

外腔半导体激光器宽带调谐特性

柴燕杰 张汉一 谢世钟 孙波 周炳琨

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 本文分析了强反馈外腔半导体激光器的宽带频率调谐特性,得到了最大频率调谐范围公式,利用 $1.5\ \mu\text{m}$ 外腔半导体激光器实现了 $1.45\ \mu\text{m}$ 至 $1.57\ \mu\text{m}$ 范围内的波长宽带调谐(120 nm 调谐范围)。

关键词 可调谐激光器, 半导体激光器

Wide-band tuning property of external cavity semiconductor laser

CHAI Yanjie, ZHANG Hanyi, XIE Shizhong, SUN Bo, ZHOU Bingkun

(Electronic Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Wide-band wavelength tuning properties of external cavity semiconductor laser (ECL) with strong feedback configuration are analyzed in this paper. A formula of maximum tuning range is given in theory and an ECL with 120 nm tuning range ($1.45\sim 1.57\ \mu\text{m}$) is achieved experimentally.

Key words tunable laser, semiconductor laser

1 引言

窄线宽可调谐半导体激光器在频分复用光通信(OFDM)^[1]、高分辨率光谱测量、外差传感、相干检测技术等领域有广阔的应用范围。虽然通常的分布反馈式(DFB)激光器^[2]具有模式稳定的优点,但DFB激光器线宽大,调谐范围小,在上述领域中的应用受到一定限制。外腔半导体激光器^[3]利用外腔将部分输出光反馈回有源区,通过反馈光与有源区内光场之间的有效相互作用,可以降低激光器噪声,压窄激光器线宽,增大波长调谐范围。

本文报道了对 $1.5\ \mu\text{m}$ 半导体激光器调谐特性的理论与实验研究结果,利用体材料半导体激光器管芯实现了调谐范围 120 nm,线宽 60 kHz 的稳定单模输出。

2 宽带调谐原理

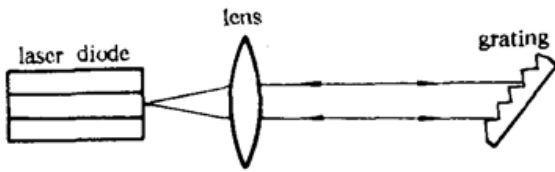


Fig. 1 Schematic diagram of grating external cavity semiconductor laser

其中 R_3 为包括了耦合损耗和传输损耗在内的外腔有效反馈率。由于光栅的反射光具有色散特性,当转动光栅时,反馈进入有源区的光波长也不同,从而改变激光振荡波长,实现了激光波长调谐。

我们认为体材料半导体激光器增益具有洛仑兹(Lorentz)线型,即

$$g(\lambda) = g_0 \frac{(\Delta\lambda_{\text{gain}}/2)^2}{(\lambda - \lambda_0)^2 + (\Delta\lambda_{\text{gain}}/2)^2} \quad (1)$$

其中 $g_0 = g(\lambda_0)$, $\Delta\lambda_{\text{gain}}$ 为激光器增益曲线半极大值处全宽度。当激光器一端镀增透膜后, R_2 减小, g_0 增大,内腔模的振荡阈值增高,在增益达到阈值条件以前,不会形成内腔模振荡。当耦合外腔后,由于有部分出射光反馈回有源区,相当于减小了反馈光波长 λ_y 处的损耗,虽然反馈光波长 λ_y 处的增益小于增益中心波长 λ_0 处的增益,但外腔的反馈作用仍可使波长 λ_y 处的模式比增益中心波长 λ_0 处的模式先达到振荡条件(即增益大于损耗),通过转动光栅,即改变光栅的角度,就可以改变反馈回有源区的光波长 λ_y ,实现激光波长调谐。当波长 λ_0 处满足阈值条件时,若 λ_y 处也达到增益阈值,就达到了激光器的最大波长调谐范围,这时的 λ_y 值给出了外腔半导体激光器最大波长调谐范围的理论值。

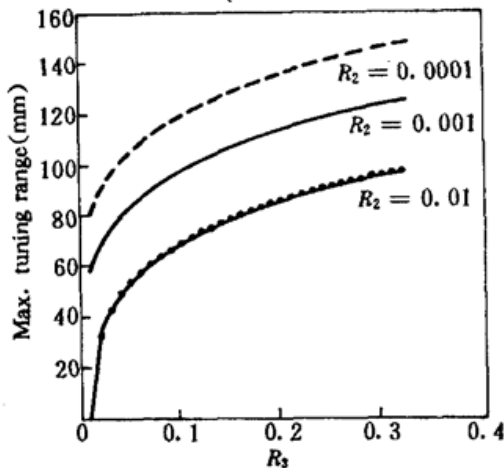


Fig. 2 Tuning property of grating external cavity semiconductor laser

$\Delta\lambda_{\text{gain}} = 100 \text{ nm}$, $l = 230 \text{ }\mu\text{m}$, $\gamma = 30 \text{ cm}^{-1}$, $R_1 = 0.32$

对不同的激光器参数,图 2 给出了光栅外腔激光器的调谐特性理论曲线,可见,对激光二极管耦合面镀增透膜(即减小 R_2)和增大外腔反馈强度(即增大 R_3)可有效地增大激光器的波长调谐范围。

3 外腔半导体激光器

激光器管芯为中国科学院半导体所研制的 $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ F-P 型半导体激光器,管芯安装在自行设计的可两面出光的台阶型热沉上。为实现强反馈,激光二极管与外腔的耦合面(R_2)上镀了

为了加强外腔的作用,实现外腔的强反馈(即外腔反射率远高于内腔反射率),对激光二极管耦合面镀增透膜,利用外腔将闪耀光栅的一级干涉光反馈回有源区中。设 l, L 分别为有源区和外腔长度, n 为有源区折射率, R_1, R_2, R_3 分别为激光器本征腔两个解理面及外腔的光强反射率,其

内腔模在增益中心 λ_0 处的振荡条件为

$$g_0 = \gamma + \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (2)$$

其中 γ 为有源区内部光强损耗系数。在光栅反馈波长 λ_y 处,外腔模增益阈值条件为

$$g_{\text{ext}} = \gamma + \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{R_1 R_c} \quad (3)$$

其中 R_c 为考虑了 R_2 的影响在内的等效外腔光强反馈率^[4](对强反馈外腔近似有 $R_c \approx R_3$)。当 $g_{\text{ext}} = g(\lambda_y)$ 时,达到激光器波长调谐极限,由(1)式可得到外腔半导体激光器的最大波长调谐范围

$$\Delta\lambda_{\text{max}} = \Delta\lambda_{\text{gain}} \sqrt{g_0/g_{\text{ext}} - 1} \quad (4)$$

增透膜,外腔激光器采用了双层控温结构,以增强外腔的温度稳定性。

镀膜前,激光器阈值为 $I_{th} = 14 \text{ mA}$,镀膜后激光器阈值升高至 $I_{th}' = 40 \text{ mA}$,相当于 $R_2' = 5 \times 10^{-4}$ 。耦合上光栅外腔后,阈值电流又降至 26 mA ,相当于外腔反馈率 $R_3 = 2\%$,显然, $R_3 \gg R_2$,确实实现了外腔的强反馈。在外腔激光器中采用 0.23 节距 (pitch) 的自聚焦透镜 (GRIN-Rod) 进行光耦合,外腔长 $L = 3 \text{ cm}$,光栅为 $1.5 \mu\text{m}$ 一级闪耀光栅,每毫米 600 刻线。激光器控温由自行研制的精密双路控温电源实现,控温精度为 $0.005 \text{ }^\circ\text{C}$ 。外腔激光器可实现长期稳定单模工作,输出线宽为 60 kHz ,图 3 为用延迟自外差法^[5]测得的自差拍线宽谱。

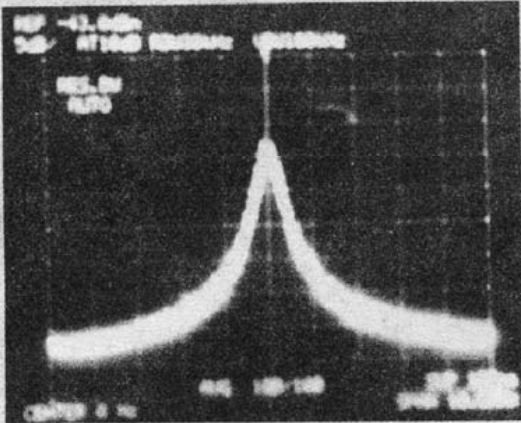


Fig. 3 Spectrum of self-heterodyne detection
horizontal : 1 MHz/div , vertical : 5 dB/div

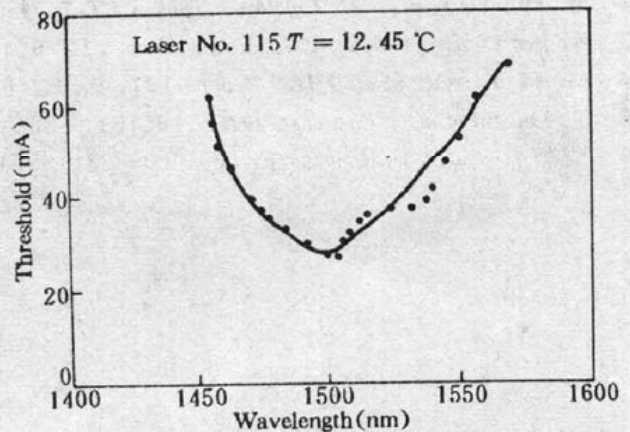


Fig. 4 Threshold dependence on wavelength of external cavity semiconductor laser

4 宽带调谐实验研究

利用上面描述的激光器结构,我们对光栅外腔半导体激光器的调谐特性进行了实验研究。由于器件具有良好的调谐性能与稳定性,通过改变光栅角度,我们利用 $1.5 \mu\text{m}$ 外腔半导体激光器在 $1.45 \mu\text{m}$ 至 $1.57 \mu\text{m}$,即 120 nm 波长范围内实现了激光器波长的宽带调谐(不连续调谐),根据作者已掌握的文献结果,这是首次利用体材料型半导体激光器得到的最大波长调谐范围。图 4 为实验中测得的激光器阈值与振荡波长关系曲线。当激光波长远离增益中心时,由于增益的降低,所需的振荡阈值电流也相应升高。当外腔半导体激光器的工作电流高于 40 mA (即高于镀膜后的激光器阈值)时,在增益中心波长处会出现内腔模;由于外腔的强烈选模作用,内腔模的强度一般很弱,图 4 中的曲线为外腔半导体激光器的边模抑制比大于 20 dB 时的实验结果。实验中还发现当激光器波长调谐约 0.7 nm 左右时,会产生模式跳变,跳变范围为一个内腔模的间距。我们认为这是由于虽然激光二极管的一面镀了增透膜,但仍然没能消除本征模式的影响,使得波长调谐实际上只能在一个本征模的振荡范围内进行,当调谐至本征模边缘时,由于增益下降,模式将会向下一个本征模式跳变。

通过改变激光器管芯温度,可以使增益曲线中心波长产生较大的移动,以覆盖外腔调谐过程中激光振荡频率的“空白”点(约需要改变管芯温度 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右),再配合光栅角度和外腔长的调谐,就可以在全增益线宽范围内实现频率的准确调谐,即将外腔半导体激光器的频率调谐到任何所需要的频率点上。利用外腔半导体激光器的这种调谐性能,已在国内实现了三路半导体激光器频率的等间距(4.8 GHz)锁定^[6]。

5 结 论

本文对强反馈光栅外腔半导体激光器的调谐特性进行了详细的理论分析与讨论,得到了最大波长调谐范围公式。在实验中得到 3120 nm 的波长调谐范围,为已见报道的体材料半导体激光器的最优结果。

参 考 文 献

- 1 K. Nosu *et al.*, *J. Lightwave Tech.*, **LT-5**(9), 1301~1308(1987)
- 2 M. Fukuda *et al.*, *J. Lightwave Tech.*, **LT-7**, 1504~1509(1989)
- 3 N. A. Olsson *et al.*, *J. Lightwave Tech.*, **LT-5**(4), 510~515(1987)
- 4 M. F. Ferreira *et al.*, *IEE Proc.*, **137**, Pt. J, (6), 361~369(1990)
- 5 T. Okoshi *et al.*, *Electron. Lett.*, **16**(16), 630~631(1980)
- 6 柴燕杰 *et al.*, *高技术通讯*, (3), 20~23(1992)