

文章编号: 0258-7025(2010)10-2515-05

激光光谱研究垂直腔面发射激光器的特性

陈杰华¹ 杜润昌¹ 赵劫成¹ 马 洪² 顾思洪^{1,2}

(¹中国科学院武汉物理与数学研究所, 湖北 武汉 430071; ²武汉国家光电实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 设计并实现了一种通过原子对激光的吸收光谱研究被动型相干布居囚禁(CPT)原子钟所使用的垂直腔面发射激光器(VCSEL)特性的实验方法。通过切换输入 VCSEL 的微波功率, 实验记录原子对单色和调频多色激光的吸收谱, 借助光谱分析研究了 VCSEL 激光管自身温度变化速度、微波功率变化造成 VCSEL 的温度变化及 VCSEL 输出波长随温度的变化等特性, 以及通过所实现的光谱直接测量所用 VCSEL 制备 CPT 态的效率。该方法为 CPT 原子钟所用的 VCSEL 提供了一个有用的测试、研究平台, 对于原子钟的研制和 VCSEL 研究具有实际价值。

关键词 光谱学; 相干布居囚禁; 原子钟; 垂直腔面发射激光器; 微波; 激光物理

中图分类号 O562.3; TH714.1⁺4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103710.2515

Study on Characteristics of Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser by Laser Spectrometry

Chen Jiehua¹ Du Runchang¹ Zhao Jicheng¹ Ma Hong² Gu Sihong^{1,2}

(¹ Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)
² Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract An experimental scheme is proposed and realized, with which the characteristic of a vertical-cavity surface-emitting laser(VCSEL), a key component of a passive coherent population trapping(CPT) atomic clock, is studied through atomic absorption spectra toward laser. By switching on and off the input microwave for modulating VCSEL, atomic absorption spectra toward monochromatic and multi-chromatic laser are alternatively recorded. The characteristics of VCSEL, including temperature response rate, temperature change along microwave power, wavelength response to its temperature, and the CPT state preparing efficiency are studied with the spectra measurement. This scheme provides a convenient experimental method to measure and study VCSEL, and a useful tool for developing CPT atomic clocks.

Key words spectroscopy; coherent population trapping; atomic clock; vertical-cavity surface emitting laser; microwave; laser physics

1 引 言

被动型相干布居囚禁(CPT)原子钟是一种新型原子钟^[1,2]。双色相干光与原子相互作用在原子中制备出 CPT 态^[3], CPT 原子钟利用由此获得窄线宽的电磁感应透明(EIT)谱线作为微波鉴频信号^[4~8]。由于用光激励信号取代传统原子钟微波激励信号作为鉴频信号而省去了传统原子钟的微波

腔, 因此 CPT 原子钟在实现小型化方面具有其他原子钟所不可比拟的优势。运用微机电系统(MEMS)加工工艺, CPT 原子钟可以制成手表尺寸、电池供电的微型原子钟^[9]。作为小型原子钟, CPT 原子钟具有非常广阔的应用前景。CPT 原子钟虽然有一些新的实现方法^[10~13], 但出于小型化考虑, CPT 原子钟一般用微波调制垂直腔面发射激光

收稿日期: 2009-12-28; 收到修改稿日期: 2010-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(10574141)和武汉光电国家实验室创新基金(Z080005)资助课题。

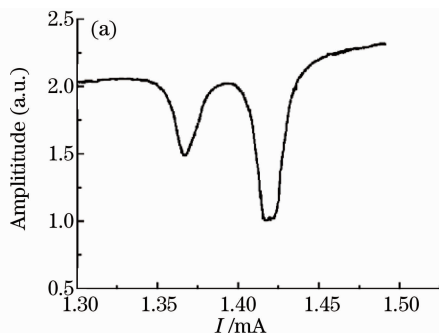
作者简介: 陈杰华(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事相干布居囚禁原子钟方面的研究。E-mail: cjh_924@sina.com

导师简介: 顾思洪(1955—), 男, 博士, 研究员, 主要从事原子频标方面的研究。E-mail: shgu@wipm.ac.cn(通信联系人)

器(VCSEL)获得多色相干光,利用其中两个频率成分作为制备 CPT 态的双色相干光源,本文所研制的 CPT 原子钟就是采用的这种方案^[2,14]。全面掌握 VCSEL 的特性,对于 CPT 原子钟的研制以及 VCSEL 的其他应用都有实际意义。利用开、关微波功率,通过原子对激光的吸收光谱研究了 VCSEL 输出激光特性和 CPT 态的制备过程及 VCSEL 对于微波的响应特性等。

2 实验装置

研究选用⁸⁷Rb 原子的 D1 线跃迁,原子的相关能级如图 1 所示。实验装置如图 2 所示,实验选用自由运行 VCSEL 激光管,输出激光带宽为 100 MHz,频率 $\nu = E/(2h)$ 的微波通过 bias-T 叠加在 VCSEL 的直流驱动电流上,使 VCSEL 的输出光由单色变为调频多色光。⁸⁷Rb 样品原子与缓冲气体封于玻璃泡内,工作时泡温控制在 75 °C。原子对激光的吸收谱由光电探测器探测,经相敏检测处理后记录。由于半导体激光管的出射激光的波长与半导体芯片的温度成正比,增加驱动电流除了增强 VCSEL 输出光强,激光波长也随之增长。实验中通过增加电流扫描激光波长,由此记录的原子对单色光的典型吸收谱线如图 3(a)所示。图 3(a)中的两谱线就是原子由基态两超精细能级向上能级跃迁的吸收谱。由于多普勒展宽,图 3(a)的大吸收峰中虽



可辨出结构,但上能级超精细结构谱线已不能分辨。从谱线的基线可见光强基本随电流线性增加。该 CPT 原子钟原子对受到微波调制的多色光的典型吸收谱见图 3(b)^[15],其中幅度最大的吸收峰是原子对 ± 1 级边带同时吸收产生的,相邻的两个峰是由对基频和 ± 2 级边带同时吸收产生的,次相邻的峰是对 $\pm 1, \pm 3$ 级以及 $-1, -3$ 级边带吸收所致,依次类推。

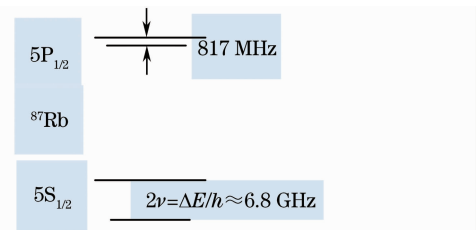


图 1 制备 CPT 态所涉及的⁸⁷Rb 原子能级

Fig. 1 Involved energy levels of ⁸⁷Rb for preparing

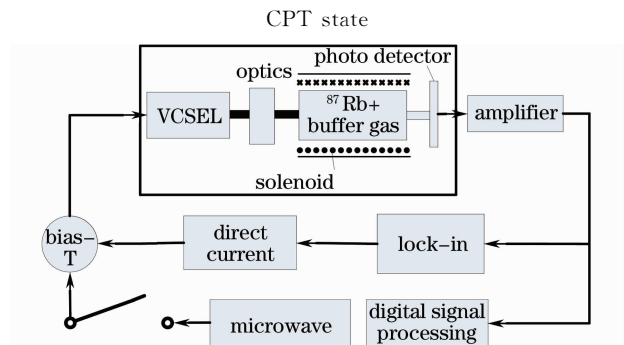


图 2 实验装置结构图

Fig. 2 Schematic of experimental setup

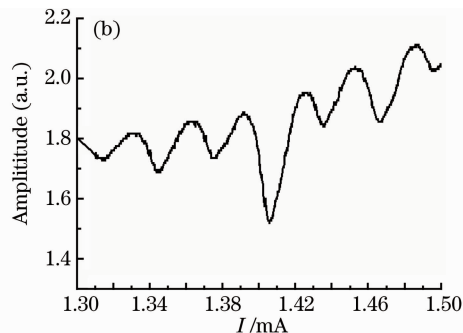


图 3 实验记录的原子吸收谱。(a)对单色光的吸收谱,(b)对多色光的吸收谱

Fig. 3 Experimental recorded absorption spectra to (a) monochromatic light and (b) coherent multi-chromatic light

从图中可以看出,图 3(b)最大吸收峰频率所对应的位置并不出现在图 3(a)两峰正中间所对应的电流值位置,这一情况实际是叠加微波后 VCSEL 获得的输入功率增加所致。为了研究微波功率对 VCSEL 输出光相关特性的影响,设计了通过光谱研究激光波长与微波功率对应关系的方案。

图 2 中的 bias-T 经电控开关与功率为 -10 dBm,频率为 3417 MHz 的微波信号连接,通

过周期为 98 ms,占空比为 23:75 的控制方波开启和关闭开关。控制方波为高电平时开关开启(微波 on),低电平时开关断开(微波 off),即可获得原子对单色激光和调频多色激光的吸收谱线,进而通过吸收谱展开研究。

3 实验结果与讨论

图 4 为所获原子对 VCSEL 输出激光的吸收

谱。虽然微波功率较弱,调制指数 $n \ll 1$,但从图 4 已经清楚可辨认出分别对应微波 on, off 两条谱线的信息。在图 4 的分辨率下微波 off 所对应的谱线实际已经连成了连续的实线,而如果将梳状线梳齿的端点连成包络线就是微波 on 对应的谱线。微波 on, off 的切换速率在秒量级,图 4 谱中微波切换对应的上升沿和下降沿时间对谱线的影响忽略不计。微波 on 使 VCSEL 的输出光变为调频多色光,由图 4 中对应的吸收谱可清楚辨认出 5 个吸收峰。中心峰就是 ± 1 级边带同时抽运基态原子向上能级跃迁产生。与中心峰左相邻的大峰是由基频抽运 $F=1$ 和 $+2$ 级边带抽运 $F=2$ 基态超精细能级向上能级跃迁产生,而右邻大峰即最大吸收峰则是基频抽运 $F=2$ 和 -2 级边带抽运 $F=1$ 的跃迁所致,这两峰的主要贡献源于基频。两端的两小峰分别由 $+1, +3$ 级以及 $-1, -3$ 级边带产生(其中 $-1, -3$ 级边带所对应的吸收峰还未出现极值)。

图 4 所示光谱明显揭示了微波引起的差别:微波 on 对应的谱线整体向左移动,两个大吸收峰在电流稍小的位置提前出现;两大吸收峰幅度也有所减小。如前所述,VCSEL 的输出波长与温度成正比,谱线左移是因为微波功率的输入使 VCSEL 输出激光达到特定波长所需电流减少,而调频多色光使激光功率分散于各个边带,因此基频加一个边带所产生的吸收峰幅度仍比单色光的吸收峰有所减小。且制备 CPT 态的 ± 1 级边带跃迁吸收峰谱线处于微波 on 这套谱的两大吸收峰光谱线的正中间,然而相对于微波 off 的谱,该峰位置偏向于电流稍小的位置。

通过微波 on, off 交替工作方式获得图 4 提供的两套谱的信息,作为比较,实验分别记录了恒定 -10 dBm 和 0 dBm 微波功率的吸收谱,发现与图 4 所包含的两套谱分别完美吻合。为了考察 VCSEL 对于微波功率变化的响应速度,实验还比较了较强微波功率($+4$ dBm)条件下, on, off 交替工作方式和恒定 on 方式工作所记录的吸收谱。研究表明,在此实验条件下交替方式获得的谱中对应于 off 的谱线与恒定 0 dBm 微波功率的谱在实验误差范围内仍然吻合;而对应于 on 的谱线也与恒定 on 方式所记录的谱线吻合。比较谱线可知,微波功率为 $+4$ dBm 造成谱线的位置与 0 dBm 微波功率谱相比左移距离超过图 3(a) 两大峰的间距,由谱线形状可判断出调制已经超过研制的原子钟所对应的调制深度,实验结果说明在此调制深度对于 10 ms 量级交替工作方式, VCSEL 改变状态的所需响应时间可以忽略。

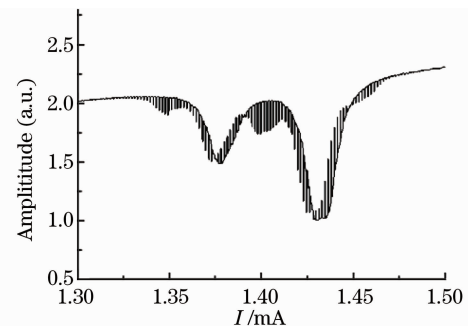


图 4 微波功率为 -10 dBm 时,原子对单色光和调制产生的多色光的吸收谱

Fig. 4 Absorption spectra to monochromatic light and modulated light with -10 dBm of microwave power

图 5 是取微波功率 1 dBm 所获得的谱。图中微波 on 对应谱与所研制的 CPT 原子钟对应的谱基本相同。由谱线形状可确定调制深度,根据 Vanier 的方法^[16]可算出调制指数 $n \approx 1.6$ 。需指出的是微波耦合效率对于具体耦合方式以及实现耦合电路的制作工艺非常敏感,例如虽然使用相同的 VCSEL,但所研制的原子钟实现与图 5 基本相同的谱线所用微波功率仅为 -7 dBm。本文仅讨论在相同实验条件下改变微波功率观察、研究相应的物理现象。图 6 显示的是激光管的输出波长(基频)随着微波调制深度改变而发生的变化。

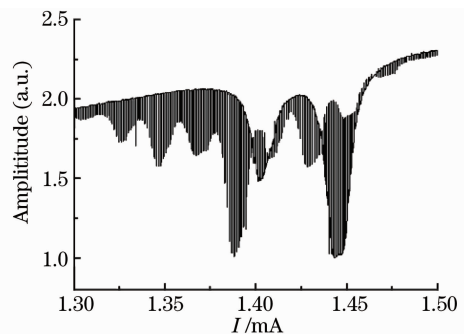


图 5 微波功率为 $+1$ dBm 时,原子对单色光和调制光的吸收谱

Fig. 5 Absorption spectra to monochromatic light and modulated light with $+1$ dBm of microwave power

将激光波长停在 ± 1 级边带吸收峰的极小值处,精确改变微波频率就能获得对应于 CPT 态的用于锁定原子钟微波频率的 EIT 峰,图 7 是实验所获得的 EIT 峰谱线。由于交替工作方式,当微波 off 时原子对激光没有吸收,图 7 谱的顶端对应满幅激光功率,微波 on 出现原子对激光 ± 1 级边带成分吸收造成透射功率减少,图中梳齿的幅度就是原子对激光 ± 1 级边带的吸收幅度。当精确改变微波频率达到 $\nu = E/(2\hbar)$,激光的 ± 1 级边带就在原子钟制备

出 CPT 态,而谱中下端朝上的峰就是所对应的 EIT 峰。从图 7 所示谱线可以直接确定 EIT 峰与吸收峰的比例,即确定出制备 CPT 态的效率。图 8 是由此实验方式采用不同光强所获得的 CPT 态制备效率的实验结果。图 8 结果表明,在实现 CPT 频标所应用的弱光强附近,制备效率与光强成线性关系,这一结果与前期实验研究结果相同^[17],然而本方法大大节省了实验时间。

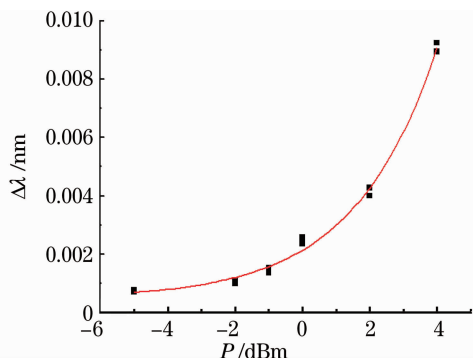


图 6 激光管的输出波长(基频)与微波调制深度的关系

Fig. 6 Relationship between laser wavelength (carrier) of VCSEL and microwave modulation depth

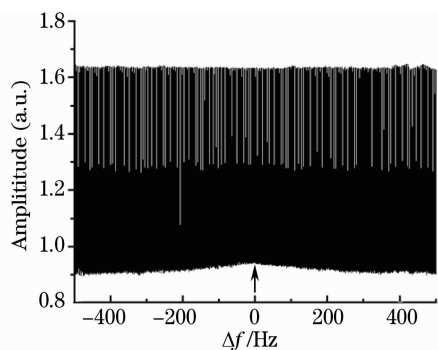


图 7 交替工作方式所记录的 EIT 谱线

Fig. 7 Experimental recorded EIT spectrum when microwave power is alternately on and off

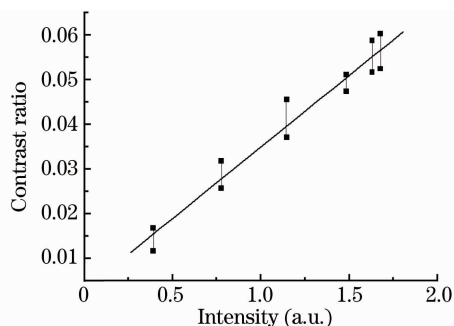


图 8 不同光强时 CPT 态的制备效率

Fig. 8 Preparing CPT state efficiency with different laser intensities

4 结 论

设计并实现了一种通过原子对激光的吸收光谱研究 CPT 原子钟所使用 VCSEL 的特性的实验方法。通过切换输入 VCSEL 的微波功率,实验记录原子对单色和调频多色激光的吸收谱,通过光谱方法直接研究 VCSEL 激光管自身温度变化速度、微波功率变化造成 VCSEL 的温度变化、VCSEL 输出波长随温度的变化等特性,以及通过所实现的光谱直接测量所用 VCSEL 制备 CPT 态的效率。利用本实验方法能够方便地对 CPT 原子钟所选用的 VCSEL 进行测量,获得有关特性的第一手资料。本方法为 CPT 原子钟所用的 VCSEL 提供了一个有用的测试、研究平台,对于原子钟的研制和 VCSEL 研究具有实用价值。

参 考 文 献

- 1 Wang Fuyuan, Shi Baosen, Lu Xiaosong *et al.*. Two narrow bandwidth photons interfering in an electromagnetically induced transparency(EIT) system[J]. *Chin. Phys. B*, 2008, **17**(5): 1798~1803
- 2 J. Vanier. Atomic clocks based on coherent population trapping: a review[J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(4): 421~442
- 3 Li Qiang, Yun Enxue, Gu Sihong. Study of coherent population trapping state with a four-level system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 351~355
李 强, 云恩学, 顾思洪. 用四能级系统研究相干布居囚禁态[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 351~355
- 4 Guo Hong, Li Gaxiang, Peng Jinsheng. Photoionization properties of an atom with two autoionizing states[J]. *Chin. Phys.*, 2002, **11**(7): 694~699
- 5 E. Arimondo. Coherent population trapping in laser spectroscopy[J]. *Progress in Optics*, 1996, **35**: 259~288
- 6 Yang Xihua. Investigation of transient properties of electromagnetically induced transparency with different pump laser energy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7): 811~814
杨希华. 不同能量抽运场作用下瞬态电磁感应透明特性研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7): 811~814
- 7 Zhang Lianshui, Yang Lijun, Li Xiaoli *et al.*. Suppressing power broadening of electromagnetically induced transparency by utilizing microwave field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1305~1308
张连水, 杨丽君, 李晓莉 等. 利用微波场抑制电磁感应透明的功率展宽[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1305~1308
- 8 Zhang Liying, Liu Zhengdong, Chen Jun. Electromagnetically induced transparency of quasi- Λ -type four-level atom system at low-light levels[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1419~1423
张丽英, 刘正东, 陈 峻. 准 Λ 型四能级原子系统在弱场中的增益及电磁感应透明[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1419~1423
- 9 Zhao Jianming, Zhao Yanting, Huang Tao *et al.*. Experimental investigation of electromagnetically induced transparency with double-pumping lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(4): 1023~1026
赵建明, 赵延霆, 黄 涛 等. 双抽运光用电磁感应透明的试验研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(4): 1023~1026
- 10 A. B. Post, Y. Y. Jau, N. N. Kuzma *et al.*. Amplitude-versus frequency modulated pumping light for coherent population

- trapping resonances at high buffer-gas pressure[J]. *Phys. Rev. A.*, 2005, **72**: 033417
- 11 S. V. Kargapoltsev, J. Kitching, L. Hollberg *et al.*. High-contrast dark resonance in $\sigma_+ - \sigma_-$ optical field[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2004, **1**(10): 495~499
- 12 G. Kazakov, B. Matisov, I. Mazets *et al.*. Pseudoresonance mechanism of all-optical frequency-standard operation[J]. *Phys. Rev. A.*, 2005, **72**: 63408
- 13 T. Zanon, S. Guerandel, E. de Clercq *et al.*. High contrast Ramsey fringes with coherent population trapping pulses in a double lambda atomic system [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**: 193002
- 14 Sun Qingqing, Gu Ying, Gong Qihuang. Effect of relaxation rate on population distribution, EIT and refraction in/and systems [J]. *Chin. Phys.*, 2004, **13**(10): 1711~1716
- 15 Lü Liqiang, Du Runchang, Liu Chaoyang *et al.*. Laser frequency stabilization of coherent population trapping atomic frequency standard realized with digital servo[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1411~1415
吕利强, 杜润昌, 刘朝阳 等. 数字伺服实现相干布居囚禁原子频标的激光稳频[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1411~1415
- 16 Vanier. Improved resource allocation technique [P]. WIPO patent application. WO/2005//012925 A2
- 17 Du Runchang, Liu Guobing, Chen Jiehua *et al.*. Realization and investigation of relative experimental parameter of coherent population trapping frequency standard [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(8): 1697~1700
杜润昌, 刘国兵, 陈杰华 等. 相干布居数囚禁原子频标的实现及相关实验参数研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(8): 1697~1700