

吸收型双稳半导体激光器的起振波长*

夏光琼** 吴正茂** 陈建国 卢玉村

(四川大学光电系, 成都 610064)

摘 要 从双稳半导体激光器上跳阈值处的谐振波长是所需阈值电流最低的波长这个物理事实出发, 利用双稳半导体激光器的速率方程组, 本文对双稳半导体激光器上跳阈值处的谐振波长进行了研究。文中还就一些器件参量对双稳半导体激光器上跳阈值处谐振波长的影响进行了讨论。

关键词 吸收型双稳半导体激光器, 上跳阈值, 谐振波长。

1 引 言

双稳半导体激光器(BSL)是重要的光学元件。由于它可用作光学记忆元件、光学开关、脉冲整形器等, 因而近十年来人们对它进行了广泛的研究^[1~5]。尽管已有人对双稳半导体激光器的某些器件参数对谐振波长的影响进行了实验研究, 但是对双稳半导体激光器上跳阈值的谐振波长的理论研究还未见报道。本文将针对这个问题进行讨论。一般而言, 由于受吸收区的影响, 上跳阈值的谐振波长并不反映此时增益区的增益峰值波长, 而是在一定条件下增益区和吸收区共同作用的结果, 因此在确定双稳半导体激光器上跳阈值的谐振波长时需要把两区当成一个整体进行分析。由于上跳阈值的谐振波长是衡量双稳半导体激光器工作特性的一个重要参量, 而且一般光信息处理系统对双稳半导体激光器的谐振波长均有一定要求, 因此有必要对双稳半导体激光器上跳阈值的谐振波长进行研究。

本文所采用的速率方程组类似文献[4], 只是使用了洛仑兹函数来描述增益的分布^[7, 8]。为了获得速率方程组的解, 文中根据对实验过程的分析结果引进了“最小偏置电流”这个条件, 即上跳阈值处的谐振波长应是使所需阈值电流最低的那个波长。

众所周知, 介质增益的波长特性与多种因素有关。为了突出如何在理论上预言上跳阈值处的谐振波长这一中心问题, 本文在影响增益波长特性的诸因素中, 只选择了其中最主要的因素(载流子密度——其变化是引起增益峰值移动的主要因素)进行讨论。

2 理论分析

为了认识“最小偏置电流”这个概念的正确性, 先考察一个两段式双稳半导体激光器, 如

* 国家教委留学回国人员基金资助项目。

** 西南师范大学物理系, 重庆 630715。

收稿日期: 1994年9月24日; 收到修改稿日期: 1994年11月23日

图 1 所示。一般来说,在实验过程中,可以通过使任一区的注入电流固定在透明电流以下(此时这一区为吸收区),改变另一区的注入电流(这一区为增益区)来获得光学双稳输出。文中令增益区的器件参数用下标 1 来标识,吸收区的器件参数用下标 2 标识。假设吸收区的偏置电流 I_2 (或载流子密度 N_2) 低于其透明值,并且器件其它参数满足双稳条件。从零开始,逐渐提高增益区的偏置电流 I_1 。当 I_1 低于双稳半导体激光器的上跳阈值电流 I_t 时,整个激光器任一波长的增益不足以抵消腔内的损耗(包括端面透射、介质损耗以及 2 区对光的吸收造成的附加损耗),双稳激光器处于“停”状态。当 I_1 上升到 I_t 时,某一波长的光首先满足其增益等于损耗,激光器输出光强就会上跳。换句话说,人们没有理由相信上跳将发生在需要更高阈值电流的波长,而不在需要最低阈值电流的波长。由此可见,上跳阈值处的谐振波长应是使激光器所需阈值电流最低的那个波长。从数学上说,也就是在谐振波长处, I_1 对 λ 的一阶导数为零。

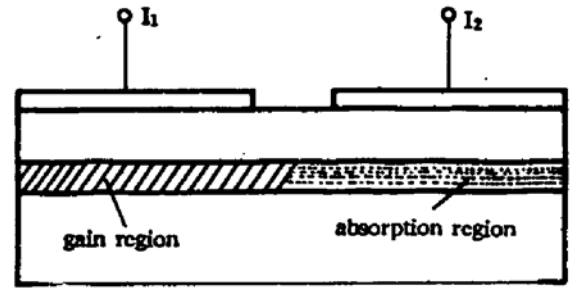


Fig. 1 Schematic of a absorptive-type bistable semiconductor laser

稳态下双稳半导体激光器的速率方程组可以表示成:

$$I_1/eVx_1 = F(N_1) + au(N_1H_1 - N_0)S, \quad (1)$$

$$I_2/eVx_2 = F(N_2) + au(N_2H_2 - N_0)S, \quad (2)$$

$$g_i = a\Gamma [x_1(N_1H_1 - N_0) + x_2(N_2H_2 - N_0)], \quad (3)$$

$$g_i = \alpha - \ln(R_1R_2)/2L, \quad H_i = [1 + (\lambda - \lambda_c)^2/Q^2]^{-1},$$

$$F(N) = AN + BN^2 + CN^3. \quad (i = 1, 2) \quad (4)$$

式中 I 为偏置电流, e 为电子电荷, V 为有源层体积, a 为微分增益系数, u 为介质中光速, N 为载流子密度, N_0 为透明载流子密度, S 为光子数密度, Γ 为限制因子, x 为对激光器的总长度归一化的每个区长度, α 为分布损耗系数, R_1 和 R_2 分别为两个端面的反射率, λ_c 为增益的峰值波长, Q 表征增益的带宽, A 、 B 、 C 分别表征无辐射复合、辐射复合以及俄歇过程。

为简化讨论,在(3)式中忽略了自发辐射的影响,因而阈值以下 $S = 0$ 也是速率方程组的一个稳定解^[2]。在固定吸收区的偏置电流 I_2 以后,可以通过逐渐升高 I_1 来确定双稳半导体激光器的上跳阈值电流 I_t 。低于 I_t , 激光器达不到阈值, N_1 和 N_2 不能使(3)式成立。当 $I_1 = I_t$ 时,在上跳以前, $S = 0$, 因此 N 满足

$$I_i/eVx_i = F(N_i) \quad (5)$$

于是 $S = 0$ 和(5)式构成了 I_t 时双稳态的一组稳定解。这样,由(3)式可以推导出

$$x_1N_1H_1 + x_2N_2H_2 = M \quad (6)$$

$$M = N_0 + g_i/a\Gamma \quad (7)$$

通常,增益峰值波长随电流的移动可以表示成^[6]

$$\lambda_i = \lambda_0 + e'(N_i - N_0), \quad (i = 1, 2) \quad (8)$$

式中 λ_0 为 $N = N_0$ 时的增益峰值波长, e' 为常数。令 $y = (\lambda - \lambda_0)/Q$, $\varepsilon = e'/Q$ 。可以推导出

$$x_1N_1/\{1 + [y - \varepsilon(N_1 - N_0)]^2\} = M - x_2N_2H_2 \equiv z \quad (9)$$

最后得到

$$N_1 = \{[2\varepsilon(y + \varepsilon N_0) + x_1/z] \pm [(x_1/z)^2 + 4\varepsilon x_1(y + \varepsilon N_0)/z - 4\varepsilon^2]^{1/2}\}/2\varepsilon^2 \quad (10)$$

通过(5)式,可以看出“ I_1 取最小值”等价于“ N_1 取最小值”。双稳半导体激光器上跳阈值的谐

振波长 λ , 可以通过(10)式加上 $dN_1/dy = 0$ 两个方程来确定, 从而, 上跳阈值电流 I_1 和载流子密度 N_1 , 也能确定。

3 结果与讨论

在计算中使用了如下数据: $a = 2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$, $\Gamma = 0.25$, $V = 3.2 \times 10^{-10} \text{ cm}^3$, $L = 0.04 \text{ cm}$, $Q = 30 \text{ nm}$, $\epsilon' = -2 \times 10^{-17} \text{ nm} \cdot \text{cm}^3$, $\alpha = 20 \text{ cm}^{-1}$, $R_1 = R_2 = 0.31$, $A = 5 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, $B = 1 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$, $C = 5 \times 10^{-29} \text{ cm}^6/\text{s}$, $N_0 = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\lambda_0 = 1300 \text{ nm}$ 。图 2 中给出了要满足(3)式、偏置电流 I_1 随波长的变化, 其中 $x_1 = 0.625$, 曲线(a)、(b)以及(c)分别对应 N_2 取 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以及 $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。从图中可以看出, 对于 $N_2 = 1 \times 10^{16}$ 、 5×10^{17} 、和 $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 上跳阈值的谐振波长分别为 1262.9、1265.2 和 1267.8 nm。另外, 从图中还可以看出, N_2 (或者 I_2) 越高, 上跳阈值电流 I_1 越低。计算表明, 对于本文所用参数, 上跳阈值的谐振波长均比 λ_0 短 30 nm 以上, 比上跳阈值电流下介质的增益峰值波长略大(约长几个 nm)。

图 3 给出了上跳阈值电流处的谐振波长和上跳阈值电流随吸收区的载流子密度 N_2 的变化曲线, 中间两条曲线对应于 $x_1 = 0.625$, 另外两条曲线对应于 $x_1 = 0.5$ 。从图中可以看出, 随着 N_2 的增加, 上跳阈值的谐振波长 λ , 向长波端移动, 上跳阈值电流 I_1 变小。另外, x_1 越大(即增益区越长)上跳阈值电流越低, 上跳阈值处的谐振波长的移动越小。

Kuznetsov 的研究结果表明^[4], 要获得双稳输出, 吸收区微分增益与载流子寿命的乘积必需大于增益区微分增益与载流子寿命的乘积。相应于本文也就是要求 H_2T_2 大于 H_1T_1 。用如下等式定义载流子寿命:

$$T_i = (A + BN_i + CN_i^2)^{-1}, \quad (i = 1, 2) \quad (11)$$

双稳输出的条件可以表示为

$$(A + BN_2 + CN_2^2)\{1 + [y - \epsilon(N_2 - N_0)]^2\} < (A + BN_1 + CN_1^2)\{1 + [y - \epsilon(N_1 - N_0)]^2\} \quad (12)$$

图 4 中给出了 H_2T_2/H_1T_1 随俄歇效应系数 C 的变化曲线, 其中 $x_1 = 0.5$, (a)和(b)分别代表 A 取 $5 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 和 $8 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 。从图中可以看出, 如果俄歇效应系数 C 太小, (12)式将得不到满足。一般而言, 在 GaAs 半导体激光器中俄歇系数较小(可以忽略), 因此相对而言要在 GaAs 半导体激光器实现双稳比在 InGaAsP 半导体激光器实现双稳要困难一些^[5]。另外, 从图中还可以看出, 对于无辐射损耗较小的激光器, 更容易满足条件(12)式。对于 InGaAsP 激光器, 由于 C 随着温度的升高而增加, 因而可能会出现低温下(12)式得不到满足, 而在高温下方能满足的情况, 因此对于某些两段式半导体激光器, 有可能在更高的温度下才出现双稳^[3]。

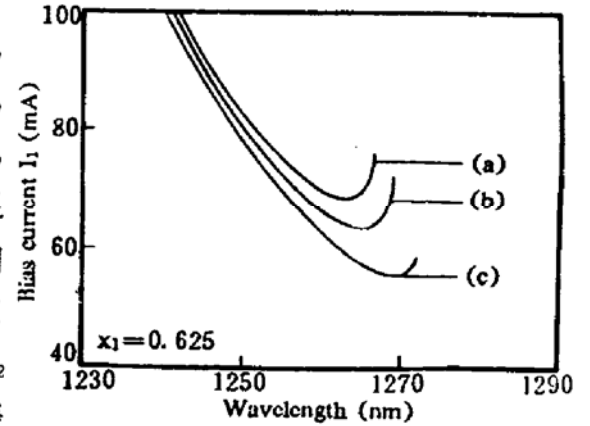


Fig. 2 Dependence of the bias current I_1 required to initiate oscillation at different wavelengths for (a) $N_2 = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, (b) $= 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, and (c) $= 8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, respectively. Where $x_1 = 0.625$

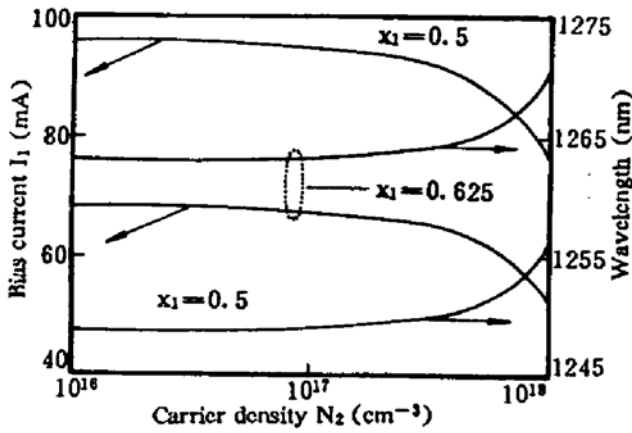


Fig. 3 Variations of the oscillation wavelength and switch-on threshold current with the carrier density N_2 of the absorption region

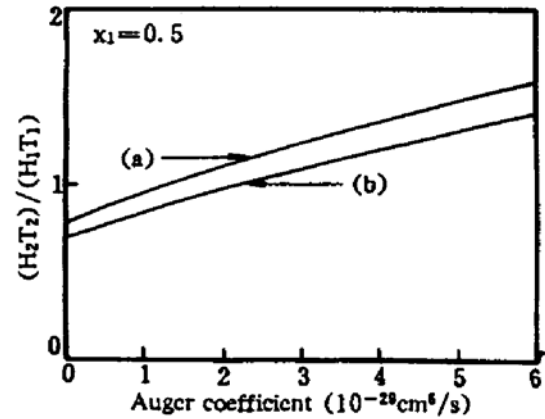


Fig. 4 Dependence of H_2T_2/H_1T_1 on Auger coefficient for $x_1 = 0.5$, where (a) $A = 5 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, (b) $A = 8 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$

参 考 文 献

- [1] A. Paradisi, I. Montrosset, Numerical modeling of bistable laser diodes with saturable absorbers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, 27(3): 817~823
- [2] J. Chen, P. E. Barnsley, H. J. Wickes, Method of determining differential gain coefficient for bistable laser diodes. *Electron. Lett.*, 1991, 27(19): 1745~1747
- [3] H. Liu, T. Kamiya, B. Du, Temperature dependence of bistable InGaAsP/InP lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, 22(9): 1579~1586
- [4] M. Kuznetsov, Theory of bistability in two-segment diode lasers. *Opt. Lett.*, 1985, 10(8): 399~401
- [5] H. Kawaguchi, Absorption and dispersive bistability in semiconductor lasers. *Opt. and Quant. Electron.*, 1987, 19: S1~S36
- [6] J. Wang, J. Chen, Y. Hao *et al.*, Additional wave-length shift of peak gain due to inhomogeneous distributions of carriers inside semiconductor lasers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, 5(10): 1171~1173
- [7] G. Xia, Z. Wu, J. Chen *et al.*, Carrier deficit from nominal threshold density and mode suppression ratio of an above-threshold biased semiconductor laser. *Opt. Lett.*, 1994, 19(10): 731~733
- [8] 吴正茂, 夏光琼, 陈建国等, 半导体激光器阈值行为研究. *中国激光*, 1995, A22(2): 91~94

Oscillation Wavelength at Switch-on Threshold of Absorptive-Type Bistable Semiconductor Lasers

Xia Guangqiong Wu Zhengmao Chen Jianguo Lu Yucun

(*Optoelectronics Department, Sichuan University, Chengdu, 610064*)

(Received 24 September 1994; revised 23 November 1994)

Abstract Based on the physical principle that the oscillation should start at the wavelength with minimized threshold current, and theoretical studies on the oscillation wavelength of a two-segment bistable semiconductor laser at its switch-on threshold, have been carried out by using the rate equations. Some parameters affecting the wavelength have been discussed.

Key words absorptive-type bistable semiconductor lasers, switch-on threshold, oscillation wavelength.