

文章编号: 1001-3806(2003)03-0223-03

## 两段式 DFB 激光器波长调谐特性分析\*

闫璐 罗斌 潘炜

(西南交通大学计算机与通信工程学院, 成都, 610031)

摘要: 利用耦合波方程, 对两段式 DFB 激光器进行理论分析, 得出了激光器激射工作时两段载流子浓度和激射波长之间所满足的隐含表达式。作为特例, 分析了吸收型器件在两段等长情况下的阈值载流子浓度变化和波长调谐特性。

关键词: 两段式 DFB 激光器; 载流子浓度; 波长调谐

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

### Analysis of tuning characteristics of two-segment DFB lasers

Yan Lu, Luo Bin, Pan Wei

(Institute of Computers & Communications Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**Abstract:** Based on coupling wave equation, two-segment DFB lasers have been analyzed, and implicit expression of their carrier density and emission wavelength has been obtained. As a special case, the oscillation behaviors of the absorptive device with two equal length segments: threshold conditions, carrier density and wavelength tuning range have been analyzed.

**Key words:** two-segment DFB semiconductor lasers; carrier density; wavelength tuning

### 引言

随着光纤通信向大容量、高速率发展, 可调谐激光器在大容量的波分复用传输系统和光交换系统中有了重要的应用<sup>[1]</sup>。相对于超结构光栅(SSG)<sup>[2]</sup>、取样光栅(SG)<sup>[3]</sup>等结构的器件, 两段式 DFB 半导体激光器结构简单, 可以对它实现非均匀泵浦。一段作为增益区以提供振荡工作所需增益, 另一段作为吸收区。由于吸收区载流子浓度并未饱和, 这一段的有效折射率随电流能够发生较大的变化。因此, 和普通 DFB 激光器相比, 调谐能力增强<sup>[4]</sup>。

对 DFB 激光器的研究, 常采用传输矩阵方法(TMM)<sup>[5]</sup>: 把激光器分为很多小的部分, 并设在某个小的部分中光子密度、载流子浓度是均匀分布的。这样通过对每一个小部分的求解, 就可以得到整个系统的解。TMM 方法可以用于各种 DFB 结构的激光器的非线性分析, 包括多段式(多电极)DFB 激光器。通过比较理论和实验结果<sup>[6]</sup>, 在两段式 DFB

激光器中, 每段中的载流子分布随腔长的变化并不大。因此, 可以设为在腔内是均匀分布的。基于这一考虑, 笔者对光子数分布采用耦合波方程, 载流子浓度用平均场处理, 由此得出激光器激射工作时两段载流子浓度和激射波长之间所满足的隐含表达式。并且分析了吸收型器件在两段等长情况下的阈值载流子浓度变化和波长调谐特性。

### 1 理论分析

两段式 DFB 激光器的结构如图 1 所示。

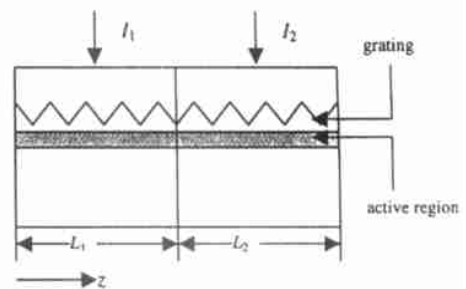


Fig. 1 Schematic illustration of distributed feedback (DFB) semiconductor laser

下面用耦合波方程来分析 DFB LD 的阈值行为。设沿腔长方向为  $z$  轴, 见图 1, 由 Maxwell 方程组可以导出在周期波导中沿  $z$  轴方向的场分布<sup>[7]</sup>:

\* 国家自然科学基金资助项目。

作者简介: 闫璐, 女, 1979 年 5 月出生。硕士研究生。主要从事光纤通信及光器件的研究。

收稿日期: 2002-07-18; 收到修改稿日期: 2002-11-18

$$E(z) = A(z)\exp(i\beta_0 z) + B(z)\exp(-i\beta_0 z) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{式中,} \quad A(z) &= E_1 \exp(i\Delta\beta z) \\ B(z) &= E_2 \exp(-i\Delta\beta z) \end{aligned} \quad (2)$$

分别代表前向波和后向波,  $\beta_0$  是布喇格波数。可求得  $A(z)$  和  $B(z)$  的耦合波方程:

$$\begin{aligned} \frac{dA(z)}{dz} &= i\Delta\beta A(z) + ikB(z) \\ -\frac{dB(z)}{dz} &= i\Delta\beta B(z) + ikA(z) \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $k$  是耦合因子。此方程的通解为:

$$\begin{aligned} A(z) &= A_1 \exp(iqz) + r(q) B_2 \exp(-iqz) \\ B(z) &= B_2 \exp(-iqz) + r(q) A_1 \exp(iqz) \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $A_1, A_2, B_1, B_2$  是相关的常数,  $q$  是由边界条件决定的复数波数, 定义为:

$$q = \pm [(\Delta\beta)^2 - k^2]^{1/2} \quad (5)$$

式中, “+”、“-”号分别对应于前向、后向波。  $\Delta\beta$  是相位失配因子:  $\Delta\beta = \delta - i\bar{\alpha}/2$  (6)

式中,  $\delta$  是激光波长  $\lambda$  和布喇格波长  $\lambda_0$  间的偏移量:  $\delta = 2\pi(\mu/\lambda - \mu_0/\lambda_0)$  (7)

式中,  $\bar{\alpha}$  是增益, 和载流子浓度  $N$  之间的关系如下:

$$N = \frac{\bar{\alpha} + \alpha_{\text{int}}}{T\alpha} + N_0 \quad (8)$$

$r(q)$  表示前向波或后向波的反射振幅比, 定义为:

$$r(q) = \frac{q - \Delta\beta}{k} = -\frac{k}{q + \Delta\beta} \quad (9)$$

如果忽略两段之间的损耗, 两段式DFB激光器的边界条件可写成:

$$A(0) = r_1 B(0), \quad A(L_1) = A'(0) \quad (10)$$

$$B'(L_2) = r_2 A'(L_2), \quad B(L_1) = B'(0) \quad (11)$$

式中,  $A(0), A(L_1), B(0), B(L_1)$  是第1段的参量,  $A'(0), A'(L_2), B'(0), B'(L_2)$  是第2段的参量,  $r_1, r_2$  是两个端面的反射率。将此式用于(4)式中, 便可求得如下4个方程:

$$[1 - r_1 r(q_1)] A_1 + [r(q_1) - r_1] B_2 = 0 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} [r(q_2) - r_2] A_1' \exp(iq_2 L_2) + \\ [1 - r_2 r(q_2)] B_2' \exp(-iq_2 L_2) = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} A_1 \exp(iq_1 L_1) + r(q_2) B_2 \exp(-iq_1 L_1) - \\ A_1' - r(q_2) B_2' = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} r(q_1) \exp(iq_1 L_1) A_1 + B_2 \exp(-iq_1 L_1) - \\ r(q_2) A_1' - B_2' = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

这组方程只对于满足如下本征方程的  $q$  值, 才有有意义的解:

$$\frac{[r_1 - r(q_1)][r_2 - r(q_2)]}{[1 - r_1 r(q_1)][1 - r_2 r(q_2)]} \exp[2i(q_1 L_1 + q_2 L_2)] =$$

$$\begin{aligned} 1 + \frac{[r_1 - r(q_1)][r(q_1) - r(q_2)]}{[1 - r_1 r(q_1)][1 - r(q_1) r(q_2)]} \exp(2iq_1 L_1) + \\ \frac{[r_2 - r(q_2)][r(q_2) - r(q_1)]}{[1 - r_2 r(q_2)][1 - r(q_1) r(q_2)]} \exp(2iq_2 L_2) \end{aligned} \quad (16)$$

这就是两段式DFB激光器阈值条件的一般表达式。  $L_1, L_2$  是两段的长度。

## 2 数值模拟

文中进行模拟计算所需要的参数由表1给出。

Table 1 List of parameters

$L$	400 $\mu\text{m}$	cavity length
$N_0$	$1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	carrier density of transparency
$\Gamma$	0.3	confinement factor
$\alpha$	$2.5 \times 10^{-16} \text{cm}^2$	gain constant
$\alpha_{\text{int}}$	$25 \text{cm}^{-1}$	internal loss
$\mu_0$	3.35	effective refractive index
$d\mu/dN$	$-1.2 \times 10^{-20}$	refractive index derivative with respect to carrier density
$k$	$50 \text{cm}^{-1}$	coupling coefficient

为了简化分析, 忽略了端面反射, 并设两段等长, 即  $r_1 = r_2 = 0, L_1 = L_2 = L/2$ , (16) 式变为:

$$\begin{aligned} r(q_1) r(q_2) \exp[i(q_1 + q_2)L] - \frac{r(q_1) - r(q_2)}{1 - r(q_1) r(q_2)} \times \\ [r(q_2) \exp(iq_2 L) - r(q_1) \exp(iq_1 L)] = 1 \end{aligned} \quad (17)$$

这是一个关于载流子浓度和激光波长的隐含表达式, 通过对它的求解, 可以分析两段式DFB激光器两段的载流子浓度变化以及波长调谐特性。

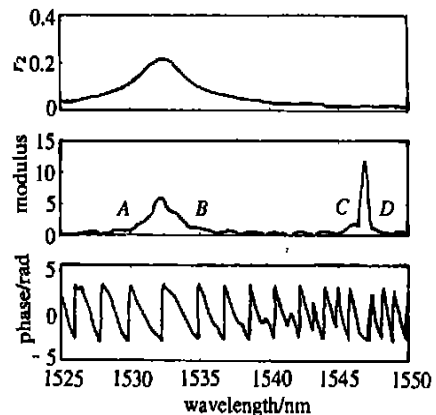


Fig. 2 Variation of effective reflective index, module and phase of the left hand side of Eq (17)

从图2所示的腔中等效反射率、(17)式左边模和相位的变化曲线可以看出, 满足模等于1的点有4个, 但是只有等效反射峰两侧的两个点A和B才能同时满足相位条件。一般选取在同样  $N_1$  时,  $N_2$

值小的那一点,因为这一点将优先激射。在有些情况下,这两个点的激射条件会非常接近,以致它们同时激射,出现多波长工作的情况。这种双纵模激射的情况在实验中可以观察得到<sup>[4]</sup>,通过分别调节激光器两段的工作电流,可以使器件单模工作。

$N_1, N_2$  以及  $N_1$  和激射波长之间的关系如图3、图4所示。

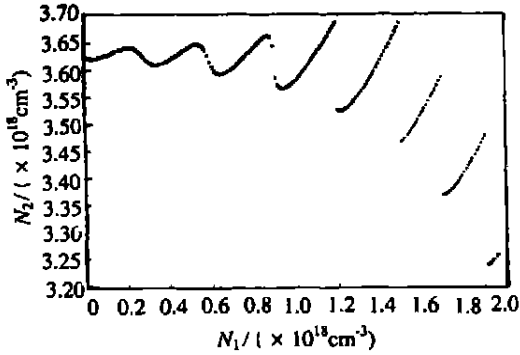


Fig. 3 Variation of the carrier density in the gain region with it in the absorptive region

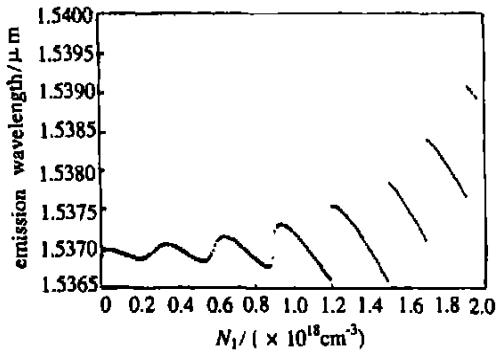


Fig. 4 Variation of the emission wavelength with carrier density in the absorptive region

作为特例,文中分析的是吸收型两段式DFB激光器的波长调谐特性。通过对载流子浓度适当取值,使第1段作为吸收区工作,第2段作为增益区。从图3可以看出,  $N_1, N_2$  的连续变化,导致波长在

一定范围内的调谐,如图4所示。波长调谐范围从1536.5nm到1539.2nm,其间,有不同模式的跳转。从图4还可以看出,最长的连续调谐发生在  $N_1$  从  $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  到  $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 对应的调谐范围从1536.5nm到1537.5nm,大约有1nm。之所以能进行波长调谐,是因为两段式DFB激光器不同模式具有不同的阈值增益,器件工作在最低阈值模上。此外,在接近器件端面的最后一个不完全光端周期的相移变化对DFB半导体激光器的阈值性质是非常灵敏的,它不仅改变模式的位置,也改变此模式对应的阈值增益<sup>[5]</sup>。通过调节两段中的电流,可以改变两段的载流子浓度,从而控制激光器的输出光功率和激射波长。上述模拟结果和实验观察到的一致。在实验中<sup>[4]</sup>,通过分别调节激光器两段的工作电流,在保证器件单模工作的情况下,进行了波长调谐。可以观察到,在两段工作电流之和保持不变的前提下,波长调谐范围为6.2nm;不同振荡波长对应的输出功率也有所变化。如果固定其中一段的偏置电流,波长随另一段偏置电流变化,连续波长调谐范围为0.9nm。

#### 参 考 文 献

- [1] Delorme F. IEEE J Q E, 1998, 34(9): 1706~ 1716.
- [2] Tohmoi Y, Yoshikuni Y, Ishii H *et al.* IEEE J Q E, 1993, 29(6): 1817~ 1823.
- [3] Jayaraman V, Chuang Z M, Colren L A. IEEE J Q E, 1993, 29(6): 1824~ 1834.
- [4] 罗 斌,吕鸿昌,杨新民.高技术通讯,1997,7(8): 30~ 32.
- [5] Davis M G, O' Dowd O F. IEEE Photon Technol, 1991, 3(7): 603~ 605.
- [6] Rigole P J, Chawki M J, Auffret R *et al.* J Opt Commun, 1991, 12(2): 69~ 71.
- [7] Agrawal G P, Dutta N K. Semiconductor lasers. Second Edition, New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1993: 319.

• 简 讯 •

### 电子泵浦硫化镉纳米电线激光器

哈佛大学的科学家们已经将硫化镉纳米电线集成于电子泵浦激光器中。纳米电线至少要有70nm的直径,才能获取510nm的横向单模。将纳米电线放置在掺硅浓度很高的绝缘体基底上,然后外镀氧化铝、钛和黄金,锁定其位置。电线的一端不镀膜层,室温下节电流为210μA,相应的电线会以1.83nm的间隔发出众多Fabry-Perot模式。当激光器件冷却到8K,它发出一个494nm的单峰。这个发射器的室温多模光谱的特征是只需刚好高于阈值驱动。由于非理想物质界面而导致的节不致性限制了该激光器难以刚好高于阈值工作。如果不采用开端,而采用布喇格光栅和芯/壳的纳米电线组织结构,可以改进工作性能。研究人员认为,用氮化镓和磷化铟作为原材料来设计电子泵浦纳米电线激光器件是可行的。

(蒋 锐 叶大华 供稿)