外腔半导体激光器特性测量

姓名 2x011xxxxx

ABSTRACT 外腔半导体激光器的频率可调性是其用于原子光谱与激光稳频的基础，明确起振条件及调谐规律有助于选择稳定工作区间。本实验测量功率–电流关系，并分别在固定注入电流和固定温度下记录波长变化，研究阈值电流、连续调谐及跳模特性。由起振后线性段外推得到阈值电流约为 27.5 mA；连续分支的平均温调率和电调率分别约为 $-26\,\mathrm{GHz/K}$ 和 $-2.6\,\mathrm{GHz/mA}$。温度或电流增加时，波长在分支内连续红移，并在分支切换时向短波方向跳变。结果揭示了增益变化、腔模移动与光栅反馈共同作用下的调谐特征，为工作点选择及连续调谐范围的确定提供了依据。

KEYWORDS 外腔半导体激光器 · 阈值电流 · 温度调谐 · 电流调谐

1. 原理概况

1.1. 半导体激光器的阈值与功率特性

半导体激光器以有源层中的受激辐射为增益来源，两个端面构成短的 Fabry–Pérot 谐振腔。光在腔内往返传播时，只有当增益补偿内部损耗和端面输出损耗，才能形成稳定振荡。设腔长为 L，两个端面的功率反射率为 R_1、R_2，内部损耗系数为 α_i，则阈值条件可写成 [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 Γ 为光场限制因子，g_{th} 为阈值材料增益，α_m 为端面引起的等效镜面损耗。注入电流增大时，载流子增益提高；在阈值以上的有限范围内，输出功率可近似写成

$$P \simeq S(I - I_{\mathrm{th}}), \qquad I > I_{\mathrm{th}}, \tag{2}$$

其中 S 为功率对电流的斜率效率。实验将起振后的近似线性区拟合为 $P = aI + b$，以零功率横截距估计阈值电流：

$$I_{\mathrm{th}} = -\frac{b}{a}. \tag{3}$$

阈值电流可以由此拟合外推得到。

1.2. 波长调谐与跳模

半导体激光器的输出波长由增益峰和谐振腔模共同决定。对纵模序数为 M 的腔模，可用近似关系

$$\lambda_M(T) = \frac{2n(T)L}{M} \tag{4}$$

表示，其中 $n(T)$ 为有源区的有效折射率。温度改变时，折射率和禁带宽度均发生变化，因而腔模位置和增益峰位置同时移动；注入电流除改变载流子状态外，还会通过焦耳热改变器件温度。外腔半导体激光器还受到外腔模和光栅反馈波长的共同选择，因而温度或电流连续变化时，某一模式可在一段范围内连续调谐；当模式竞争转移到另一模式时，波长会出现离散跳变。

用频率 $\nu = c/\lambda$ 表示调谐特性时，温调率和电调率分别定义为

$$F^T = \frac{\mathrm{d}\nu}{\mathrm{d}T}, \qquad F^I = \frac{\mathrm{d}\nu}{\mathrm{d}I}, \tag{5}$$

单位分别为 GHz/K 和 MHz/mA。在同一连续分支内，以端点差分计算平均调谐率：

$$\begin{aligned} \Delta\nu &= c\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right), \\ \overline{F}^x &= \frac{\Delta\nu}{x_2 - x_1}, \quad x = T \text{ 或 } I. \end{aligned} \tag{6}$$

波长随温度或电流增加而增大时，频率调谐率为负。

1.3. Littrow 外腔与测量光路

本实验使用 Littrow 结构外腔半导体激光器。激光经准直后照射光栅，满足 Littrow 条件的衍射光沿近似原路返回激光管，光栅因此同时提供外腔反馈和波长选择。若 d 为光栅周期、θ 为入射角，一级衍射的 Littrow 条件为

$$2d\sin\theta = \lambda. \tag{7}$$

改变光栅角度会改变反馈波长；改变外腔长度也可以改变外腔共振条件。光隔离器用于减小后续光学元件反射光返

* email@pku.edu.cn

回激光器造成的模式和频率扰动。测量光路可通过半波片和偏振分束棱镜分光，分别用于波长计读数和扫描 F-P 腔的纵模信号观察。本次测量记录输出功率及温度、电流变化时的波长。

2. 内容步骤

实验使用 Littrow 结构外腔半导体激光器、驱动及温度控制系统，以及功率和波长测量系统。待激光器工作状态稳定后，依次进行以下测量。温调和电调分别保持注入电流或温度不变，以比较单一控制量变化时的波长响应。

2.1. 阈值电流测量

从约 20 mA 开始逐步增大注入电流，在各电流设定下记录对应的输出功率，测量至 61 mA。绘制功率–电流曲线，对起振后的近似线性段进行拟合，由式(3) 求得阈值电流。拟合选取 $I \geq 29\,\mathrm{mA}$ 的区间，以起振后的功率增长确定横截距。

2.2. 温度调谐特性测量

将注入电流固定为 40 mA，在 20.0–23.2 °C 范围内逐步改变温度设定值，待读数稳定后记录波长，观察连续调谐与跳模现象。

2.3. 电流调谐特性测量

将温度固定为 20.1 °C，在 29–86 mA 范围内改变注入电流，保持光路配置不变，待波长读数稳定后记录。结合温调、电调曲线，选取各连续分支的端点，由式(6) 计算频率变化和平均调谐率。

3. 思考题

1. 对外腔半导体激光器来说，有哪些频率调谐方式？

频率调谐可通过改变工作温度、注入电流、外腔长度和光栅角度实现。温度改变有源区折射率和增益峰位置；注入电流通过载流子效应和热效应改变增益及腔模；压电陶瓷（PZT）改变外腔长度，移动外腔共振频率；转动光栅则改变满足式(7) 的反馈波长。协调改变外腔长度与光栅角度，可使腔模与反馈波长同步移动，扩展连续调谐范围。

2. 本实验中的外腔半导体激光器的频率连续调谐量约为多少？

由式(6) 及表1，温度调谐两个连续分支内的频率变化绝对值分别为 42.19 GHz 和 25.45 GHz；电流调谐两个主要连续分支的对应值分别为 45.98 GHz 和 46.52 GHz。因此，本次观测到的连续调谐量为数十 GHz，其中电流调谐的两个主要分支均约为 46 GHz。

3. 计算激光器的电调率和温调率，并与典型值比较。

表1 给出的平均温调率为 $-26.37\,\mathrm{GHz/K}$ 和 $-25.45\,\mathrm{GHz/K}$，平均电调率为 $-2554\,\mathrm{MHz/mA}$ 和 $-2736\,\mathrm{MHz/mA}$。负号表示温度或注入电流增加时，连续分支内的输出频率降低。

典型外腔调谐曲线对应的温调率、电调率绝对值约为 30–33 GHz/K 和 2.5–2.6 GHz/mA[1]。本次电调率与该量级接近，温调率略低，温度和电流两种调谐的变化方向均与连续分支内的红移一致。同一调谐方式下各分支的平均调谐率相近，说明其频率响应在不同分支上具有相似的量级。

4. 分析讨论

4.1. 阈值电流

功率–电流曲线如图1所示。低电流区的输出功率较小，随电流增加变化缓慢；约 29 mA 后功率明显上升，并呈近似线性关系，表现出由自发辐射背景向受激辐射主导输出的过渡。

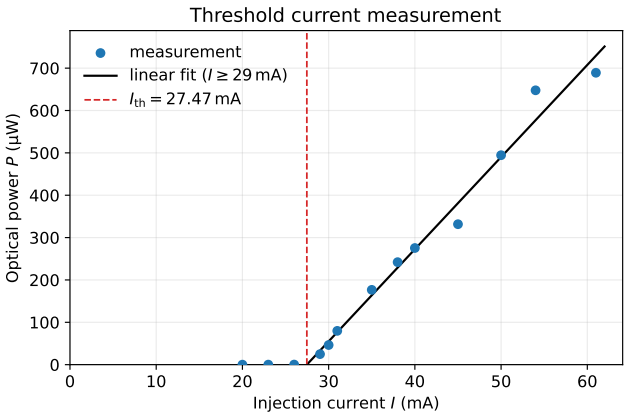


Figure 1 功率–电流曲线。黑线为 $I \geq 29\,\mathrm{mA}$ 区间的线性拟合，红色虚线标示外推得到的阈值电流。

对 $I \geq 29\,\mathrm{mA}$ 的近似线性段进行最小二乘拟合，得到

$$\frac{P}{\mu\mathrm{W}} = 21.7530\,\frac{I}{\mathrm{mA}} - 597.5988. \tag{8}$$

拟合决定系数为 $R^2 = 0.9815$。将式(8) 的斜率和截距代入式(3)，得到

$$I_{\mathrm{th}} = 27.472\,\mathrm{mA} \approx 27.5\,\mathrm{mA}. \tag{9}$$

该结果对应起振后线性段的零功率横截距。低电流区的背景功率和起振过渡使曲线偏离线性，阈值的外推结果因而与拟合区间的选择有关。

4.2. 温度调谐特性

在注入电流固定为 40 mA 时，温度调谐曲线如图2所示。各连续分支内，波长随温度升高而增大，即输出频率降低。在 20.0–20.3 °C 和 21.9–22.2 °C 区间，波长向短波方向跳变，形成连续红移与离散回落交替的结构。

由式(6) 计算，20.3–21.9 °C 和 22.2–23.2 °C 两个连续分支的平均温调率绝对值均约为 26 GHz/K，详细结果见表1。两处分支切换对应的频率上升分别约为 38.49 GHz 和 33.37 GHz。连续分支内的红移反映了温度对折射率及增益谱的影响，跳变则对应振荡模式的切换。

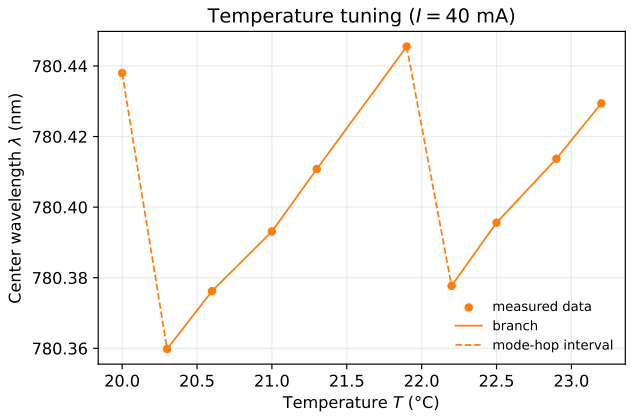


Figure 2 固定注入电流 $I = 40\,\mathrm{mA}$ 时的温度调谐特性。实线连接连续分支内的测量点，虚线标示跳模区间。

4.3. 电流调谐特性

在温度固定为 20.1 °C 时，电流调谐曲线如图3所示。波长同样在各连续分支内随电流增加而增大，并在 38–40 mA、58–60 mA 和 77–84 mA 区间发生向短波方向的跳变。

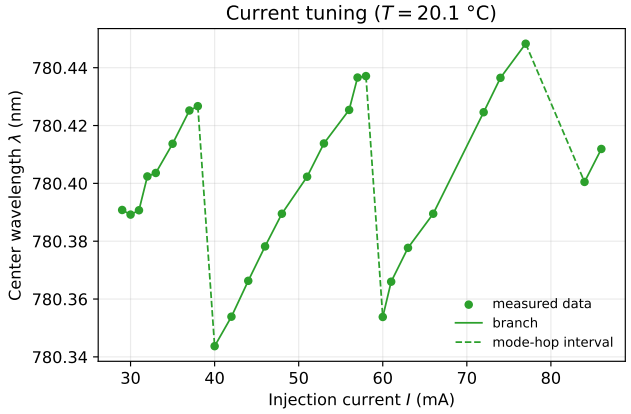


Figure 3 固定温度 $T = 20.1\,^{\circ}\mathrm{C}$ 时的电流调谐特性。实线连接连续分支内的测量点，虚线标示跳模区间。

40–58 mA 和 60–77 mA 两个主要连续分支的平均电调率绝对值约为 2.6 GHz/mA，对应连续调谐量均约为 46 GHz。前两处跳变的频率跨度分别约为 40.86 GHz 和 41.00 GHz，彼此接近；第三处约为 23.53 GHz，且跨越的电流采样区间较宽。连续红移与分支切换的组合，与注入电流通过载流子效应及热效应改变增益和共振条件的预期一致。前两处频率跳变跨度接近，呈现出较规则的分支结构；第三处采样间隔较大，其跨度反映该区间两端的净频率变化。

4.4. 调谐率汇总与误差分析

温度和电流连续分支的频率变化及平均调谐率汇总于表1。频率变化由分支端点波长换算，平均调谐率为该变化与相应温度或电流跨度之比。

两组温调率及两组电调率分别接近，说明不同分支具有相似的频率响应。结合图2和图3，两种调谐方式均表现为分支内部的连续红移及分支之间的离散回落，与增益谱、腔模及光栅反馈共同选频的预期一致。由此可见，温度和电流可以在一定区间内连续调节频率，但保持连续响应还需要避开模式切换区域。

调谐方式	控制量区间	$\Delta\nu$/GHz	平均调谐率
温度	20.3–21.9 °C	−42.19	−26.37 GHz/K
温度	22.2–23.2 °C	−25.45	−25.45 GHz/K
电流	40–58 mA	−45.98	−2554 MHz/mA
电流	60–77 mA	−46.52	−2736 MHz/mA

Table 1 连续调谐分支的频率变化和平均调谐率。温调时固定 $I = 40\,\mathrm{mA}$，电调时固定 $T = 20.1\,^{\circ}\mathrm{C}$。频率由 $\nu = c/\lambda$ 换算，负号表示频率随控制量增加而降低。

测量误差主要来自功率读数、波长读数和工作状态的稳定程度。阈值由直线横截距外推得到，低功率背景及线性区间的选择会影响截距；较高的拟合决定系数说明所选区间符合近似线性关系，但阈值精度还取决于功率测量和取点条件。温调、电调率由端点差分得到，温度尚未稳定或波长末位读数波动时，频率差和控制量跨度均可能产生偏差。采样步长则限制跳模位置的定位精度，尤其在较宽的取点区间内，端点差只给出该区间的净变化。改进测量时，可在接近起振及分支切换的位置加密取点，并以读数稳定作为记录条件；分支内部可增加重复测量，以评估波长波动对平均调谐率的影响。

5. 实验总结

本实验完成了外腔半导体激光器的阈值电流、温度调谐和电流调谐特性测量。功率–电流曲线在起振后呈近似线性增长，外推得到阈值电流约为 27.5 mA。固定注入电流为 40 mA 时，两段连续温调分支的平均温调率分别为 −26.37 GHz/K 和 −25.45 GHz/K；固定温度为 20.1 °C 时，两段主要电调分支的平均电调率分别为 −2.55 GHz/mA 和 −2.74 GHz/mA，相应的连续调谐量均约为 46 GHz。温调、电调曲线均由连续红移分支和向短波方向的跳变组成，表明温度与电流既能移动振荡频率，也会改变不同模式之间的竞争关系。同一调谐方式下的分支斜率相近，而分支之间存在频率跳变，说明选择工作点时需要兼顾调谐灵敏度与跳模边界；分支内部适合平滑调节频率，接近分支边缘时则需关注模式切换。实验还表明，阈值外推依赖起振后线性区间的选择，调谐率及跳模位置的测量则需要稳定的温度条件和适当的取点间隔。上述结果将起振、连续调谐和模式切换联系起来，为理解和使用外腔半导体激光器提供了实验依据。

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).