

应用增益杠杆效应提高分布反馈 激光器的波长可调谐范围

庄婉如^{1,2} 何卿华¹ 胡雄伟^{1,2} 陈锦泰¹ 王志杰² 王 圩²

(¹ 香港中文大学电子工程系 香港新界沙田,

² 中国科学院半导体所集成光电子学国家联合实验室 北京 100083)

提要 在三段电注入应变多量子阱分布反馈激光器中,应用增益杠杆效应扩大了波长的可调谐范围。对其中两段加固定偏置直流电流,另一段作为控制段(其长度为总腔长的 0.33)。随着对控制段注入电流的增加,发射波长会往长波方向移动。其波长连续可调谐范围(不含跳模)在 1.538 μm 波段可达 0.82 nm。经过跳模后尚可连续调谐。

关键词 半导体激光器,量子阱,波长可调谐

波长可调谐激光器作为某些要求工作波长极其准确的系统的光源是非常重要的。例如作为光纤通信多波复用系统中的各路光源;又如作为相干光检测系统中的本地振荡器光源;再如需对准某吸收光谱线的泵浦光源(如铯频标、铷频标的泵浦源)等。但半导体激光器在常规使用下,增加注入电流促使发射波长往短波长移动是很小的,分布反馈(DFB)激光器的波长移动更小,只能作极精密的波长微调,难以作波长可调谐的手段。曾经有过采用两段“增益杠杆”效应的报道^[1,2]。也有三段电注入 DFB 激光器获得较好的波长可调谐性的报道^[3,4]。

本文报道在自制的三段电注入应变多量子阱 DFB 激光器中应用多段电注入的“增益杠杆”效应,改变电流注入的大小,就可获得很可观的波长可调谐特性。

1 提高波长可调谐性的设计

众所周知,布喇格波长 λ_b 与衍射光栅周期 Λ 的关系式为

$$2\Lambda = m\lambda_b/n_{\text{eff}} \quad (1)$$

式中 m 为正整数,称为衍射级数, n_{eff} 为刻有光栅的那层材料的有效折射率。本实验的 DFB 激光器为一级光栅,也即 $m = 1$ 。DFB 激光器可发生振荡的波长是

$$\lambda = \lambda_b \pm [(q + 1/2)\lambda_b^2/2(n_{\text{eff}} \times L_{\text{eff}})] \quad (2)$$

式中 q 为正整数, L_{eff} 为激光器的总有效腔长。哪个纵模的阈电流最低,它就夺得激射中的主模,并把其它模式极大地抑制下去。通常 λ_b 处于最优条件,而且边模抑制比可以超过 20 dB。要想得到可观的调谐,就需改变 λ_b 。从(1)式可知: λ_b 不仅与光栅周期 Λ 有关,还与有效折射率 n_{eff}

有关。在刻蚀光栅之后, Λ 就被固定了。唯有 n_{eff} 可以变化。有效折射率的变化量 Δn_{eff} 为

$$\Delta n_{\text{eff}} = - \frac{\alpha_h \lambda_0}{4\pi} a \Gamma (N - N_t) \quad (3)$$

式中 N_t 为透明载流子密度, 而 $\alpha_h \lambda_0 a \Gamma$ 可视为仅随发射波长 λ_0 变化的常数 $A(\lambda_0)^{[5]}$, 也即

$$\Delta n_{\text{eff}} = - A(\lambda_0) (N - N_t) \quad (4)$$

联合(1), (2), (4)式可知: 随着注入电流的增加, 激射波长会往短波段移动。但其数量很小, 仅可提供极其微小的调谐。利用文献[2]介绍的两段量子阱激光器的增益杠杆效应, 可能获得大得多的波长可调谐范围。

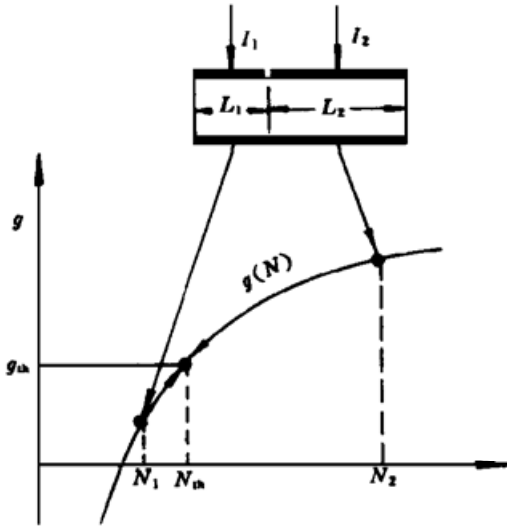


图1 增益杠杆效应的解释

Fig. 1 The explanation of a gain-levered effect

增益杠杆效应如图1所示^[1,2], 适用的对象是多段电注入量子阱激光器。它是基于下述两个关系:

(1) 量子阱激光器的增益 $g(N)$ 与注入载流子密度 N 具有高度的亚线性关系^[1];

(2) 激光器在达到受激发射之后, 激光腔内的增益就达到了饱和。对两段电注入激光器来说, 可写为(各种参数分别以加下标 N 和 g 来区分对应哪一段):

$$\frac{L_1 g_1(N_1) + L_2 g_2(N_2)}{L_1 + L_2} = g_{\text{th}} \quad (5)$$

式中 g_{th} 为阈值增益。图1中的 N_{th} 为相应的阈值载流子密度。给 L_2 段注入超过激光器透明载流子密度的固定载流子密度 N_2 ; L_1 作为控制段, 施以可调载流子密度 N_1 。由于增益杠杆效应, 在变化 N_1 时, 会把 N_2 沿 $g(N)$ 曲线往下拉。由于 N_1 段的 $\Delta g/\Delta N$ 很陡; 而 N_2 段的 $\Delta g/\Delta N$ 很平缓, 而且为负值。即

$$|\Delta N_2| > |\Delta N_1| \quad (6)$$

激光器的平均载流子密度的变化为

$$\overline{\Delta N} = \frac{L_1 \Delta N_1 + L_2 \Delta N_2}{L_1 + L_2} \quad (7)$$

选择短段作为控制段, 即

$$L_1 < L_2 \quad (8)$$

再联合(6)式, 可得

$$|L_1 \Delta N_1| < |L_2 \Delta N_2| \quad (9)$$

代入(7)式, 可推得此条件下的 $\overline{\Delta N}$ 为负值。再代入(4)式可把 Δn_{eff} 转变为正值。也就是说增益杠杆的激光器, 当其控制段为短段时, 发射波长会随电流的增大往长波方向移动。而且有较大的波长调谐发生。如果考虑长段为控制段, 即

$$L_1 > L_2 \quad (10)$$

而(6)式仍然是存在的。这时(7)式右边的两项, 哪一项更大不是明确的。而两项绝对值的差别一定是少于(9)式中的差别。因而导致 ΔN 不可能很大, 波长随注入电流的增大有可能往长波方向移动, 也可能往短波方向移动。文献[2]在假设某些 g_{th} 的情况下, 图解得到多种情况下 N 与 N_1 的关系。大体而言, $L_1/(L_1 + L_2) = 0.3$ 的效果为最佳。

2 器件结构

采用三段电注入结构比起两段结构可以在沿谐振腔的方向更容易按照理论分析的需要造

成载流子的非均匀分布,从而减小了激光束空间烧孔的恶劣效应^[3],而且也可以作为增益杠杆

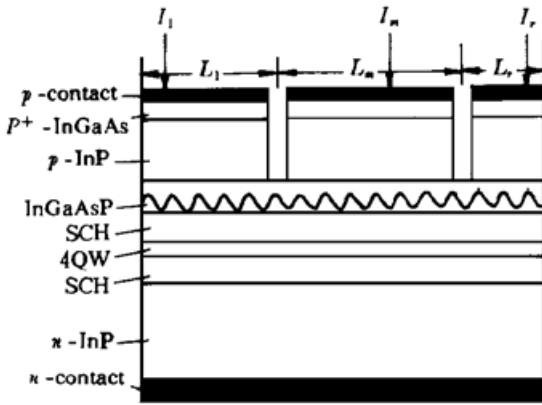


图2 三电极DFB激光器的结构简图

Fig.2 Schematic structure of the three-electrode DFB laser

激光器,因而能获得优良的波长可调谐性^[3,4]。在某些应用场合,需要对输出光进行相位控制,这时就必须采用三段结构。本文所用的三段电注入DFB应变多量子阱激光器的结构剖面图如图2所示。有源区包含4个量子阱及5个垒:量子阱为压应变InGaAsP(其 λ_g 为 $1.57\ \mu\text{m}$, $\Delta a/a = +0.6\%$),每个阱厚为 $4\ \text{nm}$,各被垒层隔开;垒层为晶格匹配InGaAsP,中间三个垒层厚度为 $10\ \text{nm}$ 。上下侧的两个垒层同时也当作SCH层之用(SCH是载流子和光场分别限制异质结构的简称)。每个SCH层厚为 $150\ \text{nm}$ 。为了制得DFB激光器,在上SCH层之上的InGaAsP层内光刻一级布喇格光栅(刻光栅光源用He-Cd激光器,其光栅周期约为 $242\ \text{nm}$)。有源区条宽为 $2\ \mu\text{m}$,被n型InP材料所掩埋。采用选择性腐蚀把P型电极和P型区沿腔轴方向分为三段,腐蚀深度控制在P型InP复盖层底部。三段的长度分别为 $L_l = 640\ \mu\text{m}$, $L_m = 1000\ \mu\text{m}$ 和 $L_r = 240\ \mu\text{m}$ 。各段之间的电阻值在 $300 \sim 500\ \Omega$ 之间。这样的激光器实际上是把P区电隔开成三段,但具有同一个谐振腔。我们把它称为三段电注入激光器。

采用选择性腐蚀把P型电极和P型区沿腔轴方向分为三段,腐蚀深度控制在P型InP复盖层底部。三段的长度分别为 $L_l = 640\ \mu\text{m}$, $L_m = 1000\ \mu\text{m}$ 和 $L_r = 240\ \mu\text{m}$ 。各段之间的电阻值在 $300 \sim 500\ \Omega$ 之间。这样的激光器实际上是把P区电隔开成三段,但具有同一个谐振腔。我们把它称为三段电注入激光器。

3 波长可调谐实验与讨论

当把激光器的三段P面电极并联在一起,使激光器处于均匀注入的情况,测得的平均阈值电流 I_{th}^0 为 $90\ \text{mA}$ 。我们选择最左边段为控制段,即 $L_l/(L_l + L_m + L_r) = 0.33$ 。把中间段和右边段分别加上固定偏置电流 I_m 和 I_r ,使之略超过透明电流值。然后调节控制段电流 I_c ,所得到的波长可调谐性能随 I_c 变化的测量关系曲线示于图3。

从图3得知:(1)随着控制段电流的增加,发射波长往长波有明显的可连续调谐,经过跳模后又可继续连续调谐。往长波移动以及调谐范围大正好印证了上一节增益杠杆效应的分析。如果单纯用注入引起有效折射率的变化来解释,其结果会导致发射波长往短波移动,则与实验结果相反;(2)跳模影响了波长连续可调谐的范围。不同的 $(I_m + I_r)$,其跳模所对应的控制段电流几乎都落在很相近的电流点;连续可调谐的范围差别很小;跳模的波长间隔也很接近,约为 $0.42\ \text{nm}$ 。这几点都可以从(2)式得到解释。(2)式给出相邻纵模的间隔为 $\lambda_c^2/2(n_{eff} \times L_{eff})$ 。其数值正好与跳模的波长间隔很相近。这也很容易理解:DFB激光器具有多个分立纵模。当注入电流引起 n_{eff} 变化,从而造成相邻的纵模转化为阈值相对最低时,这个纵模式将转化为主模,并抑制原来的主模,结果形成了跳模。所跳的纵模必须服从(2)式中所规定的模式。由于

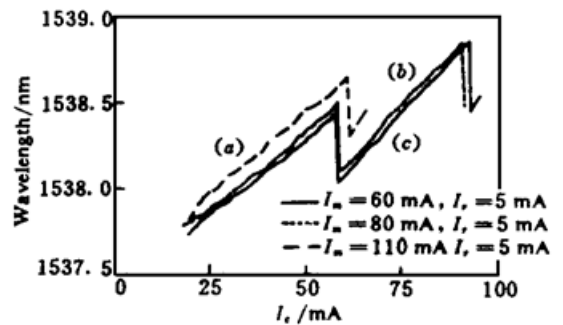


图3 发射波长与控制段电流 I_c 的关系及随另两段的偏置电流而变化

Fig.3 Wavelength vs current (I_c) of the control section with the currents of the other two sections fixed

(2) 式中各模式间距是相同的, 除造成跳模的波长间隔大致相同外, 还促使跳模落在电流相近点(实质是可以有相近的 n_{eff}) 以及波长调谐范围差不多; (3) 随着另两段偏置的增大, 发射波长也会往长波方向移动; (4) 波长随控制段电流 I_c 的变化斜率 $d\lambda/dI_c$ 基本上保持不变。

我们的器件光刻的是一级光栅, 可以把(1) 式改写为

$$\lambda_b = 2\Lambda n_{\text{eff}} \quad (11)$$

联合考虑(4) 式, (7) 式及(11) 式, 不难得出

$$d\lambda/dI_c = d\lambda/dN = \text{常数} \quad (12)$$

增益杠杆效应指的是多段量子阱激光器, 当控制段电流增大时, 会把其它段的注入载流子密度往下拉。若控制段长度小于总长度的一半, 虽然控制段电流在增加, 但由于增益饱和及增益杠杆效应, 使总的平均载流子密度反而减小。这导致了波长往长波方向移动。同时, 使输出光功率增大。经过跳模后波长还可继续连续调谐。另两段的直流偏置不同, 跳模对应的控制段电流、跳模的波长间隔以及连续可调谐范围都大致相同。波长随控制段电流的变化斜率也保持不变。波长可连续调谐范围(不包含跳模) 可达到 0.82 nm 左右。

参 考 文 献

- 1 K. Y. Lau. Frequency modulation and linewidth of gain-levered two-section single quantum well lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**(20) : 2068~ 2070
- 2 K. Y. Lau. Broad wavelength tunability in gain-levered quantum well semiconductor lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**(25) : 2632~ 2634
- 3 Pascal Correc. Tunability of multisection DFB lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(6) : 972~ 980
- 4 Hitoshi Kawaguchi, Katsuaki Magari, Hiroshi Yasaka *et al.*. Tunable optical-wavelength conversion using an optically triggerable multielectrode DFB laser diode. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(11) : 2153~ 2159
- 5 Zhuang Wanru, Duan Jining, Zou Zhengzhong *et al.*. Total internal reflection optical switch with injection region isolated by oxygen ion implantation. *Fiber and Integrated Optics*, 1996, **15**(1) : 27~ 36

Widen the Wavelength Tunable Range of a Distributed Feedback Laser by Using Gain-lever Effect

Zhuang Wanru^{1,2} H. W. Ho¹ Hu Xiongwei^{1,2} K. T. Chan¹
Wang Zhijie² Wang Wei²

(¹Electronic Engineering Dept., The Chinese Univ. of Hong Kong, Shatin, New Territories, Hong Kong

²State Key Lab. on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductor,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Abstract The wavelength tunable range was widened in a three-electric section strained multi-quantum-well distributed feedback laser by using the gain-lever effect. When the fixed bias currents are injected into the two sections, another section is the control section (its length is 0.33 of the all cavity length). The lasing wavelength becomes longer when the current of the control section is increased. The maximum continuous tuning range (without mode hopping) is 0.82 nm at 1.538 μm . It still can be continuously tuned after mode hopping.

Key words semiconductor laser, quantum well, wavelength tunable