

文章编号: 0258-7025(2006)09-1153-06

两个光纤激光器的相位锁定及 高相干功率输出

何兵, 楼祺洪, 周军, 薛冬, 董景星, 魏运荣, 漆云凤, 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 研究了两个光纤激光器的相位锁定及其相干输出。将两个光纤激光器的输出耦合进一个自成像共振腔, 然后利用一个空间滤波器进行模式选择。自成像共振腔由两个焦距为8 mm的准直透镜、一个焦距为500 mm的傅里叶透镜和一个耦合输出镜组成。滤波器由两根20 μm 的铂金线组成, 并放置在耦合输出镜面上。实验中, 观测到光束截面图样具有高对比度的干涉条纹。输出镜反射率在50%和30%情况下, 分析了单个激光器和激光器阵列的斜率效率。在总抽运功率为60 W时, 获得了18.3 W的高相干功率输出。稳定的相位锁定是由于激光器阵列具有能适应光程长度变化的自调节过程。实验表明, 利用该方法完全可以进一步提高相干输出功率。

关键词 激光器; 相位锁定; 自成像共振腔; 空间滤波器

中图分类号 TN 248.1; O 436.1 **文献标识码** A

Phase-Locking and High Coherent Power Output of Two Fiber Lasers

HE Bing, LOU Qi-hong, ZHOU Jun, XUE Dong,

DONG Jing-xing, WEI Yun-rong, QI Yun-feng, WANG Zhi-jiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Phase-locking and coherent output of two fiber lasers are studied. Two fiber laser are coupled into a common self-imaging resonator with a spatial filter for mode selection. The resonator consists of two collimators with 8 mm focal length, a Fourier lens with 500 mm focal length, and a coupled output mirror. The filter is made of two platinum wires with 20 μm diameter and is placed at the plane of the output mirror. The high-contrast interference strips of the beam profile are observed. Under the output mirror with the different reflectivity of 50% and 30% condition, the slope efficiencies of the individual laser and the laser array are analyzed. When the whole pump power is 60 W, a high coherent power output of 18.3 W is obtained. Steady phase-locking results from a self adjusting process of the laser array which adapts to changes in the optical path lengths. This experiment shows that the coherent power output can be improved greatly by means of this method.

Key words lasers; phase-locking; self-imaging resonator; spatial filter

1 引言

近年来, 单根光纤激光器的输出功率迅猛提高, 尤其是采用光纤布拉格光栅选频、双端抽运、光子晶体光纤和多级放大等新技术, 输出功率已达几百瓦甚至超过千瓦^[1~3]。但是由于受激拉曼散射(SRS)

和受激布里渊散射(SBS)等非线性效应的影响, 单根光纤激光器的最终输出功率还是受到限制。要想保证光束质量的同时并进一步提高输出功率就需要采用相干组束技术。目前国内外已经提出多种相干组束技术, 如: 并联-主振荡功率放大(MOPA)系统^[4]、多芯光纤自组装^[5]、全光纤组束^[6]、S-F腔组

收稿日期: 2006-01-16; 收到修改稿日期: 2006-03-07

基金项目: 国家 863 计划(2005AA828030)和中国科学院知识创新工程资助项目。

作者简介: 何兵(1975—), 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事光纤激光器、放大器和相干组束的研究。E-mail: bryanho@mail.siom.ac.cn

导师简介: 楼祺洪(1942—), 男, 浙江人, 中国科学院上海光学精密机械研究所研究员, 博士生导师, 目前研究方向为光纤激光器及其相干组束技术、陶瓷激光器和准分子激光器。E-mail: qhlou@mail.shnc.ac.cn

束^[7]等等。通常而言,主振荡功率放大系统涉及到复杂的干涉探测和每个激光器的相位探测;多芯光纤自组装方法对光纤的制作和拉制要求很高;全光纤组束采用光纤耦合器将多根光纤的输出激光组合到一根光纤,但最终还是受限于单根光纤的功率承载能力;S-F腔组束实际上与 Talbot 腔的原理相似,涉及到复杂的和快速的场振幅和波面的变化,这就增加了模式控制和准直的难度,很容易导致异相模式的产生,而且在衍射极限内并没有实现单模操作。对于大量的介质如 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄,采用自成像共振腔已经得到证明^[8,9],这种方法完全可以应用于光纤激光器阵列选择,并且在低功率输出下已经得到证明^[10,11]。该方法对光纤激光器的相位锁定是被动进行的,利用激发频率适应光程长度变化的自调节过程来实现的。在这种方法中,可以有大量的不同长度的光纤激光器利用一个进行模式选择的滤波器来耦合进一个共用的自成像共振腔中。在每一个激光器中,光纤的长度和相位情况都决定于空间滤波器,它允许有多个纵模模式的存在。该方法还允许每一个独立的激光器以及相位锁定阵列的输出都是非偏振光,因为一个偏振本征态在两个元件的系统中总是能够被发现(如果忽略它们之间的取向关系)。

本文将两个不同长度的光纤激光器耦合进一个共用的自成像共振腔,通过一个特殊设计的空间滤波器进行选模和稳定相位,成功实现了激光束的相干合成。观测到高对比度的干涉条纹。

2 实验装置

实验结构如图 1 所示。自成像共振腔是由两个平板输入镜 (M_1 和 M_2),一个平板输出镜 M_3 ,和一个会聚透镜 L_3 组成。 M_1 和 M_2 是全同双色镜对 1064~1110 nm 高反而对 975 nm 透过率大于 95%, M_3 对 1050~1110 nm 的反射率为 R , L_3 的焦距 $f = 500$ mm,它在整个系统中作为一个傅里叶变换透

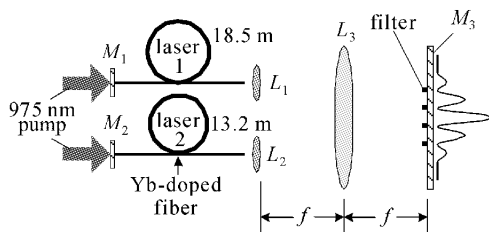


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

镜。两个大功率的半导体二极管阵列激光器(其发射波长为 975 nm)作为抽运源。所用的两根光纤为国产掺 Yb 双包层 D 型光纤,纤芯直径为 16 μm ,数值孔径为 0.37 的内包层作为工作介质,纤芯的数值孔径为 0.16,它们的长度分别为 18.5 m 和 13.25 m。单根这种光纤已经获得 110 W 的高功率输出^[12]。 M_1 和 M_2 放在两根光纤的输入端,光纤的输出端磨平具有 4% 的非涅耳反射率,作为两个光纤激光器的输出镜。两个平凸透镜 (L_1 和 L_2) 直径为 6.28 mm,焦距为 8 mm,放在掺 Yb 光纤的输出端作为准直透镜,它们相对于会聚透镜的光轴对称地紧挨着放置在 L_3 的前焦面上,间距为 6.3 mm。输出耦合镜 M_3 放在傅里叶透镜 L_3 的后焦面。

3 基本原理

早在 1969 年 J. A. Arnaud 就提出了简并和半简并光学腔的概念并进行了理论分析^[13],A. E. Siegman 指出自成像共振腔就是一种半简并腔^[14],V. Couderc 等最早应用自成像共振腔实现了固态激光器光抽运效率的优化^[15]。对于自成像共振腔而言,根据通常光束传输矩阵方法,它的腔内往返一次 ABCD 矩阵为: $\mathbf{A} = \mathbf{D} = -1$, $\mathbf{B} = \mathbf{C} = 0$ 。这正是半简并腔的条件,在这种情况下根据定义可以把自成像共振腔看成一个半简并、自成像系统。而且,很容易看到对于任意的复光束参数 q 的自洽方程为

$$q = (\mathbf{A}q + \mathbf{B}) / (\mathbf{C}q + \mathbf{D}), \quad (1)$$

(1) 式对于任意的 q 值都成立,即任何入射到腔内的同轴高斯光束都是与腔匹配的。由于腔的往返传输矩阵为 $-[1]$,光线传输矩阵对于腔内两次往返就变成单位阵了。如果将任意离轴的光线看成光轴的话,这种类型的腔也是简并的,条件是离轴光线在腔中经过两次往返是闭合的。所以,这种自成像腔中任意一束腔内闭合光束在腔内经过两次往返都能回到初始位置,并且这种腔对任意横截面图样的光束都支持。

根据图 1,准直透镜处(也就是 L_3 的前焦面)的光场与 M_3 处(L_3 的后焦面)的光场正好满足傅里叶变换。假设 L_3 前焦面上的场振幅函数为 $u(x, y)$,则输出镜处的场振幅为

$$U(f_x, f_y) = \frac{1}{j\lambda f} \times \iint_{-\infty}^{\infty} u(x, y) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy, \quad (2)$$

式中 $f_x = \frac{x_f}{\lambda f}$, $f_y = \frac{y_f}{\lambda f}$,表示傅里叶变换频率。其中

x, y, x_f, y_f 分别表示傅里叶透镜前焦面上的横坐标和纵坐标、透镜后焦面上的横坐标和纵坐标, λ 为光波长, f 为傅里叶透镜的焦距。对(2)式平方就得到相应的光强分布

$$I = |U(f_x, f_y)|^2. \quad (3)$$

如果知道入射光场的 $u(x, y)$, 就能联立(2)式和(3)式求出耦合输出镜处的光强分布。对于图1两个光纤激光器的相位锁定实验而言, 两个光纤激光器输出经透镜 L_2 和 L_3 准直后为两束同相高斯光束, 所以假定傅里叶变换透镜前焦面上的两高斯光束腰斑相等, 相位相同, 初始相位均为 0。因此

$$u(x, y) = \frac{c}{w(z)} \exp\left[-\frac{(x-d)^2 + y^2}{w^2(z)}\right] + \frac{c}{w(z)} \exp\left[-\frac{(x+d)^2 + y^2}{w^2(z)}\right], \quad (4)$$

式中 c 为常数因子, $w(z)$ 为与自成像腔光轴相交于 z 点的高斯光束等相位面的曲率半径, d 为高斯光束中心到自成像腔光轴的距离。因为假设两光束同相位, 所以(4)式中省略了光束的相位因子。联立(2)~(4)式就能计算出预设同相模式在耦合输出镜处的光强图样, 以及中心条纹宽度等参数。

4 结果与讨论

在准直透镜 (L_1 和 L_2) 处的光束截面和在输出镜处的光束截面正好是一个傅里叶变换。因此一个关于共振腔光轴对称的光束截面通过高反馈效率在共振腔中经过一次往返正好产生自己的像。这两个相对传输的波发生耦合时, 由于模式的竞争将会导致光束的不稳定性。用一个 CCD (型号: COHU4810) 和 Spricon Inc 公司生产的 LBA-PC300 型激光波面分析仪 (软件版本 3.23) 测量傅里叶变换透镜 L_3 后焦面上的输出光束的截面图样。图 2(a) 和 (c) 分别是输出耦合镜的反射率为 50% 和 30% 时激光器阵列在没有空间滤波器的情况下自由运行时输出镜处的光束截面图样。正如文献 [10] 描述, 光束截面呈现出低对比度的干涉边缘, 这个边缘还不停地以无规则的步调和方向运动。当每一个光纤激光器受到轻微的机械干扰时边缘的无规则运动加剧而且对比度下降。为了稳定相位引入两根高熔点 (熔点: 1769 °C) 细铂金线作为空间滤波器, 铂金线的直径为 20 μm 。这两根铂金线平行放置间距为 90 μm , 这个距离是预设的同相模式在输出镜处的两个第一强度极小之间的距离。理想情况下, 将该滤波器放在输出镜的前面, 与预设同相模式图样相

匹配时, 能对异相模式产生高损失而对同相模式产生低损失。图 2(b) 和 (d) 为输出镜反射率在 50% 和 30% 时同相模式光束的截面图样。激光器阵列在同相模式下工作时, 光束剖面呈现出高对比度的干涉条纹。在耦合输出镜的两种反射率情况下, 光束截面图样中心条纹的宽度均为 91 μm , 这与理论计算结果吻合得很好。

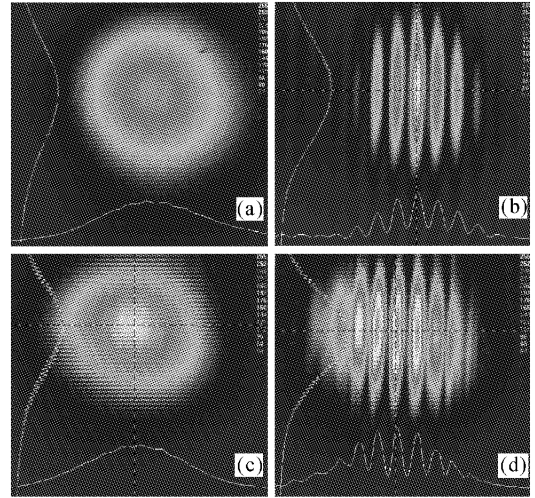


图 2 不同输出镜反射率条件下激光器阵列自由运行 ((a) 和 (c)) 和同相模式 ((b) 和 (d)) 工作时的光束截面图样

Fig. 2 For the different reflectivity of the output mirror, beam pattern of laser array in free running ((a), (c)) and in-phase modes ((b), (d))

典型的光纤激光器的长度范围由几米到几十米。要让它们的长度完全相等实际上是不可能的。由于无法控制热和机械的影响, 它们的光程随时都在变化。假设光程的热变化系数为 10 ~ 5 $\text{m}/^\circ\text{C}$ [16], 如果有 0.01 °C 的漂移就能导致 5 m 长的二氧化硅光纤产生 π 的相位漂移, 从而完全改变干涉条件。但是在实验中, 只要放上空间滤波器, 任何单个激光器光程长度自由变化时, 两个激光器相位锁定都呈现出稳定状态, 相干条纹不发生移动。这说明, 系统具有能适应外界变化的自调节过程 [10]。实际上就是激光器阵列 (有独立长度 l_1 和 l_2) 发出的波的共振频率在光纤输入端平面处都必须同时满足有节点的边界条件, 同时在 L_3 的前焦面上有相同的相位。因此激光束的频率由每个独立激光器的自由光谱范围 ($c/2nl_1$) 和 ($c/2nl_2$) 相乘合成。当其中任何一个激光器的光程发生变化时系统输出的纵模模式就会发生轻微漂移产生一套新的共振频率。自调节过程并不总是可能的, 但是在有宽增益带宽、长

距离但不等长距离、低 Q 值的共振腔激光系统中表现最好。宽的增益带宽和长的距离在增益带宽区域内提供了大量非常接近的空间纵模模式,这样能很容易发现共同的共振频率。而低 Q 值的共振腔能对振荡线展宽从而容许相近的振荡产生叠加。所有这些好的条件在光纤激光器阵列中都具备了。

图 3 给出了实验所测的单根光纤激光器带外腔工作时和激光器阵列在同相模式下工作时的输出功率

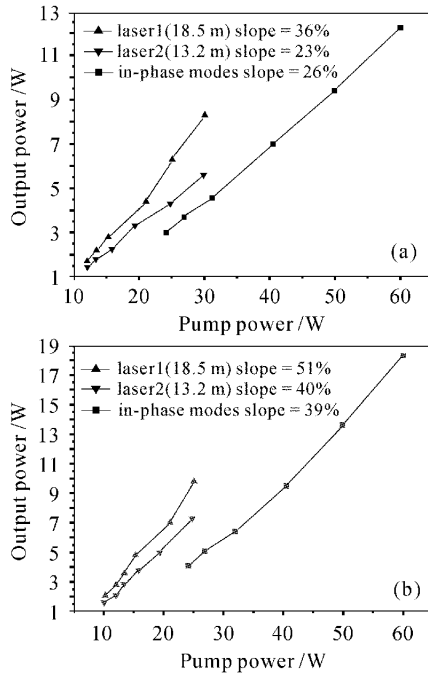


图 3 不同反射率下相位锁定激光器阵列和单个激光器的抽运功率和输出功率关系

Fig. 3 For the different reflectivity of the output mirror, output power versus pump power of the phase-locking laser array and the individual laser (a) $R = 50\%$; (b) $R = 30\%$

率与抽运功率的关系。由图 3(a)可见,激光器 1 和激光器 2 的斜率效率分别是 36% 和 23%,相位锁定的激光器阵列斜率效率为 26%。当总的抽运功率为 60 W 时相位锁定的激光器阵列的相干输出为 12.3 W。与文献[10]和[11]的低功率情况下相比三者的斜率效率都偏低。这主要是由于耦合输出镜的反射率较高增加了反射光功率,这样在自成像共振腔中反射光与入射光耦合时的耦合损失与 L_1 和 L_2 将反射光再次耦合进光纤纤芯中时的耦合损失都增高,同时还有腔内光学元件对光的吸收、散射等一些未知因素导致的损失也将增加,最终导致输出功率降低。适当降低输出耦合镜的反射率能够提高单根光纤激光器和相位锁定激光器阵列的斜率效率,而且还能提高相干输出功率。实验充分证明了这一点。由图 3(b)可见,激光器 1 和激光器 2 的斜率效率分别达到 51% 和 40%,相位锁定激光器阵列的斜率效率提高到 39%。总抽运功率为 60 W 时,相干输出功率提高到 18.3 W。很明显,不能靠无限制地降低输出耦合镜的反射率来提高相干输出功率。因为在自成像共振腔中必须提供足够的反馈来进行耦合才能达到理想的相干效果。所以对于耦合镜的反射率必定存在一个优化的范围,在这个优化范围内既能提供足够的反馈又能达到理想的相干。

从图 3 还注意到,不论 $R = 50\%$ 还是 $R = 30\%$ 时,激光器 1 的斜率效率比激光器 2 的斜率效率高 10% 甚至更多,这是两根掺 Yb 双包层光纤长度不同导致的。对于光纤激光器而言,在抽运功率一定的情况下,输出功率是光纤长度的函数,可以利用速率方程导出它们的关系。对于连续波(CW)激光,振荡激光的频带很窄,则与时间无关的稳态速率方程组为^[17,18]

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_a(\lambda_p)\Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)]\sigma_a(\lambda_s)\Gamma_s}{h\nu_s A}}{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)][\sigma_a(\lambda_p) + \sigma_e(\lambda_p)]\Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{1}{\tau} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)][\sigma_a(\lambda_s) + \sigma_e(\lambda_s)]\Gamma_s}{h\nu_s A}}, \quad (5)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_p P_p^\pm(z) \{ \sigma_a(\lambda_p)N - [\sigma_a(\lambda_p) + \sigma_e(\lambda_p)]N_2(z) \} - \alpha_p P_p^\pm(z), \quad (6)$$

$$\pm \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_s P_s^\pm(z) \{ [\sigma_a(\lambda_s) + \sigma_e(\lambda_s)]N_2(z) - \sigma_a(\lambda_s)N(z) \} + \Gamma_s \sigma_e(\lambda_s)N_2(z)P_0(\lambda_s) - \alpha_s(z)P_s^\pm(z), \quad (7)$$

式中 $P_p^\pm(z)$ 和 $P_s^\pm(z)$ 分别表示光纤中的抽运功率和信号功率,上标“+”和“-”分别表示沿光纤 z 方向正向传播和反向传播。 h 为普朗克常数, A 为纤芯

的横截面积, ν_p 和 ν_s 表示抽运光和信号光的频率, $\sigma_e(\lambda)$ 和 $\sigma_a(\lambda)$ 表示发射和吸收截面, α 为散射损耗系数, Γ 为功率填充因子。 $N_2(z)$ 为上能级粒子分布函

数,其自发辐射寿命为 τ 。自发辐射对激光功率的贡献为 $P_0(\lambda_s) = 2hc^2/\lambda_s^3$, c 为真空中的光速。 N 为纤芯每单位体积的 Yb^{3+} 粒子数浓度。求解(5)~(7)速率方程需要实际的边界条件。对于实验中单端抽运光纤激光器的情况,边界条件为

$$P_s^+(0) = R_{s0}P_s^-(0), \quad (8)$$

$$P_s^-(L) = R_{sL}P_s^+(L), \quad (9)$$

$$P_p^-(L) = R_{pL}P_p^+(L), \quad (10)$$

$$P_p^+(0) = R_{p0}P_p^-(0) + P(0), \quad (11)$$

这里的 R_{p0} 和 R_{pL} 分别表示抽运光在 $z = 0$ 和 $z = L$ 处的反射率。 R_{s0} 和 R_{sL} 分别为激光在 $z = 0$ 和 $z = L$ 处的反射率。 $P(0)$ 为光纤输入端注入的抽运功率。对于本实验中的掺 Yb 双包层光纤激光器,输出功率可以表示为

$$P_{\text{out}} = P_s^+(L) - P_s^-(L), \quad (12)$$

联立(5)~(12)式,利用 Matlab 数值模拟软件,模拟了在抽运功率 50 W 时的输出功率和光纤长度的关系曲线,见图 4。从图 4 中看到,随着光纤长度的增加,输出功率先快速增加,在达到一个极大值后缓慢地降低。由于在极大值附近的变化是比较缓慢的,所以选取范围(小于极大值 0.05%) 18~24 m 作为光纤的优化长度范围。激光器 1 的光纤长度 18.5 m 正好在优化长度范围之内。而激光器 2 的光纤长度 13.2 m 远离优化长度范围,这就导致抽运光没有被纤芯中的 Yb^{3+} 粒子充分吸收,也就没有充分转化成激光输出而损失掉了。所以激光器 2 的斜率效率与激光器 1 相比低很多。这为优化激光器阵列,选取单根光纤长度提供了可靠的数据。

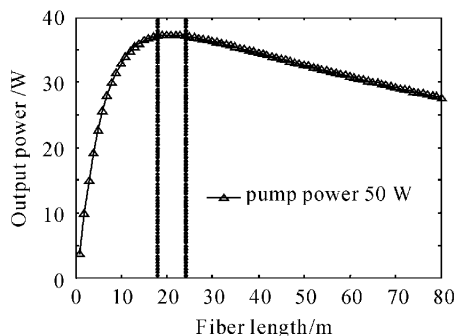


图 4 光纤激光器的输出功率是光纤长度的函数
Fig. 4 Output power as a function of fiber length

实验中,在高相干功率输出时没有观测到铂金线发红、断裂和熔化等基本物理特性的改变,说明这种铂金线滤波器能承受更高功率激光束的照射。

单个激光器和激光器阵列的输出光都是非偏振

光,但在整个实验过程中,没有进行任何偏振调控。如果在忽略光束取向的情况下,一个偏振本征态是肯定存在的^[10]。

综上所述,如果选择合适的耦合输出镜反射率、增加激光器的数目、选择具有优化长度的光纤和增加抽运光功率等,进一步提高相干输出功率是完全可能的。

5 结 论

利用自成像共振腔和一个空间滤波器实现了对两个不同长度的光纤激光器的相位锁定。观测到高对比度的干涉条纹。系统稳定的相位锁定能力主要是由于自调节过程来实现的。在抽运功率 60 W 和耦合输出镜反射率为 30% 时,获得 18.3 W 的相干功率输出。实验充分说明,该方法具有进一步提高相干输出功率的巨大潜能。

参 考 文 献

- Li Lijun, Fan Wande, Fu Shenggui *et al.*. Yb³⁺-doped double-clad fiber laser with frequency selecting by double-clad fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1):55~58
李丽君, 范万德, 付圣贵 等. 双包层光纤光栅选频双包层光纤激光器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1):55~58
- Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Qianqiang *et al.*. A 440 W CW high power output with homemade Yb-doped double-clad-fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):20
楼祺洪, 周 军, 朱健强 等. 国产双包层掺镱光纤实现 440 W 的连续高功率激光输出[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):20
- Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25):6088~6092
- M. A. Culpepper. Coherent combination of fiber laser beams [C]. *SPIE*, 2002, **4629**:99~108
- E. J. Bochove, P. K. Cheo, G. G. King *et al.*. Self-organization in a multicore fiber laser array [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14):1200~1202
- D. Sabourdy, V. Kermene, A. Desfarges-Berthelemot *et al.*. Efficient coherent combining of widely tunable fiber lasers [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(2):87~97
- C. J. Corcoran, F. Durville. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(20):201118-1~201118-3
- S. Ménard, M. Vampouille, B. Colombeau *et al.*. Highly efficient phase locking and extracavity coherent combination of two diode-pumped Nd:YAG laser beams [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24):1996~1998
- Y. Zhou, L. Liu, C. Etson *et al.*. Phase locking of a two-dimensional laser array by controlling the far-field pattern [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(16):3025~3027
- L. Liu, Y. Zhou, F. Kong *et al.*. Phase locking in a fiber laser array with varying path lengths [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(21):4837~4839
- Q. Peng, Y. Zhou, Y. Chen *et al.*. Phase locking of fibre lasers by self-imaging resonator [J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(4):171~173

12 Dong Xue, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. A 110-W fiber laser with homemade double-clad fiber [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(6);345~347

13 J. A. Arnaud. Degenerate optical cavities [J]. *Appl. Opt.*, 1969, **8**(1);189~195

14 A. E. Siegman. Lasers [M]. Sausalito, California; University Science Books, Mill Valley, 1986. 845

15 V. Couderc, O. Guy, A. Barthelemy *et al.*. Self-optimized resonator for optical pumping of solid-state lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(15);1134~1136

16 M. Tateda, S. Tanaka, Y. Sugawara. Thermal characteristics of phase shift in jacketed optical fibers [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(5);770~773

17 I. Kelson, A. A. Hardy. Strongly pumped fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(9);1570~1577

18 Wu Zilu, Chen Guofu, Wang Xianhua *et al.*. Numerical analysis of Yb³⁺ doped double clad fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(3);332~336
武自录,陈国夫,王贤华等. 掺 Yb³⁺ 双层光纤激光器的数值分析[J]. *光子学报*, 2002, **31**(3);332~336



欢迎成为《中国光学期刊网》企业会员

为进一步提高服务水平,中国光学期刊网从2006年起在信息服务上实行会员制度,凡光电子、激光、光通信等相关的企业均可申请成为中国光学期刊网的企业会员,中国光学期刊网将为企业会员提供优质超值的专业服务。

一、会员企业享受的服务包括:

- 1) 企业名称在中国光学期刊网首页的“会员企业”栏目中出现,并链接到企业自己的网址。
- 2) 会员企业可获赠光学类期刊一份,全年12册,请在《中国激光》、《光学学报》、《激光与光电子学进展》和 *Chinese Optics Letters* 中任选一种。
- 3) 可免费在本站“特别推荐”栏目发布文字信息(含广告) 10条,每篇不过2000字。
- 4) 如在中国光学期刊网发布广告,可享受广告报价的80%优惠。
- 5) 优先或免费参加光学期刊网组织的各类学术和业务活动。
- 6) 可免费阅读本网站期刊全文300篇次。



二、会员义务:

1. 注册时向中国光学期刊网递交企业真实信息。
2. 每年交纳会员费2800元,会员资格从交费之日起计算,一年内有效。
3. 不得将中国光学期刊网提供给会员的信息转给第三方使用。
4. 尊重并保护本网及论文作者的知识产权。
5. 在本网发布信息必须遵守中华人民共和国相关法律法规。

三、成为企业会员的步骤:

- ① 注册成为中国光学期刊网的一般用户,也可以直接填写广告投放申请表单,说明您的意向。
- ② 来信至 mail@opticsjournal.net 告知您已经注册成功。并请告知选择何种期刊及收刊地址、联系人。
- ③ 银行汇款2800元至下列帐户:
开户行:工商银行上海嘉定支行营业部 户名:中国科学院上海光学精密机械研究所
帐号:1001700809026400195
- ④ 联系人:郑继承;电话:021-69918253; Email:expert@mail.siom.ac.cn