

文章编号: 0258-7025(2010)05-1182-04

铯分子饱和吸收谱的半导体激光器稳频

孟腾飞 武跃龙 姬中华 武寄洲 赵延霆 贾锁堂

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

摘要 利用饱和吸收的方法得到了铯分子在 780 nm 附近 $X^1\Sigma_g^+ \rightarrow B^1\Pi_u$ 能级跃迁吸收带的一段饱和吸收谱, 利用铷 ^{87}Rb 原子饱和吸收谱的 $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=2)$ 的跃迁线为标准确定这一段饱和吸收谱的位置。实验中对其中的 5 条吸收峰进行了仔细观测, 利用其中的一条饱和吸收峰“R5”对 780 nm 半导体激光器进行了稳频。测得稳频后的激光在 800 s 内频率的漂移小于 1.5 MHz, 从而提供了一种利用铯分子饱和吸收峰对 780 nm 半导体激光器进行稳频的新方法。此激光可以用于制备超冷基态铯分子, 同时也可作为光通信波段 1560 nm 处的频标参考光。

关键词 激光光学; 稳频; 饱和吸收光谱; 铯分子; 半导体激光器

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103705.1182

Frequency Stabilized Diode Laser Based on Cesium Molecular Saturated Absorption Spectroscopy

Meng Tengfei Wu Yuelong Ji Zhonghua Wu Jizhou Zhao Yanting Jia Suotang

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract One part of the saturated absorption spectroscopy on cesium molecules near 780 nm at the absorption band $X^1\Sigma_g^+ \rightarrow B^1\Pi_u$ is obtained. The position of cesium molecular saturated absorption spectroscopy can be determined by $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=2)$ resonance line of the saturated absorption spectroscopy on ^{87}Rb atom. The five absorption peaks of the saturated absorption spectroscopy are observed. The 780 nm diode laser is stabilized to the “R5” absorption peak. The frequency stability of the laser is better than 1.5 MHz in 800 s. It offers a new method to stabilize the 780 nm diode laser frequency by the saturated absorption peak of cesium molecules. This laser can be used to produce the ultracold ground state cesium molecules, and can be used as the frequency-doubled reference of optical communication range in 1560 nm.

Key words laser optics; frequency stabilization; saturated absorption spectroscopy; cesium molecule; diode laser

1 引 言

由于半导体激光器具有体积小、功耗低、波长覆盖范围大、且易于调谐和调制等优点, 被广泛应用于光通信、光信息读写和激光光谱等领域^[1]。在这些应用中, 半导体激光器输出频率的稳定度是一个十分重要的问题。然而在自由运转状态下激光频率起伏较大^[2]。为了提高激光频率的稳定度, 人们提出了很多方案: 有兰姆凹陷稳频^[3]、塞曼效应稳频^[4]、饱和吸收

稳频^[5~8]和法布里-珀罗(F-P)腔稳频^[9,10]等稳频方法。饱和吸收稳频用原子或分子跃迁线作为频率标准来实现激光频率锁定, 从而提高激光器的频率稳定性, 同时由于其简单有效的特点得到了广泛的应用。

铯分子在约 750~800 nm 范围内有一个强的吸收带^[11~13]。在 780 nm 附近能测到铯分子的一些饱和吸收信号, 这些饱和吸收谱线是 $X^1\Sigma_g^+$ 的振动能级为 $\nu_g = 10$ 到 $B^1\Pi_u$ 的振动能级为 $\nu_e = 5$ 振转能

收稿日期: 2009-07-21; 收到修改稿日期: 2009-09-09

基金项目: 国家 973 计划(2006CB921603)、国家自然科学基金(60808009, 60978018), 国家基础科学人才培养基金(J0730317), 山西省自然科学基金(2008011004), 新教师基金(200801081021)和山西省回国留学基金资助课题。

作者简介: 孟腾飞(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事超冷原子分子光谱方面的研究。E-mail: mengtf2007@126.com

导师简介: 贾锁堂(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事原子分子物理方面的研究。E-mail: tjia@sxu.edu.cn

级的跃迁谱线^[14]。而且得到的一段铯分子的饱和吸收谱,在饱和吸收光谱图上显示了铯分子的 5 个饱和吸收峰,实验中通过监视铷原子的饱和吸收谱来确定所得的铯分子的饱和吸收谱的位置,这 5 个吸收谱线为振转能谱中 $\Delta l = 1$ 的 R 支。实验中选用“R5”共振线作为标准对半导体激光器进行了稳频。稳频后的激光为制备超冷基单态铯分子($X^1\Sigma_g^+$)提供了必要的技术支持^[15],同时也可作为光通信波段 1560 nm 处的倍频参考光^[16]。

2 实验原理与装置

图 1 为实验装置图,图中虚线为电信号,实线为

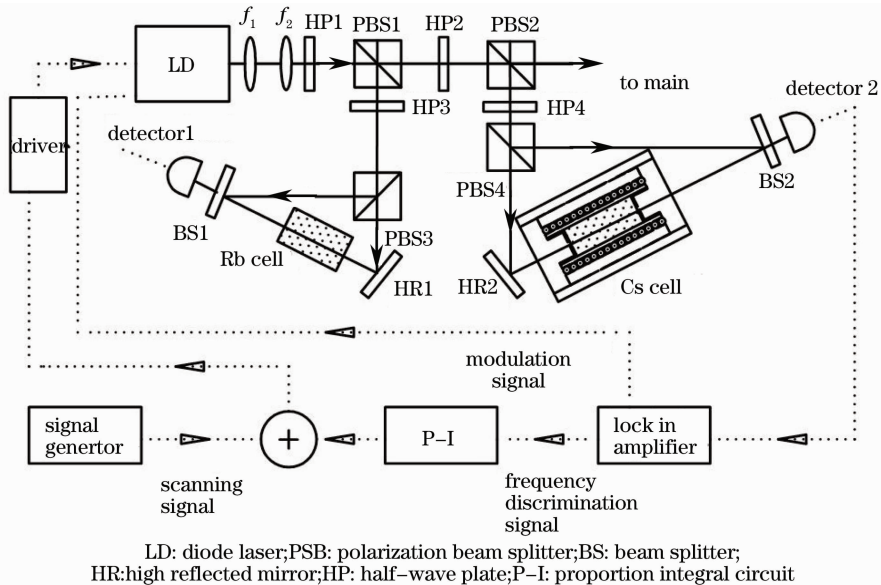


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

在实验中将信号发生器输出频率为 10 Hz 的三角波信号通过加法器加到激光器电源上,使激光器在一定范围内扫频。为了产生合适的误差信号使激光器频率锁定到铯分子“R5”饱和吸收线上,利用锁相放大器输出了一个频率为 45 kHz 幅度为 20 mV 的正弦信号加到激光头的电流调制端口上作为调制信号。光电探测器得到的经调制的电信号输入锁相放大器解调后产生微分误差信号,然后微分误差信号输入 P-I 电路中, P-I 输出的信号输入加法器,使微分误差信号和信号发生器产生的扫频信号同时输入激光器的电源,调节 P-I 电路的增益和积分时间到一个合适的值,实现了将激光频率稳到铯分子饱和吸收峰“R5”上。

激光。激光器为 New Focus 公司生产的 External-cavity Diode Laser(New Focus 6013),锁相放大器为 Stanford Research System SR830。激光器输出的激光经过两个透镜($f_1 = 4$ mm, $f_2 = 10$ mm)扩束成直径约为 3 mm 的光斑,经过偏振分光棱镜 PBS1 分为两束,一束用作铷原子的饱和吸收光谱作为频率参考,另一束再经过偏振分束棱镜 PBS2 用于产生铯分子的饱和吸收信号并产生误差信号对激光器进行稳频。在铯分子的饱和吸收光路中,铯分子是通过对铷原子加热得到的,实验中所用的铯泡加热到约 200 °C。铯分子饱和吸收用到的探测光和抽运光的光功率分别为 0.27 mW 和 2.38 mW。

3 实验结果及分析

图 2(a)为铯分子的饱和吸收光谱。图中标出了实验探测到的 5 个饱和吸收峰,分别为 R1, R2, R3, R4, R5。R5 对应的频率比铷⁸⁷Rb 原子 $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=2)$ 的饱和吸收峰处的频率约为 1.9 GHz, R5 与 R4 的相对频差为 159 MHz, R4 与 R3 的相对频差为 300 MHz, R3 与 R2 的相对频差为 401 MHz, R2 与 R1 的相对频差为 130 MHz。它们的线宽分别是: R1 为 $\Delta\nu = 15.9$ MHz, R2 为 $\Delta\nu = 28.1$ MHz, R3 为 $\Delta\nu = 41.9$ MHz, R4 为 $\Delta\nu = 37.5$ MHz, R5 为 $\Delta\nu = 21.3$ MHz。吸收峰位置均可作为稳频位置,随机地选取“R5”对 780 nm 半导体激光器进行了稳频。图 2(b)和图 2(c)为获得的 R5 的饱和吸收信号和鉴频信号。

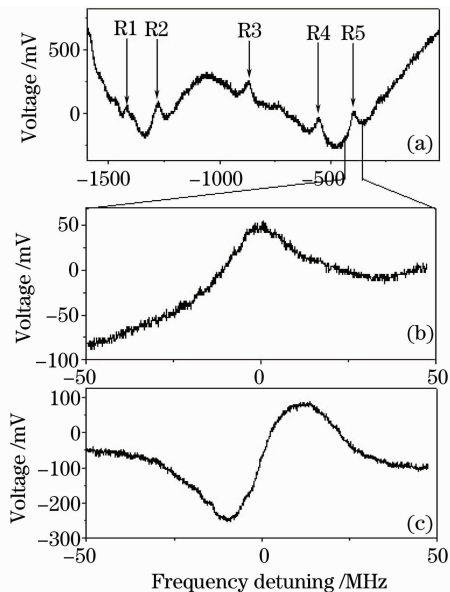


图2 铯分子的饱和吸收光谱(a)及R5的饱和吸收信号(b)和鉴频信号(c)

Fig. 2 Saturated absorption spectra of cesium molecules (a) and the saturated absorption signals (b) and the error signals (c) of R5

图3给出了在自由运转时的误差信号和闭环锁定后的误差信号。可以看出自由运转时误差信号的起伏比较大,对应的激光频率的起伏约为10.5 MHz,而在闭环锁定后估算的激光频率的起伏在1.5 MHz以下,这表明闭环锁定后输出激光的频率起伏得到了明显的抑制。

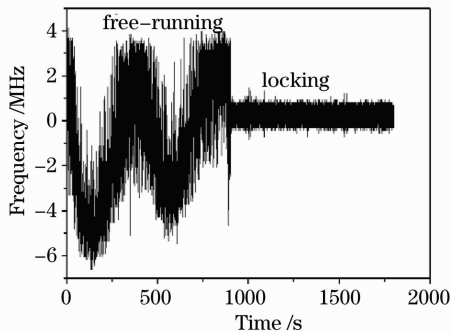


图3 自由运转和锁定时的误差信号

Fig. 3 Error signal with and without locking

对获得的误差信号的阿伦方差进行分析。阿伦方差可表示为: $\sigma_y(\tau) = \langle \frac{1}{2} (\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2 \rangle^{1/2}$, 式中 $\langle \rangle$ 表示对无穷个采样的平均, \bar{y}_i 表示取样时间 τ 的第 i 个区间上测得的瞬间相对频偏的平均值。实际测量只能是有限的测量次数 N , 它的估值表达式为

$$\sigma_y(\tau) = \left[\frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} (\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2 \right]^{1/2}$$

图4是用阿伦方差的方法得到的描述780 nm半导体激光器在自由运转状态和频率锁定状态下频率稳定度的曲线图。阿伦方差的值是对误差信号在800 s内的采样数据处理而得到的。图4中“实心圆”标记的曲线和“空心圆”标记的曲线分别表示半导体激光器在自由运转状态和频率锁定状态下在不同积分时间的阿伦方差, 显示了两种情况下的频率稳定度。从图中可以看出在半导体激光器频率锁定状态下在积分时间为100 s时 $\sigma_y(\tau)$ 达到最小值 5.63×10^{-12} 。在积分时间大于1 s后, 阿伦方差在频率锁定状态下要比自由运转状态下的值约小2个数量级, 说明在稳频后输出激光的频率稳定度得到了较大的改善。

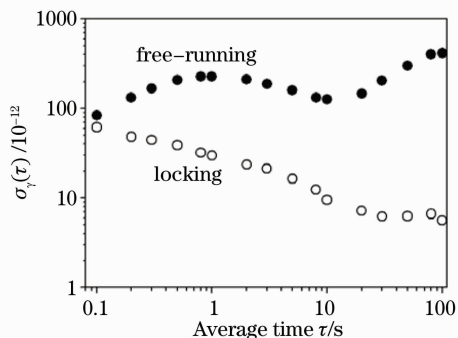


图4 分别从自由运转与锁频状态下频率的误差信号得到的阿伦方差 $[\sigma_y(\tau)]$

Fig. 4 Square root of the Allan variance values $[\sigma_y(\tau)]$ from the error signal with and without locking

4 结 论

实验中测得了铯分子 $X^1 \Sigma_g^+ \rightarrow B^1 \Pi_u$ 的一段饱和吸收振转能谱, 通过选用其中的R5作为对780 nm的半导体激光器进行稳频的位置, 实现了利用铯分子饱和吸收峰对780 nm半导体激光器的稳频。实验中得到了800 s内频率漂移小于1.5 MHz的频率稳定度。稳频后的激光可以应用于制备超冷基态铯分子, 也可应用于光通信波段1560 nm处的倍频参考。

参 考 文 献

- Carl E. Wieman, Leo Hollberg. Using diode laser for atomic physics[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **62**(1): 1~19
- K. C. Harvey, C. J. Myatt. External cavity diode laser using a grazing incidence diffraction grating [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(12): 910~912
- Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tangrong *et al.*. *Laser Principle* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. 214~220
周炳琨, 高以智, 陈侗嵘 等. *激光原理* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. 214~220
- Kristan, L. Corwin, Zhengtian Lu *et al.*. Frequency-stabilized diode laser with the Zeeman shift in an atomic vapor[J]. *Appl.*

- Opt.*, 1998, **32**(15): 3295~3298
- 5 Zhang Jing, Tao Hua, Wei Dong *et al.*. A laser diode system stabilized on the saturated absorption lines of rubidium atoms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 197~201
张靖, 陶桦, 卫栋等. 铷原子饱和吸收稳频半导体激光器系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 197~201
 - 6 Zhao Jianming, Yin Wangbao, Zhao Yanting *et al.*. Frequency locking of a semiconductor laser via radio-frequency modulation spectrum[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 935~938
赵建明, 尹王保, 赵延霆等. 采用射频频率调制光谱实现半导体激光器稳频[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 935~938
 - 7 Weiguang Ma, Lei Dong, Wangbao Yin *et al.*. Frequency stabilization of diode laser to 1.637 μm based on the methane absorption line[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(8): 486~488
 - 8 Baodong Yang, Jiangyan Zhao, Tiancai Zhang *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): 1~5
 - 9 Ji Zhonghua, Zhang Ranran, Ma Jie *et al.*. Long-term frequency stabilization with digital servo system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 804~808
姬中华, 张冉冉, 马杰等. 数字伺服系统实现激光器频率长期锁定[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 804~808
 - 10 Yang haijing, Wang Yanhua, Zhang Tiancai *et al.*. Modulation free frequency stabilization of a laser based on a confocal Fabry-Perot cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3): 316~320
杨海菁, 王彦华, 张天才等. 基于共焦法布里-珀罗腔的无调制激光稳频锁定[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 316~320
 - 11 F. W. Loomis, P. Kusch. The band spectrum of caesium[J]. *Phys. Rev.*, 1934, **46**(4): 292~301
 - 12 R. Gupta, W. Happer, J. Wagner *et al.*. Absorption studies of Cs_2 and Rb_2 molecular bands in the visible and near visible[J]. *J. Chem. Phys.*, 1978, **68**(3): 799~802
 - 13 U. Diemer, R. Duchowicz, M. Ertel *et al.*. Doppler-free polarization spectroscopy of the $B^1\Pi_u$ state of Cs_2 [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1989, **164**(4): 419~426
 - 14 Hui Chen, Hebin Li, Yuri V. Rostovtsev *et al.*. Near-infrared saturation spectroscopy of cesium molecules using a diode laser [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(4): 723~726
 - 15 Matthieu Viteau, Amodsen Chotia, Maria Allegrini *et al.*. Optical pumping and vibrational cooling of molecules[J]. *Science*, 2008, **321**(5886): 232~234
 - 16 A. Danielli, P. Russian, A. Arie *et al.*. Frequency stabilization of frequency-doubled 1556 nm source to the $5S_{1/2} \rightarrow 5D_{1/2}$ two-photon transitions of rubidium[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(12): 905~907