

852 nm 窄带滤光片外腔反馈半导体激光器的优化

刘金玉¹, 何军^{1,2}, 王军民^{1,2,†}

(1. 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006;

2. 极端光学协同创新中心, 山西大学, 山西 太原 030006)

摘要: 外腔半导体激光器是激光光谱学、原子物理学及量子光学领域广泛应用的光源。本文介绍我们研制的利用超窄带宽滤光片作为激光纵模选择元件且反馈量可变的猫眼型 852 nm 外腔半导体激光器(IF-ECDL)。旋转窄带滤光片的角度, 激光波长粗调范围为 14 nm。利用光纤延时自差拍法测量了窄带滤光片外腔半导体激光器的线宽, 单滤光片进行选频的 IF-ECDL 线宽约为 211 kHz, 双滤光片情形的 IF-ECDL 线宽约为 187 kHz。激光频率连续调谐范围大于 1.5 GHz, 获得了铯原子 D2 线的两组饱和吸收光谱。所研制的 IF-ECDL 可应用于精密光谱测量、光通信、激光冷却与俘获铯原子等方面。

关键词: 窄带滤光片; 外腔反馈半导体激光器; 纵模调谐范围; 线宽

中图分类号: O431

文章编号: 1007-6654(2018)01-0098-09

0 引言

半导体激光器具有效率高、体积小、价格低、结构简单、波长覆盖范围大等优点, 而其缺点有光束发散角大、激光增益介质的增益谱宽, 线宽宽等; 所以需要对半导体激光器的线宽进行压窄。随着半导体技术的快速发展, 集成激光二极管和外腔反馈的半导体激光器展现了非常好的应用前景, 在精密测量、冷原子物理、量子通信等领域有广泛应用^[1-2]。1980 年 Lang 和 Kobayashi^[3] 将外腔反馈技术应用到半导体激光器上, 实现了线宽压窄和波长调谐; 1981 年苏联科学家 Fleming 与 Mooradian^[4] 首次利用光栅将半导体激光器的部分输出光反馈回其激活区, 其外腔半导体激光器的线宽约为 1.5 MHz。2006 年作者所在研究小组研制了光栅反馈半导体激光器并将

其应用在铯原子磁光阱实验中^[5]。2009 年山西大学光电研究所刘四平等^[6] 研究了利用 Eagleyard Photonics 公司生产的镀有减反膜的 GaAs 激光二极管制备的 Littrow 式光栅外腔半导体激光器, 获得激光线宽 120 kHz。但由于光栅外腔半导体激光器的光反馈与波长选择都由光栅一个元件提供, 这种设计对压强和由于机械形变及热应变所导致的光学偏移很敏感。对通常的 Littrow 装置, 输出光束的方向和位置都依赖于波长。近年来窄带滤光片外腔反馈半导体激光器(IF-ECDL)的研究方兴未艾。2006 年 Baillard 等^[7] 从理论和实验两方面研究了窄带滤光片外腔反馈半导体激光器, 表明 IF-ECDL 结构更稳定。2010 年中科院国家授时中心阮军^[8] 等研制了可应用于原子钟的高稳定度 852 nm 波长 IF-

收稿日期: 2017-11-20; 接受日期: 2017-11-27

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFA0304502); 国家自然科学基金项目(11774210、61475091)

作者简介: 刘金玉(1990—), 男, 山西吕梁人, 硕士生, 主要从事量子光学和光与原子相互作用方面的研究, E-mail: 838594159@qq.com。

† 通信作者: 王军民, E-mail: wwjmm@sxu.edu.cn

ECDL, 其频率稳定度为在 1 s 积分时间内约为 3×10^{-12} , 激光器的线宽约为 123 kHz。2012 年 Thompson 和 Scholten^[9] 研究了利用 NPBS 和反射镜组成的 IF-ECDL。2016 年 Martin^[10] 等人研究了利用双滤光片选择纵模的 450 nm 波长 IF-ECDL; 2016 年北京大学区域光纤通信网国家重点实验室制作了 852 nm 波长 IF-ECDL, 并测试了激光器的性能^[11]。目前, 关于 IF 猫眼型激光器, 澳大利亚 MogLabs 等几家公司有定制产品, 且有较大的市场需求。

本文介绍自制的反馈量可调节的双滤光片 852 nm 波长 IF-ECDL 的工作原理, 以及激光器性能参数的表征, 并讨论 IF-ECDL 激光线宽的影响因素, 并对 IF-ECDL 性能进行优化。

1 窄带滤光片外腔反馈半导体激光器工作原理

1.1 外腔半导体激光器的纵模选择

IF-ECDL 的波长调谐方法^[12] 有① 电流调谐; ② 温度调谐; ③ 窄带滤光片角度调谐; ④ 扫描平面反馈镜调谐。LD 激光器与其它传统激光器相比, LD 的输出光功率和频率受温度和注入电流的影响显著。因此 LD 的波长调谐可采用温度调谐和注入电流调谐, 一般来说, LD 的波长-温度曲线有很好的线性。能够通过温度的改变精确地控制波长, 但是温度调制速度较慢, 温控调谐可以使 LD 的输出功率保持恒定, 温度变化电路是温控系统的关键。在半导体中, 温度和能隙之间存在着依赖关系, 有以下经验公式:

$$\lambda = \frac{hc}{E_g(T)}. \quad (1)$$

所以通过控制有源区的温度, 可以改变半导体激光器有源区的能隙(禁带宽度), 从而使激光器的波长得到调谐。利用改变半导体激光器注入电流也可改变波长。电流调制可达到很高的速度, 但是, 波长被调制的同时, 光强也被调制。改变电流对光强的影响较大其调谐机理可以解释为: 注入电流的变化引起载流子浓度改变, 也改变了折射率(或改变了增益系数), 实现波长调谐由于半

导体激光是粒子在能带之间跃迁产生的, 而能带的能量范围大, 所以半导体激光器具有很宽的发光范围。半导体激光器纵模间隔为

$$\Delta\lambda_d = \frac{\lambda^2}{2n_{int}L_{int}}, \quad (2)$$

$$\Delta\nu_d = \frac{C}{2n_{int}L_{int}}. \quad (3)$$

其中 n_{int} 为 LD 中介质折射率, L_{int} 是本征腔长, C 是光束。在外腔反射镜强的外部反馈的情况下, 二极管腔的共振被抑制。对于反馈镜与激光二极管后端面形成的腔的纵模, 它的纵模间隔为

$$\Delta\nu_e = \frac{C}{2(L_{ext} + n_{int}L_{int})}, \quad (4)$$

$$\Delta\lambda_e = \frac{\lambda^2}{2(L_{ext} + n_{int}L_{int})}. \quad (5)$$

其中 L_{ext} 是总的外腔光程, 滤光片的厚度为 1 mm, 计算实际光程可忽略滤光片的折射率导致的额外光程。 $L_{ext} \gg n_{int}L_{int}$ 因此, 激光器轴向模就是外腔的 F-P 模。

干涉滤光片用来在很窄的光谱范围内选择性地透射, 波长位于透射带宽范围之外的入射光, 或者被反射或者被吸收。窄带干涉滤光片实际上就是法布里珀罗标准具, 制作的方法是用折射率很低的很薄的无吸收层将两个高反射率的多层介质膜分开。在可见光范围内只有一个透射峰, 也称谱线滤光片。半导体激光器产生的激光经透镜准直成平行光后以一定角度 θ 入射干涉滤光片, 利用多光束等倾干涉理论, 透过率峰值处波长 λ 为

$$\lambda = \lambda_{max} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{n_{IF}^2}}. \quad (6)$$

其中窄带滤光片的折射率 n_{IF} 为 1.5; λ_{max} 为光束正入射时的窄带滤光片的透射波长值, 也是窄带滤光片调谐范围中的最大极限波长值。

假设裸激光二极管的出射光强为 I_0 , 则此时透过干涉滤光片的总光强由艾里公式给出

$$I_T = I_0 \frac{1}{1 + F_{IF} \sin^2(\theta/2)}. \quad (7)$$

其中 F_{IF} 为窄带滤光片的精细度, 转动被置于 ECDL 谐振腔中的干涉滤光片相对于激光的倾角, 则 IF-ECDL 出射的激光的波长被调谐。利用 IF 选频, 可以获得单纵模运转的激光器。与光

栅 ECDL 相比, IF-ECDL 的调谐灵敏度更高^[7], 即在转动波长选择元件相同的角度, 波长的调谐范围更大。

1.2 IF-ECDL 压窄激光线宽原理简析

半导体激光器和其他类型的激光器就基本理论而言没有根本的区别, 即都是基于受激光发射。为实现粒子数反转与阈值条件以实现激光器相干辐射输出, 光子反馈谐振是上述条件的根本保证, 也是半导体激光器与半导体发光二极管的区别所在。半导体激光器 LD 的内腔通常是利用半导体晶体两端自然解离面所构成的平行平面腔。理想的内腔反馈应该是半导体激光器的后端面的反射率为 1, 前端面(输出面)镀一定的增透膜。半导体激光器线宽宽的原因是内腔腔长短, 腔面反射率低, 因而其品质因数 Q 值低。

所以压窄半导体激光器的激光线宽就是延展外腔及提高外腔反馈镜的反射率实现的。 r_1 是 LD 的后端面振幅反射率, r_2 是 IF-ECDL 激光器的反馈镜的反射率。外腔的精细度 F 为

$$F = \frac{\Delta v_{\text{外}fsr}}{\Delta v} = \frac{\pi \sqrt{r_1 r_2}}{1 - r_1 r_2}. \quad (8)$$

延展外腔可以减小外腔的纵模间隔增加反馈镜的反射率或反馈镜的反射量以提高 ECDL 的精细度, 从而使 IF-ECDL 的线宽压窄。

1.3 IF-ECDL 稳定性分析

区别于光栅外腔半导体激光器, IF-ECDL 激光器的选频和光反馈由两个独立的元件完成: 窄带滤光片 IF 对纵模进行选择, 猫眼透镜配合平面反馈镜对光进行反馈。由于输出耦合镜的倾斜和离轴, 用透镜将光聚焦到平面反馈镜上, 按镜面反射方式, 使光严格沿原路返回, 形成猫眼效应。所以对光路的偏移不敏感, 机械稳定性好, 使激光器可以稳定运转。与光栅激光器相比, 光反馈量可以得到优化。反馈元件上光束的腰斑决定了光反馈对光路偏斜的敏感性^[7]。在光栅装置中腰斑是 1 mm 量级, 在 IF-ECDL 中几乎是一点, 所以 IF-ECDL 激光器的机械稳定性更高。利用猫眼透镜可以增加光反馈的有效性, 使反馈更容易实现。

IF-ECDL 激光器的光路结构一般有两种, 如图 1 和图 2 所示。本文采用图 1 所示的结构。其优点如下: 首先与图 2 相比, 图 1 只需要用一片猫眼透镜, 不需要准直透镜, 这可以避免两片透镜由于机械结构不共轴而引起的出射光光束质量变差, 也可节约成本; 外腔平面反馈镜使用 0°全反镜, 这样的镜片很容易找到, 可以镀覆盖 780 nm、795 nm、852 nm 和 894 nm 波长的铷原子、铯原子跃迁线的膜, 因此只需更换对应波长的 1/2 波片, 就可以实现多个波长的 IF-ECDL。其次本激光器的光路设计方案通过转动 1/4 波片可调节外腔对 LD 的光反馈量, 反馈量可方便地在很大范围内调节, 可以很便利地研究不同反馈量对 ECDL 激光线宽的影响。值得研究的是, 由于 IF-ECDL 的激光线宽与外腔的长度以及滤光片的带宽有关, 本文研制的 IF-ECDL 在旋转支架上安装了两个滤光片, 这样可以将滤光片总的光谱带宽减小, 从而有利于 IF-ECDL 线宽的进一步压窄。

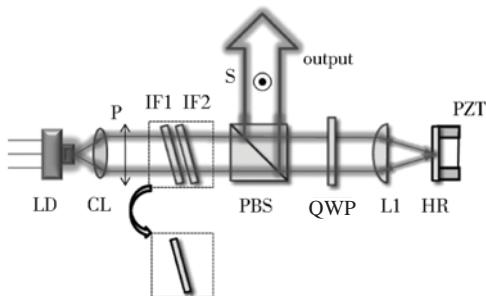


Fig. 1 Schematic diagram of feedback amount tunable ECDL with dual filters.

图 1 反馈量可调谐的双滤光片 ECDL 原理图

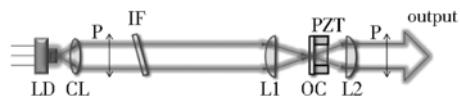


Fig. 2 Schematic diagram of the general ECDL with one narrow-band filter. LD : Laser diode; CL: Aspheric collimating lens; IF: Narrow-band width filter; PBS: Polarization beam splitter cube; L1 and L2: Cat-eye Lens; HR: High-reflectivity mirror; OC: Output-coupling mirror; PZT : Piezoelectric transducer

图 2 一般结构的窄带滤光片外腔半导体激光器原理图

LD: 激光二极管; CL: 非球面准直透镜;

IF: 窄带滤光片; PBS: 偏振分光棱镜;

L1 及 L2: 猫眼透镜; HR: 高反镜;

OC: 输出耦合镜; PZT: 压电陶瓷

2 实验装置及实验方案

选用德国 Eagleyard Photonics 公司生产的 EYP-RWE-860 型激光二极管,在控温 25℃时,激光二极管的发射功率谱密度在 850 nm—870 nm 区间最大,最大输出功率 70 mW,管子的输出端面镀 0.3% 的消反膜。调节外腔平面反射镜的角度,可以很容易使外腔平面反射镜反馈的光进入激光二极管的增益芯区。半导体激光器在远场并非严格的高斯分布,在横向和侧向有不同发散角。由于半导体激光器有源层较薄,横向有较大发散角 θ_{\perp} ,用球透镜对解离面成像时,需要的像面和腔面的像面不在同一位置,所以需用短焦距非球面透镜进行准直,实验选用焦距 4.5 mm 的非球面透镜这样可以较好地补偿激光的像散,同时使得准直后的椭圆光斑长轴长度为大约 6 mm,避免在后面光路中被机械结构挡光而产生衍射及功率损耗。将激光二极管作为激光源,机械加工如图 3 所示的外腔结构:外腔材料为黄铜,有良好的导热性能,以保证对激光二极管进行良好的控温。

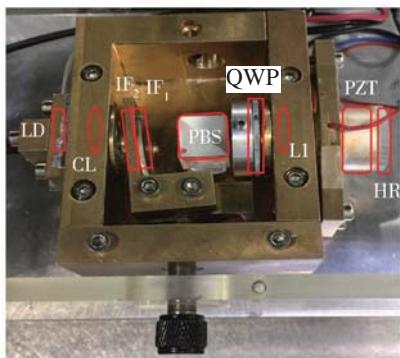


Fig. 3 Device diagram of home-made 852 nm IF-ECDL
图 3 自制 852 nm IF-ECDL 装置图

实验所用的干涉滤光片在 852 nm 附近入射角大约为 6°时光功率最大透射率为 87.6%, FWHM 为 0.5 nm。由于激光二极管发射的光是线偏振光,偏振度大约 100 : 1。实验中所选的激光器方案如图 1 所示的结构,将激光二极管出射的长椭圆光斑的长轴调节为竖直方向,则激光的偏振为 P 偏振,经过 PBS 后,只有微瓦量级的光

被反射,PBS 对激光的损耗也很小。然后再经过 1/4 波片后经 18 mm 焦距的猫眼透镜聚焦;0°全反镜粘贴到 10 mm 长的圆管状的压电陶瓷上,仔细调节 IF-ECDL 后端面 4 颗螺钮,配合调节猫眼透镜,使得激光聚焦的焦点正好落在全反镜的表面上。则光束反向传输经猫眼透镜后,转换为平行光。当旋转 1/4 波片时,激光经过 PBS,透射的 P 偏振光在 IF 上进行多光束干涉,然后反馈进入 LD 芯区,S 偏振光反射输出。

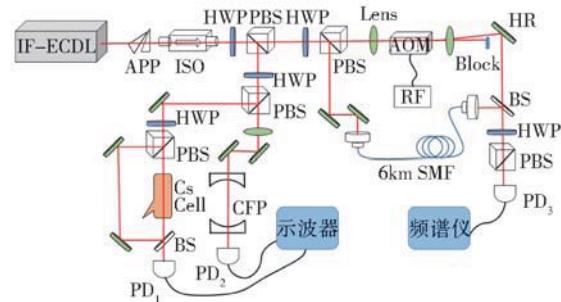


Fig. 4 Experimental schematic of the performance testing of 852 nm IF-ECDL: 852 nm ECDL with narrow-bandwidth filter; APP : Anamorphic prism pair; ISO : Optical isolator; HWP : Half wave plate; PBS : Polarization beam splitter cube; AOM : Acousto-optic modulator; RF : radio frequency signal generator; HR : High-reflectivity mirror; BS : 50/50 Beam splitter plate; CFP : Confocal Fabry-Perot cavity; PD : Photon detector; SMF : single mode fiber

图 4 852 nm IF-ECDL 性能测试实验光路图。

IF-ECDL: 852 nm 窄带滤光片外腔半导体激光器;
APP: 整形棱镜对; ISO: 光隔离器; HWP: 半波片;
PBS: 偏振分光棱镜; AOM: 声光调制器; RF: 射频信号发生器; HR: 高反镜; QWP: $1/4\lambda$ 波片; BS: 50/50 分束器;
CFP: 共焦 FP 腔; PD: 探测器; SMF: 单模光纤

本文对研制的 852 nm 波长 IF-ECDL 激光器的性能进行了测试,光路如图 4 所示。利用光纤延时自差拍法测量激光器的线宽;通过将激光注入 CFP 腔测量平面反馈镜扫腔的调谐范围;并搭建了铯原子饱和吸收光谱,测量表征激光器的连续调谐特性。

3 实验结果

3.1 852 nm IF-ECDL 的电流—功率特性

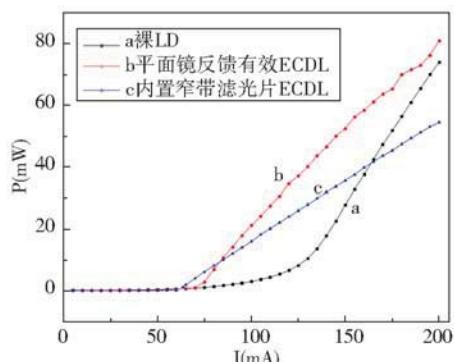


Fig. 5 IF-ECDL output power as a function of diode current at 25 °C.

图 5 IF-ECDL 的电流-功率曲线(温度 T=25 °C)

将激光器控温到 25 °C 条件下,实验所用的激光二极管最大工作电流 200 mA,最大输出功率 74 mW,电流功率曲线很平缓,没有明显的阈值电流,在 75 mA 时,输出功率为 1 mW,如图 5 中 a 曲线所示。先不放置窄带滤光片,只有外腔时,仔细调节 ECDL 反馈镜的四颗精密旋钮,当反馈有效时,激光器的阈值电流为 70 mA,最大输出功率为 81 mW,如图 5 中 b 曲线所示。在形成外腔时,由于激光在外腔中来回反射充分利用 LD 芯区的增益介质,从而使得 ECDL 在整个电流激励范围内的输出功率整体高于相应电流处的裸 LD 的输出功率。当在 ECDL 中安装 852 nm 窄带滤光片选频元件后,旋转 IF 的角度,将 ECDL 的激光波长调谐到 852.3 nm,测得如图 5 中所示的 IF-ECDL 电流-功率曲线 c。从图中可以看出,经过选频后的 IF-ECDL 的阈值电流为 61 mA,最大输出功率为 55 mW,阈值电流的降低是由于外腔反馈使芯区的利用率增加,同时窄带滤光片抑制原来的多纵模运转,通过模式竞争选出的单一纵模可以更有效地利用增益介质,使得在低电流处就产生激光。又由于窄带滤光片引入了损耗,与此同时,在高电流时由于很大的光反馈,LD 芯区增益介质已经用尽,使得 IF-ECDL 的输出功率小于裸 LD。并且由实验数据可看出在阈值以上,IF-ECDL 的电流功率曲线呈线性关系。

3.2 IF-ECDL 的波长调谐范围

IF-ECDL 波长的粗调:大范围转动窄带滤光

片相对于光路的倾角,激光波长可从 840.0 nm-854.2 nm 调谐,然后用精密螺钉微调激光波长,可改变波长 1 nm 左右。

IF-ECDL 波长的微调:由半导体激光器的工作原理分析可知,改变激光器的温度和加载于激光二极管的电流,可调谐激光的波长,实验测得激光二极管电流一波长调谐率为 0.002 nm/mA;温度一波长调谐率为 0.056 nm/°C;扫描平面反馈镜上压电陶瓷改变 ECDL 腔长对激光波长进行调谐:激光器的工作状态为温度 T=25 °C,泵浦电流 I=150 mA,扫描电压 V=200 V 时,将输出的激光注入 FSR=750 MHz 的 CFP 腔,在驱动反馈镜上压电陶瓷所加三角波电压的一个下降沿时间内,可测出两个 CFP 腔的纵模间隔,由于压电陶瓷的伸缩随电压改变的非线性,导致两个纵模间隔不一样宽。所以改变 IF-ECDL 的腔长对应频率调谐范围大于 1.5 GHz。

由上文理论分析可知外腔的纵模间隔与外腔腔长成反比。由于自制的 IF-ECDL 的外腔总腔长为 85 mm,所以扫描压电陶瓷时,所扫的频率范围较小,或者说若要改变激光器相同的频率,长腔所需的压电陶瓷的伸缩量更大。同时, ECDL 的外腔越长,激光的纵模间隔越小,激光器越容易引起跳模,所以在激光器的调谐范围及运转稳定性与激光线宽之间要取得平衡。

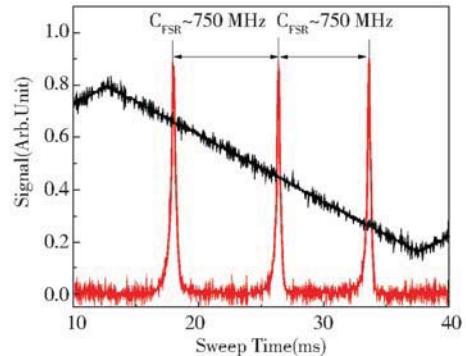


Fig. 6 Frequency tuning range of planar feedback mirror
The black line is voltage applied on the PZT; The red line is the longitudinal-mode transmission peak signal of the F-P cavity in scanning mode.

图 6 激光器的平面反馈镜频率调谐范围。
黑线是激光器 PZT 上所加的电压,
红线是扫描 F-P 腔时的纵模透射峰。

3.3 852 nm IF-ECDL 应用于铯原子饱和吸收谱测量

将 IF-ECDL 激光器的干涉滤光片的角度旋转 6° 左右粗调到 852.3 nm, 然后微调与滤光片支架连接的微调螺钮, 将激光波长调谐到 852.334 nm, 然后扫描反馈镜上的压电陶瓷, 同时微调 IF-ECDL 激光器的电流和温度, 可以很稳定地测出铯原子 D2 线饱和吸收谱如图 7 中(a)(b) 所示。

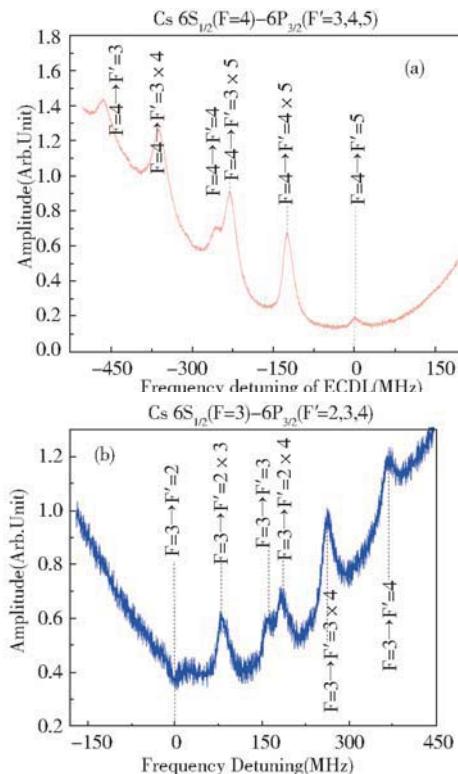


Fig. 7 Saturated absorption spectrum (SAS) of Cesium atom D2 line. (a) Cs 6S_{1/2}(F=4)-6P_{3/2}(F'=3, 4, 5); (b) Cs 6S_{1/2}(F=3)-6P_{3/2}(F'=2, 3, 4)

In figure(a)(b), The resonance peak and cross peak of the hyperfine transition of D2 line of Cs atom are given. Due to the non-linearity of the piezoelectric transducer scanning, the calibration of the absorption peak may have some error.

图 7 铯原子 D2 线的饱和吸收光谱(SAS)

- (a) Cs 6S_{1/2}(F=4)-6P_{3/2}(F'=3, 4, 5);
- (b) Cs 6S_{1/2}(F=3)-6P_{3/2}(F'=2, 3, 4)

图 7 中(a)(b)给出了 Cs 原子超精细能级跃迁的共振峰和交差峰。由于压电陶瓷扫描的非线性, 吸收峰的标定可能有一定的误差。

图 7 中(a)(b)给出了 Cs 原子超精细能级跃

迁的共振峰和交差峰。由于压电陶瓷扫描的非线性, 吸收峰的标定与理论可能会有一定的误差。可将 IF-ECDL 锁定到饱和吸收谱上进行量子光学及冷原子物理等实验。

3.4 852 nm IF-ECDL 激光线宽特性的比较

光纤延时自差拍法通过声光调制器调制一路信号及光纤延时另一路信号, 使信号光和参考光产生的拍频信号位于非零频的中频附近, 避免了周边环境对系统带来的低频干扰, 从而降低了系统误差, 提高了测量精度^[13]。如光路图 4 所示, 852 nm IF-ECDL 激光经 PBS 分成两束, 一束光经过声光频移器频移 80 MHz, AOM 的衍射效率为 60%; 由于 852 nm 激光器输出的激光线宽大约 200 kHz, 其在光纤中的折射率为 1.5, 可知激光相干长度 L_c 为 1 km, 理论计算表明只有当光纤长度大于激光相干长度的 6 倍时^[14], 才能保证测量精度。实验中另一束光经过 6 km 的单模光纤 SMF, BS 为 50/50 分束器, 将合束以后的偏振相同的光的拍频信号用快速光电探测器 PD 探测。

基于光纤延时声光调制器 (AOM) 频移自差拍法实验方案研究 IF-ECDL 在不同工作状态下的激光线宽。

转动 1/2 波片, 调节外腔反馈镜对 LD 的不同反馈量, 测 ECDL 的线宽。根据外腔半导体激光器的工作原理, 反馈镜的反馈量越大, ECDL 的线宽越窄。实验中, 将 IF-ECDL 的电流调节到 150 mA 处, 在反馈量为 10%、15%、20% 时所测的激光线宽分别为 $211.1 \text{ kHz} \pm 2.5 \text{ kHz}$, $207.3 \text{ kHz} \pm 1.3 \text{ kHz}$ 和 $198.0 \text{ kHz} \pm 1.3 \text{ kHz}$ 。由于测线宽时激光器两路拍频信号在光纤的耦合功率在抖动, 所以所测线宽只能定性地看出线宽随反馈量改变的趋势: 外腔光反馈量越大, IF-ECDL 激光器输出的激光线宽越窄。

分别将单、双滤光片作为选频元件对 852 nm IF-ECDL 激光的线宽进行测量比较。在实验中, 当将激光正入射滤光片时, 用波长计监视的 IF-ECDL 激光器输出的波长为 854.2 nm; 将 IF 旋转大约 6° 时, 输出的波长为 852.3 nm, 对应 Cs 原子 D2 跃迁线。即 $\lambda_{max} = 854.2 \text{ nm}$, $\lambda = 852.3$

$n_{IF} = 1.5$, 可由(6)式计算出 IF 对应的旋转角 5.74° , 实验与理论基本相符。由于窄带滤光片的带宽随入射角改变而不同。因此, 也需将 IF 旋转到 852 nm 所对应的角度测其实际工作状态时 IF 的带宽, 利用波长可大范围调谐的窄线宽的钛宝石激光器对所使用的窄带滤光片的光谱带宽进行测试, 使用旋转平移台将滤光片旋转到 5.8° 入射。两滤光片以极小二面角安装, 双滤光片的带宽是由于对单滤光片在各波长处的透过率引入了相应的衰减系数, 各波长处衰减系数不同, 导致双滤光片

带宽更窄。当将滤光片从正入射位置旋转 5.8° 角时, 852.39 nm 波长的激光透射率最高, 如图 8 所示是在倾角为 5.8 度时, 所测得的滤光片峰值透过率和带宽。利用洛伦兹函数进行拟合得到单滤光片的峰值透过率是 87.6% , FWHM 半高全宽值约为 0.50 nm ; 以极小角度安装的同样的滤光片的峰值透过率是 76.0% , FWHM 半高全宽值约为 0.30 nm 。可见双滤光片的带宽小于单滤光片。

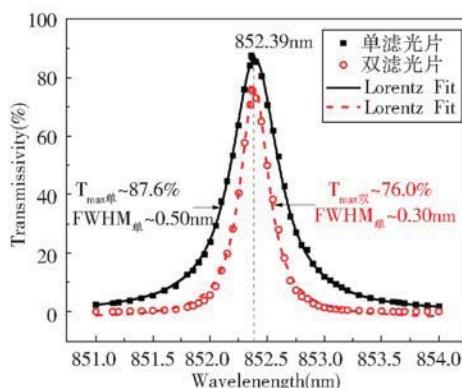


Fig. 8 Transmission of the interference filter as a function of laser wavelength at an incidence angle of 5.8°
图 8 干涉滤光片在倾角为 5.8° 时随波长的透过率曲线

外腔半导体激光器的线宽在外腔腔长相同、外腔反馈镜的反馈量相同及激光器的工作状态如电流、温度等相同的条件下, 纵模选择元件 852 nm 干涉滤光片的带宽越窄, 由外腔反馈回激光二极管的激光光谱范围越小, 经过 LD 增益芯区的模式竞争更显著, IF-ECDL 激光线宽越窄。如图 9 所示, 利用光纤延时声光频移自差拍法分别获得了单滤光片 ECDL 和双滤光片 ECDL 在中心频率 80 MHz 附近拍频信号的噪声功率谱。对于半导体激光器来说, 其光谱线型更接近洛伦兹线型, 光电流的频谱也呈现洛伦兹线型, 其 3dB 宽度等于激光线宽的 2 倍。使用洛伦兹线型函数进行拟合得到: 单滤光片 IF-ECDL 线宽为 $211.1\text{ kHz} \pm 2.5\text{ kHz}$, 双滤光片 IF-ECDL 的线宽为 $187.2\text{ kHz} \pm 1.4\text{ kHz}$ 。

4 结论

本文通过选取光学元件参数, 制作了 852 nm 波长 IF-ECDL, 并对激光器的性能进行了测试和表征。此激光器结构稳定, 很容易进行调谐, 输出功率 56 mW , 且电流-功率呈线性关系; 激光器可以稳定地单纵模运转。激光器的纵模选择机制比较多, 可以进行粗调和微调。可将激光器锁定到饱和吸收谱。旋转 IF 从正入射 0° 角到最大可旋转角 16° , 激光波长粗调范围为 840.0 nm — 854.2 nm ($\sim 14\text{ nm}$)。IF-ECDL 的线宽在单滤光片情形约为 211 kHz , 在双滤光片情形约为 187 kHz 。

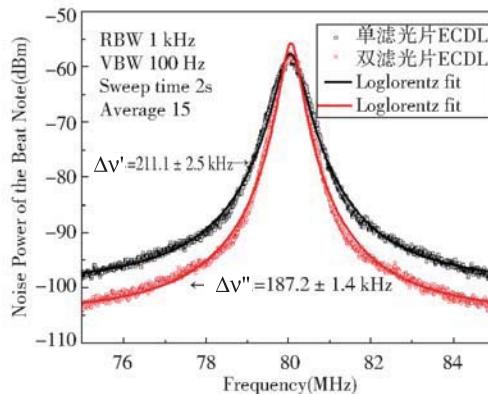


Fig. 9 Noise power spectrum of beat note signal based on fiber-delayed acousto-optic modulator-shifted self-heterodyne scheme. The spectrum analyzer's resolution bandwidth (RBW) is 1 kHz, video bandwidth(VBW) is 100 Hz, the swept time is 2 s.

图 9 光纤延时声光频移自差拍法所测的拍频信号功率谱频谱分析仪的分辨带宽(RBW)为 1 kHz, 视频带宽(VBW)为 100 Hz, 扫描时间为 2 s

参考文献：

- [1] Wieman C E and Hollberg L. Using Diode Lasers for Atomic Physics [J]. *Rev Sci Instrum*, 1991, **62**(1): 1-20. DOI: 10.1142/9789812813787_0110.
- [2] Meiners-Hagen K, Schöde l R, Pollinge F, and Abou-Zeid A. Multi-wavelength Interferometry for Length measurements Using Diode Lasers[J]. *Meas Sci Rev*, 2009, **9**(1): 16-26. DOI: 10.2478/v10048-009-0001-y.
- [3] Lang R and Kobayashi K. External Optical Feedbac k Effects on Semiconductor Injection Laser Properties [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1980, **16**: 347-355. DOI: 10.1109/JQE.1980.1070479.
- [4] Fleming W, and Mooradian. Special Characteristics of External-Cavity Controlled Semicmduktor Lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 1981, **17**(1): 44-59. DOI: 10.1109/JQE.1981.1070634.
- [5] 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频率锁定[J]. 中国激光, 2006, **33**(3): 316-319. DOI: 10.3321/j.issn:0258-7025.2006.03.006.
- [6] 刘四平, 张玉弛, 张鹏飞, 等. 减反膜外腔半导体激光器特性的研究[J]. 物理学报, 2009, **58**: 285-289. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3290.2009.01.044.
- [7] Baillard X, Gauguet A, Bize S, Lemonde P, Laurent Ph, Clairon A, and Rosenbusch P. Interference-filter-stabilized External Cavity Diode Lasers [J]. *Opt Commun*, 2006, **266**: 609-613. DOI: 10.1016/j.optcom.2006.05.011.
- [8] Jun Ruan, Jie Liu, Jie Ma, Zhijing Du, Changjiang Wu, and Shougang Zhang. Robust Exteral Cavity Diode Laser System with High Frequency Stability for Cs Atomic Clock [J]. *Chinese Opt Lett*, 2010, **8** (3): 300. DOI: 10.3788/COL20100803.0300.
- [9] Thompson D J and Scholten R E. Narrow Linewidth Tunable External Cavity Diode Laser Using Wide Bandwidth Filter [J]. *Rev Sci Instrum*, 2012, **83**: 023107. DOI: 10.1063/1.3687441.
- [10] Martin A, Baus P, and Birk G. External Cavity Diode Laser Setup with Two Interference Filters [J]. *Appl Phys B*, 2016, **122**: 298. DOI: 10.1007/s00340-016-6575-9.
- [11] Zhaojie Jiang, Qi Zhou, Zhiming Tao, Xiaogang Zhang, Shengnan Zhang, Chuanwen Zhu, Pingwei Lin, and Jingbiao Chen. Diode Laser Using Narrow Bandwidth Interference Filter at 852 nm and Its Application in Faraday Anomalous Dispersion Optical Filter [J]. *Chinese Phys B*, 2016, **25**(8): 083201. DOI: 10.1088/1674-1056/25/8/083201.
- [12] 谢建平, 王沛, 许立新, 等. 半导体激光器的波长调谐和波长稳定技术 [J]. 量子电子学报, 2002, **19**: 97-103. DOI:

- 10.3969/j.issn.1007-5461.2002.02.001.
- [13] 白建东, 王杰英, 王军民. 基于光纤延时声光频移自差拍法快速测量激光线宽 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6):061407. DOI: 10.3788/LOP53.061407.
- [14] Richter L, Mandelberg H, Kruger M, and McGrath P. Linewidth Determination from Self-heterodyne Measurements with Subcoherence Delay Times [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1986, 22(11): 2070-2074. DOI: 10.1109/JQE.1986.1072909.

Optimization of 852-nm External-Cavity Diode Laser with Narrow-bandwidth Filter

LIU Jin-Yu¹, HE Jun^{1,2}, WANG Jun-Min^{1,2}

(1. State Key of Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,
and Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: External-cavity diode lasers have been light sources widely used in the field of Laser spectroscopy, atomic physics and quantum optics. In this paper, a robust, stable, and acoustically inert 852 nm external-cavity diode laser (IF-ECDL) with ultra-narrow bandwidth filter as the laser Longitudinalmode selection element and a cat-eye Lens has been developed. The range of laser wavelength is about 14 nm by rotating narrow-band filter. The linewidth of the laser has been investigated experimentally based on the fiber-delayed acousto-optic modulator (AOM) shifted self-heterodyne scheme. And the linewidth of the ECDL with a single filter as longitudinal mode selection element is 211 kHz and that with the dual filters is 187 kHz. The homemade IF-ECDL is used for the spectral measurement, and the laser frequency can be continuously tuned more than 1.5 GHz to obtain two sets of saturation absorption spectra of cesium atoms. The developed IF-ECDL lasers can be applied in precision-spectroscopy, optical communications, laser cooling and trapping of cesium atoms.

Keywords: narrow-bandwidth filter; external-cavity diode laser; frequency tunable range; linewidth