

角锥腔固体激光器相干特性的研究

朱孟真¹, 万 强¹, 刘 旭¹, 欧阳艳蓉², 陈 霞¹, 魏靖松¹, 马云峰¹, 陆益敏¹, 程 勇¹

(1. 武汉军械士官学校 光电技术研究所, 湖北 武汉 430075;

2. 武汉军械士官学校 基础部, 湖北 武汉 430075)

摘 要: 多光束相干合成是获得高功率、高亮度激光输出的有效途径。首次采用倏逝波理论结合互注入特性揭示了角锥腔固体激光器远场输出为相干合成分布的机理, 角锥腔对称部分的激光由于互注入实现锁相, 相邻部分由于倏逝波耦合实现锁相, 重点研究了固体激光器倏逝波耦合相干的特性。研究表明: 锁相效果跟激光阵列排布方式有关, 在相同的激光阵列排布方式时, 腔长越长, 占空比越大, 则模式间耦合越强, 锁相效果越好, 越趋向于同相模输出。理论和实验证明了角锥是一个天然的相干合成元件, 角锥多光束相干合成技术具有重要的科学价值。

关键词: 激光技术; 互注入锁相; 倏逝波耦合; 角锥

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0906008

Study on coherent characteristic of solid state laser with corner cube resonator

Zhu Mengzhen¹, Wan Qiang¹, Liu Xu¹, Ouyang Yanrong², Chen Xia¹, Wei Jinsong¹, Ma Yunfeng¹,
Lu Yimin¹, Cheng Yong¹

(1. Opto-Electronics Facility, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan 430075, China;

2. Department of Basic Sciences, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan 430075, China)

Abstract: Coherent beam combination technology is a significant approach for achieving high power laser beam with good beam quality. Based on “mutual injection and evanescent wave” characteristics of corner-cube resonator, it reveals that far field output of corner-cube laser was the inner reason and mechanism of coherent combining distribution by theory of evanescent wave. Evanescent wave coupling phase-locked combining characteristic in solid state laser was studied emphatically. The results indicate that the phase locking output is influenced by the distribution of laser beams and some other factors. When the distribution of laser beams is same, the cavity length and duty ratio determine the phase locking result. The longer cavity length and larger duty ratio, the stronger evanescent wave coupling is, so the phase locking result is much better, running to an in-phase mode output. Theories and experiments indicate that corner cube is a natural coherent combination element, and coherent beam combination technology by corner cube has important scientific value.

Key words: laser technology; mutual inject phased-locking; evanescent wave coupling; corner cube

收稿日期: 2016-01-10; 修订日期: 2016-02-15

基金项目: 国防预研基金(51302010206); 国防探索基金(7131029)

作者简介: 朱孟真(1982-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事固体激光技术及相干合成研究。Email: mzhzhu@163.com

0 引言

激光器阵列相干合成是获得高功率/能量、高亮度激光输出的有效途径,是激光技术领域的一个研究热点^[1]。根据不同的相位控制方式,相干合成主要分为主动相位控制和被动相位控制两大类。主动相干合成^[1]是通过参与合束的各子光束进行主动相位控制实现多路激光的相干合成输出;被动相位控制是根据不同的机理实现的被动自组织相干合成^[2]。如可利用衍射耦合进行模式选择的自成像腔和泰伯腔^[3]、能量的相互注入实现锁相输出^[4-5]、迈氏腔实现相干合成^[6-7]以及外腔式光栅耦合实现相干合成^[8]等。

笔者研究发现,角锥是一个天然的相干合成元件,在角锥棱镜腔固体激光器中,其近场光斑为 6 个瓣的分布状态,貌似高阶模,远场分布是角锥腔 6 个子腔部分相干合束的结果。文中采用“互注入与倏逝波”锁相特性揭示了角锥棱镜腔天然的相干合成特性。倏逝波耦合是指当激光模式之间彼此距离足够近时,各自进入邻近模式倏逝场所在区域,一个模式的存在对另一个模式构成扰动,原先各路激光的本征模式不再相互独立,同相邻的激光单元之间存在共同的场耦合,从而形成了集体参与振荡的共同模式结构。这种由于倏逝波耦合在激光阵列中产生的模式结构又叫超模,N 个激光单元之间的相互耦合会形成 N 个超模,损耗最低的超模结构具有最高的增益,最容易起振。

国内外有利用倏逝波耦合实现多芯光纤和输出端熔融拉锥耦合^[9],但对于固体激光倏逝波耦合的研究较少。倏逝波耦合相干合成最早在半导体激光中实现。1970 年,美国 Bell 实验室的 Ripper J E 等^[10]观察到了 2 路 GaAs 激光通过倏逝波耦合产生锁相输出的实验现象。1991 年,法国 Bourdet G L 等利用倏逝波耦合的方法实现了 9 路激光相干合成,输出功率为 160 W;1992 年英国 Abramski K M 等^[11]利用倏逝波耦合的方法实现了 5 路激光相干合成,输出功率 125 W。1992 年,日本科学家 Michio Oka 等^[12]首次报道了利用倏逝波耦合的方法实现 4 路二极管端面泵浦的固体 Nd:YAG 介质 1.06 μm 连续激光的锁相相干,输出功率 1.2 W,并用耦合强度的方法研究

了耦合输出模式的相位分布关系;1993 年,Jingwen Xu 等^[13]研究了两路固体激光倏逝波耦合相位变化的动力学过程。文中通过理论和实验研究了固体激光器的倏逝波耦合机理和特性,激光模场之间的倏逝波耦合可以实现锁相输出,倏逝波耦合强度逐渐增强,模场之间的锁相状态从非相干变为相干,从异相模逐渐变为同相模,能量逐渐向中心集中。

角锥棱镜被其棱及其像分割为 6 个对称的部分,角锥棱线的几何尺寸一般为微米量级,故角锥棱镜腔相邻子腔的激光由于倏逝波耦合实现锁相相干,而角锥棱镜腔对称子腔的激光由于角锥的互注入特性实现锁相相干,从而 6 个部分的激光实现锁相相干,远场为 6 路激光相干合成分布。

1 角锥棱镜谐振腔固体激光器的相干特性

角锥棱镜谐振腔激光器,除具有极强的抗失调特性之外^[14-15],还具有天然的相干合成特性^[16-17]。由于角锥被其棱线及其像分割为 6 个扇形部分,相应的角锥棱镜腔激光器的模场也被分割为 6 个扇形部分,其近场分布为 6 个瓣,如图 1 所示,貌似高阶模,但远场分布具有典型 6 路激光相干合成的特性。

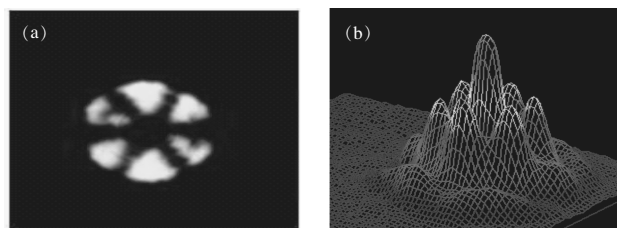


图 1 角锥棱镜腔激光器近场和 3D 远场分布图

Fig.1 Near-field and 3D far-field distribution measured in solid state laser

为进一步研究角锥棱镜谐振腔激光器输出光束的相干性,构建了如图 2 所示的实验装置。在谐振腔输出镜外插入正六边形分布的小孔光阑阵列,小孔直径 $\varphi 1 \text{ mm}$,分别位于角锥棱镜腔输出光束的 6 个部分。采用 Spiricon 公司生产的 LBA-FW-SCOR 型激光光斑分析仪分别测量位于角锥腔不同位置两路激光的远场分布。

测量时,在小孔光阑阵列后面挡住其他 4 路激光,分别测量小孔光阑对称 AD 两路、相邻 AB 两路、斜相邻 AC 两路激光的远场分布,测量结果分别

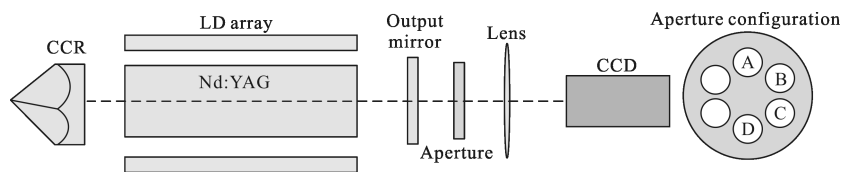


图 2 角锥腔激光器及腔外加小孔阵列结构示意图

Fig.2 Schematic of cube-corner resonator laser and out-of-cavity plus small hole

如图 3(a)、3(b)、3(c)所示。从图中可以看出,均为典型的两路激光远场相干分布,区别在于由于小孔位置关系的不同导致两路激光占空比的不同,从而远场光斑条纹的疏密不同。由于小孔光阑阵列位于角锥棱镜腔激光器输出镜外,故可认为角锥棱镜腔固体激光器 6 个部分激光之间具有高的相干性。

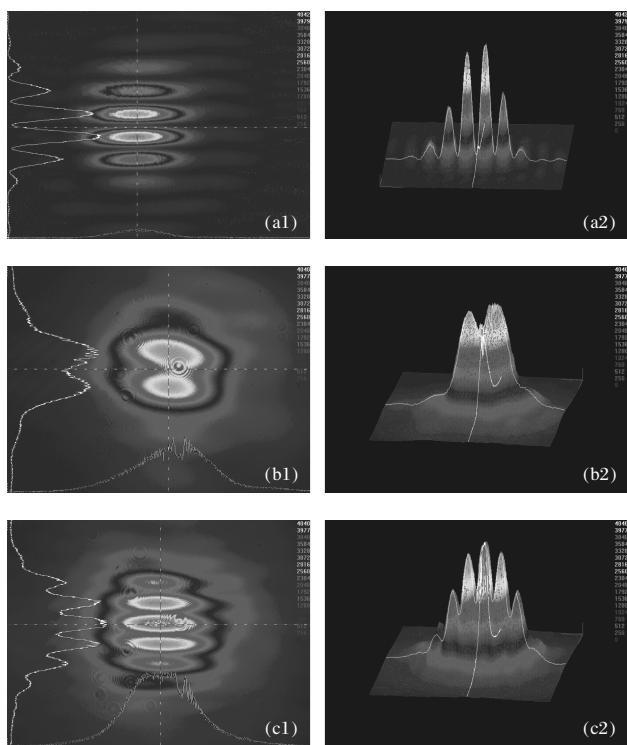


图 3 角锥腔激光器不同部分之间的远场相干性图

Fig.3 Far-field coherent profiles of two discretional symmetrical holes in the six fan-shaped parts of the CCR

角锥棱镜谐振腔 6 个扇形模场中,对称位置的激光模场由于角锥的对称反射实现相互注入耦合锁相,相邻位置的激光由于倏逝波的作用相互耦合影响,从而角锥腔 6 个部分激光模场之间实现相互耦合锁相相干。

2 固体激光器倏逝波耦合模型

为了深入揭示角锥腔相邻两路激光之间的倏逝

波耦合机理,开展了固体激光器倏逝波耦合机理和特性的研究。一维两阵元结构是激光阵列最基本的形式,研究表明^[18]:当阵列激光束呈高度对称的圆形或正六角形方式分布时,相比于其他对称性较差的排布方式,可以获得更高的能量集中度。结合角锥棱镜谐振腔的结构特点,文中以 2 路、6 路激光耦合为模型。

根据自组织耦合机理,多路激光模场之间的演化方程为:

$$\frac{dE_1}{dt} = \frac{1}{\tau_c} [(G_1 - a_1)E_1 - \kappa_{1,2}E_2 - \kappa_{1,N}E_{1,N}] + i\omega_1 E_1 \quad (1a)$$

$$\frac{dE_m}{dt} = \frac{1}{\tau_c} [(G_m - a_m)E_m - \kappa_{m-1,m}E_{m-1} - \kappa_{m,m+1}E_{m+1}] + i\omega_m E_m \quad (1b)$$

$$\frac{dE_N}{dt} = \frac{1}{\tau_c} [(G_N - a_N)E_N - \kappa_{N,1}E_1 - \kappa_{N,N-1}E_{N-1}] + i\omega_N E_N \quad (1c)$$

式中: $m=2, 3, \dots, N-1$; a 为衰减系数; ω 为激光器的运转频率; $\kappa_{i,j}$ 为第 i 路和第 j 路激光之间的耦合系数,且 $\kappa_{i,j} = \kappa_{j,i}$, 设

$$E_m = X_m \cos \varphi_m + iX_m \sin \varphi_m \quad (2)$$

代入公式(1),化简得:

$$\frac{d\Delta\varphi_{mm}}{dt} = \frac{d\Delta\varphi_m}{dt} - \frac{d\Delta\varphi_n}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left[\sum_{s=1}^6 \kappa_{ms} \sin(\Delta\varphi_{ms}) - \sum_{s=1}^6 \kappa_{ns} \sin(\Delta\varphi_{ns}) \right] + \Delta\omega_{mn} \quad (3)$$

式中: $\Delta\omega_{mn} = \omega_m - \omega_n, m \neq n$ 。

当为 6 路激光且为正六角形对称排列时,即 $m, n \leq 6$, 假设相邻两路激光模场的相位差均为 $\Delta\varphi$ (第 1 路和第 6 路相差 $5\Delta\varphi$, 而不是 $\Delta\varphi$), 且 $\Delta\omega_{mn} = 0$, 化简得:

$$\frac{d\Delta\varphi_{12}}{dt} = \frac{1}{\tau_c} [\kappa_1 \sin(\Delta\varphi) + \kappa_1 \sin(5 \cdot \Delta\varphi)] \quad (4a)$$

$$\frac{d\Delta\varphi_{23}}{dt} = \frac{1}{\tau_c} [\kappa_2 \sin(2 \cdot \Delta\varphi) + \kappa_2 \sin(4 \cdot \Delta\varphi)] \quad (4b)$$

$$\frac{d\Delta\varphi_{34}}{dt} = \frac{1}{\tau_c} [2\kappa_3 \sin(3 \cdot \Delta\varphi)] \quad (4c)$$

对于随机的初始相位差 $\Delta\varphi_0$, 通过仿真计算, $\Delta\varphi(t)$ 最终收敛于某几个值 $\Delta\varphi_E$, 分别为:

$$\Delta\varphi_E = \pm \frac{1}{3}\pi, \pm\pi \quad (5)$$

如图 4 所示, 横坐标为相位差稳定时间, 0 点为初始时刻, 纵坐标为相位差。

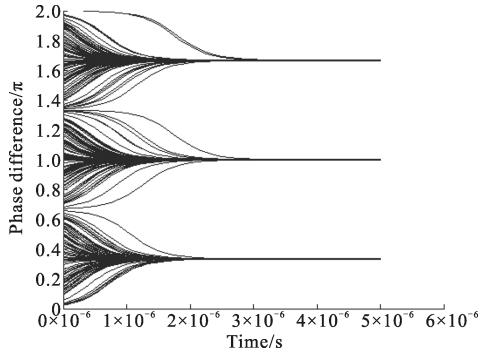


图 4 6 路激光锁相稳定的演化过程

Fig.4 Evolvement process of six lasers phase locking

固体激光器倏逝波耦合锁相相干实验方案如图 5

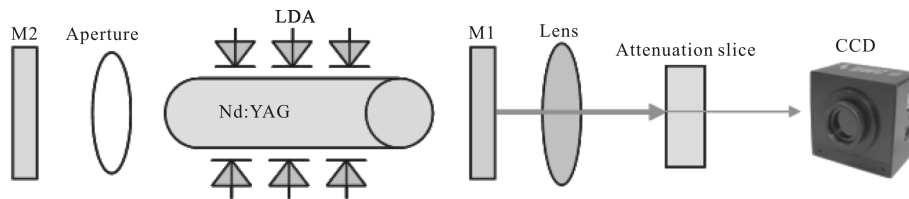


图 5 实验装置图

Fig.5 Schematic of the experiment

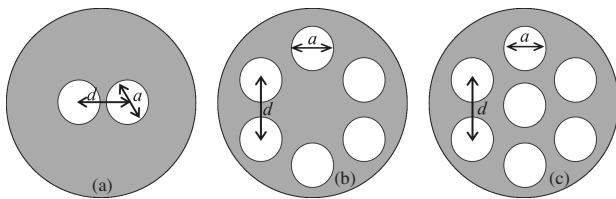
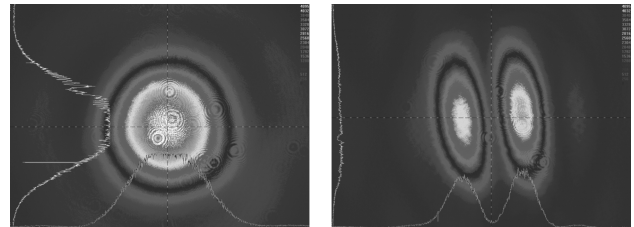


图 6 小孔光阑阵列结构示意图

Fig.6 Schematic of diaphragms structure



(a) 单路远场

(b) 两模水平排列

(a) Far-field of single laser

(b) Far-field of two laser arrays

图 7 两模耦合结果

Fig.7 Two laser arrays coupling

3 固体激光器倏逝波耦合实验

腔内插入图 6(a)所示两孔光阑获得两路激光的耦合锁相。腔长 500 mm, 孔直径 $\Phi 0.9$ mm, 两孔中心间距 1 mm 时, 远场分布如图 8 所示。图 7(a)为腔外单路激光的远场光斑, 呈典型的高斯分布。图 7(b)为两路激光远场分布, 是典型的两路激光锁相相干合成远场分布图。说明两路固体激光由于光场之间的倏逝波耦合实现了锁相输出。

但此时, 两路激光之间有 π 的相位差, 远场光斑呈异相模。当腔长增加至 600 mm 及更大时时, 远场

所示, 实验装置为平平腔结构的 LD 侧面泵浦 Nd:YAG 激光器。其中, M1 为透过率为 50% 的输出镜; M2 为全反镜; 增益介质为直径 $\Phi 5$ mm 掺杂浓度 1% 的棒状 Nd:YAG 晶体, 长度 80 mm; 采用环形准连续 LD 阵列对称泵浦, 以实现增益均匀, 泵浦脉宽 200 μ s。

在 M2 和激光晶体之间插入不同阵列结构的小孔光阑, 将 Nd:YAG 激光介质分割为多个单元介质, 从而形成多路激光模场输出, 如图 6 所示。小孔光阑的中心位置与 Nd:YAG 介质的中心轴线重合, 图 6(a)、(b)、(c)分别为 2 孔、6 孔、7 孔结构示意图。改变不同的小孔光阑阵列可以在 Nd:YAG 介质内形成不同的模场分布, 当满足一定条件时, 子光束之间由于倏逝波耦合作用实现锁相输出, 通过 1 m 傅里叶透镜获得远场分布, 通过 CCD 测量其分布。

分布不变, 仍然是异相模分布。说明在 500 mm 腔长时子光束之间的耦合已经足够强, 锁相已经稳定, 当腔长变长时, 耦合强度增大, 锁相更加稳定, 但并没有改变子光束之间的耦合状态。这与参考文献[11]的分析是一致的。在一维阵列情况下, 在没有任何模式选择机制时, 异相模通常具有最高的模式增益而容易起振^[13], 并且 π 的相位关系对于模式之间的距离以及模式的强度不敏感。

当在腔内插入图 6(b)所示 6 孔光阑阵列时, 形

成了 6 路激光耦合模式。腔长为 300 mm, 孔直径 1 mm, 相邻孔中心间距 1.5 mm(占空比约为 0.67)时的远场分布如图 8(a)所示。此时相邻光束间距较大, 模式的菲涅耳数 $N=a^2/L\lambda$ 较大, 模式之间的互相影响几乎可以忽略, 远场分布为非相干叠加。

保持孔直径和腔长不变, 将相邻孔间距减小到 1.1 mm(占空比约 0.91), 此时远场分布如图 8(b)所示, 呈正六角形对称分布, 貌似拉盖尔-高斯光束 TEM_{30} 模。远场分布的变化表明了此时六路激光不再是非相干叠加, 而是由于倏逝波耦合作用发生了锁相, 说明了减小模式间距可以增强模式间的倏逝波耦合。

保持孔直径和相邻孔中心间距不变, 将腔长拉长到 1000 mm, 此时远场分布如图 8(c)所示, 形状与图 8(b)相同, 说明改变腔长也可以改变模式之间的耦合强度, 使模式之间发生耦合锁相。

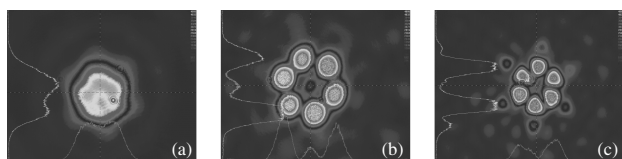


图 8 6 模耦合时的远场光强分布图

Fig.8 Far-field light intensity distribution of six laser arrays coupling

保持腔长 1000mm 不变, 将孔直径减小为 0.9mm, 相邻孔中心间距减小为 1.0 mm, 光束直径和间距的减小都使模式之间的耦合加强, 此时的远场分布如图 9(a)所示, 形状仍然不变, 说明此时倏逝波耦合锁相状态非常稳定, 在较大的变化条件下保持不变。但是, 由于占空比相比图 8(c)的变大, 旁瓣能量减弱, 说明该分布为六模倏逝波耦合的远场分布。

依据公式(1)~(4)仿真模拟结果, 模式之间为相干耦合, 相邻模式之间的相位差收敛于 $\pi/3$ 或 π 。当为图 9(b)所示的 π 相位差时, 模拟远场分布如图 9(c)所示, 与实验结果吻合较好, 说明了异相模状态容易起振, 且非常稳定。

保持孔直径 0.9 mm、相邻孔中心间距 1.0 mm 不变, 将腔长增加至 1800 mm, 远场分布发生了变化, 如图 10(a)所示, 出现了中心主瓣。在相邻孔中心间距较小时, 增加腔长, 减小模式菲涅耳数, 模式之间的耦合强度更强, 锁相状态发生了变化, 显然, 此时相邻光束模式之间的位相差不再是 π 。当相邻光束

模式之间相位差为如图 10(b)所示的 $\pi/3$ 时, 模拟结果(见图 10(c))与实验结果相吻合。

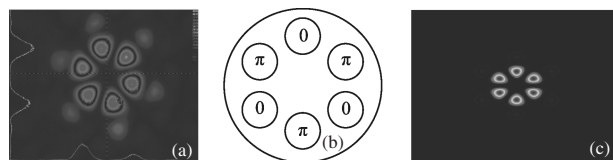


图 9 6 模耦合时实验与模拟结果图

Fig.9 Experiment and simulation results of six laser arrays coupling

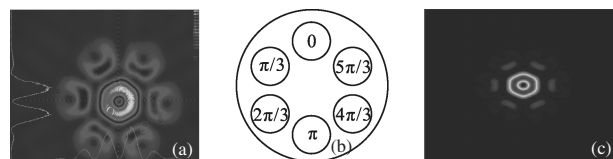


图 10 6 模耦合时不同相位分布

Fig.10 Six laser arrays coupling at different phase distributions

从以上结果可知, 增加腔长, 减小模式间距, 6 路激光之间逐渐从非相干到相干耦合, 随着耦合强度增加, 相邻光束模式之间的相位差从 π 变为 $\pi/3$, 从异相模趋向同相模。但是, 由于 6 路阵列激光之间空隙较大, 相互之间的耦合仍然不够强, 故不能获得完全的同相模输出。要想获得同相模输出必须进一步增加模式之间的耦合强度。

当小孔直径为 0.9mm, 相邻孔中心间距为 1.0mm, 腔长为 1000 mm 时, 将小孔阵列从图 6(b)所示的 6 孔改变为图 6(c)所示的 7 孔阵列时, 光斑分布如图 11(a)所示。此时, 远场光斑呈中心主瓣, 外侧 6 个副瓣, 能量向中心主瓣集中, 说明此时光束之间的倏逝波耦合强度足够大, 远场能量分布进一步向中心集中。采用图 11(b)所示的相位分布进行仿真模拟, 结果如图 11(c)所示, 与实验结果符合较好。

保持小孔直径 0.9 mm, 相邻孔中心间距 1.0 mm, 小孔阵列 7 孔分布不变, 将腔长拉长至 1800 mm, 远场光斑如图 12(a), 此时获得了更好的锁相相干合成效果, 远场分布向中心主瓣集中。采用 7 路激光相位差为零即完全同相模输出条件, 图 12(b)所示, 进行模拟仿真, 结果如图 12(c)所示, 与实验结果符合较好。由于腔长进一步变长, 模式之间的耦合进一步变强, 相位关系为同相输出, 呈中心主瓣, 并且由于占空比较大, 光强向中心主瓣集中, 获得了比较好的相干合成效果。在实验过程中, 继续拉

长腔长,发现远场光斑形状基本不变,能量进一步向中心集中。

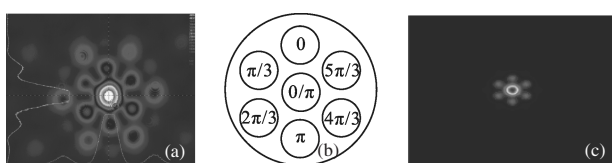


图 11 腔长为 1 000 mm 时的实验和模拟结果

Fig. 11 Calculated and measured far-field patterns when cavity length is 1 000 mm

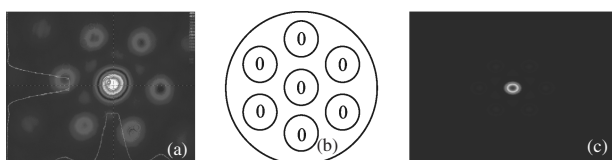


图 12 腔长为 1 800 mm 时的实验和模拟结果

Fig. 12 Calculated and measured far-field patterns when cavity length is 1 800 mm

实验说明固体激光之间的倏逝波耦合可以实现激光模式之间的自组织锁相相干。增加腔长、减小激光模场间距、阵列中心增加激光模场都可以导致激光模场之间的倏逝波耦合强度增强,从而导致模场之间的锁相状态从非相干到相干,从异相模逐渐变为同相模,能量逐渐向中心集中,最终获得六路激光完全相干同相模输出的中央主极强远场分布。

4 结 论

多光束相干合成是获得高功率/能量、高亮度激光输出的有效途径。理论和实验揭示了固体激光之间的倏逝波耦合可以实现激光模式之间的自组织锁相相干。增加腔长、减小激光模场间距、阵列中心增加激光模场等都可以使激光模场之间的倏逝波耦合强度增加,耦合强度的增加又导致模场之间的锁相状态从异相模逐渐趋向同相模,能量逐渐向中心集中。

角锥棱镜被其棱线及其像分割为 6 个对称的部分,故角锥棱镜谐振腔激光器近场输出为 6 个瓣,貌似 TEM₀₃ 模。角锥棱镜棱线宽度一般为微米几何量级,根据第 2、3 部分的理论和实验,6 个部分激光模场的相邻部分之间必然会发生很强的倏逝波耦合效应。同时,角锥对称部分激光两两之间会发生互注入耦合锁相。在角锥棱镜腔“互注入与倏逝波”锁相的

共同作用下,6 路激光之间锁相相干同相模输出,远场为中央凸起的典型相干合成分布。由于角锥棱镜谐振腔固体激光器一般模场面积较大,各部分均不仅存在基模振荡,而是多模振荡,影响了 6 个部分激光模式之间的耦合锁相效果,不可能是完全相干,而是部分相干。

研究结果揭示了角锥是一个天然的相干合成元件,角锥多光束互注入相干合成技术具有重要的科学价值。

参 考 文 献:

- [1] Liu Zejin, Zhou Pu, Wang Xiaolin, et al. The history, development and tend of coherent combining of laser beams [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(9): 2221–2234. (in Chinese)
刘泽金, 周朴, 王小林, 等. 激光相干合成的历史、现状与发展趋势[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2221–2234.
- [2] Lei Bing, Feng Ying, Liu Zejin, et al. Study and development of coherent addition techniques of laser beam [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2007, 24(4): 407–441. (in Chinese)
雷兵, 冯莹, 刘泽金, 等. 激光束相干合成技术的研究进展[J]. 量子电子学报, 2007, 24(4): 407–441.
- [3] Wang Wei, He Bing, Zhou Jun, et al. Coherent combination of fiber lasers in self-imaging cavity [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(11): 1802–1806. (in Chinese)
王炜, 何兵, 周军, 等. 光纤激光器自成像腔相干组束研究[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(11): 1802–1806.
- [4] Zhu Mengzhen, Cheng Yong, Liu Yang, et al. Mutual injection phase-locked study of fiber laser with two out ports [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(12): 2964–2968. (in Chinese)
朱孟真, 程勇, 刘洋, 等. 双端输出光纤激光器互注入锁相研究[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 2964–2968.
- [5] Cheng Yong, Mi Chaowei, Zhu Mengzhen, et al. Mutual injection phase-locked combining technologies of fiber lasers using a corner-cube [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(11): 1102005. (in Chinese)
程勇, 米朝伟, 朱孟真, 等. 角锥互注入锁相光纤激光器相干合成技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102005.
- [6] Lu Changyong, Li Li, Liu Xu, et al. Coherent combining of two pulsed solid state lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1757–1762. (in Chinese)
卢常勇, 李莉, 刘旭, 等. 两路脉冲固体激光器的相干合成[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1757–1762.

- [7] Wang Huisheng, Liu Yang, Wei Shangfang, et al. Coherent combination of Michelson cavity fiber lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(8): 1845–1850. (in Chinese)
王会升, 刘洋, 韦尚方, 等. 迈氏腔光纤激光器的相干合成 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8): 1845–1850.
- [8] Morel J, Woodtli A, Dandliker R. Coherent coupling of an array of Nd³⁺ doped single-mode fiber using an intracavity phase grating [C]//SPIE, *Fiber Laser Sources and Amplifier*, 1992, 1789: 13–17.
- [9] Chen Yue'e, Shao Qiufeng, Wang Jinsheng. Coherent beam combination of integrated photonic crystal fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1454–1457. (in Chinese)
陈月娥, 邵秋峰, 王金生. 多芯光子晶体光纤的相干光束集成 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(5): 1454–1457.
- [10] Ripper J E, Paoli T L. Optical coupling of adjacent stripegeometry junction lasers [J]. *Appl Phys Lett*, 1970, 17(9): 371–373.
- [11] Abramski K M, Colley A D, Baker H J, et al. Phase-locked CO₂ laser array using dagnoaal coupling of waveguide channels [J]. *Appl Phys Lett*, 1990, 60(5): 530–532.
- [12] Michio Oka, Hisashi Masuda, Yushi Kaneda, et al. Laser-Diode-Pumped Phase-Locked Nd: YAG Laser Arrays [J]. *J Quan Elec*, 1992, 28(4): 1142–1147.
- [13] Xu Jingwen, Lee K K, Chen Y C. Phase locking in a two-element laser array with detuning [J]. *Opt Commu*, 1995, 117: 198–206.
- [14] Cheng Yong. Adjust-Free Solid State Laser [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
程勇. 免调试固体激光器 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [15] Sun Bin, Zhu Mengzhen, Tan Chaoyong, et al. Latest progress of research on adjust-free solid state laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3244–3251. (in Chinese)
孙斌, 朱孟真, 谭朝勇, 等. 免调试激光器研究新进展 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(10): 3244–3251.
- [16] Yong Cheng, Xu Liu, Qiang Wan, et al. Mutual injection phase locking coherent combination of solid-state lasers based on corner cube [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(23): 5150–5152.
- [17] Wang Huisheng, Zhu Mengzhen, Yang Xue, et al. Experimental study of multi-beam laser far-field interference [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2011, 9(2): 5–8. (in Chinese)
王会升, 朱孟真, 杨雪, 等. 多光束激光远场干涉实验研究 [J]. *光学与光电技术*, 2011, 9(2): 5–8.
- [18] Sun Ling, Zhao Hong, Yang Wenshi, et al. Study on coherent combination theory of multi-beam laser [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(2): 111–113. (in Chinese)
孙玲, 赵鸿, 杨文是, 等. 多光束激光相干合成技术研究 [J]. *激光与红外*, 2007, 37(2): 111–113.