免调试激光器研究新进展

孙 斌[1],朱孟真[1],谭朝勇[1],米朝伟[1],王晓晖[2],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. 华中科技大学 光学与电子信息学院,湖北 武汉 430075)

摘 要:介绍了免调试激光器的基本概念和广泛应用,总结了国内外关于免调试激光器的研究在实现激光器小型轻量化、多波长输出、改善大能量/高功率激光器光束质量方面的新进展,以及向双角锥棱镜谐振腔方向拓展应用研究的新动向。重点报道了角锥棱镜谐振腔在相干合成领域的最新进展,分别实现了角锥光纤激光器互注入相干合成和基于角锥固体激光器互注入相干合成,为实现高可靠、大能量/高功率、高光束质量激光输出提供了一个有效技术途径。

关键词:激光光学; 免调试; 角锥; 互注入锁相

中图分类号:TN248 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2014)10-3244-08

Latest progress of research on adjust-free solid state laser

Sun Bin[1], Zhu Mengzhen[1], Tan Chaoyong[1], Mi Chaowei[1], Wang Xiaohui[2], Cheng Yong[1]

(1. Opto-Electronics Facility, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan 430075, China;
2. School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430075, China)

Abstract: The basic concept of adjust-free solid state laser was introduced. The latest progress of adjust-free solid state laser used for smart and light laser, multiple wavelength output, and improving the beam quality of high power/energy laser were generally summarized. The development trend of double corner cubes resonator was also introduced. At last, the latest progress of mutual injection phase-locked lasers combination based on corner cube was reported. The mutual injection phase-locked coherent combination of both fiber lasers and solid state lasers have been realized. And these researches indicate that it is an effective way to obtain high reliable, high power /energy and high beam quality laser output.

Key words: laser optics; adjust-free; corner cube; mutual injection phase-locked

收稿日期:2014-02-05; **修订日期**:2014-03-15

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

作者简介:孙斌(1971-),男,副教授,主要从事固体激光器件和光电装备保障方面的研究。Email:wuhansunbin@163.com

0 引　言

免调试激光器是一种将角锥作为谐振腔反射镜的新型结构激光器。一般而言,角锥包括空心角锥/实心角锥、平面角锥/球面角锥、单角锥/阵列角锥等,皆可作为谐振腔的反射镜,它具有独特的自准直光学特性、准相位共轭特性和相干合成功能。理论与实验研究证明:这种激光器显著改善了机械稳定性、热稳定性和光束质量,实现了激光器安装免调试的独特功能。免调试并非不需要调试的意思,而是指激光器谐振腔在较大的范围内不失调或具有较大的抗失调能力。这类激光器具有典型的特征:在振动、冲击和宽泛温度变化等恶劣环境下,激光指向稳定、输出性能稳定可靠、近场光斑呈“米”字型(貌视高阶模)、远场能量高度集中(主极强周围往往有旁瓣)。

《免调试固体激光器》一书已由国防工业出版社公开出版发行[1]。作者曾在《红外与激光工程》2006年第 35 卷第 3 期上介绍了免调试固体激光器的概念、几种结构形式、基本特性、几种实用固体激光器及其应用和研究动向[2]。近年来,国内外采用免调试技术开展各种激光器研究与应用的团队和人员大量增加,角锥腔免调试技术的应用也已经不仅仅限于固体激光器,而是广泛应用于化学 COIL、自由电子、气体 He-Ne、CO_2、准分子、半导体等各种类型激光器中。随着免调试激光器研究与应用的不断深入,其优异特性和一些鲜为人知的现象,引起了国内外学术界的广泛关注与重视。

文中总结了国内外在免调试激光器领域研究的新进展,阐述了采用免调试技术在实现小型化高可靠固体激光器的研究、提高 OPO 激光器效率与可靠性的研究、改善激光器光束质量的研究以及双角锥谐振腔激光器技术方面的新动向,着重阐述了角锥棱镜谐振腔的相干合成特性以及在互注入相干合成领域的最新进展。

1 免调试激光器研究新动向

近年来,在应用需求的牵引下,随着对免调试激光器特性认识的日益深入,国内外众多科研团队对其表现出浓厚的兴趣,呈现出一系列新的研究热点和动向。

1.1 向小型轻量化方向发展

在机载、星载等特殊应用平台中,激光器需要在结构空间尺寸受限条件下实现可靠运转,采用免调试技术是实现激光器小型化轻量化高可靠运转的有效途径之一,逐渐成为一个研究热点。

美国 LLNL 研制的星载测距激光器利用角锥棱镜作为折叠镜,巧妙利用角锥棱镜的偏振特性,采用偏振耦合输出,实现电光调 Q[3-4],如图 1 所示。中国工程物理研究院应用电子学研究所的叶一东[5]等人采用该方案在重频 10 Hz 条件下获得了 324.5 mJ 的脉冲能量输出,光束质量因子 2.09。该类型激光谐振腔具有很强的热稳定性和机械稳定性,同时缩短了系统的总长度,有效减小了系统的体积。

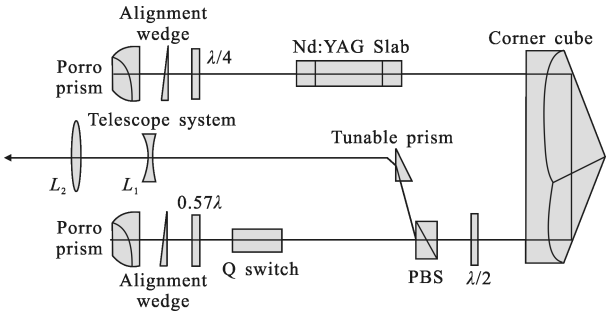


图 1 偏振耦合输出电光调 Q 角锥棱镜折叠谐振腔示意图

Fig.1 Configuration of EQ switched corner cube resonator with polarized output

激光器小型轻量化的量化指标是功率体积比($mJ\cdot Hz/cm^3$)。作者采用角锥棱镜折叠谐振腔技术实现了 50 Hz 重频条件下 60 mJ 稳定输出,光束发散角 3 mrad,能量稳定性小于 3%,环境适应性-40~65 ℃,功率体积比 4 $mJ\cdot Hz/cm^3$,实现了小型高效高可靠重频输出。

1.2 向多波长方向扩展

因具有烟雾穿透能力强和人眼安全等诸多特点,人眼安全激光器在军事、航天等有人参与的激光应用场合有着巨大的应用前景。传统 OPO 人眼安全激光器具有多谐振腔、结构复杂、可靠性差等缺点,免调试技术是提高 OPO 人眼安全激光器工作稳定性、可靠性和效率的有效手段。

2007 年,瑞典的 Björn Jacobsson 等人将角锥棱镜应用于环形腔 OPO 激光器中,获得了高效率、高可靠的光参量振荡输出[6],如图 2 所示。谐振腔采用

角锥型折叠腔结构，即 KTP 晶体一端加工成角锥形状作为谐振腔尾镜，利用角锥的自准直特性实现波长有效转化。输出镜作成后向反射器状，一个反射面采用体光栅代替，一部分振荡光从体光栅输出，剩余振荡光被体光栅反射后经后向反射器平行于入射光返回到 KTP 晶体中。体光栅的另外一个作用在于调节输出光波长，改变进入体光栅的光束入射角，即可实现输出波长调谐。该团队采用 532 nm 光泵浦 KTP 晶体，实现了 757~767 nm 波段的调谐输出。该结构亦可用于产生 1.5 Xμm 人眼安全波段激光调谐输出。

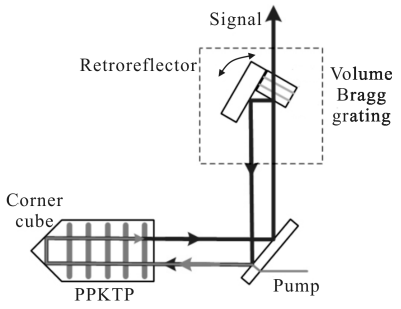


图 2 采用角锥棱镜的环形腔 OPO 激光器光路图

Fig.2 Configuration of ring resonator OPO with corner cube

2006 年，华北光电技术研究所的包照日格图等人研制了基于角锥棱镜的小型化人眼安全 OPO 激光器[7]。采用基于角锥棱镜的共用谐振腔技术，实现了基频光和 OPO 激光谐振腔的全免调试，如图 3 所示。利用角锥棱镜的匀光效应和自准直特性，确保了激光器足够的热稳定性、机械稳定性以及抗失调能力，改善输出激光的光束质量。研制的样机获得了 5.5 mrad 的人眼安全激光稳定输出，但由于采用闪光灯泵浦，重频只有 1/6 Hz。

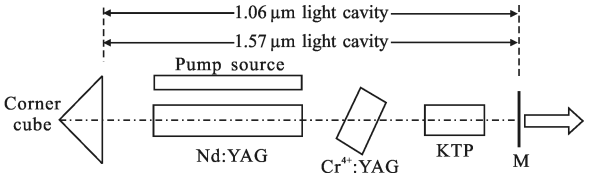


图 3 小型化人眼安全 OPO 激光器原理示意图

Fig.3 Configuration of miniaturized eye safe OPO laser

笔者所在课题组采用角锥棱镜共用谐振腔技术研制了角锥棱镜被动调 Q 光参量振荡器，通过将角锥棱镜作为谐振腔的全反镜，实现对谐振腔内增益匀化以及光束质量的改善，同时确保了激光器运行的可靠性。研制的激光器实现 1.57 μm 激光输出，重复频率 1~20 Hz 可调，能量稳定性小于 5%，功率体积比为 3.77 mJ·Hz/cm^3。

1 064 nm/1 570 nm 双波长自由切换输出固体激光器是新一代舰载、机载光电吊舱的核心器件。传统的双波长自由切换激光器结构复杂、切换速度慢且可靠性差。武汉军械士官学校光电所采用基于角锥腔偏振控制电光调 Q、环形腔 KTP-OPO 和电控偏振态切换技术实现了双波长自由切换输出[8]。目前已经实现 1 064 nm 激光 400 mJ/pulse、1 570 nm 激光 150 mJ/pulse，激光输出同轴且指向稳定、可靠性好。

由于角锥腔具有退偏特性，传统的角锥腔中难以实现电光调 Q 输出。采用与传统电光调 Q 激光器不同的思路，利用角锥棱镜的退偏特性，从偏振片侧面偏振耦合输出 1 064 nm 基频光，然后进行腔外 OPO 或倍频，同时实现电光调 Q 和激光频率的变换，是免调试激光器向其他波长扩展的一个新途径。华中光电技术研究所的张红波采用该思路实现了 25 Hz 的 532 nm 的绿光输出[9]。

1.3 改善大能量/高功率激光器的光束质量

在大能量、高功率固体激光器中，热效应和高阶模输出严重影响了输出光束质量和远场聚焦特性。美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)的 10 kW 固体激光器采用自适应系统对光束进行校正，但是系统复杂，不能广泛地应用于激光装置中。

角锥棱镜及其阵列结构简单，具有准相位共轭特性，将角锥棱镜及其阵列用于大能量、高功率激光器中可以抑制波前畸变，提高远场光斑能量集中度，克服传统激光器大能量、高功率同高稳定、高光束质量不易兼得的难题。

前苏联曾经将角锥棱镜阵列应用于大功率氧碘激光器中，改善光束质量，如图 4 所示。

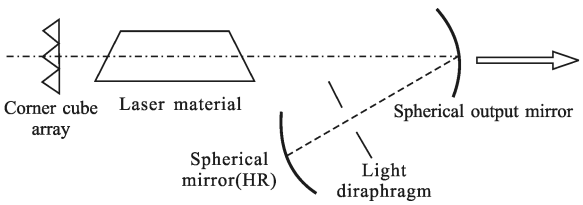


图 4 角锥阵列腔氧碘激光器示意图

Fig.4 Configuration of oxygen-iodine laser with corner cube array

笔者所在课题组曾采用 37 个角锥棱镜阵列进行改善准分子激光器光束质量与脉冲峰值功率的研究。采用角锥阵列后,100 W 的准分子激光器输出能量提高了 10%,抗失调能力大大提高,在±5°范围内输出能量无明显变化,同时远场发散角由 5 mrad 减小到 3.5 mrad。

2009 年,西南技术物理研究所的钟鸣报道了采用角锥棱镜阵列作为钕玻璃激光器的后腔镜[10-11],如图 5 所示,获得了能量大于 500 J 的 1.06 μm 激光输出,发散角 0.6 mrad 左右,远场光斑具有相干合成特性如图 6 所示,。证明了角锥棱镜阵列腔激光器可以满足高能量、高稳定性输出的要求,且显著改善了光束质量。

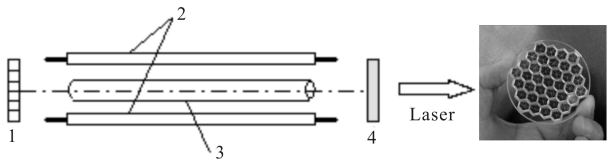


图 5 角锥棱镜阵列谐振腔钕玻璃激光器示意图

Fig.5 Configuration of Nd:glass laser based on corner cube array resonator

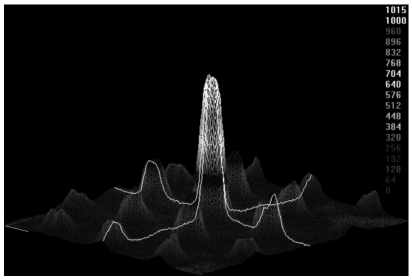


图 6 角锥棱镜阵列谐振腔激光器远场光斑图

Fig.6 Far-field beam distribution of laser based on corner cube array resonator

中国工程物理研究院激光聚变研究中心的袁晓东等人将角锥棱镜阵列应用于固体热容激光器[12-14],对热容激光器的瞬态热效应进行实时补偿,获得了保持 90%输出能力条件下的单模输出,远场可聚焦性比传统的平-凹腔提高了约 10 倍,有效地改善了光束质量。

除了上述角锥棱镜阵列外,采用球面角锥或者角锥棱镜与球面镜构成虚共焦非稳腔也可有效改善光束质量。2010 年,西南技术物理研究所刘文兵[15]等人利用球面角锥棱镜构成虚共焦非稳腔应用于钕玻璃激光器,获得了 2 176.9 J 能量和 0.3 mrad 远场发散角的激光输出,电光效率和光束质量与典型虚共焦非稳腔基本相同,且调试极其简单,结构如图 7 所示。

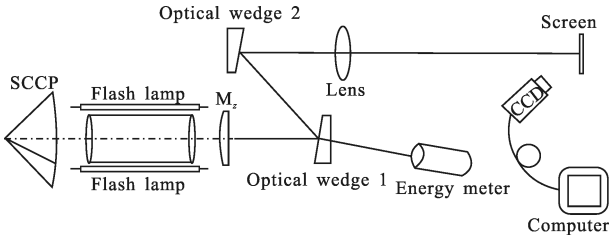


图 7 球面角锥棱镜腔钕玻璃激光器结构图

Fig.7 Configuration of Nd:glass laser with spherical corner cube resonator

2010 年,中国工程物理研究院应用电子学研究所的叶一东[16]等人利用角锥棱镜折叠腔和变反射率镜(VRM)非稳腔,研制了氙灯泵浦电光调 Q 方式的 Nd:YAG 板条激光器,获得了高光束质量的基模输出,结构如图 8 所示。在 3 Hz 重复频率下,脉冲能量为 320.2 mJ,脉宽 8.3 ns,光束质量 β 为 1.27,Q 开关效率 95.5%,电光转换效率 0.99%。

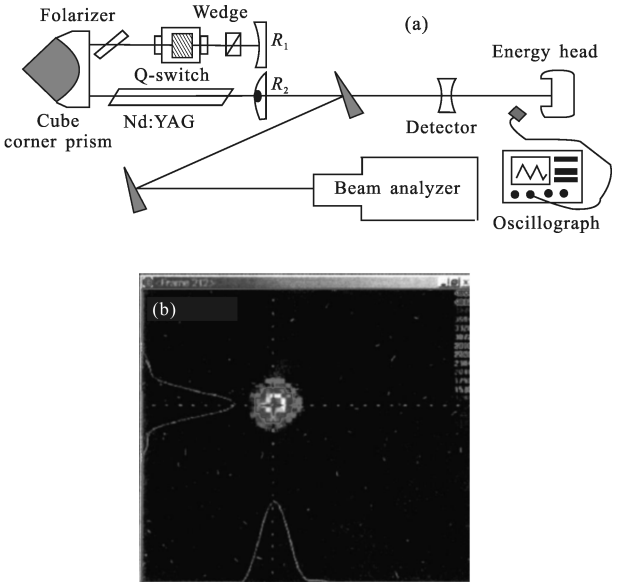


图 8 实验装置和远场光斑图

Fig.8 Experiment setup and far field beam distribution

将非稳腔输出光束质量高和角锥棱镜谐振腔免调试的优点结合到一起,是获得高光束质量、免调试大能量激光输出另一种有效方式。

1.4 向双角锥棱镜谐振腔方向拓展

角锥棱镜谐振腔对腔镜的失谐不敏感,但因角

锥腔退偏限制了其应用。当两个腔镜都为角锥棱镜时，构成的双角锥棱镜谐振腔相对于单角锥棱镜谐振腔具有更高的抗失调特性，基本结构如图 9 所示，同时对介质均匀性和热效应也有更好的补偿效果，通过改变双角锥的旋转角度可以实现退偏量可控[17-20]，获得不同的远场分布，具有特殊的应用价值，是一个新的研究动向。

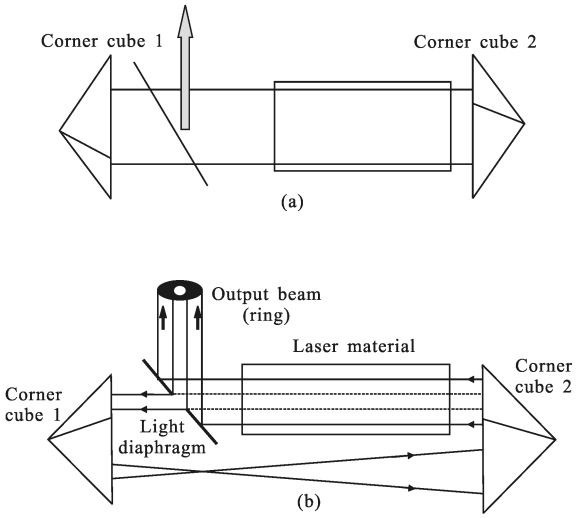


图 9 双角锥激光谐振腔的基本结构

Fig.9 Basic setups of laser resonator with two corner cubes

双角锥腔在高功率、大能量固体激光器中应用时，不仅可避免固体输出窗口的破损问题，还可以改善光束质量。双角锥腔还可应用于长腔长自由电子激光器[19-20]、化学氧碘激光器。对发展自由电子激光器、大模场体积的热容钕玻璃激光器、化学氧碘激光器等战术应用高能激光器具有重要的价值和战略意义。

2 角锥互注入锁相相干合成技术

角锥腔固体激光器输出近场呈“米”字型分布和远场能量高度集中的特性表明，角锥对称分立的六路子激光束具有相干合成特性。

2.1 基于角锥光纤激光器互注入相干合成技术

利用角锥腔中两两共轭的光束在空间、时间上完全相干的特性，将角锥棱镜用于光纤激光器互注入锁相相干合成[21-30]，设计了基于角锥的新型光纤激光器相干合成结构，如图 10 所示，用相对较低功率的光纤激光器与角锥棱镜巧妙结合，获得大功率、高能量、高光束质量的激光输出。

实验中观察到了波长锁定现象、线宽压缩现象，发现了波长漂移量与光束功率比值关系，获得了高的条纹对比度和功率合成效率[23-28]。

两路光纤激光角锥互注入锁相获得了合成功率大于 50 W，功率合成效率稳定在 90%以上，条纹对比度大于 90%锁相稳定的相干条纹。

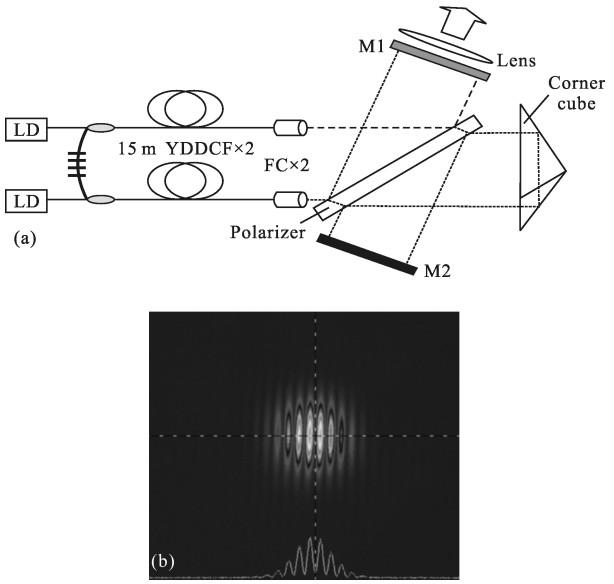


图 10 两路光纤激光合成方案及远场分布图

Fig.10 Combination of two fiber lasers and far field beam distribution

四路光纤激光相干合成[29]，如图 11 所示。获得了合成功率大于 32 W 的典型四路锁相激光相干合成的远场分布如图 12 所示，功率合成效率始终稳定在 90%以上，且锁相稳定。该方案在实现多路环形排布光纤激光器相干合成上有很强的扩展性和延伸性，可以实现 6n 路光纤激光器角锥互注入锁相相干合成，如图 13 所示。角锥互注入锁相方案同样适用于

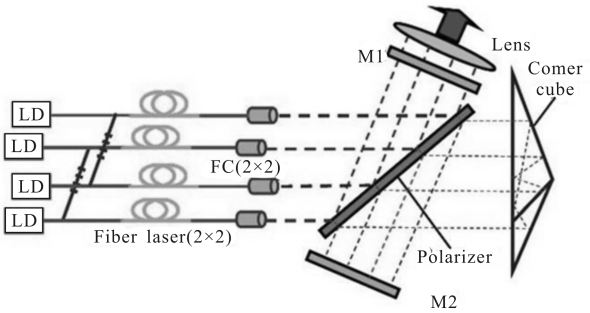
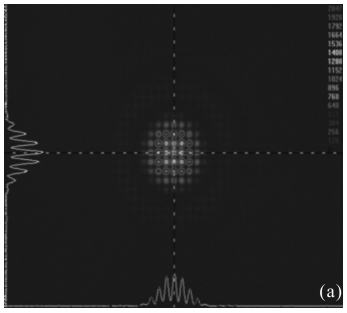


图 11 四路光纤激光合成方案

Fig.11 Combination of four fiber lasers



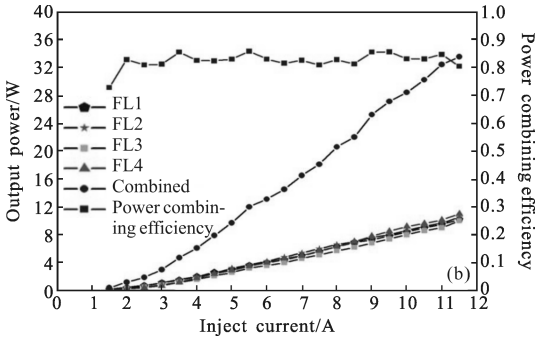


图 12 四路光纤激光器相干合成光斑分布和合成效率

Fig.12 Beam distribution and combination efficiency of coherent combination of four fiber lasers

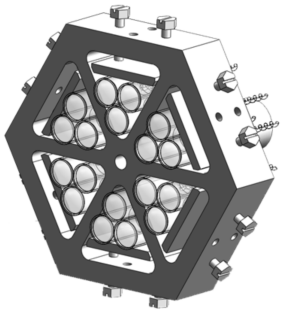


图 13 多路光纤激光角锥互注入锁相排布图

Fig.13 Setup of multiple fiber lasers mutual injection based on corner cube

多路脉冲光纤激光器的相干合成和其他波段光纤激光器相干合成。角锥互注入锁相光纤激光器相干合成技术具有相干度高、合束效率高等特点,可实现多路激光相干合成，且结构简单，非常适合能量型应用,是激光相干合成领域一种有前途的技术途径。

2.2 基于角锥固体激光器互注入相干合成技术

笔者所在课题组开展了基于角锥腔的六路固体激光器互注入锁相相干合成研究[31-32]。位于角锥对称位置的激光器由于角锥的对称共轭反射作用实现互注入,位于相邻位置的激光器,通过互注入耦合镜组实现互注入,如图 14 所示,进而实现六路固体激光器的互注入锁相相干合成输出。

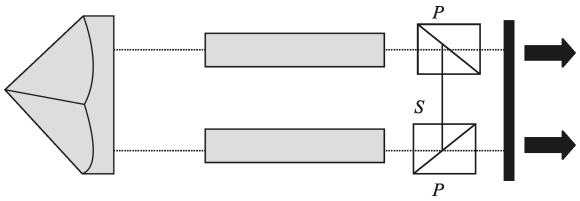
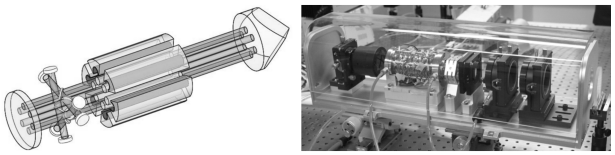


图 14 互注入耦合镜组实现互注入示意图

Fig.14 Configuration of mutual injection with coupling mirrors

研制了角锥互注入锁相六路固体激光相干合成样机,如图 15 所示。系统输出光束的近场和远场光斑如图 16 所示,近场六路光斑在远场合为一束。采用 Spiricon 公司生产的 LBA-FW-SCOR20 型激光光斑分析仪测量激光的远场分布，可以看出合束后远场为一个中央高度凸起的平顶高斯分布，说明该激光器的输出光束在远场能量高度集中，实现了很好的合成效果。



(a) 结构示意图　　(b) 原理样机图

(a) Configuration of the system　　(b) Prototype laser

图 15 六路固体激光互注入锁相相干合成示意图

Fig.15 Configuration of six solid state lasers mutual injected phase locking

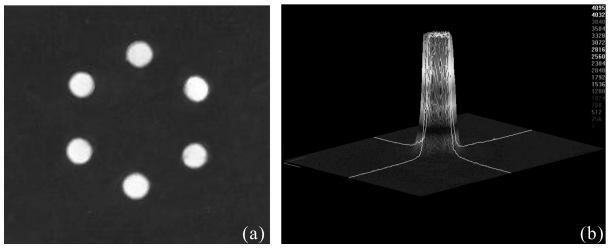


图 16 实验获得的近场和远场光斑

Fig.16 Measured near field and far field beam distribution

原理样机实现了在85 A 条件下脉宽 0.5 ms、脉冲能量 15.3 J、发散角 1.7 mrad、合成效率 95.6%的相干合成输出。在电流逐渐增大的过程中,合成效率始终稳定在 90%以上,且锁相稳定,光束质量基本不变,长时间工作性能稳定,能量稳定性小于 5%。

3 结束语

高可靠性、高光束质量是激光技术领域一个永

恒的主题。免调试技术有效解决了激光器的可靠输出难题,并且大幅改善了光束质量,是激光技术领域的一个重大发明。近年来,在应用需求的牵引下,对免调试激光器特性的认识日益深入,应用范围不断扩展。目前,已在实现激光器小型化、提高 OPO 激光器效率与可靠性、改善大能量/高功率激光器光束质量方面表现出卓越的性能,并且在相干合成领域展现出特有的特性。预计未来将在大能量碟片激光器、双角锥长腔大能量自由电子激光器等领域发挥重大作用,成为大能量/高功率激光器的一个有效实现手段。免调试激光技术将会随着激光技术的发展,在军事、航天及国民经济领域发挥越来越大的作用。

参考文献:

[1] 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.

[2] Cheng Yong. Development and progress of adjust-free solid state laser[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2006, 35(3): 297-301. (in Chinese)
程勇. 免调试固体激光器研究与进展 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3): 297-301.

[3] Wang Rongrui. The state of arts on solid state LADAR technology[J]. ***Laser and Infrared***, 1999, 29(6): 3232326. (in Chinese)
王戎瑞. 固体激光雷达技术发展现状 [J]. 激光与红外, 1999, 29(6): 3232326.

[4] Markus Henriksson, Lars Sjoqvist, Thomas Uhrwing. Numerical simulation of a battlefield Nd:YAG laser [C]//SPIE, 2005, 5989: 01.

[5] Li Jianmin, Ye Yidong, Liao Yuan, et al. Theoretical and experimental study on polarization characteristics of corner-cube folded resonator [J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2010, 22(7): 1495-1499. (in Chinese)
李建民, 叶一东, 廖原, 等. 折叠式角锥棱镜谐振腔的偏振特性理论与实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(7): 1495-1499.

[6] Björn Jacobsson, Carlota Canalias, Valdas Pasiskevicius, et al. Narrowband and tunable ring optical parametric oscillator with a volume bragg grating[J]. ***Optics Letters***, 2007, 32(22): 3278-3280.

[7] Bao Zhaorigetu, Wang Bo, He Lijie. Compact eye safe OPO laser[J]. ***Laser & Infrared***, 2006, 36(8): 639-640. (in Chinese)
包照日格图, 王博, 何利杰. 紧凑型人眼安全 OPO 激光器[J]. 激光与红外, 2006, 36(8): 639-640.

[8] Cheng Yong, Lu Changyong, Liu Xu, et al. Dual-wavelength switchable solid laser [J]. ***Chinese Journal of Laser***, 2010, 37(9): 2299-2303. (in Chinese)
程勇, 卢常勇, 刘旭, 等. 双波长自由切换输出固体激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2299-2303.

[9] Zhang Hongbo, Xi Wenqiang, Sun Feng. Study on active Q-switched green solid-state laser of corner-cube prism cavity [J]. ***Optics & Optoelectronic Technology***, 2009, 7(3): 005-007. (in Chinese)
张红波, 席文强, 孙峰. 角锥棱镜腔主动调 Q 绿光固体激光器的研究[J]. 光学与光电技术, 2009, 7(3): 005-007.

[10] Zhong Ming, Xia Huijun, Liu Wenbing, et al. Nd:Glass laser with corner cube array as cavity mirror [J]. ***Chinese Journal of Laser***, 2009, 36(1): 66-69. (in Chinese)
钟鸣, 夏惠军, 刘文兵, 等. 角锥棱镜阵列后腔镜钕玻璃激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 66-69.

[11] Liu Wenbing, Zhong Ming, Xia Huijun, et al. Experimental study on the Nd:glass laser with corner cube array resonator [J]. ***Chinese Journal of Quantum Electronics***, 2009, 26(2): 168-172. (in Chinese)
刘文兵, 钟鸣, 夏惠军, 等. 角锥棱镜阵列后腔镜钕玻璃激光器实验研究[J]. 量子电子学报, 2009, 26(2): 168-172.

[12] Jiang Dongbin, Xu Meijian, Hu Dongxia, et al. Improvement of beam quality of heat capacity laser with a cube corner array[J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2008, 20(8): 1257-1260. (in Chinese)
蒋东镔, 徐美健, 胡东霞, 等. 角锥阵列改善固体热容激光器光束质量[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(8): 1257-1260.

[13] Yuan Xiaodong, Jiang Xinying, Zheng Jiangang, et al. Output properties of cube corner array resonator [J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2009, 21(6): 813-816. (in Chinese)
袁晓东, 蒋新颖, 郑建刚, 等. 角锥棱镜阵列谐振腔的输出特性[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(6): 813-816.

[14] Yuan Xiaodong, Jiang Xinying, Zheng Jiangang, et al. Research on compensation characteristics of thermal insensitive cavity[J]. ***Laser Technology***, 2010, 34(2): 145-148. (in Chinese)
袁晓东, 蒋新颖, 郑建刚, 等. 热不灵敏激光谐振腔补偿特性研究[J]. 激光技术, 2010, 34(2): 145-148.

[15] Liu Wenbing, Xia Huijun, Zhong Ming, et al. Nd:glass laser with sphere corner cube prism unstable resonator [J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2010, 22(9): 20422046. (in Chinese)
刘文兵, 夏惠军, 钟鸣, 等. 球面角锥棱镜非稳腔钕玻璃激光器[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(9): 20422046.

[16] Yi Hengyu, Ye Yidong, Zhou Zhiqiang, et al. High beam-

quality Q-switched repetitive mini laser[J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2010, 37(9): 2318-2322. (in Chinese)
易亨瑜, 叶一东, 周志强, 等. 小型高光束质量电光调 Q 重复频率激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2318-2322.

[17] Lu Yimin, Cheng Yong, Zhu Mengzhen. Theoretic research on depolarization effect of cross resonator built by double corner cubes reflectors [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(10): 2664-2668. (in Chinese)
陆益敏, 程勇, 朱孟真. 双角锥环形腔退偏效应的理论研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2664-2668.

[18] Virnik Ya Z, Gerasimov V B, Krutin A Yu. Mode structure in an anisotropic resonator consisting of two corner-cube prisms [J]. ***IEEE Joumal of Quantum Electron***, 1990, 20(6): 719-724.

[19] John Macken, Robert Salvage. Alignment-insensitive resonators using focusing corner cubes [C]//SPIE Optical Resonators, 1990, 1224: 386-392.

[20] Chun-Ching Shih. Depolarization effect in a resonator with corner-cube reflectors [J]. ***J Opt Soc Am A***, 1996, 13(7): 1378-1384.

[21] Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin. Recent progresses and development of fiber laser combining technology[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2007, 36(2): 163-166. (in Chinese)
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.

[22] Liu Yang, Cheng Yong, Wang Xiaobing, et al. Recent progress of fiber laser combining technology [J]. ***Chinese J Quantum Electronics***, 2007, 24(3): 283-288. (in Chinese)
刘洋, 程勇, 王小兵, 等. 光纤激光合成技术研究新进展[J]. 量子电子学报, 2007, 24(3): 283-288.

[23] Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin. Mutual-injection phase-locking fiber laser with corner-cube cavity [J]. ***Chinese J Laser***, 2009, 36(1): 77-81. (in Chinese)
程勇, 刘洋, 许立新. 角锥腔互注入锁相光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 77-81.

[24] Liu Y, Chen Y, Xu L, et al. Mutual injection-locking of two individual double-clad fibre lasers [J]. ***Electronics Letters***,2009, 45(8): 0172.

[25] Liu Yang, Cheng Yong, Xu Lixin, et al. Extra-cavity mutual injection phase-locking of two fiber lasers [J]. ***J Optoelectronics Laser***, 2009, 20(7): 890-892. (in Chinese)
刘洋, 程勇, 许立新, 等. 两路光纤激光器外腔式互注入锁相实验研究[J]. 光电子 激光, 2009, 20(7): 890-892.

[26] Liu Yang, Cheng Yong, Xu Lixin, et al. Mutual injection phase-locking of two double clad fiber lasers [J]. ***Acta Physica Sinica***, 2009, 58(6): 3929-3933. (in Chinese)
刘洋, 程勇, 许立新, 等. 两路双包层光纤激光器互注入锁相实验研究[J]. 物理学报, 2009, 58(6): 3929-3933.

[27] Mi Chaowei, Liu Yang, Zhu Mengzhen, et al. Mutual injection phase-locking of two inter-related fiber lasers [J]. ***Optics & Optoelectronic Technology***, 2010, 8 (6): 84-87. (in Chinese)
米朝伟, 刘洋, 朱孟真, 等. 两路关联光纤激光器互注入锁相实验[J]. 光学与光电技术, 2010, 8(6): 84-87.

[28] 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.

[29] 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.

[30] Yong Cheng, Bin Sun, Xu Liu, et al. Coherent combination of mutual injection phase-locked fiber lasers with a corner cube reflector[J]. ***Optics Communications***, 2014, 313: 238-242.

[31] Yang Zhuo, Cheng Yong, Lu Changyong, et al. Mutual injection phase locking of solid-state lasers with corner-cube cavity [J]. ***Laser & Optoelectronics Progress***, 2012, 49: 101402. (in Chinese)
杨卓, 程勇, 卢常勇, 等. 角锥腔脉冲固体激光器互注入锁相实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49: 101402.

[32] 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.