

激光器噪声信号的探测与分析

张蓉竹 曹翔科 何 耀

(四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要 利用半导体激光器相位噪声分析模型,分析了随机噪声对输出激光相位及复振幅的调制情况。为了分析实际的相位噪声特性,设计了两个独立不同类型激光的拍频实验,利用一个中心波长为 1053 nm 的可调谐半导体激光器和一个光纤激光器进行拍频,考虑到光纤激光器输出激光的线宽远小于半导体激光器,探测到的拍频信号能够较好的反映半导体激光器的相位噪声特性。设计了一个两光束频率实时对准装置,通过高频示波器观察到了稳定拍频的信号。计算了相位噪声的统计性质,提出了利用锁相技术抑制该噪声的方案,并分析了两不同类型激光器相干合成的可行性。

关键词 激光技术; 相干合成; 相位噪声; 拍频

中图分类号 TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200929s1.0274

Analysis and Detection of the Laser Noise

Zhang Rongzhu Cao Xiangke He Yao

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract Using the analysis model of the phase noise, the random noise of semiconductor laser is studied. The modulation on the phase and complex amplitude of laser is discussed. A beat note experiment system with two different kind of laser is established to get the noise signal. In the system, a tunable semiconductor laser and a fiber laser are employed. Since the linewidth of fiber laser is much narrower than that of the semiconductor laser, the beat note can show the noise character of the semiconductor laser. According to the statistic character of the laser phase noise, a kind of phase lock technique is introduced. The feasibility of such scheme is studied in detail.

Key words laser technology; coherent combining; phase noise; beat note

1 引 言

获得高光束质量的高能激光输出是目前激光技术研究的一个重要方向,目前高能量激光器具有两种主要结构,一个是级联放大^[1],另一种则是阵列化^[2]。级联放大将使激光器的体积增大,且光束质量随着光学元件数量的增加而降低。相比而言,阵列激光器是实现超高功率激光输出的一个更为有效的方案,但由于阵列中每个单元激光器发出的激光束间相位是无关的,需要采用恰当的相位控制方案来实现光束的相干合成。如果将相干光通信系统中使用的光学锁相环技术用于阵列激光锁相中,不但可以借助电子控制系统对独立激光器的相位进行有效控制,还可以突破目前光学锁相技术中对激光器种类、数量的限制^[3]。

在进行激光相位控制前,必须要了解激光相位变化特性。由于实际激光器存在自发辐射的影响,输出

激光的相位具有随机性,也就是存在相位噪声。作为一个随机信号,首先需要对其统计性质进行深入的分析,然后根据分析结果选择合适的补偿或抑制方法。针对具体的激光器还需要通过实验对相位噪声进行探测,但是由于激光的相位噪声是一个很高频的信号,普通光学探测系统无法得到有效信号输出。

本文根据自发辐射原理,采用了一个自发辐射干扰模型对半导体激光器的噪声特性进行分析,计算了该模型下激光相位噪声的统计性质,探索了抑制相位噪声的方法。设计了一个拍频探测系统,利用线宽极窄的光纤激光器与半导体激光器进行拍频。

2 激光器的噪声分析模型

根据爱因斯坦提出的受激发射理论可知,激光增益介质中既存在受激辐射,也存在自发辐射,受激辐

基金项目: 国家自然科学基金(60508002)资助课题。

作者简介: 张蓉竹(1975—),女,博士,副教授,主要从事光电子技术与精密光学检测等方面的研究。

E-mail: zhang_rz@scu.edu.cn

射受到自发辐射的干扰,形成激光噪声。与受激辐射不同,自发辐射初始相位是随机的,与受激辐射光波的合成应当满足复平面的矢量合成^[4],如图 1 所示。

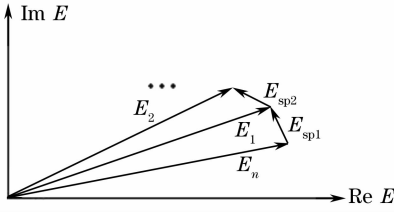


图 1 自发辐射对激光的干扰

Fig. 1 Disturbance model of the spontaneous radiation

复振幅为 E_0 的激光受到自发辐射 E_{sp1} 的干扰形成复振幅 E_1 , E_1 受到自发辐射 E_{sp2} 的干扰形成 E_2 , 依此类推, 可以将该过程用公式表示为

$$E_n = E_0 + \sum_{i=1}^n E_{spi} \quad (1)$$

由于 $E_0 \gg E_{sp1}$, 单次自发辐射或短时间自发辐射的影响是微不足道的, 只有长时间自发辐射的积累才会形成激光的噪声, 这就给控制或抑制该噪声提供了可能。

根据图 1 的模型, 不考虑强度变化, 则单次自发辐射后的合成光波相位为

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \phi_0 + \arctan\left[\frac{E_{sp1} \sin \phi_{sp1}}{E_0 + E_{sp1} \cos \phi_{sp1}}\right] \approx \\ &\phi_0 + \frac{E_{sp1}}{E_0} \sin \phi_{sp1}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $\phi_0, \phi_1, \phi_{sp1}$ 分别是 E_0, E_1, E_{sp1} 对应的幅角。经过时间 t 后, 激光的相位为^[5]:

$$\phi(t) = \sum_{i=1}^{R_{sp} t} \frac{E_{spi}}{E_0} \sin \phi_{spi}, \quad (3)$$

其中 R_{sp} 是激发辐射系数。由于激光器的相位噪声等于一系列正弦函数之和, 且每个相位 ϕ_{spi} 的正弦函数统计独立, 并且公式的求和数很大, 满足中心极限定理的条件。由此可以计算出激光相位的期望和方差分别是,

$$\begin{aligned} E[\phi(t)] &= \sum_{i=1}^{R_{sp} t} \frac{E[E_{spi}]}{E_0} E(\sin \phi_{spi}) = 0, \\ D[\phi(t)] &= \sigma^2 t, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 σ 是一个常数, 根据(4)式可以推得 $\phi(t)$ 是维纳随机过程。由于激光相位噪声的存在, 决定了激光有限的相干性^[6]。

3 拍频实验

经过理论推导可以得出自发辐射对激光相位的

影响, 并能够了解实际输出激光的相位所具有的统计特性。理论分析为抑制激光相位噪声提供了理论基础, 但是在实际的系统设计中, 还需要对激光噪声信号进行实验探测。

利用一个中心波长为 1053 nm 的可调谐半导体激光器和一个中心波长相同的光纤激光器设计了一套拍频实验系统, 具体结构如图 2 所示。

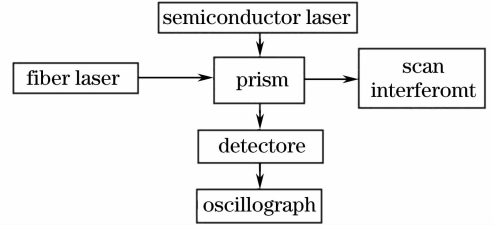


图 2 拍频测量系统结构图

Fig. 2 Sketch map of the beat note experiment system

两个激光器输出的光束同时入射到分光棱镜, 两束光在空间上重合后, 通过棱镜后沿垂直的两个方向传输。沿一个方向输入到高速光电探测器后, 转变为电信号, 并在示波器上进行显示。沿另一个方向传输的光则入射到扫描干涉仪上。

根据拍频理论可知, 光电探测器输出的电流为

$$I(t) = \alpha E_s E_l \cos[(\omega_s - \omega_l)t + (\phi_s - \phi_l)], \quad (5)$$

式中 E_s 和 E_l 分别表示半导体激光器与光纤激光器输出光的复振幅, 同样 $\omega_s, \omega_l, \phi_s$ 以及 ϕ_l 分别表示两个激光的频率及相位, 横线表示探测器的响应是一个时间平均处理过程。由于拍频信号的频率是光频

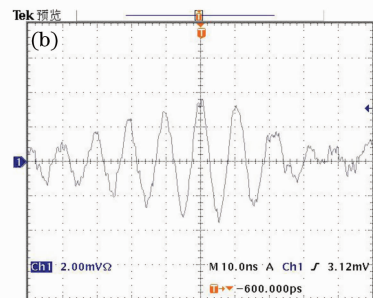
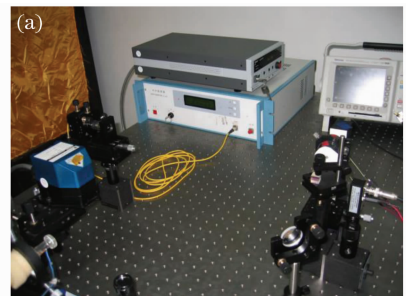


图 3 拍频实验装置(a)及输出信号(b)

Fig. 3 The experiment system (a) and the detection result (b)

率之差,通过扫描干涉仪观察两激光的频谱,只要控制其中心频率的差值,就能够让高速探测器的响应速度满足要求。

从(5)式中看出,在激光进行了稳频处理的前提下,拍频信号能够反映两束激光的相位差,由于相位噪声的存在,两相位之差不是一个确定值,而是随时间变化的量。输出电信号的变化则反映了相位噪声的大小及分布。如果 ϕ_s 与 ϕ_l 相比其噪声要大得多,则输出电流主要反映了半导体激光器的相位噪声特性。选择光纤激光器就是因为光纤激光器的结构使其线宽远小于半导体激光器,对应相位也要稳定得多,因此输出信号能够很好的反映出半导体激光器的相位噪声。具体实验光路和输出信号如图 3 所示。

4 相位噪声抑制方案

通过理论推导可以得到激光相位噪声的统计特性,而利用实验也可以对该噪声进行分析,进一步则需要对如何抑制该噪声的影响进行深入研究。锁相控制系统是电子学中常用的抑制噪声方案,因此将锁相环技术引入光学锁相控制中,原理如图 4。

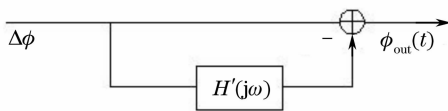


图 4 锁相控制系统原理框图

Fig. 4 Principle of the phase lock system

两束激光之间的相位差是锁相系统的输入,由于主要考虑半导体激光的相位噪声,则可以将另一束激光近似看作理想激光。输出信号则通过电光相位调制器进行处理,通常情况下采用高速 LiNbO_3 调制器。传递函数 H' 主要由探测器、控制电路和调制器的特性决定。如果考虑惯性环节锁相则 $H' = 1/(T\omega + 1)$, T 是由系统性质决定的时间常数。令惯性环节的点扩散函数为: $h = \frac{1}{T} \exp(-t/T)$, 系统的总的点扩散函数为 $\delta - h$ 。

利用这样一个系统,只要使用一个相干性和频率稳定性较好的激光作为标准光就可以起到改善和稳定被控制激光相位的功能,但为了简化计算和分析过程,仅考虑理想激光作为参考光的情况,从两束光之间的相位差出发, $\Delta\phi = \phi(t) + \beta t$, 其中 $\beta = \omega_s - \omega_l$ 是标准光与待处理激光之间的频率差,根据第二部分的推导已知具有噪声的 $\phi(t)$ 是一个维纳过程,则通过锁相环系统后,输出的相位为

$$\phi_{\text{out}}(t) = [\phi(t) + \beta t] \times [\delta - h(t)] =$$

$$\phi(t) - \phi(t) \times h(t) + \beta T, \quad (6)$$

令 $\xi_t = \phi(t) - \phi(t) \times h(t)$, 经推导可得

$$E[\xi_t] = 0, \quad D[\xi_t] = E[\xi_t^2] = \sigma^2 T/2, \quad (7)$$

故随机过程 ξ_t 平稳,这就是说通过控制系统(理想参考光)后的独立激光的相位分布由维纳随机过程改造为一平稳高斯随机过程。这样锁相激光的复振幅可以表示为 $U(t) = \exp[j(\omega_0 t + \beta T + \xi_t)]$, 由于相位中随机过程 ξ_t 平稳,可以预期激光相位的漂移将大大降低,相干性将得到改善,也说明了激光的噪声得到了有效控制。

5 结 论

根据自发辐射理论,利用一种常见的模型,分析了自发辐射对激光输出的相位影响,推导了该模型下相位噪声的统计性质,并确定了激光的相位噪声满足维纳随机分布的特性。为了能够通过实验测出实际激光输出光束的相位噪声情况,设计了一套拍频实验装置。利用光纤激光器线宽远小于半导体激光器的特性,采用两种不同类型激光器进行拍频实验,输出信号能够很好的描述半导体激光器的相位噪声特性。为了能够对激光噪声进行控制,提出采用一种高频电子控制系统组成光学锁相环的锁相控制方案,通过分析输出相位的统计性质,证明了这种方案进行激光噪声抑制的可行性。

参 考 文 献

- Liu Lang, Bi Guojiang, Huang Maoquan *et al.*. High repeating rate and big energy single-longitudinal-mode laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10): 885~889
刘 朗,秘国江,黄茂全 等. 高重复频率大能量单纵模激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10): 885~889
- Wang Jingquan, Fang Liang, Zhang Zhiyou *et al.*. Implementation of coherent array beam combination using two-dimensional sine phase grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 39~43
王景全,方 亮,张志友 等. 用二维正弦相位光栅实现阵列激光相干并束[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 39~43
- Zhang Rongzhu, Yang Chunlin. Active phase-locked technology of laser arrays[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, **26**(1): 54~57
张蓉竹,杨春林. 阵列激光器主动锁相技术研究[J]. *半导体光电*, 2005, **26**(1): 54~57
- H. H. Charles. Phase noise in semiconductor lasers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**(3): 298~311
- J. H. Franz, V. K. Jain. *Optical Communications Components and Systems* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 34~35
H. Franz, V. K. Jain. *光通信器件与系统*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002. 34~35
- B. J. Comaskey, R. Beach, G. Albrecht *et al.*. High average powers diode pumped slab laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 992~996