

## 互注入激光器研究进展

张翼鹏,李永亮,张英明,胡伟伟,刘泓鑫,顾小琨  
(长春理工大学光电工程学院,吉林 长春 130022)

**摘要:**基于互注入系统的激光器,在研究激光混沌通信,高功率激光输出方面起着重要作用,在激光加工,保密通信以及军事领域有着极其重要的价值。目前国内外的研究机构对基于互注入半导体激光器、固体激光器、光纤激光器等都开展了诸多研究。本文对国内外互注入激光器的研究进展进行了总结,分别介绍了上述三种激光器的最新研究成果,并对其前景进行了展望。

**关键词:**互注入激光器;混沌通信;高功率激光输出

**中图分类号:**TN248 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.06.003

### Research progress in mutual injection laser

ZHANG Yi-peng, LI Yong-liang, ZHANG Ying-ming, HU Wei-wei, LIU Hong-xin, GU Xiao-kun  
(The School of Electronic Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The laser based on mutual injection system plays an important role in the study of laser chaotic communication and high power laser output. It is of great value in laser cutting, secure communication and military field. At present, many researchers have been carried out in semiconductor lasers based on mutual injection, solid-state lasers, fiber lasers and so on. In this paper, the research progress of mutual injection lasers at home and abroad is summarized, the latest research results of the three kinds of lasers mentioned above are introduced, and their prospects are prospected.

**Key words:** mutual injection laser; chaotic communication; high power laser output

#### 1 引言

近年来,如何能够提高激光器特性成为了科学界的研究热点。针对不同类型的激光器,各种新型方法开始逐渐出现。据笔者所知,1974年,D. Linkens在求近似振荡器的解析解时,利用Van der Pol振子互注入,互注入的概念首次出现<sup>[1]</sup>。1990年,Hammer J M等人首次将互注入系统引入激光器中,使用工作在低频振荡态的互注入孤立量子阱激光器,来观察混沌同步现象<sup>[2]</sup>。随后互注入系统在激光器中逐渐开始运用,目前主要在固体激光器、光纤激光器、半导体激光器中使用。简单地

说,互注入系统就是两支参数匹配较好的激光器通过偏振元件等形成关联,相互耦合,将整个光路视作统一的谐振腔,实现能量互注入<sup>[3]</sup>,或是单个激光器通过角锥棱镜的对称特性实现能量互注入<sup>[4]</sup>。互注入系统有效的提高了相干激光输出功率,提升了激光器的稳定性和相干性,可以从两谐振腔内选出相位锁定的同频激光<sup>[5]</sup>。在半导体激光器中互注入作为外部扰动方法多进行激光混沌特性研究,在通信系统方面起着重大作用。互注入系统可实现双通道通信、有效抑制系统中不希望出现的非线性行为和可稳定控制等优点<sup>[6-7]</sup>。在固体激光器和光

纤激光器,采用互注入系统多用于获得高功率,高亮度的激光输出。在通信中,通过互注入激光器建立稳定的等时同步,可以完全保密传输,防止他人盗取信息<sup>[8]</sup>。通过被动相位锁定中的互注入锁定,使得激光器间自组织实现相位锁定,不需要通过位相检测和控制,不仅可以从两谐振腔内选出相位锁定的同频激光,同时还可以增大纵模频率间隔,减少模式数,以提高相干特性,将中等功率的激光束进行相干合成,从而获得高功率,高亮度的激光输出<sup>[5]</sup>。利用互注入系统产生的双路或六路激光是能量几乎相同且相位差恒定的光<sup>[4]</sup>,用于多光束干涉加工时,干涉效果好。对于目前高能激光武器<sup>[9]</sup>,利用互注入系统,可以将多光束相干合成为单一高功率、高质量光束,获得高能激光武器所需功率。因此,互注入激光器在混沌保密通信<sup>[10]</sup>、高功率激光输出<sup>[11]</sup>、激光加工<sup>[12]</sup>和激光武器<sup>[9]</sup>等领域拥有重要的应用价值。

本文对国内外互注入激光器的研究项目进行了总结,分别介绍了互注入半导体激光器、互注入光纤激光器、互注入固体激光器的近些年的研究情况,并展望其的发展前景。

## 2 互注入激光器

### 2.1 互注入半导体激光器

21世纪以来,国内外的学者越来越注重外光注入半导体激光器方面的研究。它是指将其他光源产生的光注入到半导体激光器中,通过这样可以去研究半导体激光器在非线性的工作情况下,既能用于混沌控制,也可以应用于产生带宽光信号和带宽增强等方面<sup>[13]</sup>。通过在半导体激光器中引入光注入、互注入等方式可以提高激光器的稳定性和调制带宽<sup>[14]</sup>。与普通激光器相比,互注入系统较能维持其激光特性。当传输保密信息时,他人截取后可以由其脉冲信号恢复出混沌系统,从而获取信息。基于互注入技术的混沌同步方法,一起传输的信息较少,他人极难恢复出传输信息,有效提高了保密通信过程中的安全性<sup>[15]</sup>。互注入系统性能优良,装置结构比较简单,实验比较容易实施,在降低系统噪声干扰、高功率输出和光混沌通信等应用中发挥着重要作用<sup>[16]</sup>。

2000年,J. Ohtsubo等人利用直接互注入孤立量子阱激光器,使其工作在低频率的振荡状态去观察

普通混沌同步现象<sup>[2]</sup>,后来又在2003年实现了工作在低频振荡态的直接互注入孤立的垂直腔面发射激光器(VCSELs)混沌同步实验,指出两VCSELs在相同偏振模式时。能产生同相同步,正交偏振模式之间产生反相同步<sup>[17]</sup>;2001年,T. Heil和I. Fischer等人利用直接互注入孤立半导体激光器,发现两个激光器的动力学之间有明确的时间延迟,以及子系统之间的不对称性,证明了领先的激光器同步其延迟对应物,同步延迟激光器驱动耦合引起的不稳定性<sup>[18]</sup>。2005年,J. M. Liu等学者基于互注入光电反馈半导体激光器,进行实验研究其混沌同步特性,对互注入的非线性系统预期值和延迟同步进行了讨论。实验证明其同步是由特定反馈/耦合强度组合下的反馈/耦合延迟时间之间引起的,并且是可以预测的,且预测结果与实验结果大多一致<sup>[19]</sup>。随后在2006年,该课题组基于普通反馈互注入系统,详细的分析了在具有反馈的互注入系统中获得预期或延迟同步的一般操作条件<sup>[20]</sup>;2006年,以色列的E. Klein等人在互注入外腔半导体激光器结构中,通过向每个激光器添加自反馈,通过实验和数值仿真证明在对称工作条件下,其可以建立稳定的等时同步。这种可以实现对称操作的稳定性对于构建光学公共信道密码系统是必不可少的<sup>[21]</sup>。同时发现互注入外腔半导体激光器系统比单向注入外腔半导体激光器具有较高的同步品质和较好的鲁棒性<sup>[22]</sup>,随后,他们基于互注入外腔半导体激光器系统,提出了一种公共频道保密传送信息的方案,经过实验证明了在有他人要攻击盗取信息的情形下,这个方案可以实现完全保密传送信息<sup>[6]</sup>。2007年,西南交通大学张伟利、潘炜等学者对偏振选择互注入半导体激光器同步的理论模型和混沌滤波效应进行了研究,选择X偏振光进行互注入,作为产生混沌和实现同步的条件,对系统的混沌滤波效应进行了分析,系统实现了偏振选择混沌同步<sup>[23]</sup>。同年,R. Vicente等学者利用互注入半导体激光器系统,采用非对称反馈得到的其引导延迟混沌同步,并在通信过程中相互方向上混沌同步,指出该方案能极大地保证传送消息的安全,可应用于通过公用频道进行密钥交换<sup>[24]</sup>。2008年,PAN等学者利用互注入半导体激光器,使两个半导体激光器间相互注入强度极不对称,一个极大

强度,一个极小强度,通过此装置模拟了双向混沌同步通信<sup>[25]</sup>。2011年,西南交通大学基于光纤连接的互注入半导体激光器(如图1所示),采用合适的互注入强度,实验获得宽带宽激光混沌输出,获得了能通过美国国家标准和技术研究所(NIST)基于其800-22随机数测试标准开发的一套统计检验软件——STS测试以及Diehard测试的速率为17.5 Gbit/s的高速随机码,该方案具有结构简单、性能稳定、易于调试等优点<sup>[26]</sup>。2012年,A. D. Mengue和B. Z. Essimbi利用互注入半导体激光器提出了一种安全通信系统的方案,在时域和频域中讨论了通过新控制参数失配对激光器同步的高灵敏度。评估错误位,错误率以及参数不匹配对恢复消息的影响。这体现出互注入半导体激光器在安全通信系统中的作用<sup>[27]</sup>。2015年,Xi Tang,Zheng-Mao Wu等学者使用两个相互注入的半导体激光器输出作为混沌源,用于生成Tbits/s超快速物理随机比特(PRB)的方案,得到来自两个熵源的两组PRB流的生成速率可以达到0.48 Tbits/s的实验结果<sup>[28]</sup>。2016年,昭通学院的顾庆传等提出了一种基于非对称互注入VCSELs的混沌保密通信系统,相互方向上使用两个通信通道,当在其中两个方向注入相差较大的光强度时,两个激光器在线偏振模式下可以获得较高品质的超前一滞后混沌同步<sup>[29]</sup>。

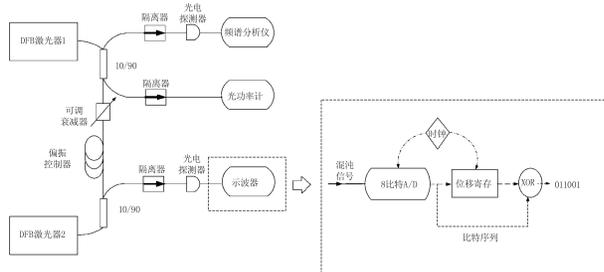


图1 基于互注入半导体激光器混沌输出产生随机码的实验装置

Fig. 1 Experimental device for generating random code based on chaos output of mutual injection semiconductor laser

## 2.2 互注入光纤激光器

1963年,第一台光纤激光器诞生以来,光纤激光器技术得到了快速发展,在研制大功率激光器,高精度传感技术方面呈现广阔的前景<sup>[30]</sup>。由于单根光纤的传输效率受到热透镜效应、传输损耗、非线性效应等因素的影响,导致很难进一步提高,所以相干合成技术目前是提高光纤激光器传输效率

较为有效的方法。利用角锥棱镜特有的光学元件特性,结合光纤光栅,可以使两路光纤激光器实现关联,研制成互注入光纤激光器,实现激光器的互注入能量锁相,进一步提高光纤激光的输出功率,从而获得更高亮度、输出功率的激光输出。同时也有学者根据某些光纤激光器的性质,利用互注入去进行混沌控制与同步方面的研究,这点与互注入半导体激光器较为类似。2008年,西南交通大学的李丰、潘炜等学者根据双环掺铒光纤激光器互耦合的结构特点,提出利用互注入对其混沌进行控制的方法,实现了两个激光器动态的相互控制。掺铒光纤激光器能够提供位于光通讯低损耗窗口上的激光,因此发展迅速并在通讯领域中广泛应用<sup>[31]</sup>。2009年1月,武汉军械士官学校光电研究所的程勇、刘洋等人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,利用了其锁相原理,成功的使两路独立光纤激光器形成注入锁定,观察到波长锁定(中心波长稳定在1085.22 nm)、可见度约0.5的远场干涉条纹、44%的线宽压缩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<sup>[32]</sup>。同年6月,该研究所利用45°半透半反分束镜和角锥反射器,基于互注入光纤激光器,使得两路光纤激光器的能量互注入,从而获得相干合成激光输出的新方法,在远场观察到了清晰稳定的干涉条纹(可见度约0.57),获得了至少10 W的输出功率,其合成效率约为76%。通过实验可知,可以在更高功率条件下运行这种基于互注入的锁相方法,这将成为光纤激光相干合成领域一种有前途的新技术<sup>[3]</sup>。2010年12月,该研究所的米朝伟等学者利用角锥及偏振片,以及光纤Bragg光栅( $R = 85\% @ 1064 \text{ nm}$ )组建两路互注入光纤激光器系统(如图2所示),成功实现了互注入锁相,实验观察到远场可见度超过0.8的清晰的干涉条纹<sup>[33]</sup>。该方法使用不同反射率的光纤Bragg光栅,实现基于角锥互注入多光束相干合成,为以后获得高功率、高亮度的激光输出做出铺垫。同时该光电研究所的朱梦真、黄长春等学者将两路光纤激光器尾端通过反射率为85%的光纤布拉格光栅连接,形成一定的相互关联,设计了一款可获得高功率、高光束质量相干光纤激光输出的双

端输出光纤激光器<sup>[34]</sup>,利用角锥使能量互注入,在远场得到了清晰稳定的干涉条纹(可见度约为0.92),获得了8.6 W的相干合成激光输出,约90%功率合成效率。功率合成效率较2009年6月的实验有显著提升。该实验结构简单,可用于多路激光相干合成,这提供了一种实现高功率光纤激光输出的新思路。2015年,西南交通大学的杨磊、潘炜等人为了实现混动同步,在双环掺铒光纤激光器中加入延时器和耦合器,将两个环的输出光经过延时线和耦合器分别注入双环掺铒光纤激光器中,形成互注入系统,通过延时反馈互注入实现混沌同步<sup>[35]</sup>。

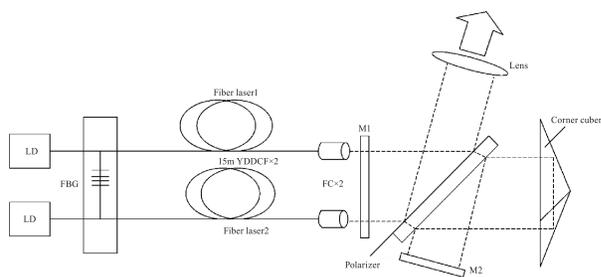


图2 两路关联光纤激光器互注入锁相相干合成实验结构示意图  
Fig. 2 Scheme diagram of experimental setup for mutual injection phase-locking of two inter-related fiber lasers

### 2.3 互注入固体激光器

固体激光器是最早实现激光输出、工作物质最多的激光器。泵浦光源由外部电源驱动发光,工作物质中的激活粒子吸收泵浦光源中某些波段的光能,在工作物质中形成粒子数反转,从而产生激光<sup>[36]</sup>。近年来互注入固体激光器已成为人们研究热点。两个固体激光器通过偏振元件或者角锥棱镜使能量互注入,有利于进一步研究锁相获得相干合成,相干光束合成是研制具有高功率、高亮度、高质量光束的激光器的有效方法。角锥棱镜作为独特的相干组合元件是目前对于互注入固体激光器中效果最好的,当它被用作固体激光器的谐振腔中的全反射镜时,它可以有效地改善激光远场能量聚焦<sup>[37]</sup>。由角锥棱镜的3条棱及其所成像可以使角锥棱镜分成6个两两对称的部分,垂直射入这些对称部分的激光通过角锥棱镜可以实现完全互注入。这种角锥腔构成的激光器,具有较大的抗失调能力,具有更高的机械稳定性。与传统固体激光器相比,互注入固体激光器可以得到更高的激光输出,更好的功率合成效率,可以有效地满足军事和工业领域的要

求<sup>[33]</sup>。2004年,R M Kurtz,R D Pradham等学者对互注入固体激光器锁定进行研究,实验表明与传统的注入锁定相比,互注入锁定的优点包括降低的激光阈值,更好的输出光束质量和改进的缩放能力。实验使用两个Nd:YVO<sub>4</sub>激光器证实,互注入锁定将激光阈值降低了至少两倍,并显著提高了输出光束质量<sup>[38]</sup>。2012年,武汉军械士官学校的杨卓,程勇等人开展了两路脉冲固体激光束相干合成和六路脉冲固体激光束相干合成的实验研究(如图3所示),实验得到了超过255 mJ的合成激光输出,接近80%的功率合成效率,约为0.5的可见度,如果进一步提高实验的抽运电流,还可以进一步提高激光器输出能量<sup>[8]</sup>。角锥腔脉冲固体激光器结构简单,容易操作,是获得多路激光相干合成输出的有效方案。同年,国防科技大学的李霄、曹润秋等学者分析了相互注入锁定相干合成对激光器相干性的影响,利用偏振分光棱镜等关联两路独立的Nd:YAG激光器,减小了在互注入过程中的损耗,实现了两路固体激光器的互注入锁定,获得了4.4 W的部分相干激光输出,同时远场光斑峰值功率密度提高了1.4倍<sup>[7]</sup>。2013年,程勇等人继续研究了基于互注入锁相的六路固体激光器的相干组合特性,得到输出能量为15.3 J,发散角为1.7 mrad的相干组合,在10 Hz和85 A时组合效率高达95.6%<sup>[39]</sup>。2014年,武汉军械士官学校的孙斌等人所在课题组基于角锥腔的六路固体激光器,研究其互注入锁相相干合成。角锥的对称共轭反射作用使得位于角锥对称位置的激光器实现互注入,通过互注入耦合镜组使得位于相邻位置的激光器实现互注入,从而得到了六路固体激光器的相干合成输出。同时逐渐增大电流的情况下,合成效率始终保持在90%以上,并且锁相稳定,光束质量保持不变,长时间工作的情况下性能也比较稳定<sup>[40]</sup>。

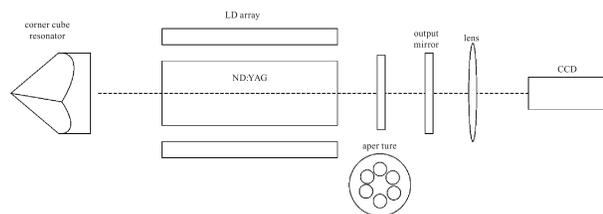


图3 锁相的六路固体激光器相干合成实验结构图  
Fig. 3 Schematic of phase-locked coherent combination of 6-beam laser array

### 3 总结与展望

基于互注入激光器的研究目前开展很多。基于互注入半导体激光器研究混沌同步特性,获得混沌激光输出,能较好地提高在通讯过程中的保密性,有效地在军事、商业上保证信息保密传输。基于互注入光纤激光器研究如何获得高功率、高亮度的激光输出,也在进行混沌同步特性研究。基于互注入固体激光器,利用角锥棱镜特性,研究获得多路激光相干合成输出,并且有效地保证了合成效率,获得良好的光束质量。

互注入激光器在使用中还存在些许不足之处。目前还无法完全消除热效应损耗、非线性效应对基于互注入半导体激光器进行混沌特性研究的影响;还无法完全解决光纤链路的损耗和非线性效应对互注入光纤激光器的影响;输出功率不算大、实验模式较为单一是互注入固体激光器急需解决的问题。

在半导体激光器、固体激光器、光纤激光器中,基于互注入系统已经进行了颇多研究。在未来可以考虑将互注入系统运用在其他类型的激光器上,这是未来基于互注入系统的研究方向,获得更好的实验结果,在军事、商业、工业等领域上有更好的运用价值。希望能将互注入激光器早日进行产业化,造福社会。

#### 参考文献:

- [1] Linkens D A. Analytical solution of large numbers of mutually coupled nearly sinusoidal oscillators [J]. IEEE Trans Circuits Syst, 1974, 21 (2) : 294 - 300.
- [2] Hammer J M, Evans G A, Carlson N W, et al. Lateral beam steering in mutual injection coupled Y-branch grating-surface-emitting diode laser arrays [J]. Applied Physics Letters, 1990, 56 (3) : 224 - 226.
- [3] 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.
- [4] YANG Zhuo, CHENG Yong, LU Changyong, et al. Mutual injection phase locking of solid-state lasers with corner-cube cavity [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2012, 49 (10) : 110 - 115. (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 (10) : 110 - 115.
- [5] LI Xiao, CAO Jianqiu, ZHOU Pu, et al. Mutual injection-locking of two Nd: YAG lasers [J]. Journal of the University of National Defense Science and Technology, 2012, 34 (1) : 24 - 27. (in Chinese)  
李霄,曹涧秋,周朴,等. 两路相互注入锁定 Nd: YAG 激光器 [J]. 国防科技大学学报, 2012, 34 (1) : 24 - 27.
- [6] Jiang N, Pan W, Yan L, et al. Multiaccess optical chaos communication using mutually coupled semiconductor lasers subjected to identical external injections [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22 (10) : 676 - 678.
- [7] HU Hanping, CHEN Xiaofeng, SU Wei, et al. Multi-coupled chaos synchronization and communication based on optoelectronic feedback delay [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34 (4) : 0406006. (in Chinese)  
胡汉平,陈笑风,苏威,等. 基于光电反馈延迟的多点耦合混沌同步和通信 [J]. 光学学报, 2014, 34 (4) : 0406006.
- [8] Klein E, Gross N, Kopelowitz E, et al. Public-channel cryptography based on mutual Chaos pass filters [J]. Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, 2006, 74 (2) : 046201.
- [9] REN Guoguang, YI Weiwei, QU Changhong. High power fiber laser and its application in tactical laser weapons [J]. Laser & Infrared, 2015, 45 (10) : 1145 - 1151. (in Chinese)  
任国光,伊炜伟,屈长虹. 高功率光纤激光器及其在战术激光武器中的应用 [J]. 激光与红外, 2015, 45 (10) : 1145 - 1151.
- [10] CHEN Jingbo, FENG Ping, TANG Hong, et al. Research on chaotic secure Communication based on projection synchronization of feedback adjustment function [J]. Computer and Digital Engineering, 2017, 45 (1) : 20 - 23. (in Chinese)  
陈镜伯,冯平,唐宏,等. 基于反馈调节函数投影同步的混沌保密通信研究 [J]. 计算机与数字工程, 2017, 45 (1) : 20 - 23.
- [11] AN Ran, FAN Xiaozhen, LU Jianxin, et al. Design and experimental study of high beam quality and high power stability laser [J]. Journal of Physics, 2018, 67 (7) : 074201. (in Chinese)  
安然,范小贞,卢建新,等. 高光束质量、高功率稳定性

- 激光器的设计及实验研究[J]. 物理学报, 2018, 67(7):074201.
- [12] YAO Ling, WU Nan, HAN Xianjun, et al. Optical fiber laser cutting and its application in precision machining[J]. Hot Working, 2018, (7):11-15. (in Chinese)  
姚令, 吴楠, 韩宪军, 等. 光纤激光切割及其在精密加工中的应用展望[J]. 热加工工艺, 2018, (7):11-15.
- [13] JIANG Ning. Study of the chaos synchronization systems based on mutual coupling semiconductor lasers [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese)  
江宁. 基于互注入半导体激光器的混沌同步系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [14] PENG Xuebao. Dynamic characteristics of optically implanted fabry-perot semiconductor lasers [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2015. (in Chinese)  
彭雪保. 光注入法布里-珀罗半导体激光器的动态特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [15] ZHOU Jun, ZHANG Yuejin. Chaotic secure communication system based on photoelectric external feedback & mutual injection [J]. Optical Communications Technology, 2013, 37(8):40-43. (in Chinese)  
周俊, 张跃进. 光电外反馈与互注入混沌保密系统研究[J]. 光通信技术, 2013, 37(8):40-43.
- [16] FENG Yangqiang, LIANG Liping, YUAN Shuqing. Study on chaos characteristics in mutually coupled semiconductor [J]. Laser Technology, 2011, 35(2):196-198. (in Chinese)  
冯亚强, 梁丽萍, 袁树青. 互注入半导体激光器混沌特性的研究[J]. 激光技术, 2011, 35(2):196-198.
- [17] Ohtsubo J, Fujiwara N, Takiguchi Y. Observation of the synchronization of chaos in mutually injected vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers [J]. Optics Letters, 2003, 28(18):1677-9.
- [18] Heil T, Fischer I, Elsässer W, et al. Chaos synchronization and spontaneous symmetry-breaking in symmetrically delay-coupled semiconductor lasers [J]. Physical Review Letters, 2001, 86(5):795-798.
- [19] Chiang M C, Chen H F, Liu J M. Experimental synchronization of mutually coupled semiconductor lasers with optoelectronic feedback [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2005, 41(11):1333-1340.
- [20] Chiang M C, Chen H F, Liu J M. Synchronization of mutually coupled systems [J]. Optics Communications, 2006, 261(1):86-90.
- [21] Klein E, Gross N, Rosenbluh M, et al. Stable isochronal synchronization of mutually coupled chaotic lasers [J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2006, 73(2):066214.
- [22] Gross N, Kinzel W, Kanter I, et al. Synchronization of mutually versus unidirectionally coupled chaotic semiconductor lasers [J]. Optics Communications, 2006, 267(2):464-468.
- [23] ZHANG Weili, PAN Wei, LUO Bin, et al. Chaotic synchronization in polarization selective mutually coupled semiconductor lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(1):55-60. (in Chinese)  
张伟利, 潘伟, 罗斌, 等. 偏振选择互注入半导体激光器的混沌同步[J]. 中国激光, 2007, 34(1):55-60.
- [24] Vicente R, Mirasso C R, Fischer I. Simultaneous bidirectional message transmission in a chaos-based communication scheme [J]. Optics Letters, 2007, 32(4):403-5.
- [25] Zhang W L, Pan W, Luo B, et al. Chaos synchronization communication using extremely unsymmetrical bidirectional injections [J]. Optics Letters, 2008, 33(3):237-9.
- [26] TANG Wei, WU Jiagui, XIA Guangqiong, et al. 17.5 Gbit/s random bit generation using chaotic output signal of mutually coupled semiconductor laser [J]. Acta Phys. Sin., 2011, 60(11):133-137. (in Chinese)  
唐曦, 吴加贵, 夏光琼, 等. 基于互注入半导体激光器的混沌输出产生 17.5 Gbit/s 随机码 [J]. 物理学报, 2011, 60(11):133-137.
- [27] Mengue A D, Essimbi B Z. Secure communication using chaotic synchronization in mutually coupled semiconductor lasers [J]. Nonlinear Dynamics, 2012, 70(70):1241-1253.
- [28] Tang X, Wu Z M, Wu J G, et al. Tbits/s physical random bit generation based on mutually coupled semiconductor laser chaotic entropy source [J]. Optics Express, 2015, 23(26):33130-33141.
- [29] GU Qingchuan. Bidirectional dual-channel chaos secret communication based on unsymmetrically mutual inject VCSELs [J]. Journal of Qingdao University (Natural Science), 2016, 29(3):107-111. (in Chinese)  
顾庆传. 基于非对称互注入 VCSELs 的双向双信道混沌保密通信研究 [J]. 青岛大学学报: 自然科学版, 2016, 29(3):107-111.
- [30] WU Jianfen, CHEN Genxiang. Fiber laser technology and its research progress [J]. Optical Communication Technology, 2006, 30(8):49-52. (in Chinese)

- 武建芬,陈根祥. 光纤激光器技术及其研究进展[J]. 光通信技术,2006,30(8):49-52.
- [31] LI Feng, PAN Wei, LUO Bin. Chaos control and synchronization of double-ring erbium-doped fiber laser based on mutual injection[J]. Chinese Journal of Quantum Optics, 2008, 14(2):207-212. (in Chinese)
- 李丰,潘炜,罗斌. 基于互注入的双环掺铒光纤激光器的混沌控制及同步[J]. 量子光学学报,2008,14(2):207-212.
- [32] CHENG Yong, LIU Yang, XU Lixin, et al. Mutual-injection phase-locking fiber laser with corner-cube cavity[J]. China Laser, 2009, 36(1):77-81. (in Chinese)
- 程勇,刘洋,许立新,等. 角锥腔互注入锁相光纤激光器[J]. 中国激光,2009,36(1):77-81.
- [33] MI Chaowei, LIU Yang, ZHU Mengzhen, et al. Mutual injection phase-locking of two Inter-related fiber lasers[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2010, 08(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,2010,08(6):84-87.
- [34] Zhu Mengzhen, Huang Changchun, Cheng Yong, et al. Mutual injection phase-locking study of fiber laser with two output ports [J]. Acta Phys. Sinica, 2009, 58(6):3929-3933. (in Chinese)
- 朱孟真,黄长春,程勇,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.
- [35] YANG Lei, PAN Wei, YAN Lianshan, et al. Chaos and synchronization in mutually coupled erbium-doped fiber ring lasers with time delay[J]. Optoelectronic laser, 2015(1):1-8. (in Chinese)
- 杨磊,潘炜,闫连山,等. 延时反馈双环掺铒光纤激光器互注入系统中的混沌同步研究[J]. 光电子·激光, 2015(1):1-8.
- [36] CHEN Heming, ZHAO Xinyan. Principle and application of laser[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013. (in Chinese)
- 陈鹤鸣,赵新彦. 激光原理及应用[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2013.
- [37] Cheng Y, Liu X, Liu Y, et al. Coherent characteristics of solid-state lasers with corner cubes[J]. Appl Opt, 2014, 53(15):3267-72.
- [38] Kurtz R M, Pradham R D, Aye T M, et al. Mutual injection locking of solid-state lasers[C]// Lasers and Electro-Optics. IEEE, 2004.
- [39] Cheng Y, Liu X, Wan Q, et al. Mutual injection phase locking coherent combination of solid-state lasers based on corner cube [J]. Optics Letters, 2013, 38(23):5150-5152.
- [40] 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.