应,从角锥反射出的激光偏振态发生了变化,有部分光在再次穿过偏振片时被反射,造成能量的损失,用一块全反镜将反射的激光沿原路返回,重新回到激光振荡区域,降低了能量损耗。

实验中观察到如下现象:波长锁定现象。波长锁定是基于角锥光纤激光器相干合成的关键之一。实验中采用日本 ANDO 公司的 6317B 光谱分析仪,仔细观察了两台光纤激光器相干合成前后的波长变化,光谱仪的最小分辨率为 0.01 nm。利用多维精

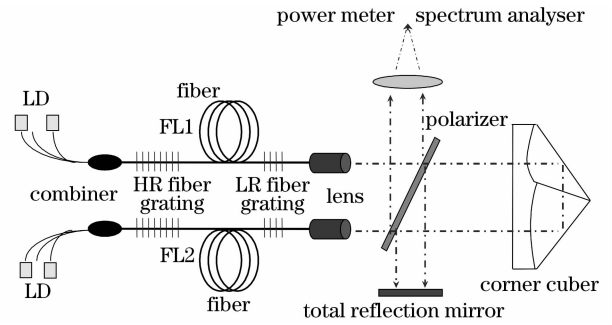


图3 两路光纤激光器互注入锁相实验结构图

Fig. 3 Schematic diagram of mutual injection-lock cavity of two fiber lasers

密调节架,精密调节 FL1 和 FL2 的准直器位置、偏振片的放置角度和全反镜方位,使两台光纤激光器的互注入耦合效率达到最高,两台光纤激光器形成如图3所示的互注入通道。

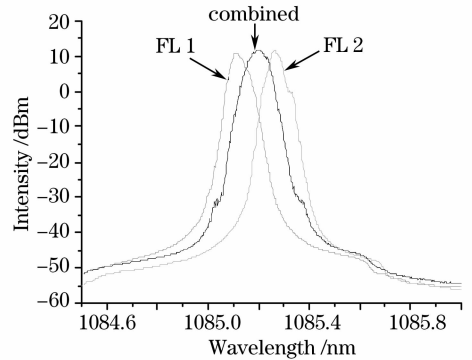


图4 合成前后的输出光谱图

Fig. 4 Spectrum of two fiber lasers (FL1, FL2) and the combined spectrum

首先,在 FL1 单独工作时,测得偏振输出激光的光谱,如图4-FL1所示,其中心波长 λ_1 为 1085.11 nm,线宽为 0.11 nm。然后关闭 FL1,打开 FL2 使其单独工作,测得此时偏振输出激光的光谱,如图4-FL2所示,其中心波长 λ_2 为 1085.31 nm,线宽为 0.12 nm, λ_1 和 λ_2 相差约为 0.2 nm。在工作条件不变的情况下,同时打开 FL1 和 FL2,使两台激光器相互注入和相互影响,此时发现,当两台激光器的注入电流较小时,合成输出的光谱的中心波长处于 λ_1 和 λ_2 的长波方向。当注入电流达到约 1.5 A 时,合成输出的光谱中心波长漂移至 λ_1 和 λ_2 之间,此时的中心波长为 1085.22 nm,线宽为 0.21 nm,如图4-combined所示。在长时间观察下,其波长无跳变现象发生。在更高电流的注入条件下,合成输出的光谱中心波长稳定在至 λ_1 和 λ_2 之间。

这一实验结果表明,当注入电流大于阈值电流时,两台原本各自独立工作的光纤激光器通过角锥

互注入锁定,使得它们之间的振荡模式相互关联,相互影响,从而达到共同的工作状态,以相同的光谱输出,即实现了波长的锁定。

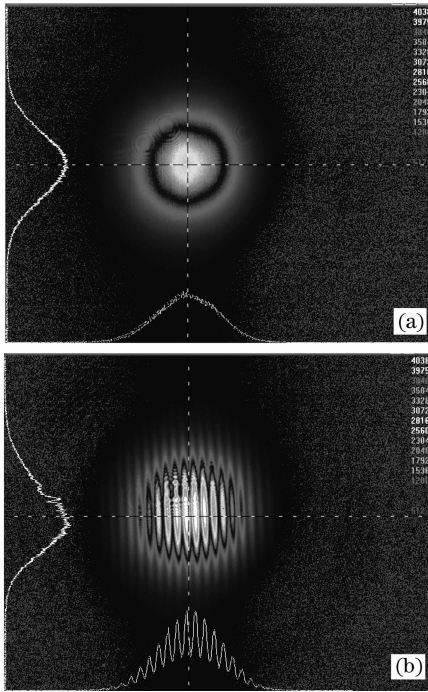


图5 不同条件下的远场干涉图
(a)未互注入;(b)互注入后

Fig. 5 Far-field beam patterns of laser array in (a) free running and (b) mutual injection

远场干涉现象。用 Spiricon 公司生产的 LBA2PC300 型激光光束质量分析仪(软件版本 3.23)测量了两路光纤激光器互注入前后的远场光场分布。首先利用一块金属挡片置于偏振片与角锥之间,以阻止两台激光器的相互注入,此时测量 1 m 正透镜焦点处的光场分布为未实现互注入时的两台光纤激光器的光场分布。撤掉金属挡片,使两台光纤激光器的能量通过角锥实现互注入,此时测量的光场分布即为两台光纤激光器实现互注入后的合成光场分布。互注入前后合成光场强度分布分别如图 5(a)和(b)所示。

线宽压缩现象。实验发现,当波长锁定后,光谱的线宽有所展宽,且随注入电流的增大而增大。此时,通过拧捏或缠绕光纤发现,合成前独立激光器输出的光谱无明显变化,尤其是线宽变化很小。但是对合成后的光谱线宽影响非常大,得到了较大幅度的压缩。压缩前合成激光光谱 3 dB 线宽是 0.34 nm,通过拧捏光纤可使其降低到 0.19 nm,压缩幅度约在 44%左右,而中心波长几乎不变。其典型变化如图 6 所示。

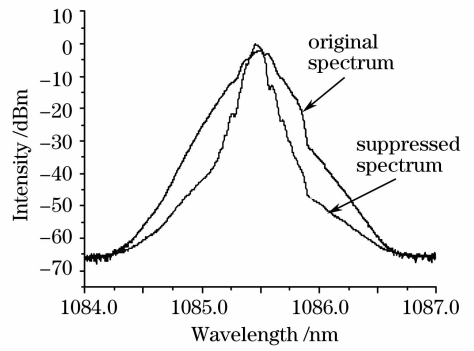


图6 拧捏或缠绕光纤对光谱线宽压缩的影响
Fig. 6 Suppression of the spectrum width when the fiber is screwed or twisted

功率合成效率大于 1 现象。通过对合成前每个光纤激光器的输出功率的测量与合成后总体输出功率的比较,可以求出功率合成效率。通过优化实验的结构参数和提高光纤与角锥的耦合效率,对腔内进行了偏振控制,发现其合成效率超过 120% 的现象,如图 7 所示。合成效率高于 1 是因为在两路光纤激光器相干合成时,腔内增益成倍增加,而腔内损耗保持不变,即提高了系统的功率提取效率。在注入电流为 7A 条件下,最大合成输出激光功率超过了 2.4 W。

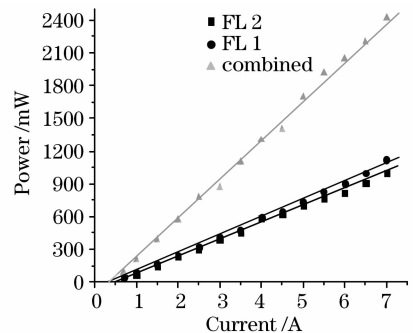


图7 功率合成效率曲线
Fig. 7 Output power combination curve of two fiber lasers (FL1, FL2)

波长漂移量与子光束功率比值的的关系。通过更进一步的实验发现,两台激光器注入前后的波长漂移量与它们的注入功率呈反比趋势,即如果 FL1 的功率大,那么它的波长漂移量就小。通过大量实验研究,发现其波长漂移量与各自的注入功率貌似有如下的一个经验公式: $P_1 \times \Delta\lambda_1 = P_2 \times \Delta\lambda_2$,即两者的注入功率比与其波长漂移量比呈倒数关系。

此外,实验中还观察到其他现象:互注入锁相的阈值、中心频率、线宽、合成效率与腔内偏振状态、模式特性有很大关系,通过调节这些参数可优化输出特性。

4 结 论

提出了基于角锥互注入被动锁相方案,并在两路光纤激光器互注入锁相实验中,观察到了波长锁定稳定、线宽压缩明显和功率合成效率大于1(达120%)等现象。角锥腔互注入锁相光纤激光器是一种全自动锁相的新结构,它具有结构简单、合成效率高、输出特性调谐灵活、完全自适应且单偏振输出、可定标放大等优点,具有重要的研究价值与应用前景。

参 考 文 献

- 1 Thomas H. Loftus, Anping Liu, R. Paul *et al.* . 258 W of spectrally beam combined power with near-diffraction limited beam quality [C]. *SPIE* , 2006, **6102**:61020S
- 2 Jesse Anderegg, Stephen Brosnan, Mark Weber *et al.* . 8-watt coherently phased 4-element fiber array[C]. *SPIE*. 2003, **4974**: 1~6
- 3 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. 两根大芯径双包层光纤激光器获得60W相干输出[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8):1279~1280
- 4 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.* . 113-W in-phase mode output from two ytterbium-doped large-core double-cladding fiber lasers[J]. *Chin. Opt. Lett.* , 2007, **5**(7):412~414
- 5 A. A. Betin, S. C. Matthews, M. S. Mangir. Vector phase conjugation with loop laser geometry[C]. CLEO'97, Baltimore, May 1997, Proceedings p. 102
- 6 A. A. Betin, S. C. Matthews, M. S. Mangir. Phase conjugation of depolarized light with a loop PCM[C]. Nonlinear Optics'98, Kauai, Hawaii, August 1998, Techn. Digest, 288~290
- 7 Jacques Morel, Alain Woodtli, René Dändliker. Coherent coupling of an array of Nd³⁺ doped single-mode fiber lasers using an intracavity phase grating [C]. *SPIE* , 1992, **1789**: 13~17
- 8 J. R. Leger, O. J. Swanson, W. B. Veldkamp. Coherent laser addition using binary phase gratings [J]. *Appl. Opt.* , 1987, **26** :4391~4399
- 9 X. J. Jia, Y. G. Liu, F. N. Liu *et al.* . Realization of an all-fibre self-organization intra-cavity coherent erbium-doped fibre laser[J]. *Chin. Phys. Lett.* , 2007, **24**(10): 2842~2845
- 10 Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin. Recent progress and development directions of fiber laser combining technology[J]. *Infraed and Laser Engineering* , 2007, **36**(2):163~166.
程 勇,刘 洋,许立新. 激光相干合成技术研究新动向[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(2):163~166.
- 11 Liu Yang, Cheng Yong, Wang Xiaobing *et al.* . Spatial coherence measurement of multiple coherent lasers combination [C]. *SPIE* , 2007, **6723**: 67232G