

## 实验 D2 外腔式半导体激光器 (ECDL) 的相关实验

实验方案	实验记录	分析讨论	总成绩
年级、专业：	17 级物理学	组号：	3
姓名：	徐昊霆	学号：	17353071
日期：	2020 年 3 月 17 日	教师签名：	

### 0 小组成员及贡献

- 徐昊霆 (17353071)：均等贡献，主要负责设计表格。
- 高寒 (17353019)：均等贡献，主要负责学习、讲解原理。
- 陈智昂 (17353011)：均等贡献，主要负责设计实验方案。
- 莫宗霖 (16308086)：均等贡献，主要负责查阅说明书等相关资料。

目录

0 小组成员及贡献 1

1 实验原理与方案 3

1.1 实验目的 3

1.2 仪器用具 3

1.3 实验安全注意事项 3

1.4 实验原理 3

1.4.1 谐振腔 4

1.4.2 ECDL 4

1.4.3 如何调节 4

1.5 锂原子蒸气室 5

1.6 实验前思考题 5

2 实验步骤与记录 7

2.1 ECDL 激光器输出频率的单模实现 7

2.2 锂原子多普勒吸收的探测以及波长计的校准 9

2.3 测量 F-P 干涉仪的精细度以及激光线宽的测量 10

2.4 实验中遇到的问题记录 10

3 分析与讨论 11

# 1 实验原理与方案

## 1.1 实验目的

- 1. 熟悉法布里-珀罗干涉仪的工作原理、结构、特点、调节和使用方法。
- 2. 掌握应用法布里-珀罗干涉仪测量 ECDL 的频率输出模式。
- 3. 熟悉光栅波长计的工作原理, 应用波长计测量 ECDL 的频率输出模式。
- 4. 熟悉锂原子的多普勒吸收, 并运用锂原子的吸收谱线校准波长计。
- 5. 掌握在锂原子吸收谱线附近实现最大的无跳模范围的调节。

## 1.2 仪器用具

表 1: 实验用具

表 D2- 1 实验用具			
编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，规格等）
1	Thorlabs SA200-5B 法布里-珀罗干涉仪	1	535-820 nm; 自由频谱区 1.5 GHz; Fineness>200
2	可调小孔光阑	2	
3	光功率计	1	量程大于等于 30 mW
4	反射镜	5	671 nm 附近反射率大于 99%
5	双通道示波器	1	带宽大于 100 MHz
6	波长计	1	分辨率 0.1 pm
7	锂原子蒸汽池系统	1	包含 Li-6 和 Li-7 双组分原子 (50%, 50%混合)，光电探测器等
8	单模光纤耦合套件	1	

## 1.3 实验安全注意事项

- 1. 警告: 使用的激光器输出功率达到了 class 3 级, 能够对人眼带来永久的损伤, 严禁任何激光直射入眼睛!! 试验过程中需要佩戴保护眼镜。
- 2. 警告: 在激光器开启后, 严禁眼睛与激光平台同一个高度, 防止激光射入眼睛! 严禁坐着, 务必避免与激光在同一高度!
- 3. 警告: 实验过程中严禁带任何手表、首饰等, 防止激光反射进入眼睛。
- 4. 注意事项: 不能用手触摸反射镜。调节镜座两个螺丝时必须配合一起调, 不可只调一个螺丝, 不可将某一个螺丝拧的过紧, 也不可将螺丝拧的过松。在摆置光路之前, 建议把螺丝的行程调节在中间, 方便实验过程中调节。实验中需尽量避免用手直接触镜片的光学面。若不小心触摸了光学表面, 需尽快用镜头纸或擦镜布擦拭干净。
- 5. 实验结束后将实验器件按照顺序放回原件盒。

## 1.4 实验原理

外腔式半导体激光器 (ECDL) 就是为了获得频宽很窄的激光。如何获得频宽很窄的激光呢? 一共分三步: 第一步, 产生激光; 第二步, 用光学谐振腔和光栅进行选频; 第三步算算中间过程的增益, 让想要的频率光强强一点。

### 1.4.1 谐振腔

谐振腔的原理和我们光学学过的法布里-珀罗干涉仪的原理相同，在实验中，我们也要用到法布里-珀罗干涉仪来探测激光器发出的是否是单模激光。在光轴的方向向 FP 干涉仪入射一束光，经过很多次反射，可以推导出出射的光强为

$$I = \frac{I_0}{1 + F \sin^2(\delta/2)} \quad (1)$$

其中  $F = 4R/(1 - R)^2$  被叫做精细度，其中  $R$  是反射率。当频率和两个反射镜之间的距离合适，光程差  $\delta$  将是  $2\pi$  的整数倍，从而出射光达到最大。

两个极大值对应的频率差定义为 FP 谐振腔的**自由光谱范围**，自由光谱范围由公式  $\nu_{FSR} = c/4L$  给出（这里的系数 4 是因为我们实验中使用的是共焦距腔）。如果进行仔细地对准，使得入射光沿着 FP 腔的光轴入射，并对入射光进行空间模式匹配，那么就可以接近完美地消除其他高阶模式的光，从而出射光强和 modes 的曲线变成一条条竖线。

### 1.4.2 ECDL

半导体激光器先产生激光，先经过内腔选择模式和出射方向（腔长 1mm 左右, Internal mode），再入射到光栅上衍射进行选模 (Grating)，再入射到外腔进行选模（腔长远大于内腔，所以筛选频率间距远小于内腔, External Mode）。在多个频率限制的激光器中，最后输出的光强还要乘上增益。总增益 = 激光二极管增益 × 二极管内腔选频 × 光栅增益 × 外腔选频。最后的效果达到让想要的频率的光强远远大于其他频率的光强。选频的示意图如图 1 所示。

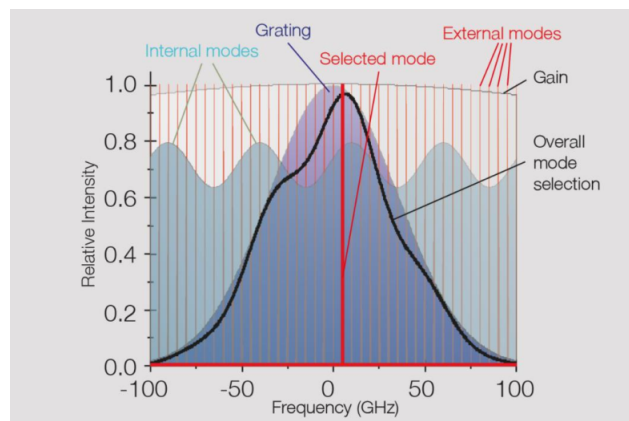


图 1: 选频示意图

### 1.4.3 如何调节

1. 光栅选频 (Grating Profile) 由光栅方程决定，通过调节光栅的角度可实现 grating profile 频率的移动。这个角度又可以通过 PTZ<sup>1</sup> 的电压来调节。
2. 激光器出射的强度 (Medium Gain) 由激光二极管的增益介质决定，它的中心位置可通过**温度**来调节，它的强度可以通过**电流**来调节。
3. Internal mode 的改变是通过腔长的改变实现的，而腔长的改变则通过电流带来的热胀冷缩效应。
4. External mode 的改变也是通过光栅的角度、二极管的温度变化实现

因此我们最后要实现单模运行或者最大无跳模范围，就需要调节激光二极管的电流、温度和光栅的角度。

<sup>1</sup> 压电陶瓷，通过调节电压进而调节角度。

## 1.5 锂原子蒸气室

在蒸气室中，锂原子服从玻尔兹曼分布

$$f = \mathcal{N} e^{-\frac{mv^2}{2k_B T}} \quad (2)$$

当激光入射时，锂原子有可能吸收或者放出光子，可以推导得到其吸收系数（定义为每单位长度吸收的比例）为

$$\kappa(\nu) = h\nu n_0 \alpha(\nu) (P_0 - P_1) \quad (3)$$

其中  $P_0, P_1$  分别是系统处于基态和激发态的概率。实验中我们只考虑光场非常弱的情况，即  $P_0 - P_1 \simeq 1$ 。

因为蒸气室中原子在不断运动，所以相应吸收谱线会因为多普勒效应而展宽，一般来说，展宽为高斯型（没有展宽的情况应该是完全尖锐的），可以用数学公式表达为

$$g_D(\omega) = \exp\left(-\frac{c(\omega - \omega_0)^2}{\omega_0^2 v_p^2}\right) \quad (4)$$

## 1.6 实验前思考题

1. 根据前面的 FP 腔和 ECDL 的原理简介，能否分别简单手绘出当激光器输出频率为单模、多模时的典型曲线？（提示：FP 腔需要工作在扫描腔模式下，采用三角波进行驱动）

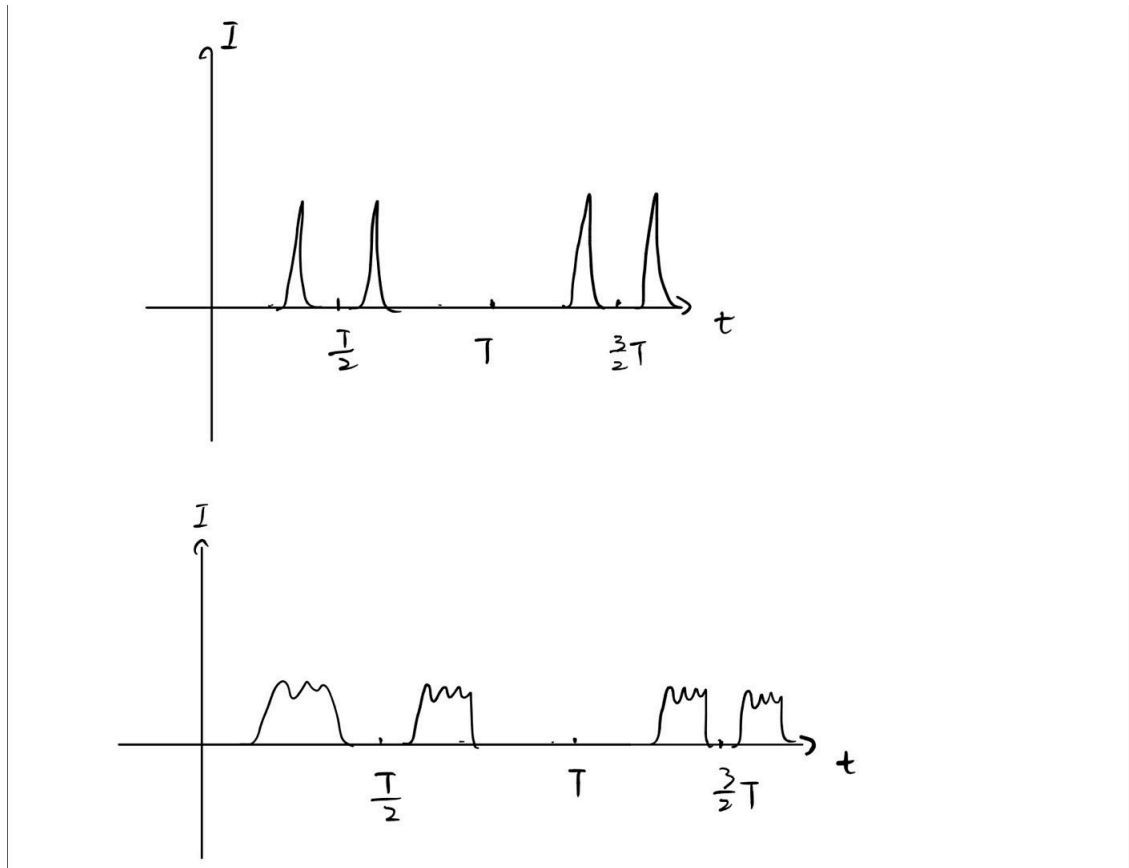


图 2: 如图手绘的激光器输出频率。上面的图是激光输出为单模时的典型曲线，其中  $T$  为三角波扫描的周期。下面的图是激光输出为多模时的典型曲线，其中  $T$  为三角波的扫描周期。

2. 预习 Thorlabs SA200-5B FP 腔的连线和使用方法，包括 FP 腔的对准。
3. 预习 Moglabs MWM 波长计的使用方法，包括单模光纤的耦合方法。
4. 手绘简单的锂原子的多普勒吸收曲线图。实验使用的是 50% Li-7 和 50% Li-6 混合的原子蒸气室。

作出曲线大概如图 3 所示，图中峰的间距是由讲义给出的锂原子的能级得到，而中间的那个峰表现为两个吸收峰是因为 Li-6 和 Li-7 吸收谱线的轻微不同。其理论上的原因或可以解释为原子核质量不同而引起的约化质量不同。

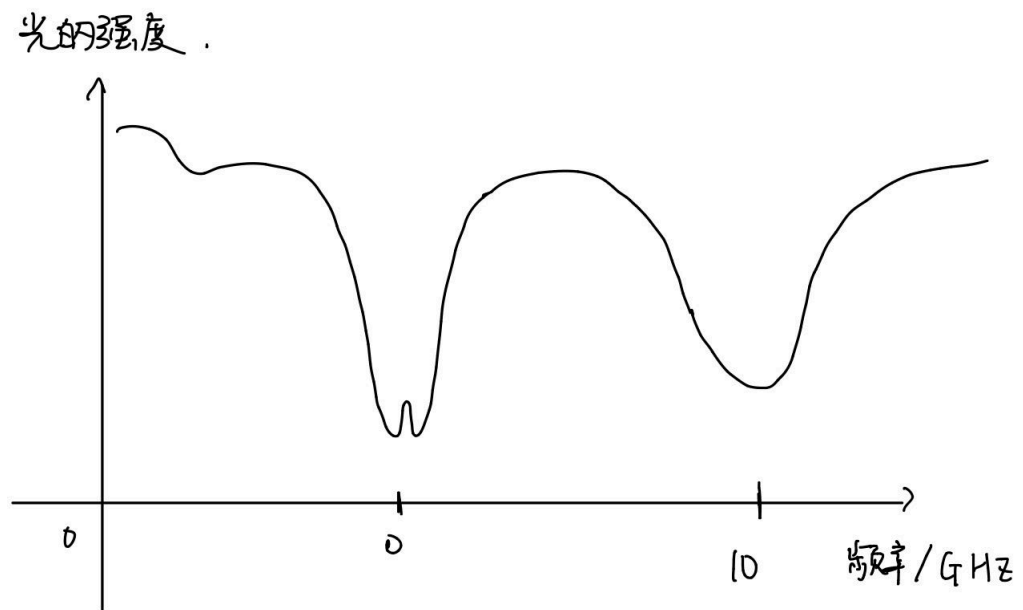


图 3: 锂原子的多普勒吸收谱线

## 2 实验步骤与记录

专业:	Physics	年级:	17
姓名:	徐昊霆	学号:	17353071
室温:		实验地点	教学楼
学生签名:	徐昊霆	评分:	
日期:	2020 年 3 月 17 日	教师签名:	

第一次实验内容概括:

1. 打开激光器。
2. 分别用 FP 干涉仪和波长计探测激光器输出的单模。
3. 分别改变温度、PTZ 的 DC 电压、激光器电流, 探究对于激光器输出单模的影响。

### 2.1 ECDL 激光器输出频率的单模实现

1. 按照激光器使用说明书, 先打开激光器电源, 使激光器工作在适合的温度  $20.0^{\circ}\text{C}$ 。
2. 设置激光器的 PZT 控制电压 (DC) 和扫描电压 (AC) 为 0V;
3. 打开激光器 steady 按钮, 将光功率计置于激光器的前方, 从 0mA 缓慢增加激光器的输入电流至激光输出功率为 3 mW 附近 (电流一般为 20 mA 左右)。注意: 电流范围 0-55mA, 严禁超过电流使用激光器!
4. 采用 FP 腔探测激光器输出的单模 耦合激光进入 FP 腔, 调节耦合系统, 实现最佳的耦合。  
(来自说明书的对准步骤) 将输入光圈关闭到最小, 然后将光束对准光圈的中心, 最方便的方法是通过两个折叠镜将光束对准到输入光圈上。保持后光圈完全打开, 然后开始扫描。确保完整扫描在示波器上可见, 并显示来自检测器的信号; 对于 ignition alignment, 调整示波器的灵敏度最大。  
使用反光镜安装座的倾斜/倾斜调节, 直到光束穿过 SA200 的主体居中, 即直到您开始在示波器上看到模式。将反光镜安装座调整至将光束保持在设备的中央。光束居后, 可以使用通过监视示波器上传输模式的形状和大小来控制两个输入镜。的干涉仪将准备好进行测量。
5. 在 FP 腔的输出信号上得到典型的单模输出波形, 记录实验结果。在没有实现最佳的耦合时会出现比  $\text{TEM}_{q00}$  和  $\text{TEM}_{q+1\ 00}$  更高阶的模式。实验中需要记录最佳耦合的结果。并表明哪些是  $\text{TEM}_{q00}$  和  $\text{TEM}_{q+1\ 00}$  模式。
6. 采用波长计探测激光器输出的单模。耦合激光进入波长计的单模光纤, 调节耦合系统, 实现最佳的耦合。备注:1. 这个步骤需要结合预习的内容, 制定相关的实验步骤。2. 在耦合进入光纤的时候最好保留 FP 腔的耦合不变, 因为后面的实验中 FP 腔和波长计都必须同时用到。
7. 在波长计的输出信号上得到典型的单模输出波形, 记录实验结果。
8. 实现激光器的单模输出后, 研究激光器电流、PZT 的 DC 驱动电压对单模输出的影响, 记录数据。然后对数据进行简单的分析。备注:1. 推荐激光器的电流变化的步进值 0.5 mA, 改变范围 10 mA 以内。2. PZT 的 DC 电压的步进值 1 V, 改变范围 15 V 以内。3. 注意改变 PZT 的 DC 电压时, 激光器的电流改变, 记录相关数值。分析为什么。
9. 在做第 8 步的时候需要同时记录波长计的读数, 然后分析激光器的输出波长随激光器电流、PZT 的 DC 驱动电压的变化规律。
10. 改变激光器的温度, 记录波长计的读数变化。温度的改变步进值  $0.1^{\circ}\text{C}$ , 范围  $1^{\circ}\text{C}$ 。温度的最小值  $19^{\circ}\text{C}$ , 最大值  $24^{\circ}\text{C}$ , 激光器的温度不能超过这个数值! 最后分析激光器温度对波长的影响。

11. 结合上面激光器电流、PZT 的 DC 电压以及温度对激光器输出频率模式、波长的影响, 分析应该如何实现激光输出频率的单模变化, 以及如何在指定波长附近实现激光频率单模的调节。(这部分在分析与讨论中)。

表 2: 探究电流对于激光器单模输出的影响 (请在旁边标注电压和温度)

测量次数	电流/mA	波长计读数/nm	测量次数	电流/mA	波长计读数/nm
1			11		
2			12		
3			13		
4			14		
5			15		
6			16		
7			17		
8			18		
9			19		
10			20		

表 3: 探究温度对于激光器单模输出的影响 (请在旁边标注电压和电流)

测量次数	温度/°C	波长计读数/nm
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		



表 4: 探究 PTZ 的 DC 电压对于激光器单模输出的影响 (请在旁边标注温度和电流)

测量次数	电压/V	波长计读数/nm
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		

2.2 锂原子多普勒吸收的探测以及波长计的校准

光路调节: 使激光能按照光路图进入到光电探测器中, 调节 1/4 波片来调节光的偏振, 使经过偏振分光棱镜后最终进入到光电探测器中的光斑达到最亮, 调节光电探测器旋钮, 使连接光电探测器的示波器幅值不超过 10V(2-8V 之间最好)。1. 打开原子蒸气室电源按钮, 设置温度 (每台装置的温度条件不同, 建议实际温度在 350-370°C 之间, 根据实验中吸收强弱调节! ), 将装置进行加热;

2. 使得激光器工作在单模信号, 缓慢调节电流和 PZT 的 DC 电压 (也可适当调节温度), 调节激光器的频率到 Li-6 或 Li-7 原子的 D1 或 D2 吸收波长;

3. 将光电探测器连接到示波器上, 使用激光器前面板的 Scan 端 (可调出三角波) 作为触发信号, 打开示波器及光电探测器;

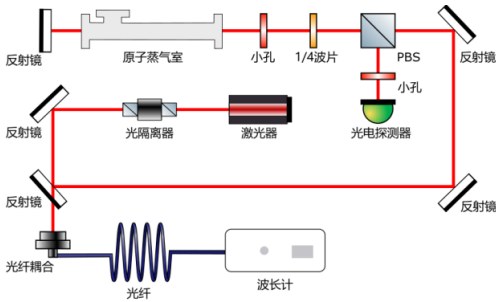


图 4: Li 原子饱和吸收光路图

提示: 原子炉工作在 350rC 附近, 根据光的吸收率来调节。

4. 增加激光器的频率扫描范围, 得到多普勒吸收谱线, 在示波器上记录数据。备注: 这里必须先在 Li 原子的吸收谱线附近实现足够宽的无跳模单模扫描, 这样才能得到较好的多普勒吸收曲线。

5. 本实验要求得到全部的锂原子的 D line 的多普勒吸收曲线, 包括 Li-6 原子的 D1 和 D2、Li-7 原子的 D1 和 D2。记录数据, 同时记录吸收的谱线的中心波长。

6. 根据记录的多普勒吸收数据, 拟合和推算出谱线吸收的中心波长, 分析中心波长与理论波长的差别, 分析误差。
7. 如果波长计读数与理论数值相差较大, 可以考虑使用理论波长校准波长计的读数。(选做)

## 2.3 测量 F-P 干涉仪的精细度以及激光线宽的测量

测量 F-P 干涉仪的精细度 1. 在调节好法布里-珀罗干涉仪后, 增大法布里-珀罗干涉仪的扫描电压, 直至示波器上出现双峰。

2. 测量双峰的时间距离  $T$ , 记录数据。
3. 调节示波器, 选定其中一个峰, 测量其半高宽时间  $t$ , 记录数据。
4. 根据公式  $F = 1.5\text{GHz} \cdot \delta t / T$ , 计算得到 FP 干涉仪的精细度。
5. 重复上述测量 8 次, 记录数据

激光线宽的测量

1. 停止法布里-珀罗干涉仪的扫描。
2. 慢慢的调节法布里-珀罗干涉仪的偏置电压到一个峰的半高宽。
3. 分别测量 100ms、1 s 时间内示波器上电压的波动。并记录和分析它的有效值  $V_{\text{rms}}$  和标准差  $V$ 。线宽估算公式为

$$\delta f = \frac{\Delta V}{2V_{\text{rms}}} \times \frac{\text{FSR}}{F} \quad (5)$$

4. 根据测量结果, 分析激光器的线宽。
5. 重复上述测量 10 次, 分析结果。

## 2.4 实验中遇到的问题记录

3 分析与讨论

专业：	Physics	年级：	17
姓名：	徐昊霆	学号：	17353071
日期	2020 年 3 月 17 日		
评分		教师签名	