外腔半导体激光器的组装

姓名 2x011xxxxx

ABSTRACT 外腔半导体激光器利用光栅反馈改善起振条件与纵模选择，是精密光谱实验中常用的可调谐光源。实验通过调节光栅反馈，测量反馈前后的电流与输出功率关系，通过线性拟合求得阈值电流，同时搭建了法布里–珀罗腔测激光器纵模光路，观察单模与多模状态。反馈前后的阈值电流分别为 32.044 mA 和 28.834 mA，降低约 10 %；反馈后的输出功率随电流增加的斜率减小，单模与多模状态呈现不同的透射峰分布。实验揭示了外腔反馈与激光起振、功率增长及纵模选择的联系，为调节激光器工作状态提供了依据。

KEYWORDS 外腔半导体激光器 · 阈值电流 · 光栅反馈 · 纵模选择

1. 原理概况

1.1. 半导体激光器的起振条件

半导体激光器以半导体有源层作为增益介质。正向注入电流后，电子和空穴分别注入有源区并在其中复合，产生自发辐射和受激辐射。要形成稳定的激光振荡，一方面需要通过电流注入使有源区达到粒子数反转，另一方面需要由两个端面构成的 Fabry–Pérot 谐振腔（F-P 腔）提供光学反馈，如图1 所示。当光在腔内往返一次所获得的增益能够补偿内部损耗和端面输出损耗时，激光器达到阈值。

设半导体激光器的腔长为 L，两端面的功率反射率为 R_1 和 R_2，有源区内部损耗系数为 α_i，模场与有源区的限制因子为 Γ，则阈值条件可写为 [1]

$$\Gamma g_{\mathrm{th}} = \alpha_i + \alpha_m, \qquad \alpha_m = \frac{1}{2L}\ln\frac{1}{R_1 R_2}, \tag{1}$$

其中 g_{th} 为阈值材料增益，α_m 为由两个端面引起的等效镜面损耗。式(1) 表明，在其他条件近似不变时，增大有效腔长或减小腔内损耗会降低达到振荡所需的阈值增益。

在阈值附近，材料增益可在有限范围内近似写成电流的线性函数，因而阈值电流可表示为

$$I_{\mathrm{th}} \propto \alpha_i + \frac{1}{2L}\ln\frac{1}{R_1 R_2}. \tag{2}$$

超过阈值后，输出功率近似随注入电流线性增加：

$$P \simeq S(I - I_{\mathrm{th}}), \qquad I > I_{\mathrm{th}}, \tag{3}$$

* email@pku.edu.cn

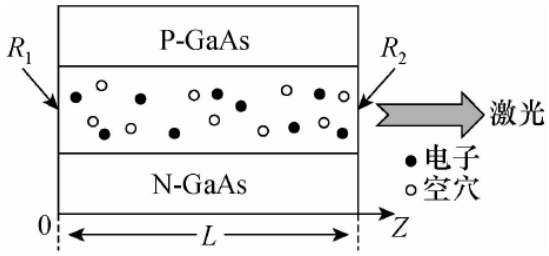


Figure 1 半导体激光器的端面谐振腔与有源区示意图。图中 R_1、R_2 为端面反射率，L 为腔长。

其中 S 为功率对电流的斜率效率。实验中将起振后的近似线性段拟合为 $P = aI + b$，再将拟合直线外推到 $P = 0$，由

$$I_{\mathrm{th}} = -\frac{b}{a} \tag{4}$$

得到阈值电流。而低于阈值时，我们认为测得功率主要由自发辐射、杂散光和探测器背景构成。

1.2. 外腔光反馈与 Littrow 结构

裸半导体激光器的内腔较短，腔内光子寿命较短，且容易受到端面反射和外界反馈的影响。外腔半导体激光器在激光管输出端设置准直透镜和衍射光栅，使部分输出光经光栅衍射后返回有源区，形成内腔与外腔共同作用的复合谐振结构。外腔反馈一方面使有效光学腔长增加，另一方面为特定波长提供选择性反馈，从而有利于降低阈值、压窄线宽并改善纵模选择。反馈效果由光栅角度、反馈强度和反馈光与激光管模式的匹配共同决定。

本实验采用 Littrow 型光栅外腔，其基本结构如图2 所示。激光管发出的发散光经准直透镜变为近似平行光后入射光栅，其中满足 Littrow 反馈条件的一级衍射光沿近似原路返回激光管，零级衍射光作为输出光。光栅方程为

$$d(\sin\alpha + \sin\beta) = m\lambda, \tag{5}$$

在 Littrow 条件下 $\alpha = \beta = \theta$，因而有

$$2d\sin\theta = m\lambda. \tag{6}$$

微调光栅角度 θ 会改变满足反馈条件的波长，因此 Littrow 外腔同时具有选模和调谐作用。当反馈光斑逐渐与原输出光斑重合时，模式匹配增强，输出功率会出现突增，实验中将这一现象称为“闪耀”。

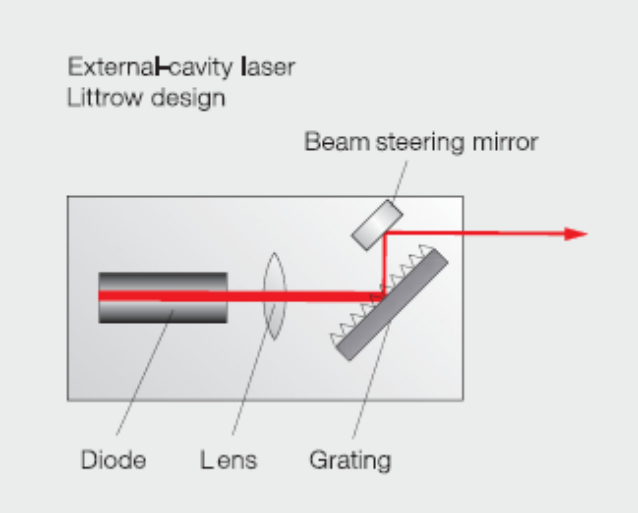


Figure 2 Littrow 型外腔半导体激光器的基本光路。激光管输出光经准直透镜照射光栅，反馈光返回激光管，零级衍射光作为输出光，图中的转向镜用于改变输出方向。

1.3. 本实验的测量思路

本实验先在未加外腔反馈的状态下改变激光器电流，记录输出功率 P 与注入电流 I 的关系；完成光栅反馈调节后，采用相同方法再次测量 P-I 曲线。分别对两组数据的起振后线性段作拟合，比较外腔反馈前后的阈值电流和斜率，分析外腔反馈对起振条件和输出特性的影响。

2. 内容步骤

2.1. 实验装置与前期检查

实验装置由 Littrow 型外腔半导体激光头、低噪声激光电源、光功率计、红外观察器以及后续纵模测量所需的光隔离器、反射镜、F-P 扫描干涉仪和光电探测器组成。激光头内部包括半导体激光管、准直透镜、光栅和用于调节外腔方向的机械结构，实物和光路示意分别如图3 和图4 所示。

实验开始前检查激光头与电源之间的连接，确认电流控制和温度控制模块处于关闭状态，并检查功率计、红外观察器和连接线缆是否正常。开启电源总开关和温度控制模块，待激光器温度稳定后再开启电流模块。逐渐增大工作电流，用荧光板或红外观察器确认有激光输出。调节过程中逐步改变电流，使激光器工作状态保持稳定。

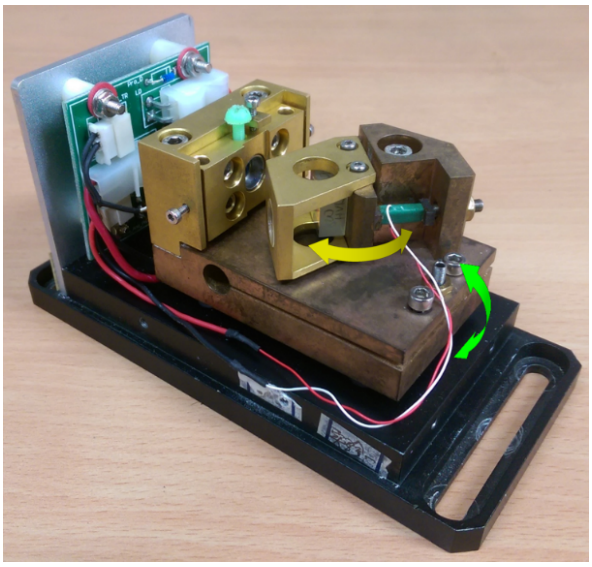


Figure 3 实验使用的外腔半导体激光头实物图。

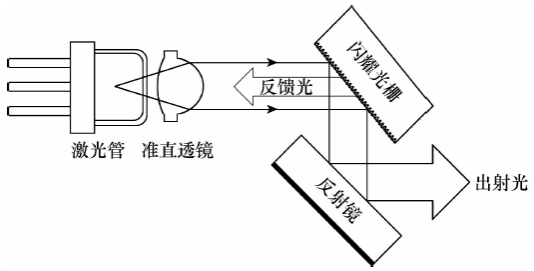


Figure 4 外腔半导体激光头的光路示意。准直透镜将激光管输出光变为近似平行光，光栅提供选择性反馈并输出衍射光。

2.2. 光栅外腔反馈调节

安装光栅组件，调整固定螺丝的松紧，使光栅保持平稳并能够转动。先在光屏上观察主光斑和光栅产生的次级光斑，粗调光栅角度，将次级光斑移至紧邻主光斑的正下方；再调节底板或光栅的微调机构，使反馈光斑沿主光斑的竖直方向逐渐靠近。将工作电流调至便于观察反馈变化的范围，并用功率计监测输出。

当反馈光斑逐渐与主光斑重合时，光反馈增强，功率计读数会出现明显突增，这就是实验中观察到的“闪耀”过程。继续微调并在功率最大的位置固定光栅，完成外腔反馈调节。固定光栅和激光头的位置，保持外腔反馈的角度和光路匹配。

2.3. P-I 曲线与阈值电流测量

分别在未加外腔反馈和完成外腔反馈调节后测量输出功率。逐步改变激光器注入电流，待读数相对稳定后记录功率计读数，得到电流 I 与输出功率 P 的数据。测量时保持功率计接收位置、温度控制状态和光路几何关系不变，两种状态采用相同的记录方法。

将起振后的近似线性数据绘制为 P-I 曲线，对线性段作最小二乘拟合 $P = aI + b$，并用横截距

$$I_{\mathrm{th}} = -\frac{b}{a} \tag{7}$$

估计阈值电流。绘制反馈前后各自的 P-I 曲线及对比图，比较阈值电流和起振后的功率增长斜率。

3. 思考题

1. 外腔半导体激光头有几部分组成，外腔半导体激光器电源包括哪几部分？

外腔半导体激光头主要由半导体激光管、准直透镜、激光器底板和光栅组件组成。半导体激光管提供增益和初始光输出，准直透镜将发散光变为近似平行光，光栅提供波长选择和外腔反馈，底板及微调机构用于保持并调节各元件的相对位置。

激光器电源主要包括温度控制模块、电流控制模块和显示/监测模块。温度控制模块稳定激光管工作温度，电流控制模块提供可调的低噪声注入电流，显示和监测模块用于观察工作电流、温度及相关状态。部分电源还带有 PZT 高压驱动模块，可改变外腔长度用于频率扫描或微调。

2. 解释光隔离器的工作原理。

光隔离器利用法拉第旋光效应实现光的单向传输。它通常由法拉第旋光器和前后两个偏振器组成。正向传播的线偏振光经过第一个偏振器后，在法拉第旋光器中旋转约 45°，因而能够通过第二个偏振器。反向传播的光在同一磁场方向下仍沿相同的旋转方向改变偏振，相对于第一个偏振器转过约 90°，因而被阻挡。

半导体激光器对反馈光较敏感，反射光返回激光管后可能引起模式跳变、频率漂移和功率波动。将光隔离器放在输出光路中，可以减少后续光学元件反射光返回激光器，提高输出状态的稳定性。

3. 加外腔前后，激光器的阈值电流有何变化？试解释其原因。

本实验将起振后的 P-I 数据作线性拟合，并将拟合直线外推到 $P = 0$。外腔反馈前得到

$$I_{\mathrm{th,before}} = 32.044\,\mathrm{mA},$$

外腔反馈后得到

$$I_{\mathrm{th,after}} = 28.834\,\mathrm{mA}.$$

因此，加外腔后阈值电流降低约

$$\Delta I_{\mathrm{th}} = 3.210\,\mathrm{mA}.$$

外腔光栅将一部分输出光反馈回激光管，使激光器获得额外的光学反馈。等效地看，外腔增加了参与振荡的有效光程，同时光栅对满足条件的波长提供选择性反馈，因而降低了达到振荡所需的净增益。由阈值条件中端面损耗项

$$\alpha_m = \frac{1}{2L}\ln\frac{1}{R_1 R_2}$$

可知，在其余参数不变时，腔长增加会减小镜面损耗对应的阈值增益，从而使阈值电流下降。

4. 分析讨论

4.1. P-I 曲线与线性拟合

分别测量未加外腔反馈和完成光栅反馈调节后两种状态下的电流与输出功率。两组数据均在 20 mA–40 mA 范围内取点，在 20 mA–29 mA 区间每隔 3 mA 取点，在 29 mA–40 mA 区间每隔 1 mA 取点。图5 和图6 分别给出了两种状态下的 P-I 曲线。选取起振后的近似线性段进行拟合，比较两种状态下的阈值电流和斜率。

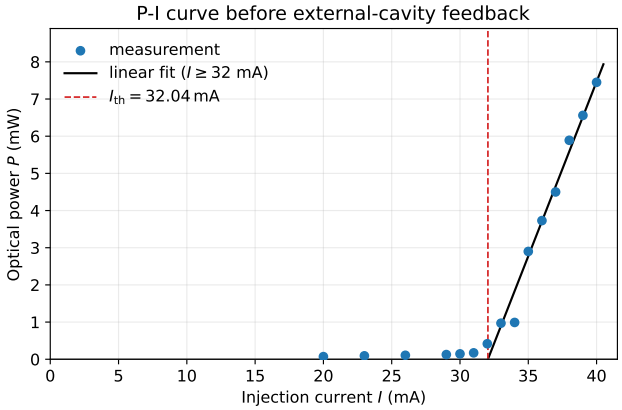


Figure 5 未加外腔反馈时的 P-I 曲线。黑线为 $I \geq 32\,\mathrm{mA}$ 数据的线性拟合，红色虚线为拟合直线外推得到的阈值电流。

未加外腔反馈时，取 $I \geq 32\,\mathrm{mA}$ 的 9 个点进行拟合，得到

$$P = (0.9384\,\mathrm{mW/mA})I - 30.0693\,\mathrm{mW}, \tag{8}$$

由横截距得到

$$I_{\mathrm{th,before}} = 32.044\,\mathrm{mA}. \tag{9}$$

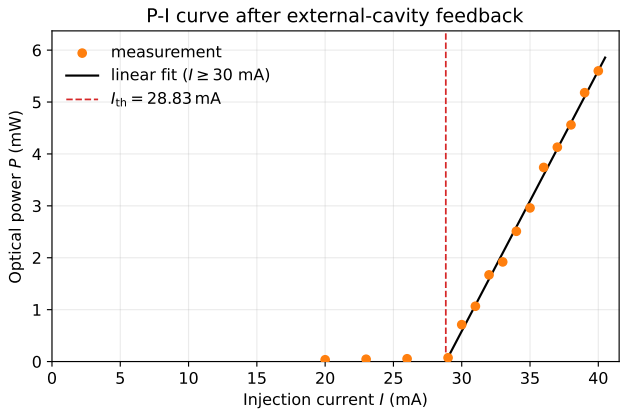


Figure 6 加外腔反馈后的 P-I 曲线。黑线为 $I \geq 30\,\mathrm{mA}$ 数据的线性拟合，红色虚线为拟合直线外推得到的阈值电流。

拟合决定系数为 $R^2 = 0.9803$，表明所选区间具有良好的线性关系。

加外腔反馈后，取 $I \geq 30\,\mathrm{mA}$ 的 11 个点进行拟合，得到

$$P = (0.5020\,\mathrm{mW/mA})I - 14.4751\,\mathrm{mW}, \tag{10}$$

相应的阈值电流为

$$I_{\mathrm{th,after}} = 28.834\,\mathrm{mA}, \tag{11}$$

拟合决定系数为 $R^2 = 0.9962$。两组拟合结果汇总于表1。

Table 1 外腔反馈前后 P-I 曲线的线性拟合结果。

状态	I/mA	点数	S/(mW/mA)	I_{th}/mA
反馈前	≥ 32	9	0.9384	32.044
反馈后	≥ 30	11	0.5020	28.834

4.2. 外腔反馈对阈值电流的影响

由式(9) 和式(11) 可得

$$\Delta I_{\mathrm{th}} = I_{\mathrm{th,before}} - I_{\mathrm{th,after}} = 3.210\,\mathrm{mA}. \tag{12}$$

加入光栅外腔反馈后，阈值电流下降约 10.0 %。外腔反馈光返回激光管后，降低了达到稳定振荡所需的净增益，使激光器能够在较小的注入电流下达到阈值。

4.3. 外腔反馈前后的斜率比较

P-I 曲线的斜率表示注入电流每增加一个单位时，输出光功率的增量，其中 P 为功率计测得的激光输出光功率。如图7 所示，外腔反馈前后的线性拟合斜率分别为 0.9384 mW/mA 和 0.5020 mW/mA。这意味着在线性拟合区间内，电流每增加 1 mA，反馈前后的输出功率分别增加约 0.9384 mW 和 0.5020 mW。反馈后的斜率约为反馈前的 53.5 %。

结合阈值电流的拟合结果可知，外腔反馈使激光器在更低的注入电流下起振，同时使起振后输出功率随电流增加的速率减小。阈值电流反映起振位置，斜率反映起振后的功率增长速率，两者分别描述了 P-I 曲线的不同特征。

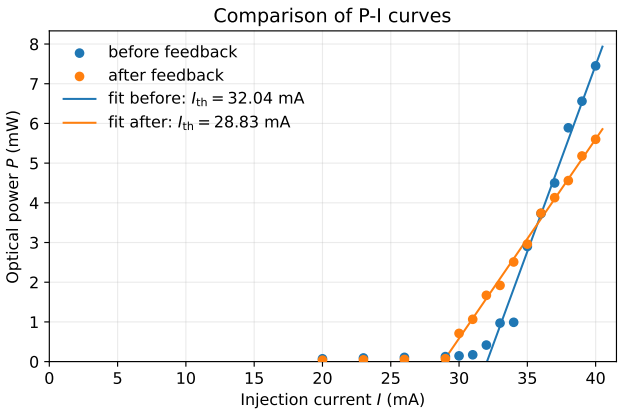


Figure 7 外腔反馈前后 P-I 曲线及线性拟合的比较。

4.4. 光路传输效率与纵模观察

纵模观察前，沿光隔离器和偏振片所在光路依次测量功率，得到 5.56 mW、5.02 mW、4.46 mW 和 4.20 mW，起始值和末端值分别为该段光路的输入与输出功率，其总传输效率为：

$$\eta_{\mathrm{path}} = \frac{P_{\mathrm{out}}}{P_{\mathrm{in}}} = \frac{4.20\,\mathrm{mW}}{5.56\,\mathrm{mW}} = 75.5\,\% > 75\,\%. \tag{13}$$

Table 2 光隔离器和偏振片光路中逐步测得的功率。测量点按光路中的记录顺序编号。

测量序号	0	1	2	3
P/mW	5.56	5.02	4.46	4.20
相对初始值	100 %	90.3 %	80.2 %	75.5 %

加入 F-P 腔前，测得光电探测器输出电压为 9.28 V。加入 F-P 腔后，记录单模和多模状态的扫描信号，分别如图8 和图9 所示。图中黄色曲线为扫描信号，青色曲线为透射信号。单模记录中可见两个主要透射峰，多模记录中则出现更密集的分立峰。

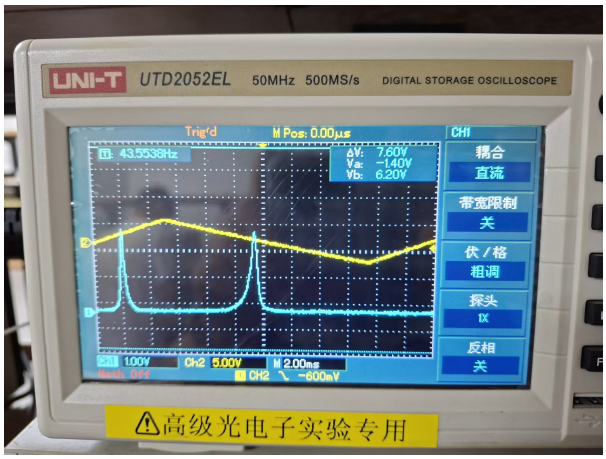


Figure 8 单模状态下的 F-P 腔透射信号。

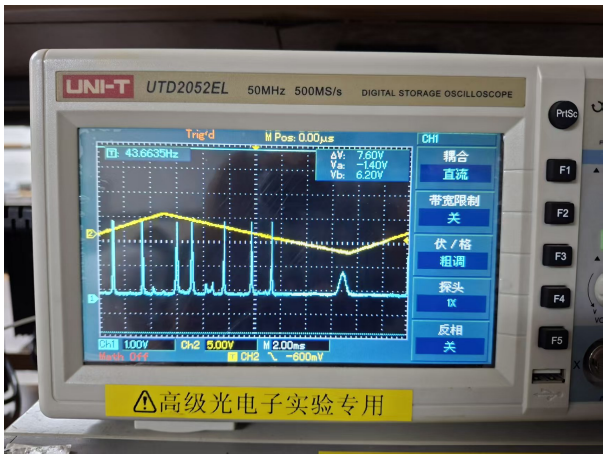


Figure 9 多模状态下的 F-P 腔透射信号。

5. 实验总结

光栅外腔反馈使激光器的阈值电流由 32.044 mA 降至 28.834 mA，降低约 10 %，同时起振后的 P-I 曲线斜率减小至反馈前的一半左右。光路测量显示，激光经过光隔离器和偏振片后功率逐步降低；F-P 扫描则呈现了单模与多模状态下不同的透射峰分布。这些结果从起振条件、功率增长和纵模分布三个方面反映了激光器的工作特性。阈值降低体现了外腔光学反馈对激光起振的作用，斜率变化反映了反馈前后输出功率对注入电流响应的差异，纵模观察则将光栅的选择性反馈与输出模式联系起来。通过光栅调节、功率测量和扫描腔观察，实验建立了外腔反馈结构与激光输出特性之间的联系，为后续激光频率调谐和稳频实验奠定了基础。

6. 致谢

感谢王青老师在实验中的讲解和指导。

参考文献

[1] 陈徐宗, 王青, 齐向晖, 王爱民, and 赖舜男, 高级光电子技术实验 (北京大学出版社, 北京, 2018).