

选频滤波器负载外腔半导体 激光器调谐特性的研究

丁 浩 陈新之

(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 本文分析选频滤波器负载外腔半导体激光器的调谐特性。从等效模型的受激条件出发, 导出确定最大调谐范围的简单表达式, 提出了计算在各种反馈强度下调谐曲线的方法。并解释近年来报道的有关实验结果。

关键词: 外腔半导体激光器, 调谐特性

Tunability study of frequency selective filter extended cavity semiconductor lasers

Ding Hao, Chen Xinzhi

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: This paper presents a theoretical study of the tunability of frequency selective filter extended cavity semiconductor lasers. From the lasing condition of [the equivalent model, we derive a simple expression determining the maximum tuning range and propose a computing method for calculating the tuning curve at any feedback level. We also explain several experimental observations reported recently.

Key words: external cavity semiconductor lasers, tuning properties

单频窄线宽可调谐半导体激光器是实现相干光通信和高密度频分复用系统的关键元件, 采用选频滤波器负载外腔与单模 F-P 激光管相耦合 (简称为选频外腔激光器) 是实现窄线宽可调谐的一种行之有效的办法。有关利用外腔压缩激光管线宽的机理和条件, 已有许多详细的论述^[1~3], 而对调谐特性的研讨则很少。本文将从选频外腔激光器等效模型 (即用选频滤波器的响应代替通常的三镜腔模型^[4~6]中外腔反射镜的响应) 的受激条件出发, 对这类器件的调谐范围、调谐曲线以及阈值与调谐的关系进行理论分析, 并解释近年来报道的一些有关的实验结果^[7,8]。

一、受激条件

我们来分析图 1(上)所示的选频外腔半导体激光器的受激条件, 首先将其简化为图 1(下)所示的等效模型。

假设 r_1, r_2 为实数, 与频率无关。选频滤波器具有 Lorentzian 选频特性, 其反射率 r_3 为复数:

$$\begin{cases} |r_3(\omega)| = \frac{r_{30}}{\sqrt{1+4\left(\frac{\omega-\omega_F}{\Delta\omega_F}\right)^2}} \\ \varphi_3(\omega) = \text{Arctg} \left[\frac{2(\omega-\omega_F)}{\Delta\omega_F} \right] \end{cases} \quad (1)$$

幅度的最大值在 $\omega = \omega_F$, $\varphi(\omega_F) = 0$, $\Delta\omega_F$ 为滤波器的半功率全带宽。参照文献 [3] 的方法, 将激光管右端面、外腔和选频滤波器的组合反射率用 r_{2ef} 来表示, 其模和相位分别为

$$\begin{cases} |r_{2ef}(\omega)| \approx \sqrt{\frac{r_2^2 + R_{ext}^2 + 2r_2 R_{ext} \cos(\omega\tau_c + \varphi_3(\omega))}{1 + (r_2 R_{ext})^2 + 2r_2 R_{ext} \cos(\omega\tau_c - \varphi_3(\omega))}} \\ \varphi_{2ef}(\omega) = -\text{arc tg} \left[\frac{(1-r_2^2) R_{ext} \sin(\omega\tau_c - \varphi_3(\omega))}{r_2(1+R_{ext}^2) + R_{ext}^2(1+r_2^2)} \times \cos(\omega\tau_c - \varphi_3(\omega)) \right] \end{cases} \quad (2)$$

其中 τ_c 为外腔的往返时间, $R_{ext} = \eta |r_3(\omega)| e^{-\tau_c/\tau_{coh}}$ 为外腔反射率, η 为激光管与外腔的耦合效率包括外腔的损耗, τ_{coh} 为激光管的相干时间。为了简明起见, 我们假设外腔的长度为几十厘米, 外腔作用时器件的线宽小于 10 MHz, 此时有 $\tau_c/\tau_{coh} < 1/10$, 故 $R_{ext} \approx \eta |r_3|$, 于是可写出选频外腔激光器的受激条件:

振幅条件:

$$\Gamma_{th} = \alpha_0 - \ln(r_1 |r_{2ef}(\omega)|) / l \quad (3)$$

相位条件:

$$\omega\tau_l = \Omega\tau_l - \varphi_{2ef}(\omega) + 2m\pi \quad (4)$$

其中 α_c 为有源介质单位长度的损耗, τ_l 和 l 分别为激光管内腔的往返时间和长度, Ω 为无外腔时的主模频率。

二、调谐范围

调谐范围可通过增益损耗曲线来分析(图 2)。激光管内腔有源介质的增益可用经典的抛物型能带理论计算得到^[9], 本文采用文献 [10] 提供的近似表达式:

$$G(\omega, N) = G_N(N - N_0) / \left[1 + 4 \left(\frac{\omega - \omega_c}{\Delta\omega_g} \right)^2 \right] \quad (5)$$

其中 G_N 为增益系数, N 和 N_0 分别为载流子密度和其在透明时的值。 ω_c 是增益峰值所对应的频率, 我们假设 $\omega_c = \Omega$ 。 $\Delta\omega_g$ 为增益曲线的带宽。

图 2 中损耗曲线的尖峰对应于滤波器的中心频率 ω_F 。当 ω_F 与 ω_c 相吻合时(图中 a 点), 如同时又满足相位条件, 则器件首先在 $\omega = \omega_c = \omega_F$ 处受激。当 ω_F 偏离 ω_c 时(图中 b 点), 为满足振幅条件, 必须提高载流子密度 N 以抬高增益曲线, 如果 b 点同时还满足相位条件, 则受

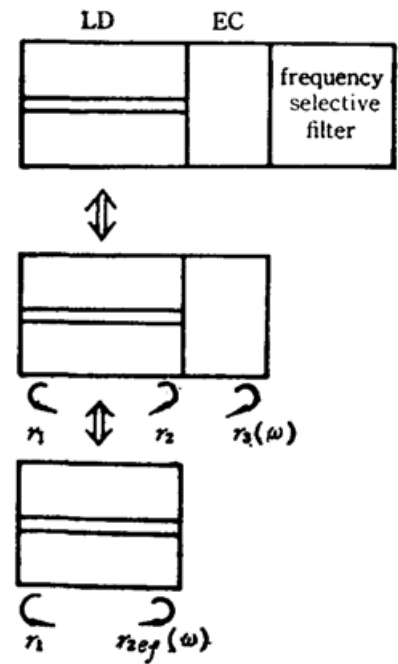


Fig. 1 Equivalent model for frequency selective filter extended cavity semiconductor lasers

激频率随滤波器的中心频率调至 ω_F , 实现了调谐。进一步调偏 ω_F , 需要进一步抬高增益曲线以保证振幅条件的满足。当 ω_F 调至 c 点时, 增益曲线将在 a 点的上方与损耗曲线的底部在 d 点相碰, 这就达到了调谐的极限。此后继续调偏 ω_F 增益曲线却不能继续抬高。这是因为在 d 点振幅和相位条件均得到满足, 器件受激于 ω_c 处, 抑制了载流子密度的进一步增长。因此在达到最大调谐范围以后, 器件的激发频率又回到并保持在增益峰值频率上, 这与文献[7]报道的实验观察相符合。

为满足振幅条件, 联立(3)和(5), 得

$$G_0 = G_N(N_{th} - N_0) = \Gamma_{th}(\omega_F) \left[1 + \Delta \left(\frac{X_F}{\Delta X_g} \right)^2 \right] \quad (6)$$

$$G(\omega, N_{th}) = \frac{G_0}{1 + \Delta \left(\frac{X}{\Delta X_g} \right)^2} = \frac{1 + \Delta \left(\frac{X_F}{\Delta X_g} \right)^2}{1 + \Delta \left(\frac{X}{\Delta X_g} \right)^2} \Gamma_{th}(\omega_F) \quad (7)$$

其中 $X = (\omega - \omega_c)\tau_l$, $X_F = (\omega_F - \omega_c)\tau_l$, $\Delta X_g = \Delta\omega_g\tau_l$ 。从以上的分析可以推出最大调谐范围 X_{Fmax} 应满足

$$X_{Fmax} = \frac{\Delta X_g}{2} \sqrt{\frac{\Gamma_{th}(\omega_c) - \Gamma_{th}(\omega_F)}{\Gamma_{th}(\omega_F)}} \quad (8)$$

图3是根据式(8)计算出来的最大调谐范围的等值曲线, 使用的参数为: 增益曲线中心波长 λ_c : $1.5 \mu\text{m}$; 激光管腔长 l : $160 \mu\text{m}$; 激光管内腔体积 V : $300 \mu\text{m}^3$; 增益系数 G_N : $1.12 \times 10^{-20} \text{m}^2$; λ_c 处增益为零时的载流子密度 N_0 : $1 \times 10^{24} \text{m}^{-3}$; 激光管左端面场反射率 r_1 : 0.565 ;

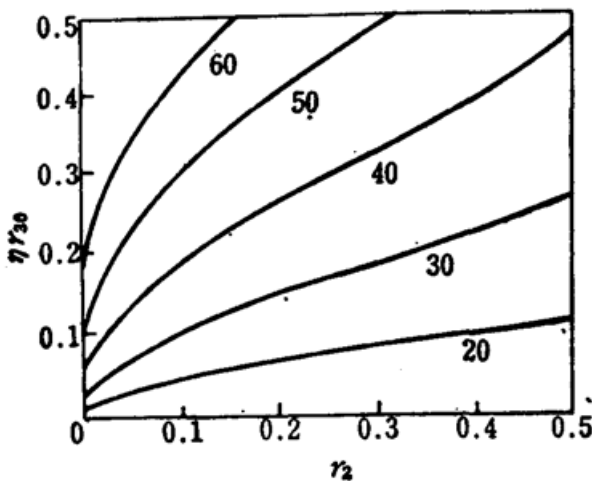


Fig. 3 Calculated extreme tuning range (normalized to the longitudinal mode spacing of the solitary laser) contours in the r_2 - ηr_3 plane

激光管内腔往返时间 τ_l : 4.26ps ; 外腔往返时间 τ_c : 56.67ps ; 选频滤波器带宽 $\Delta\omega_F$: $1 \times 10^{12} \text{rad/s}$; 增益曲线带宽 $\Delta\omega_g$: $5 \times 10^{13} \text{rad/s}$; 有源介质单位长度损耗 α_0 : 20cm^{-1} ; 表面吸收系数 A : $1 \times 10^8 \text{s}^{-1}$; 受激辐射系数 B : 0.26s^{-1} ; Auger 辐射系数 C : $4.44 \times 10^{-10} \text{s}^{-1}$ 。由此可见, 减小激光管右端面的反射率, 提高选频滤波器的反射率和减小激光管与外腔的耦合损耗是提高最大调谐范围的三个主要因素。图3同时也提供了 r_2 与 R_{ext} 相互补偿的关系。例如, 为使调谐范围大于50个激光管的纵模间隔, 当 $r_2 = 0.3$ 时, R_{ext} 至少要大于0.48; 但如果 $r_2 = 0.1$, 则 R_{ext} 能达到0.3就足够了。

三、调谐曲线

调谐曲线描写的是选频外腔激光器受激频率随外腔滤波器中心频率改变的关系, 即 $\omega =$

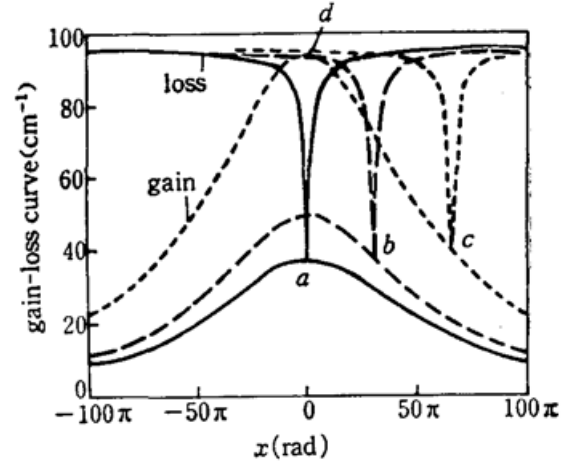


Fig. 2 Gain and loss curves for calculating the extreme tuning range

$f(\omega_F)$ 。理想的调谐曲线应为 $\omega = \omega_F$ 。然而在实际制作中尽管可以对激光管右端面采取涂膜处理以减小其反射率,但很小的残留 r_2 值,仍能使调谐曲线偏离理想曲线,外腔激光器的频率受原激光管纵模的牵制,并在原激光管两相邻纵模中间离散跳越^[8]。

选频外腔激光器可能受激的频率取决于相位条件(4),激光将在这些可能受激频率中损耗最小所对应的频率上首先发生。下面着重分析在 $0 < X < 2\pi$ 范围内(即激光管两个相邻纵模间隔内)的调谐曲线,最大调谐范围内其它区域的调谐曲线可依次类推。为便于分析相位条件,我们将(4)改写为下面的形式,并假设 $\omega_c \tau_c = 2k\pi$, $M = \tau_c / \tau_l$ 为整数。

$$\begin{aligned}
 h(X, X_F) &= X + \varphi_{2ef}(X, X_F) \\
 &= X + \text{arctg} \left[\frac{(1 - r_2^2) R_{ext} \sin(MX - \varphi_3)}{r_2(1 + R_{ext}^2) + R_{ext}(1 + r_2^2) \cos(MX - \varphi_3)} \right] \\
 &= 2m\pi
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$m = \begin{cases} 0 & 0 < X < \pi \\ 1 & \pi < X < 2\pi \end{cases}$$

在弱反馈情况下, $R_{ext} \rightarrow 0$, 导致 $\varphi_{2ef} \rightarrow 0$, 故 $h(X, X_F) = X = 2m\pi$, 也就是说外腔激光器可能受激的频率就是原激光管的纵模频率,此时所谓调谐实际上只能从激光管的一个纵模位置跳到相邻的另一纵模位置;在强反馈情况下, $R_{ext} \gg r_2$, $r_2 \rightarrow 0$, 故 $h(X, X_F) = (1 + M)X - \varphi_3 = 2q\pi$, $X_q = (\varphi_3 + 2q\pi) / (1 + M)$, $q \in \{1, M\}$ 代表外腔纵模位置,由式(3)可知在这些可能受激频率中,最接近 X_F 的 X_q 处的损耗最小,所以 X 能随 X_F 沿理想调谐曲线按外腔模间隔连续调谐。

当 R_{ext} 和 r_2 的取值介于上述两种极端情况时,调谐曲线可通过以下的计算流程用数值计算的办法获得:

1. 对每一选定的 X_F 值,确定满足相位条件(9)的 M 个 X_q 的值;
2. 由式(3)计算出 X_q 处的损耗值 Γ_{thq} ;
3. 找出 Γ_{thq} 中最小值所对应的 X_q 值记作 X_{Las} 这就是器件首先受激的频率;
4. 改变 X_F 值,重复步骤 1~3,找出 X_{Las} 与 X_F 的对应关系(即调谐曲线)。

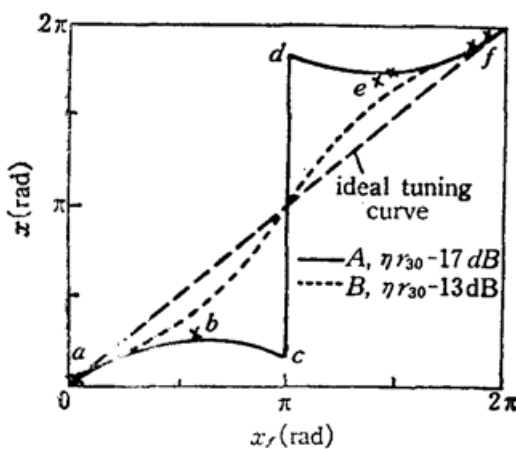


Fig. 4 Calculated tuning curve

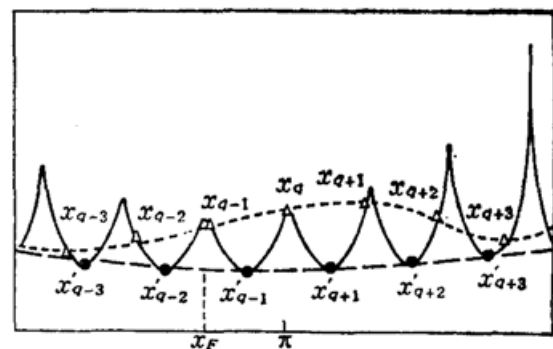


Fig. 5 Schematic diagram revealing the effective loss of the frequency selective filter extended cavity
 —loss of external cavity; ———response of frequency selective filter;effective loss curve

图 4 是根据上法计算得出的调谐曲线。曲线 A 按文献[5]报道的实验参数计算得到并与其实验结果(图中 × 点)相符,从中可区分调谐段(包括上升段 *ab* 和 *ef*、回折段 *bc* 和 *de*)和跳越段。随着反馈强度的增加 $R_{ext} \uparrow$, 调谐曲线将由 A 向 B 过渡, 逐步接近理想曲线。

图 5 是反映选频外腔实际损耗曲线的示意图。我们注意到满足相位条件的 X_q 值(图中 Δ 点)偏离外腔损耗曲线极小值所对应的 X 值 X'_q (图中 \cdot 点, 共 $M-1$ 个), 而且 X 越接近 π , X_q 与 X'_q 的偏差越大, 从而导致实际损耗最小值所对应的 X 值(图中 X_{q-s}) 偏离滤波器的中心频率 X_F , 所以调谐段偏离理想调谐曲线。当 $X_F > \pi$ 时, 实际损耗最小值所对应的 X 值便从 X_{q-s} 处跳到 X_{q+s} 处, 解释了图 4 中的 *cd* 段。实际工作中感兴趣的是上升段 X 范围的大小, 图 6 是我们的计算结果。图中 Δ 表示的点是在 r_2 取值 0.01 情况下变动 ηr_{30} 获得的; \cdot 表示的点则是在 ηr_{30} 取值为 0.1 情况下改变 r_2 值获得。

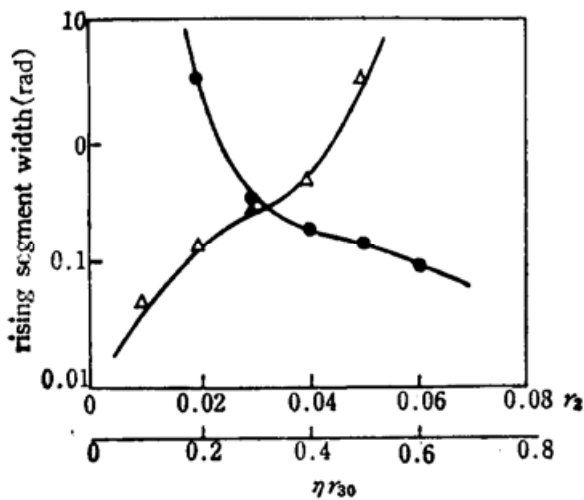


Fig. 6 Calculated rising segment width vs internal cavity facet reflectivity r_2 (\cdot) and external cavity reflectivity ηr_{30} (Δ)

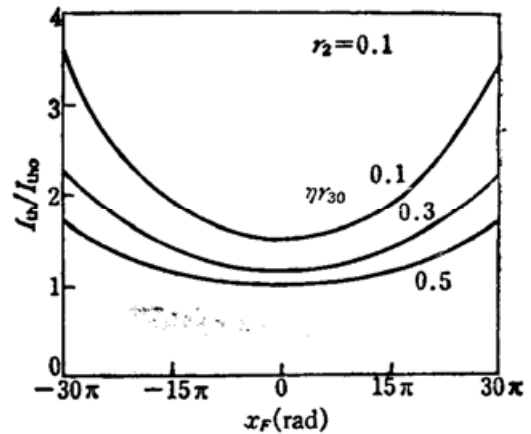


Fig. 7 Calculated threshold current(normalized to the threshold current of the uncoated solitary laser) vs tuning parameter for different feedback levels

四、阈值电流与调谐的关系

激光管的注入电流与腔内载流子密度的关系由载流子速率方程确立, 阈值时光子密度可忽略不计, 于是可得^[11]

$$I_{th} = e \sum_{i=1}^3 \xi_i N^i \tag{10}$$

其中 e 为电子电荷量; $\xi_1 = AV$, $\xi_2 = BV^2$, $\xi_3 = CV^3$, V 为激光管内腔体积; A 、 B 和 C 分别为描述界面吸收、受激辐射和 Auger 辐射的系数。阈值时载流子密度与调谐的关系已由式(6)给出, 将其代入式(10)得

$$I_{th} = e \sum_{i=1}^3 \xi_i \left\{ \frac{\Gamma(\omega_F) \left[1 + \Delta \left(\frac{X_F}{\Delta X_g} \right)^2 \right]}{G_N} + N_0 \right\} \tag{11}$$

根据式(11)计算得出的曲线示于图 7, 当激光管右端涂膜后, r_2 值减小, 必须配以很强的反馈, 才能维持原激光管的阈值; 反馈越强, 阈值电流随调谐的变化越小。

五、结 论

我们已对选频外腔半导体激光器的调谐特性进行了分析研究,结果表明:1)最大调谐范围主要决定于振幅条件,而调谐曲线则主要决定于相位条件;2)提高选频滤波器的反射率,减小外腔及外腔与激光管的耦合损耗,减小激光管与外腔耦合端面反射率,都有助于扩大最大调谐范围,扩大上升段范围和改善其线性;3)当反馈量 R_{ext} 比较小时, τ_2 应减小到以不明显增大阈值电流为最佳。

参 考 文 献

- 1 R. Lang *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-16**, 347(1980)
- 2 G. P. Agrawal, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-20**, 468(1984)
- 3 B. Tromborg *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-23** 1875(1987)
- 4 A. Olsson *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-17**, 1320(1981)
- 5 J. H. Osmundsen *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-19**, 465(1983)
- 6 惠荣庆 *et al.*, *电子学报*, **17**, 7(1989)
- 7 W. V. Sorin *et al.*, *Opt. Lett.*, **13**, 731(1988)
- 8 F. Heismaun *et al.*, *Appl Phys. Lett.*, **51**, 164(1987)
- 9 A. Yariv, *Quantum Electronics*, John Wiley and Sons, 2nd Ed., 282~292
- 10 D. Marcuse., *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-20**, 1139(1984)
- 11 N. H. Jensen *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-23**, 71(1984)