

文章编号: 0258-7025(2009)02-0285-05

两种不同类型独立激光器的拍频实验

曹翔科 何 耀 张蓉竹

(四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要 利用一个中心波长范围 1052.82~1053.12 nm 的可调谐半导体激光器和一个波长范围为 1053.10~1053.20 nm 的窄线宽光纤激光器进行拍频实验。介绍了拍频信号探测的基本原理,设计了实验光路,经过宽频放大器进行信号放大后,采用高频示波器观察到周期 10 ns,信号振幅 4 mV 左右的稳定拍频信号,实现了两种不同类型独立激光器输出光束的拍频测量。利用分光棱镜和 F-P 腔扫描干涉仪设计了一个两激光光束频率实时对准装置,可以在拍频测量的同时进行激光频率相对漂移的监控,解决了快速频率对准问题。并针对激光器自身频率稳定性较低的情况,提出了采用计算机自动控制实现自动频率对准与频率跟踪的方案。

关键词: 激光技术;拍频;独立激光器

中图分类号 TN24 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20093602.0285

Experiment on Beat Frequency between Two Independent Different Types of Laser

Cao Xiangke He Yao Zhang Rongzhu

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

Abstract An experiment on beat frequency between two independent beams generated by two different types of laser was carried out. One is a wavelength tunable semiconductor laser with central wavelength tunable range of 1052.82~1053.12 nm, and the other is a narrow line width fiber laser with wavelength of 1053.10~1053.20 nm. The fundamental principle of beat frequency signal detection is introduced, and the experimental setup is established. Stable and repeatable beat frequency signal with a period of approximate 10 ns and amplitude of 4 mV is achieved by high frequency oscillograph after amplified by wide-frequency amplifier. Beamsplitting prism and an F-P cavity sweep interferometer are utilized to achieve real-time frequency alignment which can monitor relative frequency shift and measure beat frequency simultaneously. A scheme of auto alignment through computer control is proposed in case of low laser frequency stability.

Key words laser technique; beat frequency; independent beams

1 引言

激光光束合成是获取高能量输出的一种有效方法^[1],而相干合成是目前激光技术发展的一个重要方向^[2]。目前已见报道的相干合成技术主要集中在半导体阵列的锁相合成上^[3,4],另外还有少量同类型激光器的相干合成研究报道^[5]。如果使用一个外接电子系统进行相位控制,就可以突破合成技术对

激光器种类的限制^[6]。要想实现不同类型激光的相干合成,需要严格的频率和相位控制。这其中牵涉到很多复杂的技术,比如激光器的高度稳频和可调谐能力、光波相位的高速测量与相位延迟的高速控制等。

通过激光的拍频实验,可以了解两束激光的频率特性,对了解光场的频率波动和相位噪声也有帮助,是进行激光稳频控制技术的重要方案^[7],也是光

收稿日期:2008-06-04;收到修改稿日期:2008-06-11

基金项目:国家自然科学基金(60508002)资助项目。

作者简介:曹翔科(1984-),男,四川人,硕士研究生,目前主要从事光电子技术方面的研究。

E-mail: ritchie_cxk@hotmail.com

导师简介:张蓉竹(1975-),女,四川人,副教授,博士,目前主要从事光电子技术及精密光学检测方面的研究。

E-mail: zhang_rz@scu.edu.cn

束相干合成技术的重要组成部分^[8,9]。由于不同类型激光器的发光机制不尽相同,光谱特性差异较大,因此目前激光的拍频实验研究,一般说来都使用同一个激光的两个纵模^[10],或同类型的两个独立激光器,如常见的 He-Ne 或半导体激光器^[11]。而采用两种不同类型的激光器进行拍频实验,还很少见到相关报道。

本文利用两种不同类型的激光器(半导体激光器和光纤激光器)进行拍频实验,观测到由于两束激光特性类似而被部分淹没的影响,如果一束激光的光束特性(主要是带宽)相对另一束小很多,就能够相对忽略掉它的影响,从而在拍频实验中较真实反映出另一束激光的特性。对于带宽的测量,由于两束光的带宽的叠加是两个非相关量的叠加,所以在实际测量中一束光的带宽比另一束小 10 倍,就可以忽略它的影响。

2 基本理论

理想激光的光电场复振幅表示为: $\mathbf{E}(t) = E\cos(\omega t + \varphi)$, 其中三个特征参量为振幅 E , 频率 ω 和相位 φ 。两束由不同激光器产生的激光, 三个参量都不同, 分别表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_1(t) &= E_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \\ \mathbf{E}_2(t) &= E_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2). \end{aligned} \quad (1)$$

当两束激光传输过程中在空间上重合时, 如果两束光的相位关系固定, 则可以产生拍频。

在测量过程中, 两束激光的电场复振幅 $\mathbf{E}_1(t)$ 和 $\mathbf{E}_2(t)$ 同时进入光电探测器时, 由于光电探测器响应的是光强, 是电场复振幅平方和的时间积分, 即

$$\begin{aligned} I(t) &= [\mathbf{E}_1(t) + \mathbf{E}_2(t)]^2 = \\ &E_1^2 \cos^2(\omega_1 t + \varphi_1) + E_2^2 \cos^2(\omega_2 t + \varphi_2) + \\ &E_1 E_2 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \cos(\omega_2 t + \varphi_2) = \\ &E_1^2 \cos^2(\omega_1 t + \varphi_1) + E_2^2 \cos^2(\omega_2 t + \varphi_2) + \\ &\frac{1}{2} E_1 E_2 \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2)] + \\ &\frac{1}{2} E_1 E_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)]. \end{aligned} \quad (2)$$

对于光波而言, ω_1 和 ω_2 以及 $\omega_1 + \omega_2$ 在 10^{14} 量级, 大大高于光电探测器的响应频率。而对于拍频项 $\frac{1}{2} E_1 E_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)]$, 在两束光波频率接近的时候, $\omega_1 - \omega_2$ 可能达到光电探测器的截止频率以内, 这样探测器可以响应。通过拍频过程, 把探测器不能响应到的高频信息转换到低频以后,

分析输出信号, 可以了解原始光场的部分信息。

对于现有光电探测器而言, 一般只能响应到吉赫兹量级的电场振荡。而(2)式中的前三项总都是大于 10^{12} Hz 的超高频项, 因此探测到的是它们的时间平均值。由于第三项的时间平均值是零, 所以实际测量到的是 $E_1^2 + E_2^2(t)$, 即两束激光光强的叠加。

在光电探测器后面加入一个 10 MHz~2 GHz 的前置放大器, 则可以滤除 $I(t)$ 的前三项, 当 $\omega_1 - \omega_2$ 在 10 MHz~2 GHz 区间内时, 观察到光电探测器响应到的拍频项产生的电压输出

$$u(t) \propto \frac{1}{2} E_1 E_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)]. \quad (3)$$

在实际测量过程中, 要将两束激光的频率差控制在吉赫兹以内, 需要相对较高的频率控制技术。首先, 两束激光本身都需要相对稳定的自身频率稳定, 以保证 ω_1 和 ω_2 不是一个随时间快速变化的量, 从而能够得到频率稳定的拍频信号。然后还需要两束激光的波长尽可能地接近, 从而使 ω_1 和 ω_2 的差小于 1 GHz。

由于波长和频率的乘积等于光速(不考虑介质折射率)。 $\nu = c/\lambda$, 两边求一阶导数, 有

$$\Delta\nu = (-c/\lambda^2)\Delta\lambda, \quad (4)$$

则根据计算, 对于波长在 1000 nm 附近的光波, 要使 ω_1 和 ω_2 的差小于 1 GHz, 需要波长差小于 3×10^{-12} m, 即 0.003 nm。这是非常小的一个量级, 因此, 需要借助外加的设备来探测并精确调整激光器的输出波长。

另外, 还要求激光线宽要窄, 以保证输出激光相干时间大于探测器响应时间, 激光束之间具有相对稳定的相位关系。如果是理想的单频激光, 只包含唯一的频率, 因此两束理想激光的差频结果会是单频的正弦波。但是由于实际的激光存在频率线宽, 包含许多临近的波长, 所以观察到的是由激光器线宽调制后的调制正弦波。

3 快速频率对准问题

单模激光器产生的激光, 通过 F-P 腔扫描干涉仪后, 在它的自由谱宽内显示为一个干涉峰。调整激光器的输出频率, 干涉峰会左右移动, 这样就可以在输出激光的频率变化与自由光谱内的干涉峰移动之间, 建立起对应关系。对于两束激光, 以其中一束光的频率为参考频率, 测量两路激光干涉峰的位置

以及距离,就可以产生频率差信号,以此来对准两束光的频率,或者驱动频率跟踪(锁定)环路。本实验基于 F-P 腔扫描干涉仪来进行两束光的频率对准。

F-P 腔扫描干涉仪自由谱宽的选取:1)由于在两束激光的频率差大于 F-P 腔扫描干涉仪的自由谱宽的情况下,会出现虽然观察到两束激光的干涉峰重叠,但是实际频率存在自由谱宽的整数倍的差别的现象,所以需要选择的 F-P 腔扫描干涉仪的自由谱宽大于两束激光各自的频率精度范围。2)如果 F-P 腔扫描干涉仪的自由谱宽过大,由于精细常数不能无限提高,所以即使干涉峰重叠,实际两束激光的频率差仍很大。对于示波器以及所采用的放大器最高吉赫兹量级的响应频率,过大的频率差会导致无法响应。3)对于激光器自身频率对准精度特别低的情况,可以采用一个以上的 F-P 腔扫描干涉仪来进行多级频率对准。先用大的自由谱宽来保证同样的干涉级次,再传递到下一级来逐步精确对准频率,直到需要的频率精度。综上所述,需要选择合适的 F-P 腔扫描干涉仪参数,以满足实际实验需要。

实验中,激光器的最大自身频率对准精度不超过 5 GHz,选用的 F-P 腔扫描干涉仪的自由谱宽是 4 GHz,精细常数 200。优先保证了两束激光相互频率对准的精度,虽然自由谱宽低于所需,但是干涉级次差在 ± 1 以内,也能够保证最多 3 次测量,就可以观察到拍频现象。

由于激光器的输出频率不可避免地存在漂移,所以需要考虑频率对准随时间的变化。对于测量拍频信号,只需要在频率对准以后立即测量,就不存在能够观察到的影响。如果激光器的频率漂移比较大,或者需要在比较长的时间范围内保证测量精度,可以利用 F-P 腔扫描干涉仪来设计自动频率跟踪环路。用计算机分析两个干涉峰之间的距离,比对前一时刻的频谱图样,产生控制信号来调节其中一个激光器的输出频率。由于激光器的频率漂移是一个相对缓慢的过程,所以很容易通过测量 F-P 腔扫描干涉仪的两个干涉峰的位置关系,来进行频率跟踪。

本实验采用的两台激光器,一台具有精确稳频功能,频率稳定度与精度都高于 100 MHz;另外一台经测量,频率漂移 500 MHz 所需的典型时间为 5 min,最小值不大于 1 min。可以在无自动频率跟踪机制的情况下运行。

4 实验

实验用的两台激光器,一台是 New Focus 公司生产的中心波长为 1053 nm,波长从 1052.82~1053.12 nm 可调的高精度可调谐稳频半导体激光器,线宽小于 300 kHz。另一台是波长调谐范围从 1053.10~1053.20 nm 的国产窄线宽光纤激光器。

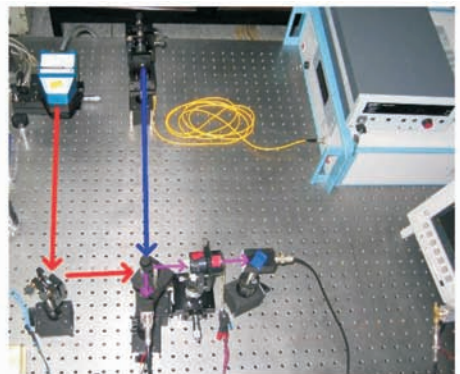
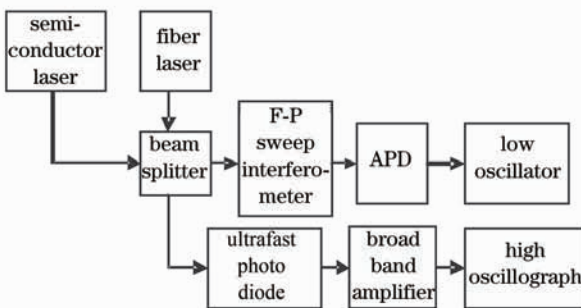


图 1 实验设置

Fig. 1 Experimental setup

实验设置如图 1 所示,两束激光经过精确准直以后,垂直入射到分光棱镜上。通过棱镜后,合成光束的一部分用于监控两束光的纵模重合情况,微调半导体激光器的输出波长,以匹配光纤激光器;合成光束的另一部分则直接入射到高速光电二极管感光面上,通过宽带高通前置放大器后输出拍频信号。

首先将两台激光器的工作频率设置为大致相同(~ 1053.10 nm)。通过 F-P 腔扫描干涉仪、低速光电探头,在一低频示波器观察到它们的输出波长谱线。由于两台激光器都是稳定的单模输出,因此在示波器上观察到的 F-P 腔扫描干涉仪的一个自由光谱区内,只能观察到两台激光器各自对应的一个

干涉峰及其纵模谱线,如图 2(a)所示。

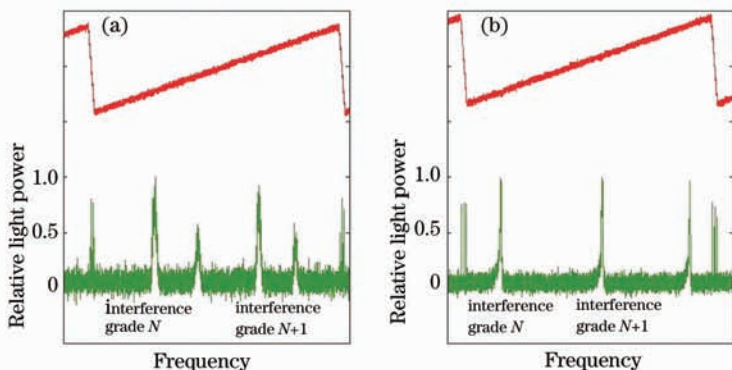


图 2 光束通过 F-P 腔扫描干涉仪形成的干涉峰

Fig. 2 Interference peaks of two beams on F-P sweep interferometer

图 2 上方的折线,是驱动 F-P 腔扫描干涉仪的压电陶瓷的锯齿波电压。仔细调整半导体激光器的输出频率,使两台激光器的输出谱线在 F-P 腔扫描干涉仪的测量精度内重叠,如图 2(b)所示。当低频

示波器监视到两光束频率基本重合后,就可以通过频率微调在分光棱镜的另一输出光路上用高速示波器探测到拍频波形。

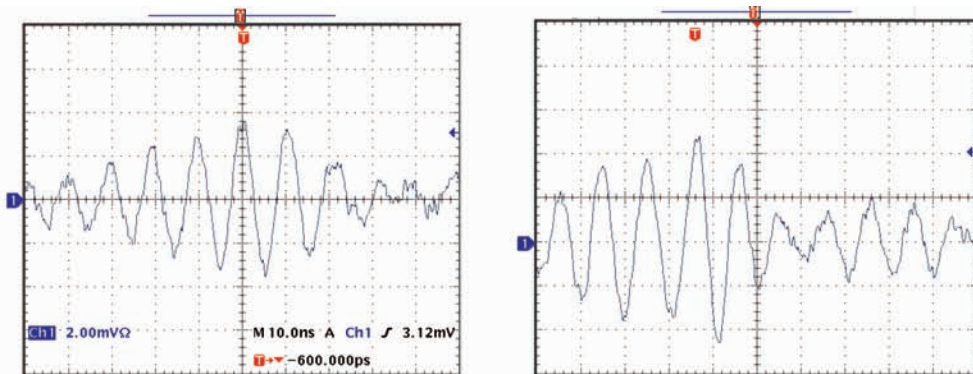


图 3 用高频数字示波器捕捉到的差频波形

Fig. 3 Beat frequency waveform captured by high frequency digital oscilloscope

图 3 给出了两次实验测量得到的拍频信号,周期~10 ns,对应频率 100 MHz,即两光波频率差 100 MHz,输出信号振幅 4 mV,由于示波器一次显示周期有限,只给出了一个周期信号。由于两光波本身在未放大的时候光电探测器输出电压大致为 1 mV,混频信号振幅应该是两光波振幅的积再开方的一半。放大 10 倍后应该在 5 mV 左右,实验结果满足理论预测。

捕捉拍频信号时,把示波器设置为单次触发工作状态。由于噪声会引起输出光电平的波动,所以将触发电平设置在非拍频条件下,长时间测量到的电平最大值的 1.5 倍,以避免捕获到噪声带来的电平波动。

5 结 论

采用 F-P 腔扫描干涉仪频率对准技术,实现了两种不同激光器产生的激光的拍频实验,在使用单次触发设置状态下进行信号采集时,在整个示波器显示时间内(2 μs)可观察到稳定的拍频信号。通过该信号可以进一步获得两光束的相位信息,为下一步相位控制和调制提供基础。

参 考 文 献

- 1 Gao Xin, Bo Baoxue, Zhang Jing *et al.*. High brightness operation of fiber coupling multiplex diode lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11):1472~1475
高欣,薄报学,张晶等.多单元半导体激光器的高亮度光纤耦合输出[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11):1472~1475
- 2 Lei Bing, Feng Ying, Wei Lian *et al.*. Study and development of coherent addition techniques of laser beam [J]. *Chinese*

- Journal of Quantum Electronics*, 2007, **24**(4):407~414
- 雷兵,冯莹,魏立安等. 激光束相干合成技术的研究进展[J]. 量子电子学报, 2007, **24**(4):407~414
- 3 D. R. Scifres, R. D. Burnham, W. Streifer. Phase locked semiconductor laser array [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **33**(12):1015~1017
 - 4 V. V. Apollonov, S. I. Derzhavin, V. I. Kislov *et al.*. Spatial phase locking of 4 and 12 wide-aperture semiconductor laser diodes in an external cavity [J]. *Quantum Electron*, 1998, **28**(3): 257-263
 - 5 S. Ménard, M. Vampouille, B. Colombeau *et al.*. Highly efficient phase locking and extracavity coherent combination of two diode-pumped Nd:YAG laser beams [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24):1996~1998
 - 6 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
 - 7 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
 - 8 Zhen Qing, An Jiaying, Wang Yuchen. Beat frequency measurement on a 4.3 micro-meter frequency stabilized CO₂ laser and its stability [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1986, **7**(2):90~94
郑青,安家莺,王玉臣. 4.3 μm 荧光稳频的 CO₂ 激光器及其频率稳定度的拍频测量[J]. 计量学报, 1986, **7**(2):90~94
 - 9 Xiao Rui, Hou Jing, Jiang Zongfu *et al.*. Experimental research of coherent combining of three fiber amplifiers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(12):6464~6469
肖瑞,侯静,姜宗福等. 三路光纤放大器相干合成技术的实验研究[J]. 物理学报, 2006, **55**(12):6464~6469
 - 10 Zhou Zhaofei, Zhang Tao, Zhu Mucheng *et al.*. Research on the laser beat-wave interferometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):101~104
周肇飞,张涛,朱目成等. 双纵模激光拍频干涉仪的研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(1):101~104
 - 11 Du Xiaocheng, He Zhenchuan, Tang Shulan. Measurement of spectral linewidth of semiconductor lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 1987, **14**(3):167~171
杜筱诚,何震川,唐树兰. 半导体激光器谱宽的测量研究[J]. 中国激光, 1987, **14**(3):167~171