

文章编号: 0258-7025(2007)01-0033-04

基于 Littrow 结构的可调谐半导体激光器

管 桦^{1,2,3}, 黄贵龙^{1,2}, 黄学人^{1,2}, 郭 彬^{1,2,3}, 舒华林^{1,2,3}, 高克林^{1,2}

(¹ 中国科学院武汉物理与数学研究所, 湖北 武汉 430071
² 中国科学院武汉冷原子物理中心, 湖北 武汉 430071; ³ 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 市售的商用半导体激光器由于其线宽宽、抖动和漂移大等缺点, 不能满足离子阱中单个钙离子的激光冷却和精细测量实验的要求。因此, 制作了一台可调谐的 Littrow 结构的半导体激光器(ECDL)。该激光器的自由光谱程为 1.5 GHz, 通过精细调节光栅的角度, 激光的波长可以覆盖 775~785 nm。该激光器的线宽约为 2.5 MHz, 抖动为 3~4 MHz, 30 min 内的漂移约为 50 MHz, 这些指标优于商用的 DL100 半导体激光器, 为下一步用于单个钙离子的激光冷却和精细测量所需要的 397 nm 和 866 nm 激光器的制作提供了条件。

关键词 激光技术; 半导体激光器; Littrow 结构; 可调谐

中图分类号 TN 248.4 文献标识码 A

Construction of the Tunable Diode Laser Based on Littrow Configuration

GUAN Hua^{1,2,3}, HUANG Gui-long^{1,2}, HUANG Xue-ren^{1,2},
GUO Bin^{1,2,3}, SHU Hua-lin^{1,2,3}, GAO Ke-lin^{1,2}

¹ Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China
² Centers for Cold Atom Physics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China
³ Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract Because of the large linewidth, dither and drift, the commercial diode laser cannot meet the requirement of the experiments of laser cooling and elaborating measurement of a single calcium ion trapped in an ion trap. In this paper, a tunable Littrow-configuration external cavity diode laser (ECDL) is constructed. The free spectral range of the laser cavity is 1.5 GHz. By adjusting the angle of the grating, wavelength of the laser can be adjusted from 775 nm to 785 nm. Linewidth of the laser is less than 2.5 MHz, dithering of the laser is about 3~4 MHz, and drift of the laser is about 50 MHz within 30 minutes. These indexes are better than those commercial DL100 lasers. The laser is the base that will construct the next 397 nm and 866 nm lasers for laser cooling and elaborating measurement of a single calcium.

Key words laser technique; diode laser; Littrow configuration; tunable

1 引言

半导体激光器由于结构紧凑、运行稳定、操作方便、价格便宜等特点, 在精密光谱、原子物理及量子光学等方面获得了广泛的应用^[1~4], 另外, 大功率激光二极管还可作为固体激光器的抽运源^[5~7]。在⁴⁰Ca⁺光频标实验中, 需要两台半导体激光器(冷却

光 397 nm, 回抽运光 866 nm) 实现激光冷却, 一台激光器(729 nm) 实现光频测量, 目前所用的激光器是商用的 DL100 激光器, 由于它的腔长比较短, 只有 10 mm 左右, 故线宽比较宽, 测量的结果是线宽为 5~10 MHz, 抖动为 5~10 MHz, 这对精密光谱实验来说是不能满足要求的。因此, 开展了半导体激光

收稿日期: 2006-05-17; 收到修改稿日期: 2006-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(60490280)和 973 计划(2005CB724500)资助项目。

作者简介: 管桦(1979—), 男, 重庆云阳人, 博士研究生, 主要从事单个囚禁⁴⁰Ca⁺光频标实验的研究。

E-mail: gery2001cn@hotmail.com

导师简介: 高克林(1958—), 男, 湖北人, 研究员, 博士生导师, 目前研究方向为单个 Ca⁺ 离子光频标。

E-mail: klgao@wipm.ac.cn

器的研制工作。

2 半导体激光器

半导体激光器的结构主要有两种,一种是 Littrow 结构^[8~11],另一种为 Littman 结构^[12,13],这两种结构见图 1^[11]和图 2^[12]。在 Littrow 结构的半导体激光器中,1 级衍射光被耦合到激光管,0 级光被反射作为激光的输出。Littman 结构的半导体激光器中,1 级衍射光反射到增加的反射镜上,被反射镜反射回光栅后,再次衍射的 1 级光回到激光管,而 0 级光作为激光器的输出。由于经过了两次衍射,所以 Littman 结构的激光器的输出功率比相同条件下 Littrow 结构的低。然而它的线宽要比 Littrow 结构的窄很多。由于 Littman 结构需要加另外一块镜子,并且需要更长的光栅,因此它的结构比 Littrow 结构要复杂;另一方面,由于 Littrow 结构的衍射效率要比 Littman 结构的高,所以对于要求较高功率的情况或者要求设计简单而对激光线宽的要求不是特别高的情况,常选用 Littrow 结构的半导体激光器。

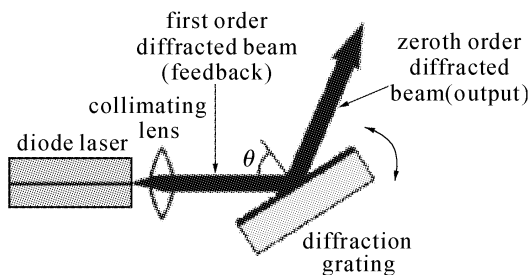


图 1 基于 Littrow 结构的半导体激光器

Fig. 1 Diode laser based on the Littrow-configuration

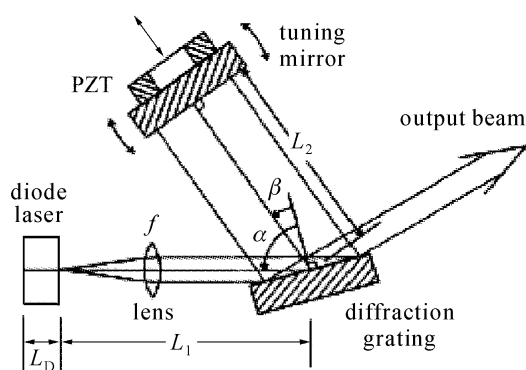


图 2 基于 Littman 结构的半导体激光器

Fig. 2 Diode laser based on the Littman-configuration

3 实验装置

首先研制 780 nm 半导体激光器,此激光器是

按照 Littrow 结构设计的。

采用这种设计,主要是基于以下的两个考虑:1)制作的激光器是为制作 397 nm 和 866 nm 激光器做准备的,397 nm 和 866 nm 激光用于钙离子的激光冷却,离子激发态的跃迁谱线线宽约为 20 MHz,所以并不要求激光线宽做得很窄,1 MHz 以下足够了。2)希望激光的输出功率尽量大,实验室现有的 397 nm 激光管的输出功率只有 5 mW,经过一次光栅选模之后,激光的输出功率只有 2~3 mW,如果采用 Littman 结构,激光的输出功率会更低,再经过光学元件之后到离子阱里的功率就很小了。

激光谐振腔可以看成一平面腔,平面腔的纵模线宽 $\Delta\nu$ 的计算公式为^[14]

$$\Delta\nu = \frac{c(1-R)}{2\pi nt\sqrt{R}}, \quad (1)$$

式中 c 为真空中的光速, R 为镜子的反射率, n 为空气的折射率, t 为腔长。

由(1)式可以看出,在谐振腔的镜子的反射率相同的情况下,腔越长,谐振腔的纵模线宽越窄,因此输出激光的线宽越窄。所以设计了腔长为 100 mm 的激光谐振腔,远远大于购买的腔长为 10 mm 的商用 DL100 激光器。

制作的激光器由主体部分(激光头)、精密温度和电流控制部分以及压电陶瓷(PZT)扫描控制部分组成。激光器的腔长为 100 mm。实验中所用的激光二极管为 Sanyo 公司的 DL7140-201 激光管,波长范围为 775~785 nm,中心波长在 780 nm,输出功率为 20 mW 左右。所用的准直镜为 Melles Griot 公司的 06GLC009(波长范围为 670~1550 nm),光栅为 Optometrics 公司的 3-4175 ($d = 1200$ lines/mm),激光管和准直镜分别固定在用黄铜加工的架子上,而光栅固定在压电陶瓷(PI Ceramic 公司,型号为 PT130.30)上,压电陶瓷再固定在一个可以精细调节并能锁定的二维光具座(Newport 公司,型号为 SL25.4BD)上。激光管底座、准直镜支架和光栅支架固定在一个铝盒里。该铝盒由整块铝铣成。铝盒的外部尺寸为 242 mm × 132 mm × 128 mm,壁厚 6 mm。由于半导体激光器的性能很大程度上由激光管的温度和电流决定,因此对温度和电流控制部分进行了精密的设计。其中温控系统采用的是双层恒温的设计。首先对铝盒进行恒温处理,采用的方法是在铝盒的四角固定四片达林顿管(型号为 BDX53C),通过达林顿管加热铝盒使盒子的温度稍稍高于室温(一般设置在 26 °C)。通过这一级恒温,

可以将铝盒的温度变化控制在 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围。在此基础上,激光管的恒温电路采用的是电桥的方式,电桥的控制端采用的是精密可调的波恩斯电位器(10 K,精度 10^{-5}),可以精确设置激光管的参考温度。测温端采用的是10 K负温度系数的热敏电阻。加热和制冷元件采用的是 Pelter(TEC)(RS 公司,型号为 PE-031-10-13)。铝盒和激光管的温度均采用 LM35CZ 测量。通过双重恒温,可以将激光管的温度变化控制在 $\pm 0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围。激光器的电流源采用的是场效应管(型号为 VP0106)精确控制输出电流的模式。实验中通过精确控制 VP0106 的源极和漏极之间的电压 V_{SD} ,可以精确控制输出到激光管的电流。实验测得激光管的电流的纹波在 $1\text{ }\mu\text{A}$ 以下。压电陶瓷的控制电路采用的是 SC100 商用模块,可以输出 $0\sim 120\text{ V}$ 锯齿波,偏置电压可以在 $0\sim 120\text{ V}$ 之间调节。

4 激光器性能测试

为测量激光器的性能和运行情况,用法布里-珀罗(Fabry-Perot)干涉仪来测量激光器的线宽、稳定性和漂移。法布里-珀罗干涉仪型号为 Toptica 公司生产的 PFI100。自由光谱程为 1 GHz ,细度约为 400 左右。测量的光路图如图 3 所示。

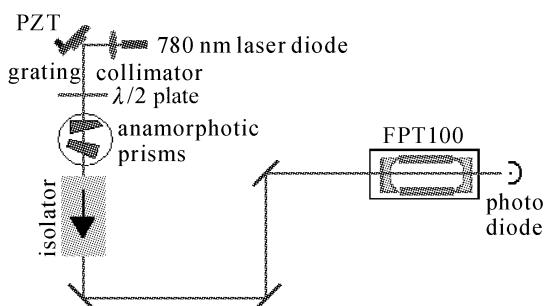


图 3 激光器性能测试光路图

Fig. 3 Sketch map of measuring the performance of the diode laser

测试时,激光管的温度设为 $24.24\text{ }^{\circ}\text{C}$,注入电流为 68.3 mA ,通过调节光栅的角度,激光的输出波长可以从 774.886 nm 调节到 786.154 nm ,选取的测试波长为 781.500 nm ,输出功率为 15.1 mW 。用干涉仪测量的结果见图 4 和图 5。

图 4 为扫描 FPI100 得到的同一个模的两个透射峰,由于是在同一个扫描周期之内,所以两个峰之间的频率间隔为一个自由光谱程,即 1 GHz 。图 5 为图 4 中的一个峰的展开。图 4 中两个峰之间的时间

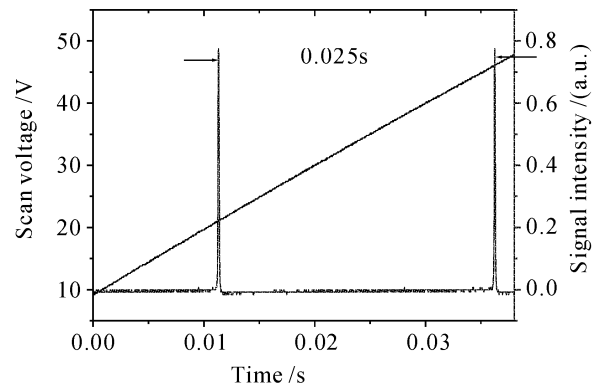


图 4 扫描 FPI100 得到的同一波长的两个干涉峰
Fig. 4 Two fringes of the laser by scanning the FPI100

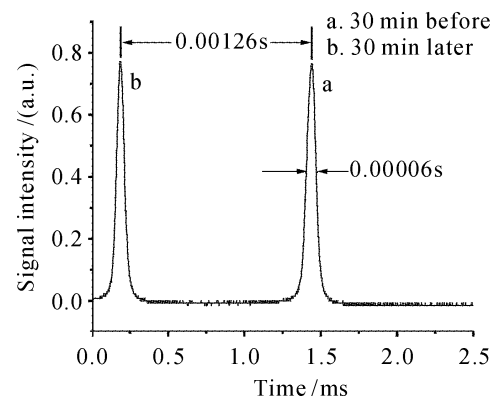


图 5 图 4 的两个峰中其中一个放大之后的情况
Fig. 5 Expanding fringe of one of the two fringes in figure 4

间隔为 0.025 s ,而图 5 中干涉峰 a 的半峰全宽(FWHM)为 0.00006 s 。所以通过展开的峰的宽度来看,激光的线宽约为 2.5 MHz ,该峰的抖动为 $3\sim 4\text{ MHz}$ 。图 5 中 b 为 a 30 min 之后的位置,可以看到激光的频率漂移约 50 MHz 。激光器抖动和漂移比商用的激光器小的优势主要源于两个方面:1) 采用了双层恒温的设计,将激光管的温度变化控制在 $\pm 0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$,同时采用了精密的电流源电路。2) 有别于商用的激光器的激光头由分离的铝板固定起来组成一个整体的结构,而是采用了将整块铝铣成的一个完整的结构,然后各个部件均固定在里面。这一方面可以使激光头各部分的温度比较恒定,另一方面又可以增加激光谐振腔的稳定性。

5 结 论

结果表明,研制的 780 nm 半导体激光器的线宽约为 2.5 MHz ,抖动约 $3\sim 4\text{ MHz}$,30 min 内的漂移约 50 MHz ,这些指标均优于商用的半导体激光器的指标,进一步可方便地用于 397 nm 和 866 nm 激光

器的研制,为 $^{40}\text{Ca}^+$ 的激光冷却和精细测量打下了基础。再通过 Pound-Drever-Hall 方法稳频,可以很容易地把激光器的线宽压窄到1 MHz以下。

致谢 感谢中国科学院武汉物理与数学研究所的朱熙文研究员、李交美高级工程师在理论和技术上的指导和帮助。

参 考 文 献

- 1 Mark W. Fleming, Aram Mooradian. Spectral characteristics of external-cavity controlled semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**(1):44~59
- 2 Carl E. Wieman, Leo Hollberg. Using diode lasers for atomic physics [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**(1):1~20
- 3 K. B. MacAdam, A. Steinbach, C. Weiman. A narrow-band tunable diode laser system with grating feedback, and a saturated absorption spectrometer for Cs and Rb [J]. *Am. J. Phys.*, 1992, **60**(12):1098~1111
- 4 K. G. Libbrecht, R. A. Boyd, P. A. Willems *et al.*. Teaching physics with 670 nm diode lasers-ionstruction of stabilized lasers and lithium cells [J]. *Am. J. Phys.*, 1995, **63**(8):729~737
- 5 Feng Lichun, Huo Yujing, He Shufang. LD-pumped acousto-optically Q-switched 473 nm laser with high repetition rate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8):1027~1030
冯立春,霍玉晶,何淑芳. 激光二极管抽运声光调Q高重复频率473 nm激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(8):1027~1030
- 6 Yao Baoquan, Ju Youlun, He Wanjun *et al.*. Experimental analysis of spectral properties of (Tm, Ho):YLF laser pumped by a laser diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7):935~938
姚宝权,鞠有伦,贺万骏等. 激光二极管抽运(Tm, Ho):YLF激光器光谱特性实验分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7):935~938
- 7 Yuezhu Wang, Xingbao Zhang, Baoquan Yao *et al.*. Fiber-coupled diode end-pumped Q-switched Tm, Ho:YLiF₄ laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(6):337~338
- 8 A. S. Arnold, J. S. Wilson, M. G. Boshier. A simple extended-cavity diode laser [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1998, **69**(3):1236~1239
- 9 C. J. Hawthorn, K. P. Weber, R. E. Scholten. Littrow configuration tunable external cavity diode laser with fixed direction output beam [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, **72**(12):4477~4479
- 10 Ch. Schwedes, E. Peik, J. Von Zanthier *et al.*. Narrow-bandwidth diode-laser-based blue and ultraviolet light source [J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **76**(2):143~147
- 11 Wenxian Hong. Design and characterization of a littrow configuration external cavity diode laser. www.cee.org/rsi/docs/2004Papers/hong-wenxian-caltech-both.pdf
- 12 K. C. Harvey, C. J. Myatt. External-cavity diode laser using a grazing-incidence diffraction grating [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(12):910~912
- 13 Sang Eon Park, Taeg Yong Kwon, Eun-joo Shin *et al.*. A compact extended-cavity diode laser with a Littman configuration [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2003, **52**(2):280~283
- 14 Wu Qiang, Guo Guangcan. Optics [M]. First edition. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1996. 141
吴强,郭光灿. 光学[M]. 第一版. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1996. 141