

文章编号: 0258-7025(2004)08-0935-04

采用射频频率调制光谱实现半导体 激光器稳频

赵建明, 尹王保, 赵延霆, 肖连团, 贾锁堂

(山西大学物理电子工程学院量子光学和光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要 利用半导体激光器可直接对注入电流进行高速调制的特点, 将 20 MHz 射频(RF)信号直接加在半导体激光器的高频调制端口, 射频信号的一部分经过相移器后, 与雪崩光电探测器(APD)所探测的饱和吸收光谱信号进行混频, 经低通滤波器后产生了类色散曲线; 将半导体激光器的输出频率稳定在铯原子 D_2 线的 ${}^6S_{1/2}(F=4) \rightarrow {}^6P_{3/2}(F'=5)$ 的超精细跃迁线上, 实验所测的 10 s 内典型的频率起伏小于 1 MHz; 这种稳频技术不需锁相放大器, 具有可避免低频段较高的强度噪声和较大的频率捕获范围的优点。

关键词 激光技术; 射频调制; 频率稳定; 铯原子; 半导体激光器

中图分类号 TN 248.4 **文献标识码** A

Frequency Locking of a Semiconductor Laser via Radio-Frequency Modulation Spectrum

ZHAO Jian-ming, YIN Wang-bao, ZHAO Yan-ting, XIAO Lian-tuan, JIA Suo-tang

(The State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,

College of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract The injection current of the diode laser can be modulated by radio-frequency (RF) signal. The RF signal of 20 MHz is input to the high frequency modulation port of diode laser, and part of it is phase shifted and mixed with the saturated absorption spectral signal then input to the low-pass filter. The resulted similar dispersion signal is used to stabilize the frequency of laser to ${}^6S_{1/2}(F=4) \rightarrow {}^6P_{3/2}(F'=5)$ transition of cesium atom and the frequency stability is better than 1 MHz in 10 s. The stabilization technology has the characteristics of lower intensity noise and higher frequency capture range.

Key words laser technique; radio-frequency modulation; frequency stabilization; cesium atom; semiconductor laser

1 引 言

半导体外腔激光器体积小、波长覆盖范围大且易于调谐和调制, 被广泛地应用在光纤通信、光信息读写、激光光谱和中性原子的激光冷却与俘获等领域中^[1]。不同的实验对激光频率的稳定性的要求不同, 所以人们采用不同的方法对激光器稳频, 如利用反射光谱产生的亚多普勒吸收信号和饱和吸收光谱进行稳频^[2,3]等。Pound-Drever 稳频技术是 Drever

等^[4]首先提出的, 实验中将单频激光器的输出激光, 由位相调制器进行射频调制后, 入射到 F-P 腔, 由雪崩光电探测器(APD)探测 F-P 腔反射的信号, 利用混频器将调制信号与雪崩光电二极管探测信号混频, 产生类色散信号, 经电子反馈系统将激光器频率稳定在 F-P 腔的峰上。之后, 其他研究小组利用这种技术对其他激光器进行稳频的研究^[5,6]。文献^[6]将半导体激光器输出的 792 nm 激光经过射频调制的电光调制器, 利用 Pound-Drever 稳频技术将

收稿日期: 2003-05-15; 收到修改稿日期: 2003-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(60078009, 10174047)和山西省青年科学基金资助项目。

作者简介: 赵建明(1966—), 女, 山西大学物理电子工程学院博士研究生, 主要从事激光光谱和量子光学方面的理论与实验研究。E-mail: zhaojm@sxu.edu.cn

激光器的频率稳定在腔内 H_2 的 Raman 吸收线上。但是有些实验如电磁诱导透明等实验要求将激光器的输出频率稳定在原子或分子跃迁线上。

我们利用半导体激光器可通过直接对注入电流进行高速调制的特点,将射频(RF)信号直接加在半导体激光器的高频调制端口,利用 Pound-Drever 射频频带技术将半导体激光器的输出频率稳定在铯原子 D_2 线的超精细跃迁线上。这种稳频技术可以避免低频段较高的强度噪声,不需锁相放大器,同时由射频频带所产生的误差信号有较大的频率捕获范围,有利于激光器的稳频。与文献[6]相比,射频信号直接加在激光器的调制端口,无需使用光电调制器,使稳频回路得以大大简化,并将激光频率直接稳定在原子的跃迁线上。

2 实验原理

射频频带 Pound-Drever 稳频的理论在文献[5]中作了详尽的研究。将射频信号加在激光器的射频频带调制端口,根据射频频带理论,在调制光谱中包含有边带信号。对于正弦位相调制,其已调制振荡的位相多了一个与调制信号成正比例的增量,所以激光已调制振荡的瞬时电场可表示为

$$E(t) = \frac{E_0}{2} \exp\{i[\omega t + N\sin(\omega_n t)]\} + \frac{E_0}{2} \exp\{-i[\omega t + N\sin(\omega_n t)]\} \quad (1)$$

式中 ω 为激光器输出的未经调制的激光频率, ω_n 表示射频频带调制频率, N 为位相调制指数。利用贝塞耳函数表示调制光谱的频率成分

$$E(t) = \frac{E_0}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(N) \exp[i(\omega + k\omega_n)t] + \frac{E_0}{2} \exp[-i(\omega + k\omega_n)t] \quad (2)$$

由上式可以看出由于对激光器的射频频带调制,产生了许多新的频率组份,即所谓的本征频率 ω 的边带,每个频率组份间的频率间隔为 ω_n 。在调制深度较浅的情况下,可忽略掉二阶及二阶以上的边带,所以典型的频率调制光谱一般只包含一对边带,如图 1 所示。由文献[5]可知,经样品后的吸收信号与射频频带混频后,即可产生用于稳频的类色散信号。

3 实验装置

将 20 MHz 的射频信号对外腔式可调谐半导体

激光器(New Focus 6017)进行调制,利用铯原子的饱和吸收光谱将激光频率稳定在铯原子 ${}^6S_{1/2}(F=4) \rightarrow {}^6P_{3/2}(F'=5)$ 的超精细跃迁线上。利用调制边带技术实现半导体激光器频率稳定的实验装置如图 2 所示。激光器输出的激光经隔离器(New Focus 5568),其隔离比约为 40 dB,采用 New Focus 5414 棱镜对对激光束整形,输出激光束直径大约为 1.5 mm;经分束镜将其分成两束,一束用于主光路,另一束约 2 mW 用于饱和吸收光谱并产生误差信号。

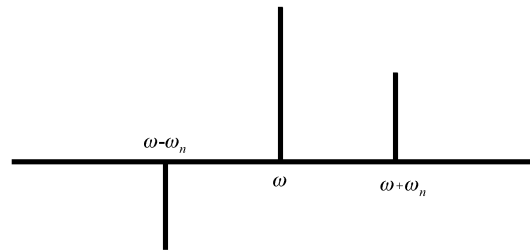


图 1 RF 调制产生的边带信号

Fig. 1 Sideband of RF modulation

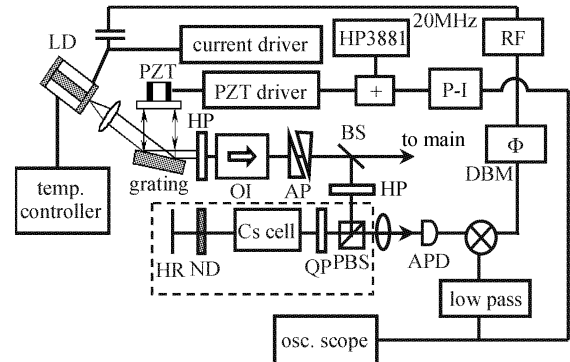


图 2 实验装置

虚线框表示饱和吸收光谱的光路

LD: 半导体激光器; OI: 光隔离器; AP: 整形棱镜; BS: 偏振分光棱镜; HR: 全反镜; ND: 中性衰减片; P-I: 比例积分电路; QP: $\lambda/4$ 片; DBM: 双平衡混频器

Fig. 2 Experimental setup

the dashed box denotes the saturated absorption part

LD: diode laser; OI: optical isolator; AP: anamorphic prisms; PBS: polarization beam splitter; HR: high reflected mirror; ND: attenuation plate; P-I: proportion integral circuit; QP: $\lambda/4$ plate; DBM: double balance mixer

由虚线框内所示的饱和吸收装置产生的饱和吸收信号由 APD(Hamamatsu C5331, 10 kHz~100 MHz)接收,由信号发生器产生(HP3881)的 10 Hz 三角波加在激光器的光栅外腔的压电陶瓷(PZT)上,扫描电压在 50~100 mV 之间,同时将射频信号

发生器产生的 20 MHz 射频信号加在激光头的射频调制端(激光器的高频调制端允许的调制频率为 10 kHz~100 MHz)。将射频信号分出一部分经过相移器后,与 APD 所探测的饱和吸收信号进行混频,由理论可知,经低通滤波器所产生的信号即是用于稳频的类色散误差信号。将此信号分为两部分,一部分送入示波器进行检测,另一部分送入比例积分电路,用于改变误差信号的强度和积分时间,比例积分电路的输出信号与 10 Hz 的三角波扫描信号经加法器后送入激光器的频率调制端口。

4 实验结果和分析

实验中选择高频调制信号的频率为 20 MHz,由上述装置产生的混频信号如图 3 所示,由图可知由高频调制产生的误差信号比由锁相放大器产生的鉴频曲线的范围大,这样在稳频过程中的频率捕获范围大,有利于频率的稳定。

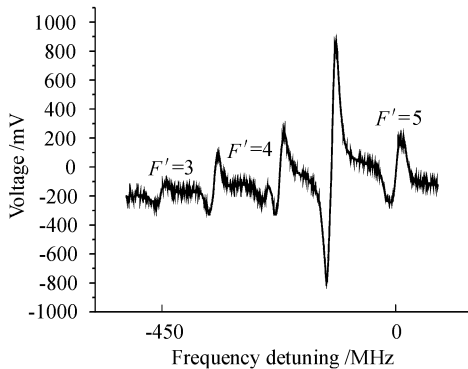


图 3 RF 调制产生的 ${}^6S_{1/2}(F=4) \rightarrow {}^6P_{3/2}$ 类色散信号
Fig. 3 Similar dispersion signal of ${}^6S_{1/2}(F=4) \rightarrow {}^6P_{3/2}$ with the RF of 20 MHz

若选择 ${}^6S_{1/2}(F=4) \rightarrow {}^6P_{3/2}(F'=5)$ 的超精细跃迁线作为参考频率,通过减小激光器的扫频范围,使其仅扫出 $F=4 \rightarrow F'=5$ 的跃迁线和 $F=4 \rightarrow F'=4,5$ 的交叉线,如图 4(a)所示。由于 $F=4 \rightarrow F'=5$ 的跃迁线和 $F=4 \rightarrow F'=4,5$ 的交叉线之间的频率间隔为 125.5 MHz,可以估测对应 $F=4 \rightarrow F'=5$ 的跃迁线中间近线性部分的频率跨度为 26 MHz,测得其对应纵轴方向的电压幅度为 375 mV,斜率为 14.4 mV/MHz。

继续减小激光器的扫频范围,并配合调节激光器驱动电流,使所选定的参考频率标准对应的类色散信号一直处在示波器的中央,如铯原子 ${}^6S_{1/2}(F=4) \rightarrow {}^6P_{3/2}(F'=5)$ 的跃迁线;并仔细检查类色散信

号的中心点是否有偏移,可以通过调节比例积分电路的直流偏置对其进行补偿。图 4(b)为 ${}^6S_{1/2}(F=4) \rightarrow {}^6P_{3/2}(F'=5)$ 的类色散信号。将扫描电压减小到零,并将扫描电压关断,将纠偏信号馈入光栅外腔的压电陶瓷上,实现闭环锁定。适当调节比例积分电路的增益和积分时间以便获得稳定的激光频率。

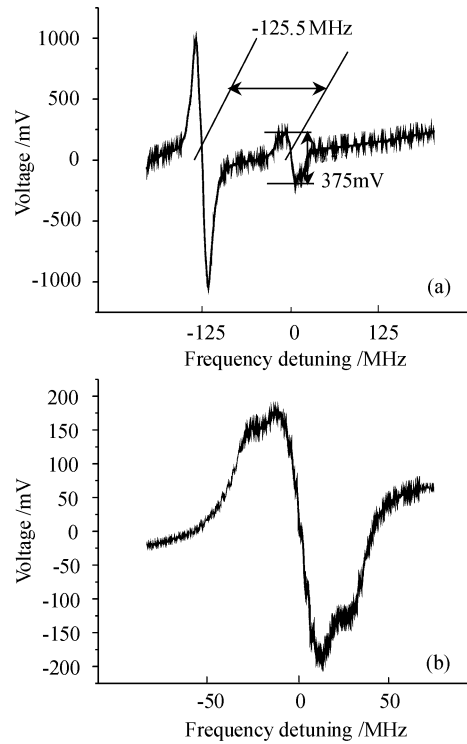


图 4 RF 调制产生的类色散信号
(a) $F=4 \rightarrow F'=5$ 的跃迁和 $F=4 \rightarrow F'=4,5$ 的交叉线;
(b) $F=4 \rightarrow F'=5$ 的跃迁
Fig. 4 Similar dispersion signal
(a) transition of $F=4 \rightarrow F'=5$ and crossover of $F=4 \rightarrow F'=4,5$; (b) transition of $F=4 \rightarrow F'=5$

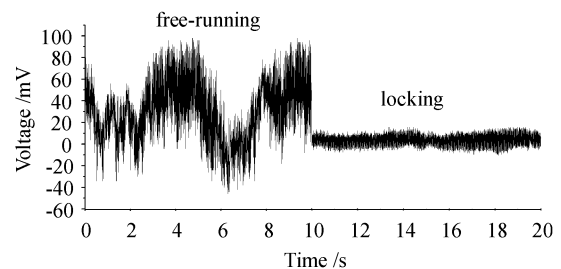


图 5 稳频前后的误差信号
Fig. 5 Error signal before and after stabilization

图 5 为外腔反馈激光器在自由运转和闭环锁定时对应的误差信号,记录时间分别为 10 s。在自由运转时可以看到其频率起伏较大,由图中误差信号

起伏的电压幅度可估算得对应的激光频率起伏约 9 MHz。而在闭环锁定后,估算得对应的激光频率起伏在 1 MHz 以下。这表明激光器的频率起伏得到了明显的抑制。这样的频率稳定度已可以满足电磁诱导透明和激光冷却原子实验的要求。

5 结 论

利用 20 MHz 的射频信号对激光器进行高频调制,由射频边带信号产生的误差信号对外腔半导体激光器进行稳频,获得了优于 1 MHz 的频率稳定度,达到了进行电磁诱导透明和激光冷却原子实验的要求。这种稳频技术具有可避免低频段较高的强度噪声,不需价格昂贵的锁相放大器以及误差信号的捕获范围大的优点,有利于激光器的稳频。

参 考 文 献

- 1 C. E. Wieman, L. Hollberg. Using diode lasers for atomic physics [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**(1):1~19
- 2 R. N. Li, S. T. Jia, R. Loe-Mie *et al.*. Novel schemes for laser diode frequency stabilization onto atomic references [J]. *Laser Physics*, 1998, **8**(3):670~672
- 3 Wang Junming, Zhang Tiancai, Xie Changde *et al.*. Frequency-offset locking of LD to hyperfine transition of Cs atoms [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(3):248~252
王军民,张天才,谢常德等. LD 相对于铯原子超精细跃迁线的偏频锁定[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(3):248~252
- 4 R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski *et al.*. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator [J]. *Appl. Phys. B*, 1983, **31**:97~105
- 5 E. D. Black. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization [J]. *Am. J. Phys.*, 2001, **69**(1):79~87
- 6 L. S. Meng, K. S. Repasky, P. A. Roos *et al.*. Widely tunable continuous-wave Raman laser in diatomic hydrogen pumped by an external-cavity diode laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(7):472~474

征 订 启 事

《光学手册》

顾问:龚祖同 主编:李景镇 陕西科学技术出版社 16开 1541页 定价:100.00元

本手册是我国编写的第一本基础性大型光学手册。全书有 2700 多个公式,1400 余幅插图和 400 多个数据表格,230 万字。手册包括 25 个光学分科(辐射度学和光度学,色度学,光谱学,光源,成像光学,信息光学,量子光学,统计光学,分子光学,非线性光学,光的偏振,光学薄膜和滤光片,纤维光学和变折射光学,集成光学,视觉光学,大气光学,海洋光学,高速摄影和光子学,显微物镜和目镜,光学调制器,热探测器和光电探测器,感光材料,光学计量仪器,光学材料,光学工艺学),5 个附录,2 个索引。由 20 多位光学专家编撰完成,在编写过程中得到了龚祖同、王大珩、侯洵、薛鸣球等著名光学专家的指导和帮助,保证了该手册的编写质量和权威性。资料丰富,表达方式详略得当,是"一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书"(引自王大珩院士为本书的题词)。

《第十六届全国激光会议论文集》

第十六届全国激光学术会议于 2003 年 10 月 19~22 日在上海举行,会议论文集由《中国激光》编辑部出版。本论文集共收录论文 173 篇,600 多页。定价为每册 100 元,光盘版为每张 50 元。

论文集较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化的最新成果,显示了激光科学技术对国家 863 计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

《第八届国际光电子和光通信学术会议(OECC'2003)论文集》

第八届国际光电子和光通信学术会议于 2003 年 10 月 13~16 日在上海举行,会议论文集由《光学学报》编辑部出版。本论文集共收录论文 436 篇,800 多页,上下两册。定价为每套 100 元,光盘版为每张 50 元。

对该论文集 OECC 会议节目委员会的评价是:质量之高,可与国际上知名的优秀论文集媲美。

如需购买,请与光学期刊联合编辑部葛晓红联系。

电话:021-69918428,021-69918011,请从邮局汇款

地址:上海 800-211 信箱,光学期刊联合编辑部 邮编:201800