

文章编号: 1007-6654(2007)01-0056-05

## 基于降温技术的宽范围外腔光栅可调谐半导体激光器\*

卫 栋, 熊德智, 陈海霞, 张 靖<sup>†</sup>

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电所, 山西 太原 030006)

摘要: 使用半导体制冷块, 通过优化设计两级制冷系统, 并结合隔离、密封等措施, 将 LD 的温度冷却到  $-20^{\circ}\text{C}$ , 使室温下输出波长为  $789\text{ nm}$  的激光器工作在  $780\text{ nm}$  附近, 改变了约  $9\text{ nm}$ 。结合外腔光栅反馈技术, 可以使激光器的输出波长稳定在 Rb 原子的  $D_2$  线上。自制了一个简单的电路, 能够以适当的比例同时调谐光栅压电陶瓷的电压和激光器的驱动电流, 使激光器可以连续调谐  $10\text{ GHz}$  以上而不跳模。

关键词: 激光器; 半导体激光器; 半导体制冷; 外腔光栅反馈

中图分类号: O431 文献标识码: A

### 0 引言

随着激光技术的发展和半导体激光器件性能的提高, 窄线宽可调谐半导体激光器已成为高分辨率光谱、激光冷却原子<sup>[1~3]</sup>等实验的常用光源。相对于染料激光器和钛宝石激光器而言, 半导体激光器具有价格低、可靠性高、操作简单等优点。它的缺点是功率较小, 波长范围有一定限制。目前在提高功率方面, 已经有比较成熟的半导体激光放大器, 能够在输入功率很小的情况下, 得到比较大的功率输出, 如德国 Toptica 公司生产的 Tapered Amplifier 在输入功率几十毫瓦时, 输出功率可以达到瓦级以上; 但是在波长方面, 通常商用的激光二极管都限制在某一个波段范围内。在冷原子物理和激光光谱学研究中, 要求激光器的波长位于原子的某一条跃迁线附近或者与原子的跃迁线共振, 如研究最多的<sup>87</sup>Rb 原子, 其用于冷却和俘获的跃迁线是在  $780\text{ nm}$  附近的 Rb 原子  $D_2$  线。商用激光二极管的波长与原子的跃迁线通常都有一定的差别, 当差别较小时, 我们可以用外腔光栅反馈的方法把波长调谐到所需波长上。但在两者相差比较大的情况下, 只靠调节光栅是无法调好的。此时必须寻找一种能够使激光器的波长

变化较大范围的方法。本文采用半导体制冷块对激光二极管进行冷却, 结合外腔光栅反馈技术, 可以使常温下输出波长为  $789\text{ nm}$  的激光器稳定工作在  $780.2\text{ nm}$  铷原子的  $D_2$  线上, 通过一个自制的电路同时调谐光栅压电陶瓷的电压和激光器的驱动电流, 激光器可以连续调谐  $10\text{ GHz}$  以上而不跳模。

### 1 实验原理

我们知道, 半导体激光器的增益曲线范围很宽, 通常有几十个纳米, 而且增益曲线会随着温度的变化而发生移动, 当温度降低时, 增益曲线向波长减小的方向移动, 输出激光的波长减小。因此可以通过改变激光二极管的工作温度来改变输出激光的中心波长, 如图 1 中的实线所示。另一方面, 尽管商用半导体激光器在自由运转时能够保证单模运转, 但激光器的线宽比较宽。为了压窄输出激光的线宽和降低输出激光的噪声, 精确地调谐输出激光的波长, 通常在外腔加上一光学反馈元件如光栅、F-P 腔等, 将一部分光反馈回激光器来改善激光器的性能。其中外腔光栅反馈技术使用最为普遍。在外腔加上光栅

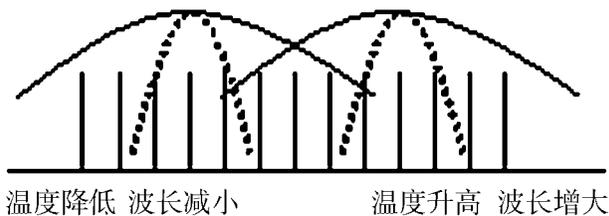
\* 收稿日期: 2006 11 17

基金项目: 教育部新世纪人才支持计划 (NCET-04-0256); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20050108007); 山西省自然科学基金 (2006011003)

作者简介: 卫栋 (1977), 男, 山西曲沃人, 博士生, 现从事量子光学与超冷原子物理。

<sup>†</sup> 通讯联系人: E-mail: jzhang74@yahoo.com, jzhang74@sxu.edu.cn

让一级衍射光反馈回激光器, 零级光作为输出光以 Littrow 的方式形成外腔光栅反馈半导体激光器<sup>[4]</sup>时, 由于光栅的色散作用, 反馈回激光器的一级衍射光中不同波长的光被散射开来, 调节光栅的反馈角度使其中某一个波长的光由于增益最大而形成稳定的振荡, 同时其它频率的振荡由于无法获得足够的增益而受到抑制。这样通过调节光栅的反馈角度可以在一定的范围内调谐激光器的波长, 如图 1 中的虚线所示。采用光栅反馈的方法调谐波长时, 距离中心波长比较远的边模由于增益较小而无法形成稳定的振荡, 所以通过光栅调节波长的范围不是很大, 一般是 5 nm ~ 8 nm。当然, 如果使用镀有减反膜的 LD 波长的调谐范围会很宽, 可以达到 30 nm ~ 40 nm。可是镀减反膜的 LD 的价格昂贵, 在实际工作中受到了一定的制约。在本文中我们利用降温的方法, 先把激光器的中心波长冷却到需要的波长附近, 然后结合外腔光栅反馈技术, 把波长精确地调谐到需要的波长上。



图中实线表示自由运转激光器,  
虚线表示存在光栅反馈的激光器。

图 1 激光器工作原理图

The solid line is for free running laser and  
the dotted line is for grating feedback laser

Fig 1 The laser's operation principle

实验中, 通过降低温度让波长移动比较大的范围并非易事, 因为对一般激光二极管来说, 温度系数的典型值是  $0.25 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。这就意味着需要的波长越小, 温度降低的就越大。要想得到比较低的温度, 最关键的是要有一个高效的制冷系统。过去人们采用液氮进行冷却得到比较低的温度, 但是操作起来非常麻烦。最近有人<sup>[5-6]</sup>利用半导体制冷块对 LD 冷却, 取得了比较理想的效果。半导体制冷块 (TEC) 利用半导体电偶对的珀尔贴效应来实现制冷, 没有任何转动部件, 具有无震动、无噪音、体积小等特点, 是一种比较理想的制冷器件。在零负载的情况下,

单级 TEC 上下两面的温差可以达到  $70^\circ\text{C}$  以上。实际使用时由于负载和 TEC 热面散热速率的限制, 两面温差通常只能达到标称值的一半左右。为了将 LD 冷却到比较低的温度, 我们采用两级制冷的方式。但是两级制冷又产生一个新问题。因为 TEC 的效率很低, 只有百分之十几, 在制冷的过程中 TEC 本身会产生大量的热, 第一级 TEC1 产生的热量就成了第二级 TEC2 的主要负载, 如果第二级 TEC2 不能及时将这些热量带走, 必然引起第一级 TEC1 热面温度的增加, 致使制冷效率降低。因此通过优化设计选择合适的 TEC 组合, 才能实现最佳制冷效果。

第二, 除了有一个高效的制冷系统外, 尽量减小负载才能保证制冷系统正常工作。如果 LD 的温度很低而周围大气的温度很高, 热量将以传导、对流和辐射等方式从大气传输给 LD, 这时周围的大气就成了很大的负载, 因此必须尽量减小大气对 LD 的加热作用。解决的办法是先用绝热材料把 LD 整个罩起来, 减小 LD 与空气的接触面积, 再把 LD 和准直透镜一起密封在一个盒子里, 使盒子内的空气与盒子外面的空气隔离, 然后把盒子里除了光路通过的部分外, 都用绝热塑料泡沫塞满, 减小盒子内的空气量和空气的流动, 这样在最大程度上减小空气对 LD 的加热作用。同时, 空气中的水蒸气在温度很低时会结成冰。如果水蒸气在 LD 的表面凝结成冰, 就会对通过的激光束产生散射作用, 影响激光器的性能。当采取了密封与隔离措施后, 盒子内的空气是与外界隔离的, 加上盒子内的大部分空间都由塑料泡沫填充, 盒子内的空气量很有限, 水蒸气的含量很少, 再往盒子内放入一小袋干燥剂, 进一步吸收空气中的水蒸气, 确保不会在 LD 表面结冰。

另一方面, 在外腔光栅反馈半导体激光器中, 激光二极管的前后表面形成一个谐振腔, 光栅与激光二极管的后表面之间也形成一个谐振腔, 在这两个谐振腔中, 分别存在独立振荡的激光场。只有当这两个光场的位相一致时, 激光器才能够运转在单模状态。要想在不跳模的条件下连续调谐激光器的频率, 必须使这两个光场的位相始终保持一致。目前主要有两种方法, 一种方法是使用前表面镀有减反膜的激光二极管, LD 前后表面谐振腔之间的激光场

由于输出损耗增大而不能形成振荡;另一种方法是同时扫描激光器的腔长和驱动电流,在调谐激光器的过程中使上述两个光场的位相总保持一致,这种方法只需要一个简单的电路就能实现,而且成本便宜,因此受到了人们的关注<sup>[7]</sup>。我们使用普通的集成运算放大器 LF356和一些电阻、电容制作了一个简单的电路,该电路把扫描信号分成两路,分别加载在光栅压电陶瓷 PZT和激光器电流源上,调节两路信号的大小以适当的比例同时扫描激光器的腔长和电流,可以增大扫描的范围。

## 2 实验装置与结果

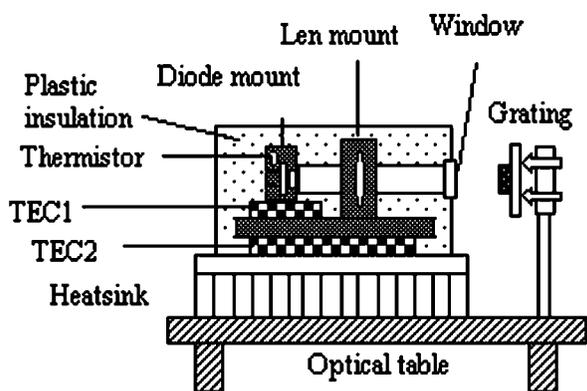
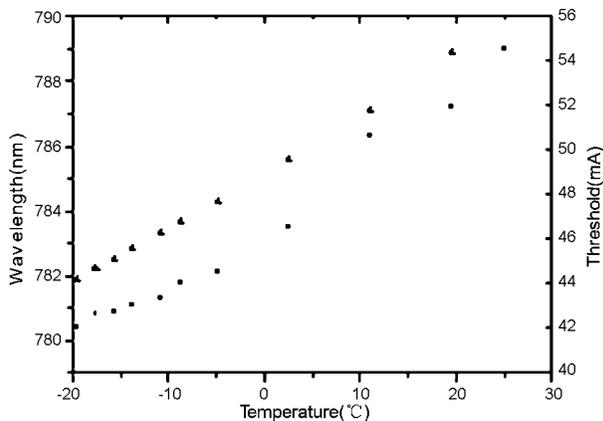


图 2 激光器结构示意图

Fig 2 Layout of laser structure



图中方块代表波长,三角代表阈值

图 3 激光器自由运转时波长和阈值随温度变化的关系

Fig 3 Free running wavelength and threshold vs temperature

图 2 是我们制作的半导体激光器结构示意图。激光二极管 (Sharp LT025M DO) 芯片的典型尺寸长 \* 宽 \* 高分别是  $300 \mu\text{m} * 250 \mu\text{m} * 125 \mu\text{m}$ 。其中发射区截面只占芯片总高度的很小一部分。在  $25^\circ\text{C}$  自由运转时的波长是  $789 \text{ nm}$ , 使用两个半导体

制冷块 (TEC) 组成级联方式对二极管制冷, LD 安装在紫铜热沉 I 中, 通过对塞入热沉 I 中的热敏电阻 (MFH 103-3380  $\pm 1\%$ ) 阻值的测量来确定 LD 的温度。热沉 I 下面是  $15 \text{ mm} * 15 \text{ mm} * 3 \text{ mm}$  的制冷块 TEC1, 大小为  $40 \text{ mm} * 40 \text{ mm} * 5 \text{ mm}$  的紫铜热沉 II 与 TEC1 的热面相连接, 用来吸收 TEC1 热面的热量, 以保证 TEC1 的两面具有较大的温差。准直透镜 (Thorlabs C230IM-B) 装在一个紫铜块上并固定在热沉 II 上。热沉 II 的下面是制冷块 TEC2 ( $30 \text{ mm} * 30 \text{ mm} * 4 \text{ mm}$ ), TEC2 直接放置在一个密封性很好 (IP65 标准) 的铝盒上, 铝盒大小为  $100 \text{ mm} * 100 \text{ mm} * 80 \text{ mm}$ , 壁厚为  $4 \text{ mm}$ 。铝盒固定在一块大散热片上, 可以及时将 TEC2 热面传导给铝盒的热量散发掉, 避免铝盒温度升高引起盒内温度的反弹。热沉与 TEC1, TEC II 与铝盒以及铝盒与散热片接触的地方都涂有导热硅脂, 保证良好的导热效果。所有需要固定的地方都使用尼龙螺丝, 杜绝不同温度部分之间的热传递。出光孔用一片镀有双面减反膜的平面窗口密封。盒子里放入一小袋干燥剂用来吸收空气中的水分。

整个装置和光栅一起固定在一个自制的小平台上, 光栅架在一个三维光学镜架上, 光栅的后面有一个压电陶瓷, 通过调节三维光学镜架可以改变光栅的反馈角和俯仰角, 能够调谐激光器的波长和反馈光的强度; 扫描压电陶瓷的电压相当于细调激光器的腔长, 能够在一定的范围内扫描激光器的频率。光栅的一级衍射光反馈回激光器, 零级光作为输出光形成 Littrow 结构的外腔光栅反馈半导体激光器, 得到了窄线宽低噪声的激光输出。实验中使用的光栅是 1200 线/mm, 大小是  $12.7 \text{ mm} * 12.7 \text{ mm}$  (Edmund Optics T43-772), 对  $780 \text{ nm}$  激光, 光栅与激光出射方向之间的夹角是  $27.9^\circ$ ; 光栅的一级衍射效率是  $20\%$ , 衍射损耗约  $20\%$ , 当激光器注入电流为  $90 \text{ mA}$  时, 得到了  $11 \text{ mW}$  的激光输出。输出激光通过一个与光栅底座相连的高反镜反射输出, 这样调节光栅的角度输出光的方向保持不变。实验中通过调节三维光学镜架, 激光器的波长可以从  $774 \text{ nm}$  调到  $782.6 \text{ nm}$ 。因为 LD 没有镀减反膜, 所以调谐的范围不是很宽。扫描压电陶瓷的电压, 可以扫描出铷原子 D 线的一个吸收峰, 如图 5 所示。图 6

是我们自制的电路图。当以适当的比例同时扫描光栅压电陶瓷的电压和激光器的电流时,可以在 10 GHz 的范围内连续扫描而不跳模,图 7 是扫描得到的一组完整的铷原子  $D_2$  线饱和吸收谱线。我们利用平衡零拍探测技术测量了激光器的强度噪声,实

验装置如图 4 所示,每只探测器前的功率为 270  $\mu$ W,用频谱分析仪(HP8890L)记录光电流信号,如图 8 所示,在 1.3 MHz 以后,激光器的强度噪声与散粒噪声极限(SNL)基本相等。

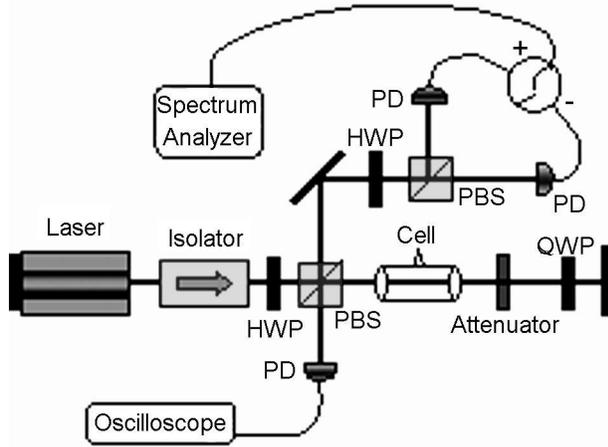


图 4 实验装置图

Fig 4 The setup of experiment

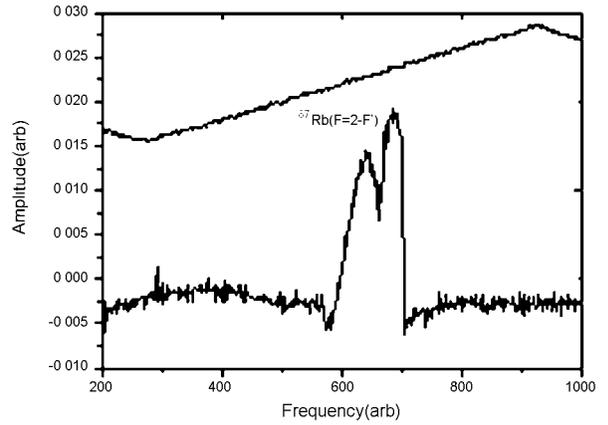


图 5 扫描压电陶瓷观察到的铷原子的饱和吸收谱线

Fig 5 A saturated absorption spectrum of Rubidium  $D_2$  line when scanning PZT

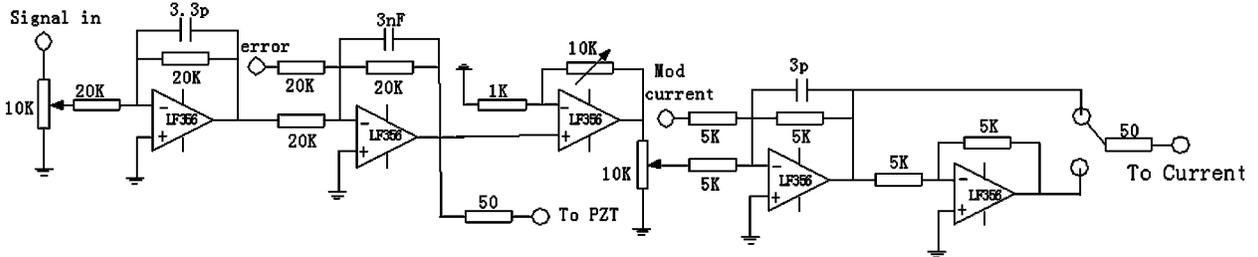


图 6 可以同时调谐光栅压电陶瓷的电压和激光器的驱动电流的电路图

Fig 6 Circuit schematic of the scan the voltage of PZT and current source simultaneously

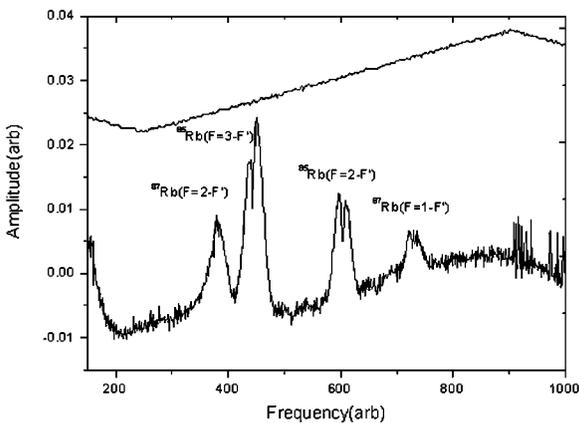
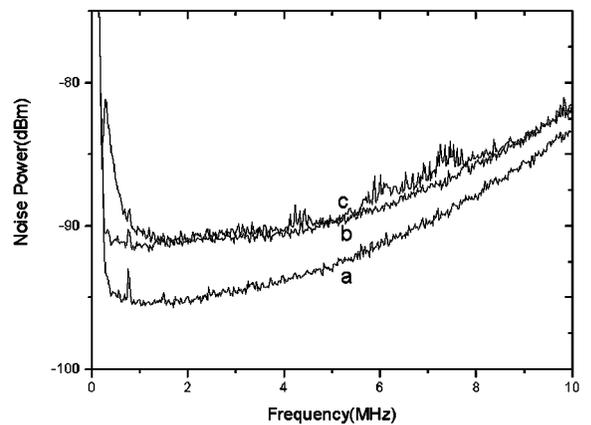


图 7 同时扫描压电陶瓷的电压和激光器的电流观察到的铷原子的饱和吸收谱线

Fig 7 A saturated absorption spectrum of Rubidium  $D_2$  line when scanning PZT and diode's current simultaneously



a 电子学噪声; b 散粒噪声基准; c 激光器强度噪声

图 8 激光器强度噪声曲线

a Electronic noise; b Shot noise limit; c Intensity noise spectrum of the diode laser

Fig 8 Intensity noise spectrum of the diode laser

### 3 总结

我们利用半导体制冷块对密封在 IP65 标准铝盒中的 LD 进行冷却, 当温度冷却到  $-20^{\circ}\text{C}$  时, 可以让波长 789 nm 的 LD 稳定工作在 780.2 nm 铷原子的  $D_2$  线上, 并给出了铷原子  $D_2$  线的饱和吸收谱和激光器的强度噪声曲线, 下一步我们将对整个装置进行更进一步的改进, 主要措施包括: 1. 优化制冷系

统和密封隔离措施, 把温度降得更低; 2. 采用精密温控仪对 LD 控温, 减小温度上下浮动引起的激光器的频率漂移; 3. 将光栅安装在铝盒内, 减小外界机械振动、空气流动等环境因素引起的激光器的抖动, 从而使 780 nm 附近的激光二极管工作在 767 nm 附近, 这将为进行量子间并费米气体  $^{40}\text{K}$  实验研究提供光源。

### 参考文献:

- [ 1 ] W IEMAN C E, HOLLBERG L. Using Diode Lasers for Atomic Physics [ J ]. *Rev Sci Instrum*, 1991, **62**: 1-20.
- [ 2 ] 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**: 197-201.
- [ 3 ] ZHANG Jing, WEI Dong, XIE Chang de, *et al*. Characteristics of Absorption and Dispersion for Rubidium  $D_2$  Lines with the Modulation Transfer Spectrum [ J ]. *Opt Express*, 2003, **11**: 1338-1344.
- [ 4 ] DAY T, LUECKE F, BROWNELL M. Continuously Tunable Diode Lasers [ J ]. *Lasers and Optics* 1993, **6**: 15-17.
- [ 5 ] FLETCHER C S, CLOSE J D. Extended Temperature Tuning of an External Cavity Diode Laser [ J ]. *Appl Phys B*, 2004, **78**: 305.
- [ 6 ] DEMARCO B. Quantum Behavior of an Atomic Fermi Gas [ D ]. Ph. D. thesis, 2001 University of Colorado Boulder.
- [ 7 ] PETRIDIS G, LINDSAY I D, STOTHARD D J M, *et al*. Mode-hop free Tuning Over 80 GHz of an Extended Cavity Diode Laser Without Antireflection Coating [ J ]. *Rev Sci Instrum*, 2001, **72**( 10 ): 3811-3815.

## W idely Tunable External Cavity Diode Laser Based on Lower Temperature

W E I D o n g   X I N G D e z h i   C H E N H a i x i a   Z H A N G J i n g

( *The State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Optoelectronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China* )

**Abstract** By using TEC cooling and making the design of diode cooling system perfect and combined with such measures as quarantining and sealing, the temperature of LD is cooled to  $-20^{\circ}\text{C}$ . This technique also makes the wavelength reduce from a nominally 789 nm diode to 780.2 nm, a change of nearly 9 nm. It can make the wavelength stable on the  $D_2$  atomic transition by the external cavity grating feedback method. The laser is continuously tunable over 10 GHz ranges by simultaneously scanning the voltage of PZT and current source using a simple home-made electronic circuit in an appropriate ratio.

**Key words** laser; diode laser; TEC cooling; external cavity grating feedback