

研究快报

量子阱半导体激光器阈值的理论分析

杜宝勋

(高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 分析了单量子阱(SQW)、多量子阱(MQW)和分别限制异质结构量子阱(SCH-SQW)半导体激光器的阈值。求出了表示光增益随注入载流子密度变化的方程。利用这个结果, 得到了上述三种量子阱半导体激光器的阈值电流密度的表达式。

关键词: 量子阱; 半导体激光器; 阈值

中图分类号: TN365

文献标识码: A

文章编号: 1000-7032(2000)03-0279-03

关于量子阱半导体激光器的阈值, 已经有了许多理论研究^[1~3]。这些研究的结果, 均表示为一些数值计算的曲线, 而不是简单的分析表达式。本文作了进一步理论分析, 求出了一些简单的分析表达式。

光增益系数

势阱层的光增益系数是

$$g = \alpha_0 \left[1 - \left(e^{-\frac{N}{\xi_c}} + e^{-\frac{N}{\xi_v}} \right) \right] \quad (1)$$

其中 $\alpha_0 = (\bar{n}/c) B \frac{m_r^*}{d_2 \pi \hbar^2}$ (2)

$$\xi_c = \frac{m_c^* kT}{d_2 \pi \hbar^2} \quad (3)$$

$$\xi_v = \frac{m_v^* kT}{d_2 \pi \hbar^2} \quad (4)$$

\hbar 是普朗克常数, k 是玻耳兹曼常数, B 是电子受激跃迁系数, c 是光在真空中的速度, d_2 是势阱层厚度, \bar{n} 是群折射率, T 是绝对温度, N 是载流子密度, m_c^* 、 m_v^* 和 m_r^* 分别是导带、价带和振子的有效质量。

(1) 式表示 g 与 N 的关系。图 1 表示根据(1)式计算的 GaAs/AlGaAs 量子阱在不同温度下的 g 随 N 的变化。

在近似计算时, 由于 $\xi_c \ll \xi_v$, 可以将(1)简化为

$$g = \alpha_0 \left(1 - e^{-\frac{N}{\xi_c}} \right) \quad (5)$$

该式表明, g 与 N 呈指数关系。

阈值电流密度

SQW 激光器的阈值电流密度是

$$J_{SQW} = \frac{qd_2}{\eta_i} A \xi_v \left[\ln \left[\frac{1}{1 - \frac{A_i + A_m}{\alpha_0 \Gamma}} \right] \right]^2 \quad (6)$$

其中 q 是电子电荷, η_i 是内部量子效率, A 是电子自发跃迁系数, Γ 是模式限制因子, A_i 和 A_m 分别是模式的内部损耗和端面损耗。

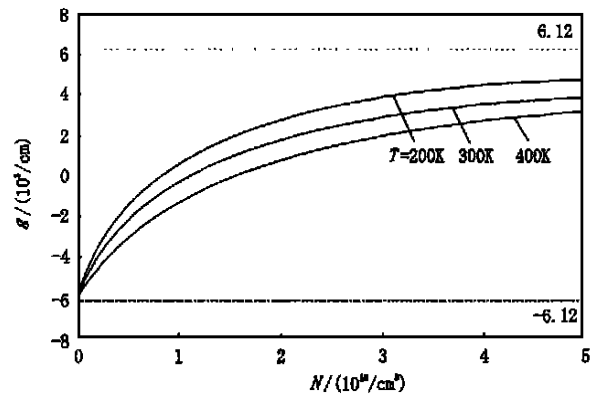


图 1 GaAs/AlGaAs 量子阱在不同温度下的 g 随 N 的变化
Fig. 1 The relationship of g and N for GaAs/AlGaAs quantum well at various temperature.

(4) 和(6) 式表明, J_{SQW} 与 T 呈线性关系。

MQW 激光器的阈值电流密度是

$$J_{MQW} = \frac{m_2}{\eta_w} J_{SQW} \quad (7)$$

$$\text{其中 } \eta_w = \frac{1}{1 + M \frac{2m_1 d_1 N_r}{3m_2 d_2 \xi_s} e^{-\frac{\Delta E}{kT}}} \quad (8)$$

$$\xi_s = \frac{m_r^* kT}{d_2 \pi \hbar^2} \quad (9)$$

$$N_r = 2 \left[\frac{m_r^* kT}{2\pi \hbar^2} \right]^{3/2} \quad (10)$$

$$M = \frac{\xi_s \xi_v}{N^2} \left(e^{\frac{N}{\xi_s}} - 1 \right) \left(e^{\frac{N}{\xi_v}} - 1 \right) \quad (11)$$

η_w 是势阱效率, d_1 是势垒层厚度, ΔE 是势垒层和势阱层的有效带隙, m_1 和 m_2 分别是势垒层和势阱层的数目。在小注入下, (11) 简化为 $M = 1$ 。

显然, 如果 $m_1 = 2$ 和 $m_2 = 1$, 则 MQW 激光器变为 SCH-SQW 激光器。这时, (7) 和 (8) 式分别变为:

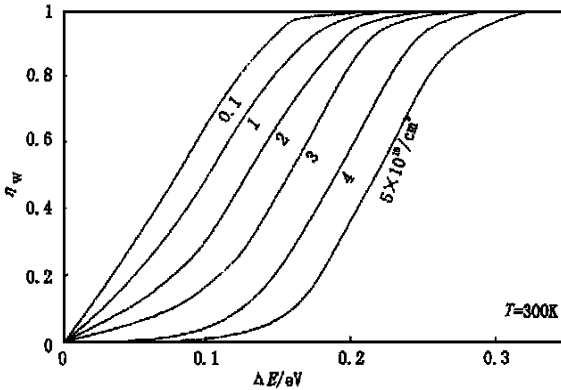


图 2 GaAs/AlGaAs SCH-SQW 在 300K 下的 η_w 与 ΔE 和 N 的关系

Fig. 2 The relationship of η_w and ΔE , N for GaAs/AlGaAs SCH-SQW at 300K.

结 论

本文分析了单量子阱(SQW)、多量子阱(MQW)和分别限制异质结构量子阱(SCH-SQW)半导体激光器的阈值。求出了表示光增益随注入载流子密度变化的(1)式。利用该式, 得到

参 考 文 献:

- [1] Agrawal Govind P, Dutta Niloy K. Quantum Well Semiconductor Lasers, *Semiconductor Lasers* [M]. Van Nostrand Reinhold 1993. 426-471.
- [2] Peinhart W H, Engelmann, Char Lang Shich, Chester Shu. Multiquantum well lasers: threshold considerations, *Quantum Well Lasers* [M]. Academic Press, Inc. 1993. 131-188.
- [3] Lau Kam Y. Ultralow threshold quantum well lasers. *Quantum Well Lasers* [M]. Academic Press, Inc. 1993. 189-216.
- [4] Du Baoxun. *Semiconductor Laser Theory*, Vol. 1 [M]. Changchun: Published by Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 1999 (in Chinese).

$$J_{\text{SCH-SQW}} = \frac{1}{\eta_w} J_{\text{SQW}} \quad (12)$$

$$\eta_w = \frac{1}{1 + M \frac{4d_1 N_r}{3d_2 \xi_s} e^{-\frac{\Delta E}{kT}}} \quad (13)$$

图 2 表示根据 (13) 式计算的 GaAs/AlGaAs SCH-SQW 在 300K 下的 η_w 与 ΔE 和 N 的关系。可见, 只要 $\Delta E > 0.25\text{eV}$ 和 $N < 4 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, 就能保证 $\eta_w > 90\%$ 。

图 3 表示根据 (13) 式计算的 GaAs/AlGaAs SCH-SQW 在 $N = 2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 时的 η_w 与 ΔE 和 T 的关系。可见, 只要 $\Delta E > 0.25\text{eV}$ 和 $T < 400\text{K}$, 就能保证 $\eta_w > 90\%$ 。

因此, 如果 $\Delta E > 0.25\text{eV}$, $T < 400\text{K}$ 和 $N < 4 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, 则 $J_{\text{SCH-SQW}}$ 与 T 呈缓慢变化的超线性关系。

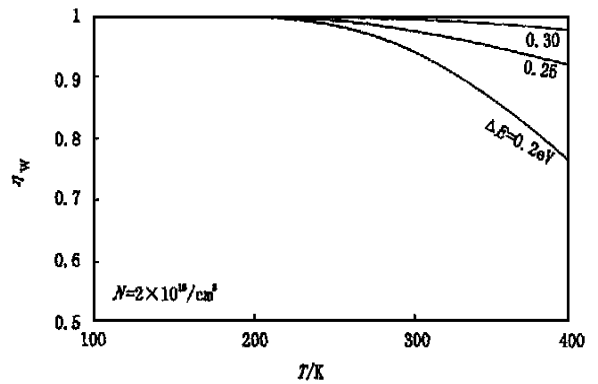


图 3 GaAs/AlGaAs SCH-SQW 在 $N = 2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 时 η_w 与 ΔE 和 T 的关系

Fig. 3 The relationship of η_w and ΔE , T for GaAs/AlGaAs SCH-SQW at $N = 2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$.

了表示 SQW 激光器阈值电流密度的(6)式, 表示 MQW 激光器的阈值电流密度的(7)和(8)式, 以及表示 SCH-SQW 激光器的阈值电流密度的(12)和(13)式。这些简单的表达式, 就是本文的理论分析的结果。

- [5] Du Baoxun. *Semiconductor Laser Theory*, Vol. 4 [M]. Changchun: Published by Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 1999(in Chinese).

Theoretical Analysis on Threshold of QW Semiconductor Lasers

DU Baoxun

(National Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, Changchun 130021, China)

Abstract: Although the threshold of quantum-well semiconductor lasers has been studied by various theoretical analysis, all of the results were not the simple analysis equation but some numerical value curves. In order to obtain the analysis equation, we do a farther study. In this paper, the threshold of single quantum well (SQW), multi quantum well (MQW) and separate confinement heterostructure quantum-well (SCH-SQW) semiconductor lasers were analyzed. The equation for the optical gain as a function of the injected carrier density at various temperatures for undoped quantum-well were derived. Using this result, the expressions for the threshold current density of the three quantum-well semiconductor lasers were obtained.

Key words: quantum-well; semiconductor lasers; threshold