

外色散腔半导体激光器的调谐特性

许知止 姚敏玉 陈家骅 周炳琨
(清华大学无线电电子学系)

提 要

改变外色散腔半导体激光器的温度、电流和腔长,可实现复盖调谐范围内的连续调谐和准确调谐。本文叙述连续调谐和准确调谐的原理与实验结果。

一、引 言

我们曾用外色散腔获得线宽小于 50 MHz(受仪器分辨率限制)的单纵模输出^[1],扩大了半导体激光器的应用范围。有些场合,除要求光源线宽较窄外,还对光源的频率有要求。如在铯频标中,激光器用作铯原子的光泵,其波长必须精确调谐至 8521.1 Å。为此应使激光器在某个特定范围内连续调谐。目前外色散腔半导体激光器靠改变腔长只能实现准连续调谐,难以实现准确调谐。本文报道用控制温度、电流及外腔长等因素来实现外色散腔半导体激光器的连续调谐和准确调谐的有关实验结果。

二、理论分析

图 1(a)所示的外色散腔半导体激光器可等效成图 1(b)所示的复合腔,图中 r_1 、 r_2 和 r_3 分别为半导体激光器两端面和光栅的振幅反射率, n_1l 和 $(n_1l_1 + l_2)$ 为半导体激光器谐振腔(下称本征腔)和外腔的光学长度(n_1 为半导体激光器有源区的折射率)。图 2(a)和图 2(b)分别为本征腔模和外腔模,间隔为

$$\Delta\nu_1 = c(2n_1l)^{-1} (c \text{ 为光速}), \quad (1)$$

$$\Delta\nu_2 = c(2n_1l_1 + 2l_2)^{-1} \approx c(2l_2)^{-1}, \quad (2)$$

外腔激光器的模式为本征腔范围内的外腔模[图 2(c)]。利用光栅的选择性反馈可进行选模,转动光栅可实现调谐。

对属 K 守恒的带间复合的 GaAs 激光器,其增益系数 $g(E)$ 可由下式表示^[2]:

$$g(E) = \frac{c^2 h^3}{8\pi n_1^3 E^3} \gamma_{sp}(E) \left[1 - \exp\left(\frac{E - \Delta E_F}{kT}\right) \right], \quad (3)$$

式中 h 为普朗克常数, E 为光子能量, ΔE_F 为电子的准费米能级和空穴的准费米能级之差。 $\gamma_{sp}(E)$ 为在能量差为 E 的导带到价带间载流子的自发辐射速率,它与归一化电流密度 J_{nom} 的关系为

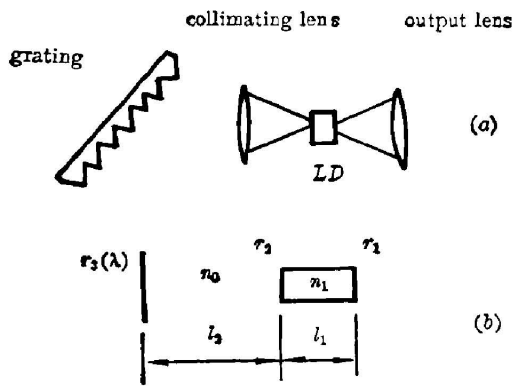


Fig. 1 External dispersive cavity and its equivalent composite cavity
(a) External dispersive cavity;
(b) Equivalent composite cavity

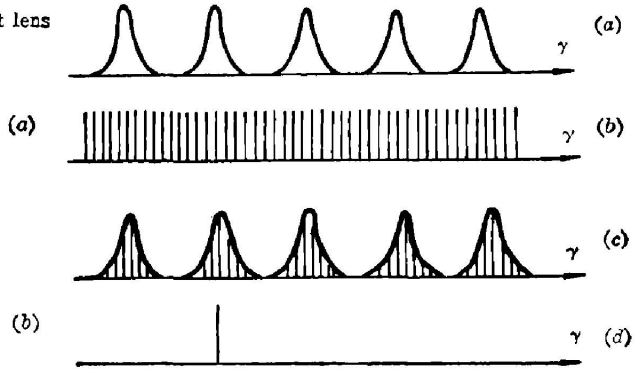


Fig. 2 Several kinds of laser cavity modes
(a) Eigen cavity modes; (b) External cavity modes;
(c) External cavity modes limited by eigen cavity modes; (d) A single external cavity mode

$$J_{nom} = e \int \gamma_{sp}(E) dE, \quad (4)$$

式中 e 为电子电荷。图 3 示出以归一化电流密度 J_{nom} 为参数、在 217 K 及 77 K 时增益的光谱分布。由图可知增益的光谱峰值位置随电流和温度而变。

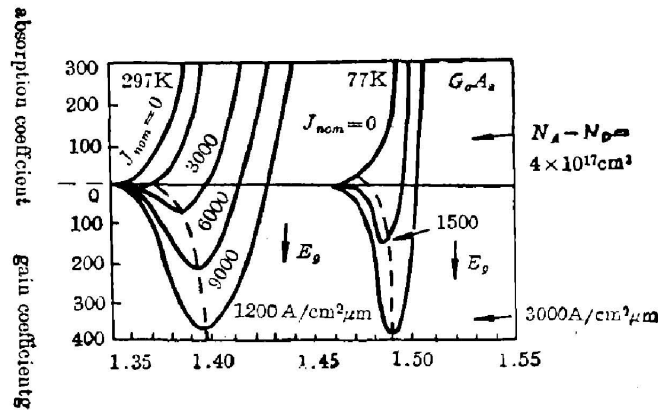


Fig. 3 Spectral gain coefficient distribution of GaAs laser diode

图 1(b) 的复合腔可等价于光学长度为 $n_1 l_1$ 、而端面振幅反射率分别为 r_1 和 r_0 的半导体激光器, 并且^[8]

$$r_0(\lambda) = \frac{[r_2 - (2r_2 - 1)\sqrt{r_3}]^2 + 4\sqrt{r_2 r_3} V (2r_2 - 1) \sin^2 \phi}{(1 - \sqrt{r_2 r_3} V)^2 + 4\sqrt{r_2 r_3} V \sin \phi}, \quad (5)$$

其中 $\phi = 2\pi k l_2 / \lambda$ ($k=1, 2, 3, \dots$), V 为传输损耗系数。若复合腔增益线型的半宽度比 $\Delta\nu_2$ 大得多, 且激光器内部无损耗, 则(5)式可简化为

$$\bar{r}_0(\lambda) = r_2 + \frac{(1 - r_2)^2 r_3 V(\lambda)}{1 - r_2 r_3 V(\lambda)}, \quad (6)$$

光栅外腔半导体激光器的阈值增益 g_{th} 为

$$g_{th} = \alpha - (2L_1)^{-1} \ln[\tau_1 \bar{r}_e(\lambda)], \quad (7)$$

式中 α 为损耗系数。由(6)式知 $\bar{r}_e(\lambda) > r_2$, 这样由(7)式可知外腔的阈值增益小于无外腔时的阈值增益。

当光栅转到某一位置(对应于某一 α 值), 对某一波长 λ_1 , 相应有一定的 $\bar{r}_e(\lambda)$, 而使 g_{th} 达到最小值。由介质均匀展宽的自选模特性可获得单纵模振荡, 它是允许振荡的本征腔模中的某一个外腔模[图 2(d)]。这时, 若改变激光器的注入电流密度或温度, 则将引起增益光谱峰值位置的变化, 从而改变了纵模的增益(图 4)。此外还引起 n_1 的变化。在室温附近, GaAs 的折射率与温度的关系为

$$n_1 = n_1'(0) + \frac{dn_1}{dT} \Delta T^{[4]}, \quad (8)$$

其中 $n_1'(0)$ 表示室温下的折射率, ΔT 为相对于室温之偏差, $dn_1/dT = 5 \times 10^{-4} \text{K}^{-1}$ 。而电流密度引起折射率变化可由载流子引起的变化来求得, 即

$$n_1'' = n_1''(0) - q^2 N^2 (\omega m_j \epsilon_0)^{-2}, \quad (9)$$

其中 $n_1''(0)$ 为无载流子注入时的折射率, ω 为光频, N 为载流子密度, m_j 和 q 分别为载流子的有效质量和所带电荷, ϵ_0 为真空介电常数。

由(8)式和(9)式可知有源区介质的折射率既随温度的升高而增加, 又随载流子密度(因而也是电流密度)的增加而减小, 故折射率的变化由两者的总效果决定。由(1)式知折射率的变化将使激光器的本征腔模间隔发生变化, 因而也引起允许振荡的本征腔模的变化。又因折射率是连续变化的, 所以允许振荡的本征腔模式频率也连续变化。

由(2)式可知, 当外腔长 L_a 连续变化时, 可使外腔模频式连续变化。

如前所述, 外腔激光器中振荡的单纵模是允许振荡的本征腔模中的一个外腔模, 因而当变动电流、温度或腔长时, 原则上可在增益曲线所允许振荡的频率范围内连续调谐。

三、实验结果和分析

本实验装置示意图如图 5 所示。由光栅的一级衍射反馈回半导体激光器的光, 经输出透镜达到分束板后分为两束: 其中透射光通过铯灯到达摄谱仪供观察用; 反射光进入 F-P 球面扫描干涉仪供监测单模特性用。光栅的零级衍射光强处放置一个铯泡, 并附有毫伏计或示波器用来记录铯原子吸收情况(测荧光强度)。在光栅外侧装有压电陶瓷, 由高压电源控制其长度来达到改变外腔长的目的。激光器的电流和温度变化分别通过稳压电源和控温电源来实现, 所得结果如下:

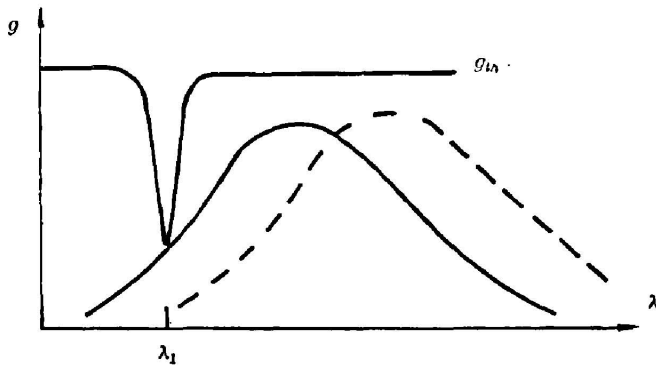


Fig. 4 The shift of gain profile caused by the variation of temperature or injection current

1. 连续调谐 图 6 是用 2m 光栅摄谱仪拍得的 2 号激光二极管本征腔模随温度变化而波长发生漂移的谱片。图中对应于靠得较近的相邻两条谱线的温度差为 1K。由摄谱仪的线色散率求得波长随温度变化的数值约为 $3\sim 4 \text{ \AA}/\text{K}$ ，和理论上所得 GaAs 材料的温度系数 $3 \text{ \AA}/\text{K}$ [6] 基本一致。

另外，由 F-P 扫描干涉仪中看到，当电流变化约 $0.2\sim 0.3 \text{ mA}$ 时，所选得的外腔单纵模发生一次相邻的跳模，此两模频率差为 1500 MHz，由此可以估计出电流变化

1mA，频率变化约为(取电变化的平均值) $\Delta V_q(j) \doteq 1500(\text{MHz})/0.25(\text{mA}) = 6000(\text{MHz}/\text{mA})$ ，相应的波长为 $\Delta \lambda_q(j) = c|\Delta \nu_q(j)|/\nu^2 = 0.14(\text{\AA}/\text{mA})$ 。

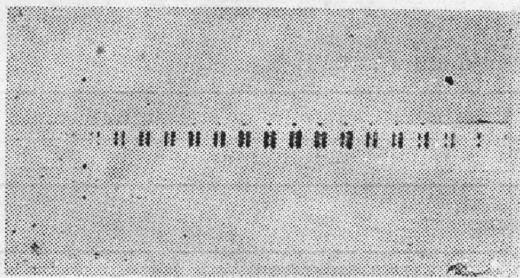


Fig. 6 A photo showing wavelength shift of eigen cavity modes with temperature

成了增益曲线峰值位置的飘移，而使各模的增益和频率均发生变化，此时原所选模已不再处于优势地位，甚至不再存在，必须略转光栅使另一频率的模起振，而靠近增益曲线“边缘”(指选模范围的边缘)的模，则有可能因增益曲线飘移而不能振荡(参见图 4)。可见改变温度可在一定范围内改变激光器的输出波长。

2. 准确调谐 将铯灯打开，在 2m 光栅摄谱仪中找到 8521 \AA 的谱线位置，改变激光器电流或温度，使激光谱线和铯线重合，在 F-P 扫描干涉仪的监视下改变外腔长(手动或用压电陶瓷)，观察到明显的铯泡吸收现象，列举数据如下：

injection current (mA) $T=30.20^\circ\text{C}$	80.6	83.2	83.7	84.2	85.3	86.4	87.5
reading on millivoltmeter (mV)	41	138	832	533	412	414	420

以电流为横坐标，毫伏计读数为纵坐标可作出图 7。

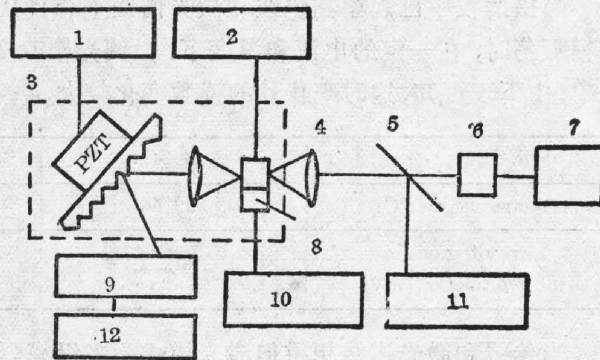


Fig. 5 Experimental set-up

- 1. DC voltage; 2. power supply; 3. external cavity laser; 4. output lens; 5. beam splitter; 6. Cs lamp; 7. spectrograph; 8. semiconductor cooler; 9. Cs bulb; 10. temperature controller; 11. scanning F-P; 12. millivoltmeter (or oscilloscope)

对压电陶瓷加电压或用手微动光栅使腔长变化，由 F-P 扫描干涉仪可观察到所选纵模发生移动。

变动温度或电流，由 F-P 扫描干涉仪及摄谱仪配合观察，有时可见所选的外腔单纵模消失，这时需微动光栅才能使纵模复现。在调谐范围的边缘，有时发现温度变化时，所选单纵模消失，转动光栅后又复现，但位置发生变化，此时若沿一个方向(指恒增加或恒减小)继续变化温度，则可发现类似现象。这证明温度变化造

当摄谱仪中已观察到铯线和激光谱线重合且从 F-P 扫描干涉仪中看到激光器以外腔单模振荡时, 在一定的电流和温度下, 微调光栅改变外腔长度, 可明显地观察到铯泡的吸收现象, 由下表可知, 这时毫伏计的读数变化较大。

diode current (mA)	69.4	86.3	65.5
temperature (°C)	29.50	29.45	29.17
reading on millivoltmeter (mV)	$\frac{-760 \sim -40}{800}$	$\frac{-790 \sim -180}{610}$	$\frac{-780 \sim 120}{900}$

当铯线和激光谱线相重但激光模式为多纵模(如 3~4 个模)时, 也能看到铯泡吸收现象, 不过这时毫伏计读数变化明显减小, 见下表:

diode current (mA)	65.0	68.3	64.4
temperature (°C)	29.13	29.3	29.3
reading on millivoltmeter (mV)	$\frac{-780 \sim -480}{300}$	$\frac{-760 \sim -530}{230}$	$\frac{-760 \sim -420}{340}$

在实验中有时发现, 当激光器处于多纵模状态而其它条件不变时, 某个模光强明显增加(因模竞争)会使毫伏计读数明显变化, 见下表:

diode current 68.9 mA, temperature 28.07°C

laser mode	multimode	the optical intensity of single mode increasing
reading on millivoltmeter (mV)	-780 ~ -405	-780 ~ -230

diode current 64.4 mA, temperature 29.3°C

laser mode	multimode	the optical intensity of single mode increasing
reading on millivoltmeter (mV)	-756 ~ -420	-756 ~ -270

另一些模光强增加时, 毫伏计读数变化明显。

上述各现象可由铯原子吸收来解释。铯原子吸收能级如图 8 所示, 强度最大(5000 R)的特征谱线波长为 8521.1 Å。铯泡中铯原子只能吸收波长为其特征谱线的光子。激光谱线和铯的 8521.1 Å 谱线在摄谱仪中相重时, 说明激光谱线已接近铯的吸收线, 此时若毫伏计读数明显变化, 则激光器已调谐至 8521.1 Å 的铯原子吸收谱线。不过每次毫伏计读数变化范围略有不同, 除光强测量是相对测量外, 其原因是能级存在精细结构, 每次发生吸收时能级略有不同, 而使跃迁几率略有不同。在多纵模情形, 只有其中波长为 8521.1 Å 的成分才能被铯泡吸收, 因此毫伏计的读数变化幅度较前者小。当因模竞争使接近 8521.1 Å 的单纵模光强增加时, 铯泡中原子可吸收光子能量的比例增大, 毫伏计读数变化范围也就增大。若某一波长并非 8521.1 Å 的单模光增加时, 由于它不能被铯泡吸收, 因而这时毫伏计的读数范围也就不大。

实验中, 当激光器功率较小且摄谱仪中铯线和激光谱线相重时, 先关闭铯灯, 从变象管中可观察到摄谱仪中的谱线由亮至暗直至完全消失, 经过一段时间, 铯灯温度降至室温, 激

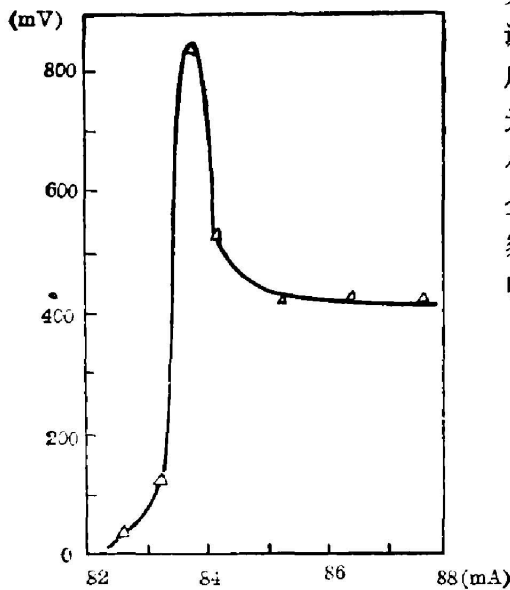


Fig. 7 Experimental result of the absorption of Cs bulb
 abscissa: injection current (mA)
 ordinate: reading on millivoltmeter(mV)

光谱线又渐渐变亮, 这现象也说明了激光谱线已调至 8521.1\AA 。因为铯灯中也有铯原子, 电源关闭后, 其作用自然也类同铯泡, 可吸收与铯线相应的光子而使激光谱线强度减弱。由于激光器功率很小(例如 $100\ \mu\text{W}$), 所以 $8521.1\ \text{\AA}$ 谱线能量可完全被铯灯中的原子所吸收, 此时在摄谱仪中就观察不到激光谱线。待铯灯温度降低后, 其内原子吸收能力减弱, 激光谱线便又逐渐变强。

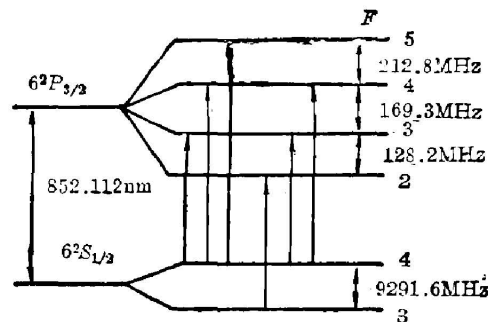


Fig. 8 The atomic energy level diagram of Cs

四、结 论

我们先后挑选了四只具有合适中心波长的 GaAs-AlGaAs 半导体激光管做了上述调谐实验, 它们都能被调谐到铯的吸收谱线 $8521.1\ \text{\AA}$ 外。因此, 改变外色散腔半导体激光器的温度、电流和外腔长可实现一定范围内的连续调谐。

用铯泡或原子分光光度计的火焰吸收法, 改变激光器电流、温度或腔长, 观察到激光谱线被强烈吸收的现象, 从而说明激光器的调谐波长, 可通过一些原子的特征吸收线进行精确校准。

实现外色散腔半导体激光器的连续调谐和准确调谐, 为其应用开辟了广阔前途, 窄线宽, 并可连续调谐和准确调谐的光源将会在激光光谱学等实际应用中显示其威力。

实验中所用半导体激光器由中国科学院半导体所七室专门研制提供, 铯灯由北京有色冶金院提供, 铯泡由北京大学无线电系波谱教研组提供, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Zhou Bingkun et al.; "International Conference on Lasers" (Digest), 1983, 323, Guangzhou, China.
- [2] H. Kressel et al.; *Semiconductor Lasers and Heterojunction LEDs*, (88, Academic Press, New York, USA, 1977).
- [3] R. P. Salrthe; *Appl. Phys.*, 1979, **20**, No. 1 (Sep), 1.
- [4] D. T. F. Marple; *J. Appl. Phys.*, 1964, **35**, No. 4 (Apr), 1241.
- [5] J. C. Dymont et al.; *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**, No. 4 (Apr), 1739.

Tuning characteristics of a semiconductor laser with an external dispersive cavity

XU ZHIZHI, YAO MINYU, CHEN JIAHUA AND ZHOU BINGKUN
(Department of Radio Electronics, Tsinghua University, Beijing)

(Received 3 March 1986; revised 19 May 1986)

Abstract

The continuous and accurate tuning of a semiconductor laser with an external dispersive cavity over the whole frequency range determined by oscillating conditions can be achieved by varying the temperature and injection current of the laser diode and the length of the external cavity. This article reports the principles and some experimental results.