

文章编号: 0253-2239(2008)05-0915-04

电光晶体调谐的外腔反馈半导体激光器

徐 震^{1,2} 周蜀渝^{1,2} 王育竹^{1,2}

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800)

² 中国科学院冷原子物理研究中心, 上海 201800

摘要 报道一种用电光晶体实现快速调谐和调制激光频率的方法。在 Littrow 型外腔反馈半导体激光中插入 LiNbO₃ 晶体, 利用 LiNbO₃ 晶体的电光效应, 通过改变晶体电压来调节激光器的有效腔长, 可以对激光频率进行快速的调谐和调制。采用该方法, 自制外腔反馈半导体激光器的调谐频率可达到 2 kHz, 它的调谐范围为 350 MHz, 激光频率调谐系数约为 1.06 MHz/V, 用饱和吸收光谱观测频率调谐的效果。快速激光频率调制可以应用在稳频技术上, 将外腔反馈半导体激光器调制在 5~100 kHz 频率下, 均获得了 ⁸⁷Rb 原子 D2 线的饱和吸收光谱的色散信号, 并实现了激光频率在饱和吸收峰上的长期稳定。

关键词 激光器; 外腔反馈半导体激光器; 电光调制; 激光稳频技术

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A

Electro-Optical Crystal Tuned External Cavity Diode Laser

Xu Zhen^{1,2} Zhou Shuyu^{1,2} Wang Yuzhu^{1,2}

(¹ Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

² Cold Atom Physics Center, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract A method of fast laser frequency tuning and frequency modulation by electro-optical crystal is reported. Due to the electro-optical effect of LiNbO₃ crystal, fast laser frequency tuning and modulation of the Littrow type external cavity diode laser (ECDL) with an electro-optical crystal is demonstrated by changing the effective laser cavity length with the voltage on the crystal. By this method, in the homemade ECDL, the tuning range of 350 MHz is achieved with tuning rate of 2 kHz, the tuning coefficient is about 1.06 MHz/V, and the effect of laser tuning was observed by saturated absorption spectrum. The fast frequency modulation can be used on the frequency stabilization. The dispersion signal of the saturated absorption spectrum of D2 line of ⁸⁷Rb atoms is achieved with the laser frequency modulation rate of 5~100 kHz, and the laser frequency is long-term stabilized on the peak and cross peak of saturated absorption spectrum of the D2 line of ⁸⁷Rb atoms.

Key words lasers; external cavity diode laser (ECDL); electro-optical modulation; laser frequency stabilization

1 引 言

光栅反馈的外腔半导体激光器(ECDL)^[1~3]具有线宽窄, 结构小, 稳定性好的优点, 已被广泛应用于原子物理^[4]和精密测量等领域。通过饱和吸收光谱^[5]、塞曼二元光谱^[6,7]或者调制光谱等方法可以实现对原

子跃迁谱线的鉴频和稳频。一般的外腔反馈半导体激光器用压电陶瓷(PZT)移动和转动光栅来进行调谐, 响应带宽在 1 kHz 以下; 通过调制二极管电流可以进行高速调制, 但调制二极管电流会引入激光器的输出功率涨落。电光晶体主要用作主动调 Q 晶体来

收稿日期: 2007-08-10; **收到修改稿日期:** 2007-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(10334050)和国家 973 计划(2006CB921202)资助课题。

作者简介: 徐 震(1976—), 男, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事激光冷却、玻色-爱因斯坦凝聚和量子光学等方面的研究。E-mail: xuzhen@mail.siom.ac.cn

导师简介: 王育竹(1932—), 男, 研究员, 院士, 博士生导师, 主要从事原子钟、激光冷却和量子光学等方面的研究。E-mail: yzwang@mail.shnc.ac.cn

产生高重复频率的光脉冲^[8,9],高频调制电光晶体还可以使单频光束产生边带^[10],一些电光晶体的光折变效应作为光开关在光通讯中也得到广泛应用。将电光晶体插入外腔可以进行 kHz 到 GHz 的调谐和调制,同时也可以获得较大的调谐范围和调制深度^[11~13]。将电光晶体 LiTaO₃ 或者 LiNbO₃ 放入 Littrow 型和 Littman 型外腔反馈半导体激光器(ECDL)可以实现激光频率的快速调制^[14~17],用液晶也可以实现电光频率调制^[18~20]。

2 实验装置和结果

激光器采用 Littrow 结构 ECDL,将 LiNbO₃ 晶体插入 ECDL 中进行电光调谐和调制,如图 1 所示。激光管选用单纵模激光二极管 SDL-5401-G1,中心波长为 780 nm;准直透镜及套筒采用 Thorlabs 公司的 LT110P-B 组件,准直透镜焦距为 6.24 mm,数值孔径 NA 为 0.55;光栅选用 Jobin Yvon 公司的闪耀光栅,光栅线数为 1800 line/mm,光栅贴在一块由 PZT 驱动的有固定转轴的铜板上,从而实现角度调谐。整个激光器底板用半导体制冷器(TEC)恒

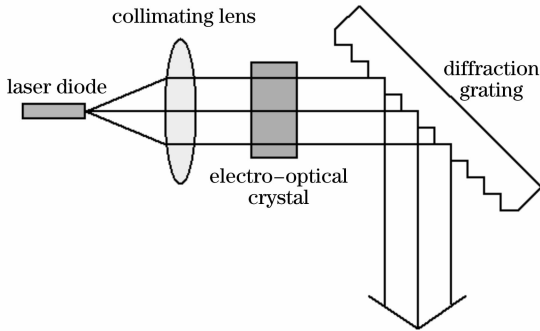


图 1 激光器的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser

温在 10 mK 以内,激光二极管(LD)电流在 100 mA 以内可调,恒温、恒流以及 PZT 驱动等电路均为自制。插入的 LiNbO₃ 晶体尺寸为 4 mm×4 mm×7 mm,选用 *z* 切,从 *x* 方向加压。

当激光器的温度为 20.0 °C、电流为 55 mA 时,激光器工作在 780 nm 的 ⁸⁷Rb 原子的 D2 线附近,PZT 调谐频率为 10 Hz,最高调谐频率为 100 Hz。图 2 中,用波长计(Burleigh WA-20VIS)测量激光波长,用饱和吸收光谱实现鉴频。饱和吸收光谱用 Rb 原子吸收池作为鉴频介质,用一束参考光和一束信号光做差分放大,信号光对面有一束抽运光来观测饱和和吸收信号。在 PZT 调谐时,通过饱和吸收光谱来检测 ⁸⁷Rb 原子的跃迁谱线,图 3 显示了 ⁸⁷Rb 原子 D2 线的两组饱和和吸收谱线。由于在腔内插入了电光晶体,激光器的光学腔长约为 35 mm,测得无跳模的调谐范围为 2~3 GHz。

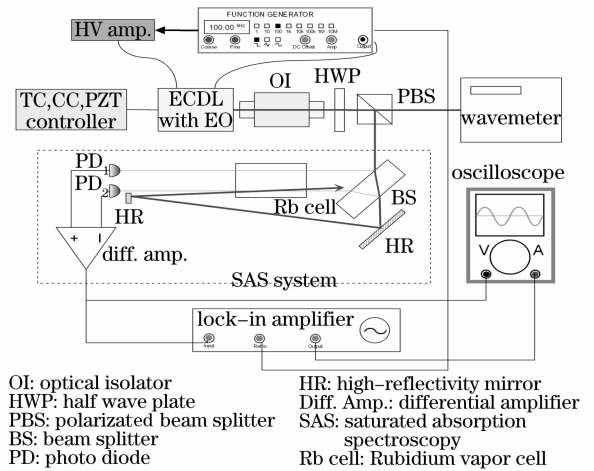


图 2 激光器波长及频率测量系统

Fig. 2 Laser wavelength and frequency measurement system

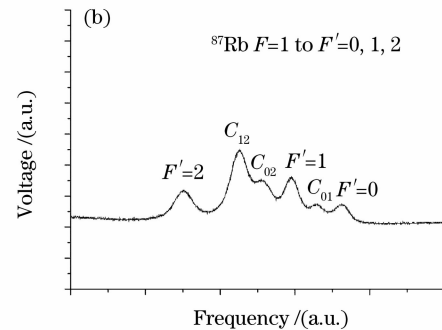
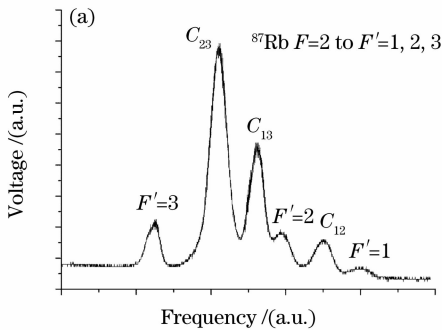


图 3 PZT 调谐获得的饱和吸收信号,调谐频率为 10 Hz。⁸⁷Rb 原子 D2 线的(a) $F=2 \rightarrow F'=1, 2, 3$ 谱线,
(b) $F=1 \rightarrow F'=0, 1, 2$ 谱线

Fig. 3 Saturated absorption signals by PZT tuning, frequency of 10 Hz. (a) $F=2 \rightarrow F'=1, 2, 3$,
(b) $F=1 \rightarrow F'=0, 1, 2$ transitions

用高压信号对电光晶体进行高压调谐,如图 4 所示,在 1 kHz 调谐频率下,可以清楚地分辨⁸⁷Rb 原子的饱和吸收谱线。在 2 kHz 的调谐频率下,谱

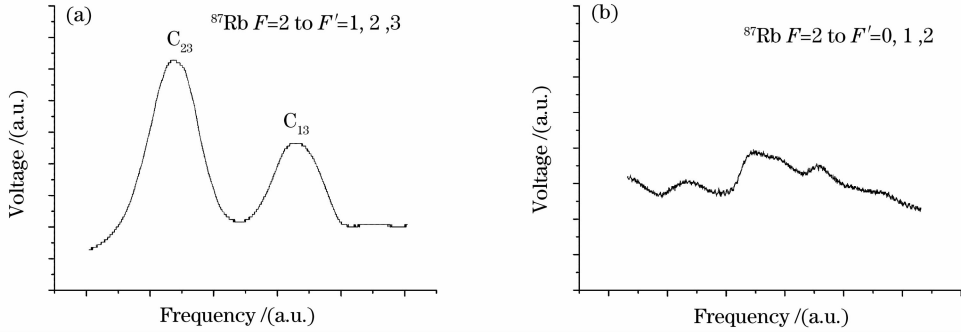


图 4 ⁸⁷Rb 的 D2 线, $F=2 \rightarrow F'=1, 2, 3$ 跃迁谱线。(a) C_{13} 和 C_{23} 交叉峰, 电光晶体的调谐频率为 1 kHz, (b) ⁸⁷Rb 的 D2 线, $F=1 \rightarrow F'=0, 1, 2$ 谱线, 电光晶体的调谐频率为 2 kHz

Fig. 4 Transition spectrum of $F=2 \rightarrow F'=1, 2, 3$ transitions of D2 line of ⁸⁷Rb atoms. (a) Shows the C_{13} and C_{23} cross-peaks with tuning frequency of the EO crystal with 1 kHz, (b) $F=1 \rightarrow F'=0, 1, 2$ transitions of D2 line of ⁸⁷Rb atoms with tuning frequency of the EO crystal with 2 kHz

电光晶体上的高压是用函数信号发生器(安捷伦公司的 HP33120A, 或者南京新联电子设备公司的 EE1642B)产生的三角波经过自制的高压放大电路(用 APEX 公司的 PA240CX 芯片制作, 放大倍数为 20)放大后加到 LiNbO₃ 晶体上的。受到芯片带宽和供电电压的限制, 高压的范围为 0~350 V, 高压的最大调谐频率为 2 kHz (PA240CX 的功率带宽为 30 kHz)。晶体上的高压只能加到 350 V, 因此激光器上电光晶体的调谐范围为 350 MHz。分析谱线畸变的原因, 除了 PA240CX 的增益带宽限制了激光调谐频率外, 光电管及差分放大电路的增益带宽也限制了测量更高频率的激光调谐。

电光晶体有较高的调制频率, 通过电光调制可以获得饱和吸收谱线的色散鉴频信号, 从而可以将激光频率锁定在⁸⁷Rb 原子的吸收峰或交叉峰上。给电光晶体加载较高频率(几千赫兹到几兆赫兹)的

正弦调制, 如图 2 所示, 将饱和吸收信号输入到锁相放大器可以获得很好的色散鉴频信号。如图 5 所示, 分别进行 5 kHz 和 100 kHz 的电光调制, 都获得了清晰的色散鉴频谱线。图 5(a)、图 5(b)分别为⁸⁷Rb 原子 D2 线的 $F=2 \rightarrow F'=1, 2, 3$ 谱线及色散鉴频谱线, 电光晶体上施加了 5 kHz 的正弦调制, 调制深度为 1 MHz, 图 5(c)、图 5(d)分别为其中的 C_{23} 交叉峰及其色散鉴频谱线, 电光晶体上施加了 100 kHz 的正弦调制, 调制深度为 1 MHz。图 5 中所示的色散鉴频信号要比饱和吸收信号延迟几个毫秒, 是由锁相放大器的积分电路引入的。

将色散鉴频信号输入到自制的比例积分电路中, 输出控制信号反馈到 PZT 上, 可以将激光器长时间稳定在⁸⁷Rb 原子 D2 线的任意一个饱和吸收峰或者交叉峰上, 实现对激光器频率的锁定。

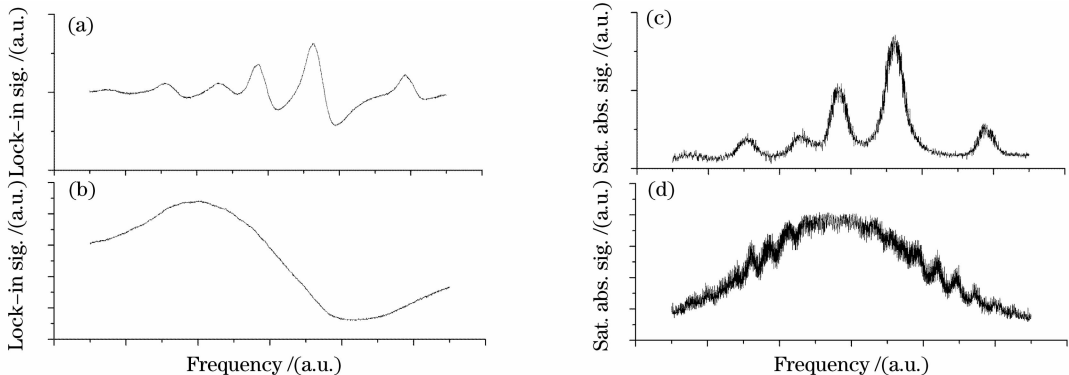


图 5 饱和吸收谱线及色散鉴频谱线

Fig. 5 Saturated absorption spectrum and its dispersive frequency discriminating spectrum

3 结 论

用自制的腔内电光调制的光栅反馈的外腔反馈激光器实现了 PZT 调谐, 电光快速调谐和电光快速调制, 通过电光快速调制获得了饱和吸收谱的色散信号, 并将激光器的频率稳定在饱和吸收谱的吸收峰和交叉峰上。和传统外腔反馈半导体激光器的调制光谱锁峰的几个方法比较: 用激光器电流调制可以产生高频的调制, 从而获得较窄的清晰的鉴频信号和较好的长期和短期频率稳定性, 但调制电流直接引入了功率噪声; 塞曼调制是外部调制, 不会引入额外的功率噪声, 但用于产生磁场的线圈限制了调制频率和调制幅度, 无法获得清晰的较窄的鉴频信号; 用电光晶体进行调制可以综合它们两者的优点, 既可以获得较高的调制频率和较大的调制范围, 又可以获得很窄的鉴频信号, 实现长时间的频率稳定, 而且不会影响激光器的输出功率, 引入功率噪声。因此, 用快速腔内电光调制实现的稳频技术具有很显著的优越性。激光器用原子的饱和吸收谱线实现了频率锁定, 预期稳定度可以在 1 MHz 内, 稳定性非常好; 利用电光的快速调谐特性还可以实现频率的快速移动。

参 考 文 献

- 1 L. Ricci, M. Weidemüller, T. Esslinger *et al.*. A compact grating-stabilized diode-laser system for atomic physics[J]. *Opt. Commun.*, 1995, **117**(5~6): 541~549
- 2 Desheng Lu, Kaikai Huang, Fengzhi Wang *et al.*. External cavity diode laser around 657 nm[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(11): 656~657
- 3 Guan Hua, Huang Guilong, Huang Xueren *et al.*. Construction of the tunable diode laser based on Littrow configuration[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(1): 33~36
管桦, 黄贵龙, 黄学人等. 基于 Littrow 结构的可调谐半导体激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 33~36
- 4 Carl E. Wieman, Leo Hollberg. Using diode lasers for atomic physics[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1991, **62**(1): 1~20
- 5 Zhang Jing, Tao Hua, Wei Dong *et al.*. A laser diode system stabilized on the saturated absorption line of Rubidium atoms[J].

- Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 197~201
张靖, 陶桦, 卫栋等. Rb 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 Kristan L. Corwin, Zheng-Tian Lu, Carter F. Hand *et al.*. Frequency-stabilized diode laser with the Zeeman shift in an atomic vapor[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(15): 3295~3298
 - 7 Ma Hongyu, Xu Zhen, Wang Yuzhu. Frequency stabilized laser by Zeeman effect and saturated absorption lines of Rubidium atoms[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(3): 123~126
马红玉, 徐震, 王育竹. 采用 Zeeman 效应与饱和吸收法的激光器稳频[J]. *光电工程*, 2006, **33**(3): 123~126
 - 8 A. E. Siegman. *Lasers* [M]. Sansalito, CA: University Science Books, 1986. 1283
 - 9 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. 6th edition, Springer Series in Optical Sciences, New York: Springer 2006. 748
 - 10 J. F. Kelly, A. Gallagher. Efficient electro-optic modulator for optical pumping of Na beams [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1987, **58**(4): 563~566
 - 11 J. R. Andrews. Electronically tunable single-mode external-cavity diode-laser[J]. *Optics Letters*, 1991, **16**(10): 732~734
 - 12 J. P. Goedgebuer, S. Gurib, H. Porte. Single frequency electrooptical tuning of an extended cavity diode-laser at 1500 nm wavelength [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(6): 1414~1418
 - 13 B. Wacogne, J. P. Goedgebuer, H. Porte. Single lithium-niobate crystal for mode selection and phase modulation in a tunable extended-cavity laser-diode [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(17): 1334~1336
 - 14 B. Boggs, C. Greiner, T. Wang *et al.*. Simple high-coherence rapidly tunable external-cavity diode laser[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(24): 1906~1908
 - 15 M. Laschek, D. Wandt, A. Tunnermann *et al.*. Electro-optical frequency modulation of an external-cavity diode laser[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **153**(1~3): 59~62
 - 16 L. Levin. Mode-hop-free electro-optically tuned diode laser[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(4): 237~239
 - 17 Kevin S. Repasky, Gregg W. Switzer, John L. Carlsten. Design and performance of a frequency chirped external cavity diode laser [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, **73**(9): 3154~3159
 - 18 Yu-Ping Lan, Ru-Pin Pan, Ci-Ling Pan. Mode-hop-free fine tuning of an external-cavity diode laser with an intracavity liquid crystal cell[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(5): 510~512
 - 19 Pin Wang, Leong Kee Seah, Vadakke Matham Murukeshan *et al.*. External-cavity wavelength tunable laser with an electro-optic deflector[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(34): 8772~8776
 - 20 P. Wang, L. K. Seah, V. M. Murukeshan *et al.*. Electronically tunable external-cavity laser diode using a liquid crystal deflector [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(15): 1612~1614