

文章编号: 0258-7025(2010)12-2969-06

# 基于铯原子 D2 线光抽运光谱的半导体激光器 偏频锁定

李乾勇 卢佳佳 胡海燕 王彦华 卫栋

(山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006)

**摘要** 通过探测在连续调谐抽运光作用下的气室对频率确定的探测光的吸收, 可获得光抽运光谱, 探测光和抽运光同时耦合不同的超精细跃迁时可形成光抽运光谱的峰值, 此时两个光场有确定的稳定性依赖于原子能级的频率差。利用光抽运光谱并结合锁频环路, 完成了参考频率为原子超精细分裂的连续半导体激光器间的偏频锁定。通过选择不同的超精细能级, 两个激光器输出激光的频率偏移可以锁定在数百兆赫兹的激发态超精细能级间隔或约 9 GHz 的基态能级间隔附近。

**关键词** 激光技术; 偏频锁定; 光抽运光谱; 铯原子

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103712.2969

## Laser Frequency Offset Locking with Optical Pumping Spectrum in D2 Line of Cesium

Li Qianyong Lu Jiajia Hu Haiyan Wang Yanhua Wei Dong

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

**Abstract** Using a pump laser coupling the hyperfine transition of D2 line in a cesium cell, the optical pumping spectra are demonstrated by detecting the absorption of the co-propagational probe beam with the identified frequency. The peaks or dips are related to the optical pumping where the pump laser and probe laser coupling different hyperfine transitions with a frequency difference. Employing a locking loop and the optical pumping spectrum, a scheme for frequency offset locking of two diode lasers with the reference frequency based on the hyperfine splitting is presented. The frequency offsets can be the intervals between the hyperfine levels of the  $6^2P_{3/2}$  excited states or the  $6^2S_{1/2}$  ground states from hundreds megahertz to 9 GHz.

**Key words** laser technique; offset locking; optical pumping spectrum; cesium

### 1 引言

半导体激光器在光与原子相互作用的实验研究和很多技术领域都有着非常广泛的应用, 通常要求激光器稳频后能输出窄线宽、频率稳定并可连续调谐的激光<sup>[1]</sup>。激光器稳频通常以光学谐振腔或特定的原子、分子跃迁谱线为参考频率来获取鉴频信号,

再结合电子学负反馈环路实现稳频。但很多时候, 如冷原子系统中<sup>[2]</sup>需要激光频率相对于原子跃迁线有一定失谐且频率稳定; 在研究失谐条件下电磁感应吸收(EIA)<sup>[3]</sup>和电磁感应透明(EIT)<sup>[4]</sup>等量子相干效应的实验中, 需要不同的光有固定的频率差以实现双光子共振; 在激光外差相干探测时也要求两

收稿日期: 2010-05-12; 收到修改稿日期: 2010-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(60978017)、高等学校博士学科点专项科研基金(20070108003)和国家基础科学人才培养基金(J0730317)资助课题。

作者简介: 李乾勇(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事半导体激光技术、冷原子物理等方面的研究。

E-mail: qianxsx@163.com

导师简介: 王彦华(1976—), 男, 副教授, 主要从事激光技术、冷原子物理等方面的研究。

E-mail: wangyanhua@sxu.edu.cn(通信联系人)

个激光的频率差相对稳定,而不苛求激光稳定在某个具体的频率,这些情况都需要激光器的偏频锁定。

相对于某一参考频率失谐的偏频锁定,可将激光器的频率锁定在共振峰峰值附近的斜坡上实现偏频锁定,其偏频的精度受到电压信号稳定度的限制,并会受到光强度起伏的干扰。如果将声光频移器的衍射光或者电光调制器产生的调制边带光锁定到参考频率上,也可实现激光器相对于参考频率的偏频锁定<sup>[5]</sup>,而且偏频的精度主要依赖于引入调制的射频信号的稳定性。

为实现两个激光器有确定频率差的偏频锁定,通常由两激光获得的拍频信号与某一参考频率进行比较,获得鉴频信号,进行偏频锁定<sup>[6]</sup>。如果将不同的激光器锁定在同一个 F-P 腔的不同纵模上也可实现激光器间的偏频锁定,这时所有激光都同腔共振,不同激光器具有纵模间隔整数倍的频率差<sup>[7,8]</sup>。文献<sup>[9]</sup>则是利用 EIT 的透射峰来进行偏频锁定,此时耦合光和探测光需要满足双光子共振条件,分别对应不同的能级跃迁,由于 EIT 透射峰信号线宽较窄,甚至小于自然线宽,锁频精度大大提高,但也存在偏频锁定的捕获范围较小的问题。

当利用一束频率连续调谐的抽运光通过铯原子气室,记录与其同向传输且频率确定的探测光的透射信号,可获得没有多普勒背景的光抽运光谱<sup>[10~14]</sup>,光谱中的峰是由原子在光场作用下的光抽运过程造成的,有些峰还同时存在量子相干效应<sup>[12,13]</sup>。文献<sup>[12~14]</sup>等利用精细能级间的光抽运实现激光器间的锁定,激光器的波长差为几十到几百纳米。而本文通过对不同情况下 D2 线的超精细能级间光抽运光谱的研究,发现光谱的峰值处探测光和抽运光耦合不同的超精细跃迁,且有固定频率差,可作为偏频锁定的参考频率。在利用相敏检波技术获得鉴频曲线、构建锁频环路后实现了两个激光器间参考频率稳定性依赖于原子超精细分裂的偏频锁定。

## 2 实验原理和装置

激光驱动多能级原子的某个超精细能级跃迁时,被激发到上能级的原子可经自发辐射跃迁到不同的基态能级,部分原子从一个超精细能级被抽运到不再同光场作用的暗态能级。原子布居因超精细能级光抽运作用而重新分布,在与原子间以及原子和器壁间碰撞等其他非辐射跃迁过程导致的布居转移过程共同作用下达达到新的动态平衡,形成了新的

不同能级间有确定布居的铯原子实验样品。而且布居平衡的不同可借助该原子样品对另外引入的探测光的吸收变化表现出来。鉴于抽运光频率的变化会影响抽运光的强度并改变这种新的布局平衡,如果在改变抽运光频率的同时,记录频率确定的探测光通过该原子气室的透射信号,则可获得光抽运光谱。图 1 为实验相关的铯原子 D2 线超精细能级结构图。 $6^2P_{3/2}$  态为铯原子的一个激发态,有 4 个超精细能级  $F_e=2,3,4,5$ ,它们的能级间隔分别为 151,201 和 251 MHz,基态  $6^2S_{1/2}$  中  $F_g=3,4$  能级间隔为 9193 MHz,即当前作为时间基准的铯原子钟的钟跃迁频率。

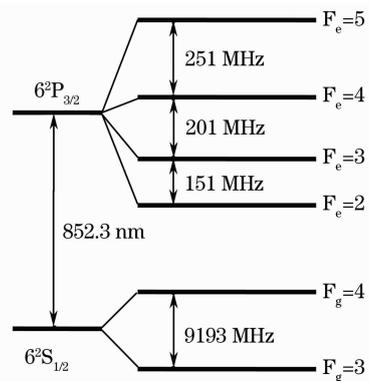


图 1 铯原子 D2 线超精细能级结构图

Fig. 1 Diagram of relevant hyperfine levels of cesium atom

实验装置如图 2 所示。DL100 (Toptica, Inc) 和 ECDL (自制) 均为光栅外腔半导体激光器,可通过电流调制或改变加在压电陶瓷 (PZT) 上的电压从而改变反馈光栅的角度实现激光器频率的连续调谐和调制。利用饱和吸收光谱装置 (SAS) 可对激光频率进行监测,其中抽运光的饱和吸收光谱还可以用来标定光抽运光谱中出现的吸收增强或减弱峰的频率差,这里以两个循环跃迁  $6^2S_{1/2} (F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2} (F_e=5)$  或  $6^2S_{1/2} (F_g=3) \rightarrow 6^2P_{3/2} (F_e=2)$  的共振频

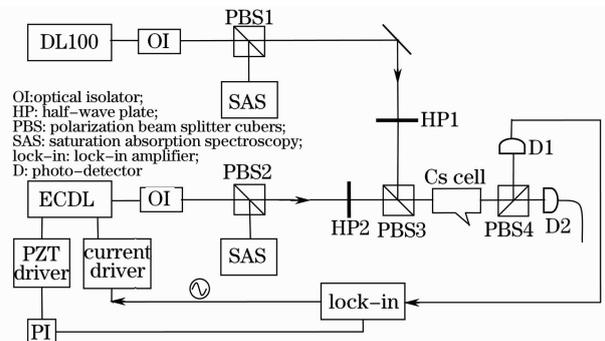


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup

率为基准进行标定。标定后的光抽运光谱还可以用来对光谱线宽范围内两个激光器的频率差变化实时监视。选用 DL100 作为探测光源, ECDL 作为抽运光源, 线偏振方向正交的探测光和抽运光经过偏振分光棱镜 PBS3 合束后通过铯原子气室, 通过旋转半波片 HP1 和 HP2 可分别改变气室中探测光和抽运光的功率, 为了避免过大的强度展宽并能有明显的抽运过程, 实验中抽运光在  $1 \mu\text{W}$  左右, 而探测光在几十微瓦量级。偏振分光棱镜 PBS4 可将通过铯气室的探测光和抽运光分开, 普通的直流探测器 D1 和 D2 可分别探测探测光和抽运光的强度变化。

当抽运光的频率在  $6^2S_{1/2}(F_g=3) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=2, 3, 4)$  或者  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=3, 4, 5)$  的整个多普勒背景范围内连续扫描时, 测量气室对频率固定的探测光的吸收就获得了光抽运光谱。一般情况下, 经过气室的探测光也有光抽运作用, 为了简化实验条件, 选择探测光频率为  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=5)$  或  $6^2S_{1/2}(F_g=3) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=2)$  循环跃迁频率, 于是探测光对垂直于光传输方向运动的原子没有明显的光抽运, 但依然存在速度选择机制。原子由于多普勒频移使其表观中心频率不同, 对于多普勒频移大小合适的原子, 探测光可耦合  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=4 \text{ 或 } 3)$  跃迁, 故也存在光抽运现象。由于不同的速度分布, 相比于在光传输方向无速度分量的原子, 这些原子对光谱的影响是较小的。

光谱中吸收增强或减弱的峰均是两个光场同时作用于某一速度群的原子后分别耦合不同的超精细能级跃迁从而出现光抽运过程的结果。在吸收增强

或减弱的峰值处, 两个光场具有确定的频率差。频率间隔对应相关超精细能级间的能级间隔。在获得信噪比高、线宽适中的光抽运光谱后, 其中的任一峰值都可提供一个偏频锁定的频率标准。

偏频锁定的环路利用锁相放大器 SR830 输出正弦信号经 ECDL 恒流驱动源的电流调制端口直接对激光器进行调制, 由 D1 探测器得到的经过调制的光抽运光谱的信号输入到 SR830 完成相敏检波获得鉴频曲线。鉴频曲线经自制的比例积分器 (PI) 处理后完成与抽运激光器反馈光栅的压电陶瓷的匹配, 输入到 PZT 驱动源 (MDT693A) 的电压调制端口形成偏频锁定的反馈环路, 最后实现两个激光器频率的相对锁定。

### 3 光抽运光谱及偏频锁定的结果与讨论

当频率在  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=5)$  跃迁频率附近的探测光通过铯气室时, 探测器 D1 输出一个恒定的电压信号。如果同时引入频率在  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=3, 4, 5)$  跃迁频率附近连续扫描的抽运光, 发生的超精细光抽运过程如图 3(a) 所示。随着抽运光频率的连续调谐, 光抽运光谱如图 3(b) 所示。当抽运光同  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=3)$  或  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=4)$  跃迁共振时,  $6^2S_{1/2}(F_g=4)$  能级上的铯原子受激吸收跃迁到激发态能级  $6^2P_{3/2}(F_e=3)$  或  $6^2P_{3/2}(F_e=4)$  上, 随之自发辐射使得原子以确定的几率分别跃迁到基态  $6^2S_{1/2}(F_g=3)$  和  $6^2S_{1/2}(F_g=4)$  能级, 如此往复多次

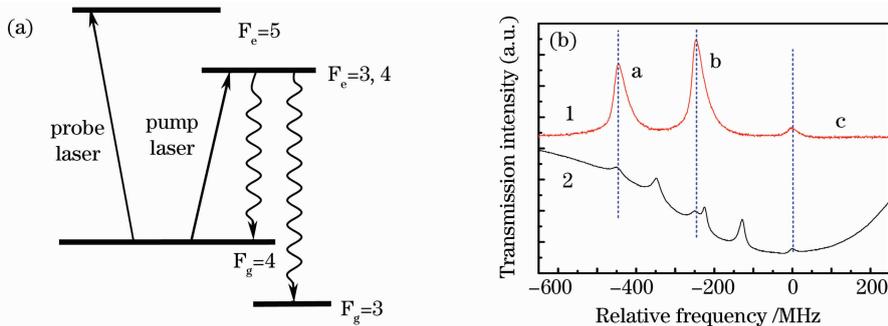
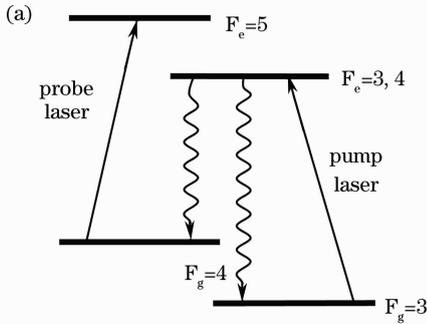


图 3 (a) 探测光 ( $30 \mu\text{W}$ ) 耦合  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=5)$  循环跃迁, 抽运光 ( $0.6 \mu\text{W}$ ) 为  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=3 \text{ 或 } 4)$  跃迁频率时的光抽运过程, (b) 探测光与抽运光同向作用于铯原子的光抽运光谱 (线 1) 和抽运光  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=3, 4, 5)$  饱和吸收谱 (线 2)

Fig. 3 Probe laser ( $30 \mu\text{W}$ ) drives the  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=5)$  cycling transition and the co-propagating pump laser ( $0.6 \mu\text{W}$ ) corresponds to cesium  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=3, 4, 5)$  hyperfine transitions. (a) the optical pumping model, (b) the optical pumping spectrum (trace 1) and the cesium  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=3, 4, 5)$  saturation absorption spectrum with Doppler background (trace 2)

后光抽运的结果使抽运光场的暗态  $6^2S_{1/2}(F_g=3)$  能级上的铯原子布居增多,而  $6^2S_{1/2}(F_g=4)$  能级上的铯原子布居相对减少,铯泡中光场作用区域的铯原子形成了新的布局平衡,从而对  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=5)$  跃迁频率的探测光的吸收减弱,透射信号增强,见图 3(b)中 a, b 两处。图中 c 处是探测光和抽运光频率均为  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=5)$  能级跃迁频率时的吸收减弱峰,此时吸收变化的主要原因是饱和效应以及简并二能级原子系统的量子相干过程。

探测光耦合  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=5)$  超



精细跃迁,抽运光在  $6^2S_{1/2}(F_g=3) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=2, 3, 4)$  跃迁频率附近连续扫描,光抽运过程如图 4(a)所示。当抽运光在  $6^2S_{1/2}(F_g=3) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=2)$  循环跃迁频率附近时,没有明显的光抽运作用,所以对光抽运光谱没有影响。当抽运光为  $6^2S_{1/2}(F_g=3) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=3)$  或  $6^2S_{1/2}(F_g=3) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=4)$  时,光抽运的结果导致基态  $6^2S_{1/2}(F_g=4)$  能级的布居增加,在与碰撞等无辐射跃迁导致的布居重新分布过程达到动态平衡后,原子气室对探测光  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=5)$  的吸收增强,即图 4(b)中光抽运光谱 d 和 e 处的吸收峰。

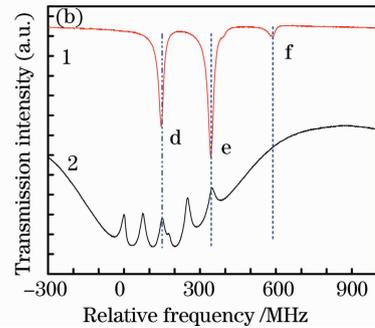


图 4 (a) 探测光( $100 \mu\text{W}$ )为  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=5)$  循环跃迁频率,抽运光( $1 \mu\text{W}$ )频率为  $6^2S_{1/2}(F_g=3) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=2, 3, 4)$  跃迁频率时的光抽运过程 (b) 探测光与抽运光同向作用于铯原子的光抽运光谱 (线 1) 和抽运光的  $6^2S_{1/2}(F_g=3) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=2, 3, 4)$  饱和吸收谱 (线 2)

Fig. 4 Probe laser ( $100 \mu\text{W}$ ) drives the  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=5)$  cycling transition and the co-propagating pump laser ( $1 \mu\text{W}$ ) corresponds to cesium  $6^2S_{1/2}(F_g=3) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=2, 3, 4)$  hyperfine transitions. (a) the optical pumping model, (b) the optical pumping spectrum (trace 1) and the cesium  $6^2S_{1/2}(F_g=3) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=2, 3, 4)$  saturation absorption spectrum with Doppler background (trace 2)

值得注意的是,图 4(b)光抽运光谱中在 f 处也出现了对探测光吸收增强的峰。利用抽运光饱和吸收光谱进行标定后可知, f 处抽运光频率与  $6^2S_{1/2}(F_g=3) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=4)$  跃迁正失谐 251 MHz,也就是探测光频率等于  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=5)$  能级跃迁频率,抽运光频率等于  $6^2S_{1/2}(F_g=3)$  与  $6^2P_{3/2}(F_e=5)$  超精细能级间的频率差。显然,  $6^2S_{1/2}(F_g=3) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=5)$  为禁戒跃迁,抽运光不能使铯原子跃迁到  $6^2P_{3/2}(F_e=5)$  能级上,也不会存在同上述类似的光抽运过程。此时必须考虑速度选择机制,与光传输方向相同,多普勒频移分别为 251 MHz 和 452 MHz 的原子对探测光的吸收作用就体现出来了。其中多普勒频移 251 MHz 的原子中一部分处于  $6^2S_{1/2}(F_g=3)$  基态能级,当抽运光频率为  $6^2S_{1/2}(F_g=3)$  与  $6^2P_{3/2}(F_e=5)$  能级频率差时,光场将抽运这些原子发生  $6^2S_{1/2}(F_g=3)$  与  $6^2P_{3/2}(F_e=4)$  的超精细跃迁,此时光抽运过程引起  $6^2S_{1/2}(F_g=$

4) 能级上原子增多,并导致探测光的吸收增强。同时探测光也因多普勒频移的存在而耦合这些原子的  $6^2S_{1/2}(F_g=4)$  与  $6^2P_{3/2}(F_e=4)$  跃迁,并与耦合  $6^2S_{1/2}(F_g=3)$  与  $6^2P_{3/2}(F_e=4)$  跃迁的抽运光共同作用构成三能级结构而存在 EIT 效应。不过 EIT 效应只会导致气室对探测光的吸收减少、透射增强,该现象还可以通过实验装置中的 D2 探测器观察到。但从图 4(b) f 处吸收增强的峰可知光抽运导致的吸收增强相比于 EIT 导致的吸收减弱处于优势地位,最终导致 f 处探测光的透射光强减弱。由于气室原子的速度分布,以及超精细能级自发辐射到两个基态能级的相对跃迁几率不同,从而不同频率的抽运光光抽运程度有差别,出现图 3(b)和图 4(b)的光抽运光谱中强度不同的 a, b, d, e, f 等峰。

同样,光抽运光谱还可能选择探测光耦合  $6^2S_{1/2}(F_g=3) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=2)$  跃迁,抽运光在  $6^2S_{1/2}(F_g=3) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=2, 3, 4)$  或  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=3, 4, 5)$  跃迁频率附近连续扫描。这

时物理过程与前面的情况相似,只是不同情况下抽运光与探测光的频率差将不同。表 1 列出了探测光在循环跃迁时光抽运光谱可提供的偏频锁定参考频率,其中  $3 \rightarrow 4 + 251$  MHz,  $4 \rightarrow 3 - 151$  MHz,  $4 \rightarrow 4 - 151$  MHz 表示抽运光的频率比  $3 \rightarrow 4$ ,  $4 \rightarrow 3$  或  $4 \rightarrow 4$  超精细跃迁频率高 +251 MHz, -151 MHz。

表 1 光抽运光谱可提供的部分偏频锁定参考频率

Table 1 Frequency offset from optical pumping spectrum MHz

Pump laser frequency	Probe laser transmission	Probe laser transmission
	3→2	4→5
3→3	151	8741
3→4	352	8942
3→4+251 MHz	—	9193
4→3-151 MHz	9193	—
4→3	9042	452
4→4-151 MHz	8992	—
4→4	8841	251

鉴于频率固定探测光获得的光抽运光谱没有多普勒背景,而且吸收增强或减弱峰的大小、线宽都可方便地通过改变探测光和抽运光强度来选择,利用光抽运光谱提供频率参考的偏频锁定的方法可获得捕获范围可控、信噪比好、参考频率依赖于超精细分裂的鉴频信号。将此信号反馈到抽运光激光器的电流或者压电陶瓷电压上校正抽运光的频率,从而形成一个实现两激光器偏频锁定的环路。

采用常规的锁相放大方法构建反馈环路,以图 4(b)中 d 处峰作为参考频率实现了偏频锁定。探测光工作在  $6^2S_{1/2}(F_g=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=5)$  跃迁频率附近,抽运光为  $6^2S_{1/2}(F_g=3) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F_e=3)$  跃迁频率,两个激光器的频率差可锁定在 8741 MHz。由锁相放大器(SR830)输出 15 kHz 左右的正弦电流调制信号加在 ECDL 电流调制端口,自 D1 就可获得调制后的光抽运光谱信号,再通过锁相放大器实现相敏同步检波,得到鉴频曲线。而且锁频环路的捕获范围可随光谱的线宽而改变。

由于抽运光和探测光不同的频率差对应光抽运光谱上的不同位置,在光谱线宽范围内还表现为探测光强度的不同。如在 d 峰附近,探测光的不同强度可对应光抽运光谱上的不同位置,经饱和吸收谱标定后就可获得强度和频率差的对应关系,从而可通过测量 d 峰附近光谱的强度来监测两激光器的频率差。图 5 中平直的曲线为鉴频信号反馈到压电陶瓷上形成闭合环路后得到的偏频锁定结果。在图中

还对比了两激光器偏频锁定和自由运转的情况。当抽运光相对于探测光偏频锁定时,探测光的透射信号就在 d 峰的峰值附近,两激光器 35 s 内频率差的变化小于 1.5 MHz,当偏频锁定环路断开,探测光的透射信号仍在 d 峰附近,且两激光器的频率差在短时间内不会超过 d 峰的线宽,可获得两激光器均自由运转时的频率差,在 25 s 内变化已大于 8 MHz。

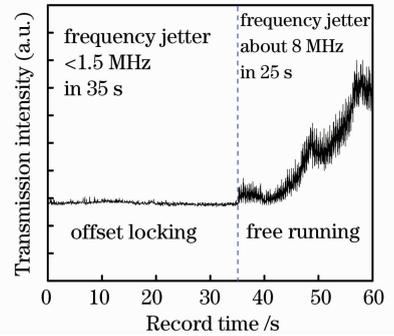


图 5 抽运光相对于探测光偏频锁定 35 s 内及两激光器自由运转 25 s 的频率差

Fig. 5 Frequency difference between probe and pump laser with the pump laser offset locked to the probe laser in 35 s and the two lasers free running in 25 s

利用探测光和抽运光同向传输获得的光抽运光谱完成偏频锁定时,并不需要光同原子共振。在实现抽运光相对于探测光偏频锁定时(图 5),探测光激光器实际上是自由运转的。此时对于静止原子非共振的探测光会因速度选择机制,存在方向合适的某一速度群的原子与之共振,并耦合对应超精细跃迁。在连续扫描抽运光的频率时,光抽运光谱上依然可得到能够提供基于超精细能级分裂间隔的参考频率。乃至在锁频环路闭合后,还可在一定范围内连续扫描探测光的频率,此时相对锁定的抽运光的频率会随之连续变化,两个激光器的频率差仍然具有相对于原子超精细分裂频率的稳定性。

## 4 结 论

在实验上获得了铯原子 D2 线中无多普勒背景且信噪比很好的光抽运光谱,在获得光抽运光谱提供的稳定性与原子超精细能级分裂稳定性相同的参考频率后,实现了两个激光器的偏频锁定。同时还可利用强度展宽机制获得不同线宽的光抽运光谱,方便地改变锁频环路的捕获范围,并根据激光器和工作环境的特点确定合适的参数以获得最优的长期

稳定性。由于 PZT 响应频率仅在千赫兹量级,对反馈环路中的高频信号没有响应,如果锁频时把鉴频信号低频部分反馈到 PZT 上,同时把高频变化的信号反馈到半导体激光器的驱动电流上将可以得到更好的结果。当然也可以通过外部调制激光束的方法实现锁频来减少附加调制噪声,进一步提高锁定后激光的稳定性。由于偏频锁定时探测光自由运转,两个光场的相对相位受光路稳定性影响,相对相位是随机的,加上自制激光器本身对机械振动和空气振动隔离不太好,使得抽运光相对于探测光偏频锁定后频率差的抖动大于通常饱和吸收谱稳频后获得的结果。

该工作还可适用于其他具有类似能级结构的原子系统,拓展能够实现锁频的激光器的波长范围,并可以实现多台激光器多个频率差的偏频锁定,进一步将两束具有稳定频率差的激光混频则可以获得频率具有相对原子超精细分裂的稳定性的拍频信号,这在光与原子相互作用研究以及高精度测量技术中有很好的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 C. E. Wieman, L. Hollberg. Use diode laser for atomic physics [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **62**(1): 1~20
- 2 C. Monroe, W. Swann, H. Robinson *et al.*. Very cold trapped atoms in a vapor cell [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **65**(13): 1571~1574
- 3 A. M. Akulshin, S. Barreiro, A. Lezama. Electromagnetically induced absorption and transparency due to resonant two-field excitation of quasidegenerate levels in Rb vapor [J]. *Phys. Rev. A*, 1998, **57**(4): 2996~3002
- 4 K. J. Boller, A. Imamoglu, S. E. Harris. Observation of electromagnetically induced transparency [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(20): 2593~2596
- 5 Wang Junmin, Zhang Tiancai, Xie Changde *et al.*. Frequency-offset locking of LD to hyperfine transition of cesium 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
- 6 U. Schünemann, H. Engler, R. Grimm *et al.*. Simple scheme for tunable frequency offset locking of two lasers [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1999, **70**(1): 242~243
- 7 E. Riedle, S. H. Ashworth, J. T. Farrell, Jr. *et al.*. Stabilization and precise calibration of a continuous-wave difference frequency spectrometer by use of a simple transfer cavity [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1994, **65**(1): 42~48
- 8 Du Zhijing, Zhang Yuchi, Wang Xiaoyong *et al.*. Locking multiple wavelength lasers to the transition of cesium atoms by using a Fabry-Pérot transfer cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 452~457  
杜志静, 张玉驰, 王晓勇等. 不同波长的激光器通过法布里-珀罗腔相对于铯原子谱线的锁定 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 452~457
- 9 S. C. Bell, D. M. Heywood, J. D. White *et al.*. Laser frequency offset locking using electromagnetically induced transparency [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(17): 171120
- 10 Wang Yanhua, Yang Haijing, Du Zhijing *et al.*. Autler-townes doublet in novel sub-Doppler spectra with caesium vapour cell [J]. *Chin. Phys.*, 2006, **15**(1): 138~142
- 11 U. D. Rapol, V. Natarajan. Doppler-free spectroscopy in driven three-level systems [J]. *Eur. Phys. J. D*, 2004, **28**(3): 317~322
- 12 H. S. Moon, W. K. Lee, L. Lee *et al.*. Double resonance optical pumping spectrum and its application for frequency stabilization of a laser diode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(18): 3965~3967
- 13 Yang Baodong, Zhao Jiangyan, Zhang Tiancai *et al.*. Improvement of the spectra signal-to-noise ratio of cesium  $6P_{3/2}-8S_{1/2}$  transition and its application in laser frequency stabilization [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2009, **42**(8): 085111
- 14 Yang Baodong, Liang Qiangbing, He Jun *et al.*. Narrow linewidth double-resonance optical pumping spectrum due to electromagnetically induced transparency in ladder-type inhomogeneously broadened media [J]. *Phys. Rev. A*, 2010, **81**(4): 043803