

# 两台同类型号独立激光器频率稳定度的测量

刘 涛<sup>1</sup> 马秀荣<sup>1,2</sup> 张双根<sup>1,2</sup> 任广军<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>天津理工大学计算机与通信工程学院通信器件与技术教育部工程研究中心, 天津 300384)  
(<sup>2</sup>天津理工大学电子信息工程学院薄膜电子与通信器件天津市重点实验室, 天津 300384)

**摘要** 采用拍频法对两台同类型号独立激光器的稳定度进行了测量。从拍频理论出发,得到了拍频信号稳定度与待测激光器和参考激光器稳定度三者所满足的平方和关系,对于稳定度一致的两台同类型号激光器,由拍频信号稳定度可以得到待测激光器的稳定度。实验中将 New Focus 公司生产的两台同类型号激光器(TLB-6017)进行拍频,根据拍频信号稳定度测得激光器稳定度为  $1.36 \times 10^{-8}$ ,频率漂移量为 5.1 MHz(1 s 积分时间)。实验结果与激光器出厂指标[稳定度  $1 \times 10^{-8}$ 、频率漂移量 5 MHz(1 s 积分时间)]相比,稳定度在同一量级,频率漂移量的相对误差为 2%。此方法避免了通常测量激光器稳定度时所需的高稳定度参考光源的限制,为激光器稳定度的测量提供了一定的参考。

**关键词** 激光器;频率稳定度;拍频;频率漂移量

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0408006

## Measurement of Frequency Stability of Two Independent Lasers with the Same Model

Liu Tao<sup>1</sup> Ma Xiurong<sup>1,2</sup> Zhang Shuanggen<sup>1,2</sup> Ren Guangjun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Engineering Research Center of Communication Devices and Technology, Ministry of Education, Academy of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

<sup>2</sup>Tianjin Key Laboratory of Film Electronics and Communication Device, School of Electronic Information Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

**Abstract** Frequency stability of two independent lasers with the same model is measured by using beat frequency technology. By using the theory of beat frequency, frequency stability of the beat signal is deduced, which can be expressed by the sum of squares of the frequency stability of the reference laser and the measured laser. From the above relationship, the frequency stability of measured laser with the same model with reference laser can be obtained. Two independent lasers (TLB-6017) with the same model produced by New Focus company are used in the experimental measurement, and the results show that the frequency stability of the measured laser is about  $1.36 \times 10^{-8}$  and the frequency shift is 5.1 MHz at the averaging time of 1 s. Frequency stability is in the same level with the technical specification (frequency stability is about  $1 \times 10^{-8}$  and frequency shift is about 5 MHz at the averaging time of 1 s), and the relative error of frequency shift is about 2%. The provided method avoids conventional limitations which need a higher stability laser as reference laser.

**Key words** lasers; frequency stability; beam frequency; frequency shift

**OCIS codes** 140.3425; 140.3460; 140.3600; 140.3430

## 1 引 言

随着激光器在光纤通信中的广泛应用<sup>[1,2]</sup>,作

为激光器性能指标之一的频率稳定度的测量就显得尤为重要<sup>[3~5]</sup>。测量激光器稳定度的常用方法是将

收稿日期: 2011-11-14; 收到修改稿日期: 2012-01-09

基金项目: 国家 863 计划、国家自然科学基金(11004152)和天津市教委基金(20090715)资助课题。

作者简介: 刘 涛(1989—),男,硕士研究生,主要从事信号处理方面的研究。E-mail: liutao19890403@163.com

导师简介: 马秀荣(1961—),女,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、光学信号处理等方面的研究。

E-mail: maxiurong@eyou.com

待测激光与频率已知的参考激光进行光学拍频<sup>[6-8]</sup>,该方法需要一个高稳定度的参考光源<sup>[9-11]</sup>。目前,使用飞秒光梳技术做成的光钟能够使得输出光频稳定度达到 $10^{-19}$ 量级<sup>[12,13]</sup>。但获得频率单一且稳定的参考源需要复杂的设备及昂贵的实验成本。

本文将拍频法运用到两台同类型号的激光器稳定度测量中,实现了激光器稳定度的测量,避免了需要高稳定度参考光源的限制。首先从拍频理论模型出发,推导得到了拍频信号稳定度与待测激光器和参考激光器稳定度所满足的平方和关系,对于两台同类型号激光器,其稳定度一致,利用测量的拍频信号稳定度可以实现待测激光器稳定度的测量。实验中将 New Focus 公司生产的两台同类型号激光器(New Focus TLB-6017)拍频,测得激光器稳定度为 $1.36 \times 10^{-8}$ ,频率漂移量为 5.1 MHz(1 s 积分时间)。实验结果与激光器出厂指标[稳定度 $1 \times 10^{-8}$ ,频率漂移量 5 MHz(1 s 积分时间)]相比,稳定度在同一量级,频率漂移量的相对误差为 2%。

## 2 理论分析

理想激光器的光电场复振幅表示为 $E(t) = E \cos(2\pi ft + \varphi)$ ,其中 3 个特征参量分别为振幅 $E$ 、频率 $f$ 和相位 $\varphi$ 。拍频时使用的两束光分别来自两个独立激光器,它们的频率相差很小,瞬时频率分别为 $f_c(t)$ 和 $f_d(t)$ ,其电场强度表示为

$$E_1(t) = E_1 \cos(2\pi f_c t + \varphi_c), \quad (1)$$

$$E_2(t) = E_2 \cos(2\pi f_d t + \varphi_d), \quad (2)$$

式中 $E_1, E_2$ 分别为两光波的振幅, $f_c$ 为参考激光器输出频率, $f_d$ 为待测激光器输出频率, $\varphi_c, \varphi_d$ 分别为两光波的相位。当两束光在空间传输过程中近似重合地垂直入射到光电探测器上时,光电探测器输出的光电流正比于两束光的合成光强,即输出的光电流为

$$\begin{aligned} i_p \propto I &= E^2(t) = [E_1(t) + E_2(t)]^2 = \\ &E_1^2 \cos^2(2\pi f_c t + \varphi_c) + E_2^2 \cos^2(2\pi f_d t + \varphi_d) + \\ &E_1 E_2 \cos[2\pi(f_c + f_d)t + (\varphi_c + \varphi_d)] + \\ &E_1 E_2 \cos[2\pi(f_c - f_d)t + (\varphi_c - \varphi_d)], \quad (3) \end{aligned}$$

式中前两项在时间上的平均值为 $\frac{E_1^2 + E_2^2}{2}$ ,第三项的频率很高,超过了现有的光电探测器响应频率,其平均值为零,第四项相对于光频来说缓慢得多。当拍频信号频率低于光电探测器的截止频率 $f_h$ 时就有交流光电流 $u(t)$ 输出, $u(t)$ 可表示为

$$\begin{aligned} u(t) &\propto E_1 E_2 \cos[2\pi(f_c - f_d)t + (\varphi_c - \varphi_d)] = \\ &E_1 E_2 \cos[2\pi \Delta f t + \Delta \varphi(t)], \quad (4) \end{aligned}$$

式中 $\Delta f = f_c - f_d$ 为拍频信号的频率, $\Delta \varphi(t) = \varphi_c - \varphi_d$ 为拍频信号的相位。

由于拍频信号频率起伏是随机的,在时域上,国内外通常采用统计的 Allen 方差<sup>[14,15]</sup>来表征频率稳定度。拍频信号频率稳定度的 Allen 方差表示为

$$S_y(\tau) = \frac{\sqrt{\sigma_y^2(\tau)}}{\bar{f}} = \frac{1}{\bar{f}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta f_{i+1} - \Delta f_i)^2}{2N}}, \quad (5)$$

式中 $\sigma_y(\tau)$ 为拍频信号频率漂移量的 Allen 方差, $\tau$ 为积分时间, $\bar{f}$ 为激光器平均频率, $\Delta f_{i+1} - \Delta f_i$ 为在积分时间 $\tau$ 内拍频信号频率漂移量, $N$ 为取样次数。

在频域上,稳定度通常用相对频率起伏 $y(t)$ 的功率谱密度 $S_y(f)$ 来表征。

相对频率起伏可以表示为

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{1}{2\pi f_c} \frac{d\Delta \varphi(t)}{dt} \approx \frac{1}{2\pi f_c} \frac{d\varphi_c(t)}{dt} - \\ &\frac{1}{2\pi f_d} \frac{d\varphi_d(t)}{dt} = y_c(t) - y_d(t), \quad (6) \end{aligned}$$

式中分母不是 $\Delta f$ ,而是参考激光器的标称频率 $f_c$ ,这是由于所测量的是拍频信号相对于参考激光器的频率起伏; $y_c(t)$ 为参考激光器的相对频率起伏; $y_d(t)$ 为待测激光器的相对频率起伏。由于激光频率高达 $10^{14}$ 量级,而 $f_c$ 与 $f_d$ 之间的频率差在兆赫兹以内,因此用 $f_c$ 代替 $f_d$ 所引入的误差可以忽略不计。

对 $y(t)$ 求自相关函数得到

$$\begin{aligned} R_{yy}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} y^*(t) y(t + \tau) dt = \\ &\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} [y_c(t) - y_d(t)]^* [y_c(t + \tau) - \\ &y_d(t + \tau)] dt = R_{y_c y_c}(\tau) + R_{y_d y_d}(\tau) - \\ &R_{y_c y_d}(\tau) - R_{y_d y_c}(\tau), \quad (7) \end{aligned}$$

式中 $R_{y_c y_c}(\tau), R_{y_d y_d}(\tau)$ 分别为 $y_c(t)$ 和 $y_d(t)$ 的自相关函数, $R_{y_c y_d}(\tau), R_{y_d y_c}(\tau)$ 分别为 $y_c(t)$ 和 $y_d(t)$ 的互相关函数,\*表示共轭。由于 $y_c(t)$ 与 $y_d(t)$ 分别对应两台独立激光器的相对频率起伏,两者是相互独立的,所以 $R_{y_c y_d}(\tau) \approx R_{y_d y_c}(\tau) \approx 0$ ,代入(7)式得到

$$R_{yy}(\tau) = R_{y_c y_c}(\tau) + R_{y_d y_d}(\tau), \quad (8)$$

由功率信号的自相关函数的傅里叶变换是其功率谱密度的性质,对(8)式作傅里叶变换得到

$$S_y(f) = S_c(f) + S_d(f). \quad (9)$$

根据文献[16]中给出  $\sigma_y^2(\tau)$  与  $S_y(f)$  满足的关系

$$\sigma_y^2(\tau) = 2 \int_0^{f_h} S_y(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df, \quad (10)$$

式中  $f_h$  为光电探测器的截止频率。

由(9)式和(10)式可以得到

$$\sigma_y^2(\tau) = \sigma_c^2(\tau) + \sigma_d^2(\tau), \quad (11)$$

将(11)式代入(5)式可以得到

$$S_y^2(\tau) = S_c^2(\tau) + S_d^2(\tau), \quad (12)$$

式中  $S_y(\tau)$  为拍频信号的稳定度,  $S_c(\tau)$ 、 $S_d(\tau)$  分别为参考激光器和待测激光器的稳定度, 即拍频信号稳定度与参考激光器和待测激光器稳定度三者满足平方和关系。

由于用于拍频的是两台相同型号的独立激光器, 可认为其稳定度一致, 即

$$S_c(\tau) = S_d(\tau). \quad (13)$$

将(13)式代入(12)式可得到待测激光器的稳定度, 其值为拍频信号稳定度的  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  倍, 即

$$S_d(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2}} S_y(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{f} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta f_{i+1} - \Delta f_i)^2}{2N}}. \quad (14)$$

### 3 拍频实验

拍频实验原理如图 1 所示。激光器 1 输出的线偏振光由光阑调整后经过反射镜和半波片输入到偏振分束器(PBS), 通过旋转半波片调节激光器 1 输出光的偏振态, 使得偏振光被 PBS 完全反射。激光器 2 输出的线偏振光经过一个光阑调整后由半波片到达 PBS, 通过旋转半波片调节激光器 2 输出激光的偏振态, 使得偏振光完全透过 PBS。两束光经过 PBS 后在空间上完全重合, 偏振态互相垂直。为了使两光束产生拍频, 将合成光束通过另一组半波片

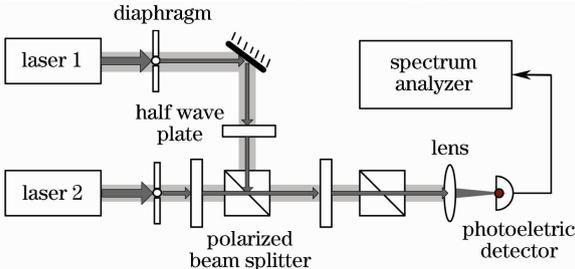


图 1 拍频实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of optical beating

和 PBS, 调节半波片使反射光和透射光经过 PBS 后偏振态完全一致。最后将拍频信号经过透镜会聚到光电探测器上, 探测器输出的交流信号再输入到频谱分析仪中进行频谱分析。

拍频实验实物图如图 2 所示。实验所用的两台激光器都是 New Focus 公司生产的可调谐外腔式半导体激光器(ECDL, New Focus TLB-6017)。拍频信号经过高速光电探测器(New Focus 1557-A)将探测得到的交流信号输入到频谱分析仪(Agilent E4445A)中。根据频谱分析仪上的追踪信号功能, 可以得到两个相邻拍频信号的频率漂移量  $\Delta(i) = \Delta f_{i+1} - \Delta f_i$ 。

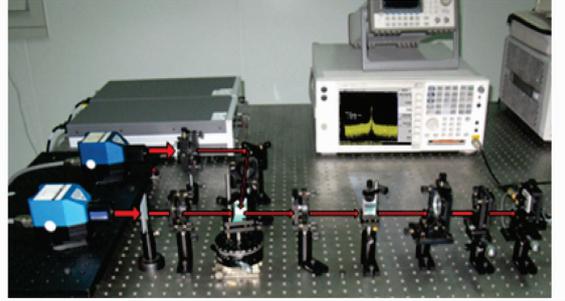


图 2 拍频实验实物图

Fig. 2 Actual object picture of optical beating

### 4 实验结果及误差分析

根据频谱分析仪中测量信号源漂移的功能得到 1 s 内拍频信号漂移轨迹如图 3 所示。其中黄线(上)为拍频信号频率漂移轨迹, 绿线(下)为某时刻点处拍频信号频率(彩图见网络电子版)。

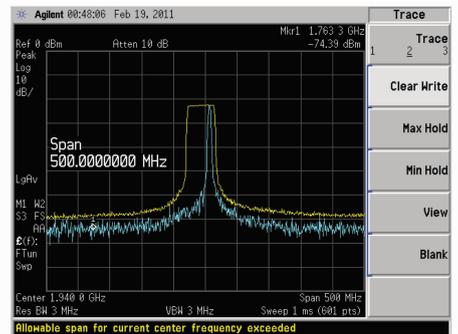


图 3 拍频信号 1 s 内漂移过的轨迹图

Fig. 3 Optical beating signal's trace in 1 s

从图 3 可以看出, 拍频信号在积分时间 1 s 内频率漂移量最大约为 45 MHz。

根据频谱分析仪中追踪信号的功能得到当积分时间为 1 s 时, 两个相邻拍频信号的频率漂移量( $\Delta$ )如图 4 所示。

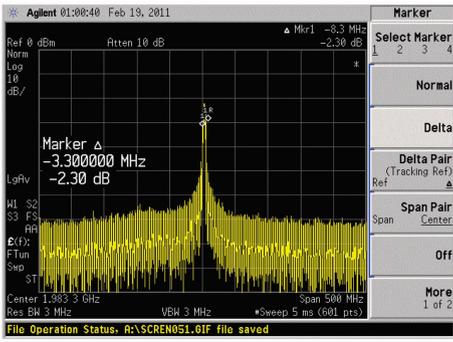


图 4 拍频信号在积分时间 1 s 时的  $\Delta$  值

Fig. 4  $\Delta$  of optical beating signal at 1 s

从图 4 可以看出,当积分时间为 1 s 时两个相邻拍频信号的频率漂移量为  $-3.3$  MHz。

取样  $N=100$  次,得到在积分时间为 1 s 时,拍频信号的频率漂移量  $\Delta$  如图 5 所示。

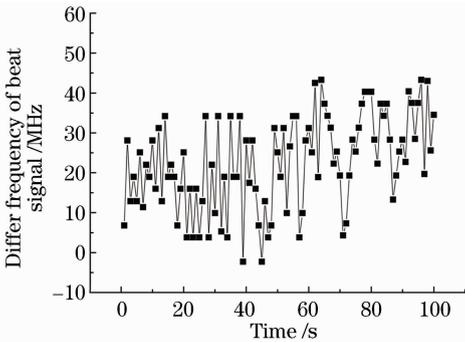


图 5 拍频信号频率漂移量

Fig. 5 Value of optical beating frequency shift

根据测量得到的拍频信号频率漂移量以及激光器的平均频率  $3.78 \times 10^{14}$  Hz(光波长为 793 nm),代入(14)式即可得到在积分时间为 1 s 时待测激光器稳定度为  $1.36 \times 10^{-8}$ 。

同样地,选择不同的积分时间  $\tau$ ,根据测得的拍频信号频率漂移量  $\Delta$  并将之代入(14)式,即可得到在不同积分时间  $\tau$  下待测激光器稳定度的 Allen 方差,如图 6 所示。

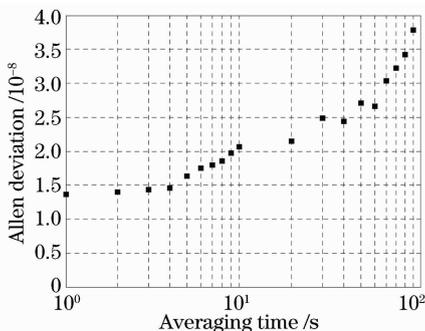


图 6 激光器在不同积分时间下的稳定度 Allen 方差

Fig. 6 Frequency stability at different averaging times

从图 6 可以看出,随着积分时间的增大,激光器的频率稳定度有所下降,这是由于激光器中的低频噪声使得激光器在长时间工作时,其中心频率出现了缓慢的单向漂移。同时,由于积分时间增大,为了减少总的测量时间,当积分时间为 100 s 时,选取采样次数  $N=30$ 。从测量结果来看,当积分时间为 1 s 时,激光器的频率稳定度为  $1.36 \times 10^{-8}$ ;积分时间为 5 s 时,激光器的频率稳定度为  $1.62 \times 10^{-8}$ ;积分时间为 100 s 时,激光器频率稳定度为  $3.78 \times 10^{-8}$ 。其稳定度都在  $10^{-8}$  量级上,与激光器的出厂指标(稳定度为  $1 \times 10^{-8}$ ,积分时间为 1 s 时)一致。

定义参考激光器引入的测量相对误差为

$$\gamma = \frac{\sigma_y(\tau) - \sigma_c(\tau)}{\sigma_y(\tau)} = 1 - \frac{\sigma_c(\tau)}{\sqrt{\sigma_c^2(\tau) + \sigma_d^2(\tau)}} \quad (15)$$

当  $\frac{\sigma_c(\tau)}{\sigma_d(\tau)} = 1$  时,  $\gamma = 29.3\%$ ; 当  $\frac{\sigma_c(\tau)}{\sigma_d(\tau)} = 2$  时,

$\gamma = 10.6\%$ ; 当  $\frac{\sigma_c(\tau)}{\sigma_d(\tau)} = 3$  时,  $\gamma = 5.1\%$ ; 当  $\frac{\sigma_c(\tau)}{\sigma_d(\tau)} = 5$

时,  $\gamma = 1.9\%$ 。

图 7 给出了测量相对误差相对于  $\frac{\sigma_c(\tau)}{\sigma_d(\tau)}$  的变化曲线,可见只要当参考激光器的频率稳定度高于待测激光器 3 倍以上时,测量结果就已经具备了足够的精确度。但是如果激光器本身就具有极高的稳定度,要寻找一个优于被测激光器 3 倍的参考源是比较困难的。

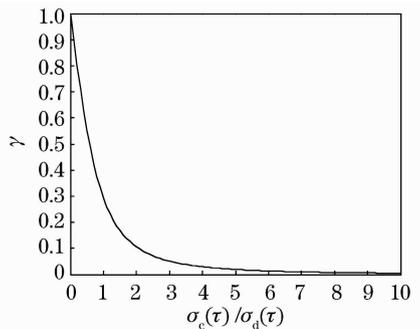


图 7 参考激光器对测量相对误差的影响

Fig. 7 Influence of reference laser on relative measurement error curve

实际上,激光频率稳定度的测量并不要求有很高的测量精度,人们更关心的是其数量级。即使测量系统本身不引入任何测量误差,但随着激光器内部和外部条件的变换,不同时间激光器频率稳定度的测量值也会有所波动,波动的范围在 20% 内都是正常的。因此提到激光器频率稳定度时通常说明是

其数量级,不会刻意强调精确到小数点后第几位。当测量的积分时间很长时,如积分时间在 100 s 及以上时,为了缩短测量时间,取测量采样次数  $N=30$ ,这也增加了测量误差。同时,本方法不仅适用于两台同类型号激光器稳定度测量,也同样适用于拍频的两台激光器输出波长严格一致的情况。

## 5 结 论

将拍频法运用到两台同类型号激光器稳定度的测量中。根据两台同类型号独立激光器拍频的理论模型,推导得到了拍频信号稳定度与待测激光器和参考激光器稳定度满足平方和关系的结论。根据测量拍频信号的稳定度实现待测激光器稳定度的测量。实验中将 New Focus 公司生产的两台同类型号激光器进行拍频,测得待测激光器稳定度为  $1.36 \times 10^{-8}$ ,频率漂移量为 5.1 MHz(1 s 积分时间)。实验结果与激光器出厂指标[稳定度为  $1 \times 10^{-8}$ ,频率漂移量为 5 MHz(1 s 积分时间)]相比,频率稳定度在相同量级,频率漂移量相对误差为 2%。避免了通常测量激光器稳定度时需要高稳定度参考光源的问题,为激光器稳定度的测量提供了一定的参考。

## 参 考 文 献

- Zhou Tianhong, Jiang Shan, Ren Hailan *et al.*. Research development of tunable lasers for optical communication systems [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2004, **17**(5): 1~5  
周天宏,江山,任海兰等. 光通信用可调谐激光器技术研究发展[J]. *光电子技术与信息*, 2004, **17**(5): 1~5
- Wu Chengbin, Gu Yuan, Wang Jiaying *et al.*. Technology and usage of tunable laser in DWDM systems [J]. *Technology of Optical Communication*, 2003, **27**(6): 29~32  
武成宾,古渊,王加莹等. 可调谐激光器技术及其在 DWDM 系统的应用[J]. *光通信技术*, 2003, **27**(6): 29~32
- E. D. Black. An introduction to pound-drever-hall laser frequency stabilization[J]. *Am. J. Phys.*, 2001, **69**(1): 79~87
- Wang Lixia, Jiang Yanyi, Bi Zhiyi *et al.*. Laser frequency stabilization based on control of intermode beat note[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1198~1202  
王丽霞,蒋燕义,毕志毅等. 基于纵模拍频控制的激光稳频技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1198~1202
- Gan Xiaocui, Liu Lianfu. Measurement of stabilization of

- frequency[J]. *Information Technology*, 2008, (6): 121~124  
甘晓翠,刘镰斧. 频率稳定度的测量[J]. *信息技术*, 2008, (6): 121~124
- Cao Xiangke, He Yao, Zhang Rongzhu. Experiment on beat frequency between two independent different types of laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 284~289  
曹翔科,何耀,张蓉竹. 两种不同类型独立激光器的拍频实验[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 284~289
- Liang Jing, Long Xingwu. Stability analysis of beat frequency in double-longitudinal-mode He-Ne laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1301~1304  
梁晶,龙兴武. 双纵模 He-Ne 激光器的拍频稳定度分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1301~1304
- A. Debut, S. Randoux, I. J. Zermour. Line-width narrowing in Brillouin lasers: Theoretical analysis[J]. *Phys. Rev. A*, 2000, **62**(2): 023803
- Yuan Dandan, Hu Shuling, Liu Honghai *et al.*. Research of laser frequency stabilization [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(8): 081401  
苑丹丹,胡妹玲,刘宏梅等. 激光器稳频技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(8): 081401
- Zhang Bin, Long Xingwu, Liu Jianping *et al.*. Lamb-dip frequency-stabilized He-Ne laser with an integrated cavity made of zerdur(D): structure and techniques[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0814005  
张斌,龙兴武,刘贱平等. 微晶玻璃腔体一体化兰姆凹陷稳频 He-Ne 激光器(D): 结构与工艺[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0814005
- Yin Cong, Qian Jin, Zhang Xiaoping *et al.*. Frequency stabilization by polarization spectroscopy based on Cr hollow cathode discharge[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1015001  
殷聪,钱进,张小平等. 基于 Cr 空心阴极放电的偏振光谱稳频技术[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1015001
- R. K. Shelton, L. S. Ma, H. C. Kapteyn *et al.*. Phase-coherent optical pulse synthesis from separate femtosecond lasers [J]. *Science*, 2001, **293**(5533): 1286~1289
- L. S. Ma, Z. Y. Bi, A. Bartels *et al.*. Optical frequency synthesis and comparison with uncertainty at the  $10^{-19}$  level[J]. *Science*, 2004, **303**(5665): 1843~1845
- Zhang Hui, Jin Yuwen, Li Yan. Time domain characterize of frequency stability-Allan variance [J]. *Metrology Test Technology*, 2001, (s1): 192~193  
张晖,金玉雯,李研. 频率稳定度的时域表征-阿伦方差[J]. *计量测试*, 2001, (s1): 192~193
- Peng Qizhong, Zhang Youzheng. Characterization of frequency stability: the confidence of estimated Allan variance[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1983, **11**(3): 1~8  
彭启琮,张有正. 频率稳定度描述: Allan 方差估值的置信度问题[J]. *电子学报*, 1983, **11**(3): 1~8
- Thomas Böttger. Laser Frequency Stabilization to Spectral Hole Buring Frequency References in Erbium-Soped Crystals Material and Device Optimization [D]. Bozeman: Montana State University, 2002