

多量子阱中注入载流子的非均匀分布*

施 炜¹ 黄黎蓉² 段子刚¹ 冯玉春¹

(1 深圳大学光电子学研究所,光电子器件与系统教育部重点实验室,深圳 518060)

(2 华中科技大学,光电子科学与工程学院,武汉 430074)

摘 要 根据多量子阱中注入载流子的运输机制,计算了多量子阱中注入载流子的非均匀分布.引入不均匀度参量 A_{sy} 来衡量载流子分布的不均匀程度,分析了各种敏感因素对载流子非均匀分布的影响.指出注入载流子分布的非均匀性,随量子阱数、注入电流、量子垒高度的增加而显著增加,随工作温度的升高而减小.

关键词 半导体器件与技术;多量子阱;注入载流子;非均匀分布

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A

0 引言

包括半导体激光器和半导体光放大器等有源器件多采用多量子阱(MQW)结构作为有源区^[1,2].理论分析^[3]和实验^[4,4]均表明:MQW 结构中载流子的分布是不均匀的.由于有源器件的增益和载流子浓度之间是次线性关系,而非辐射复合速率和载流子浓度间是超线性关系,注入载流子的非均匀分布严重影响到高性能有源器件的实现^[3].基于注入载流子运输效应的动态时域模型^[4~6]是研究载流子分布机制的有效方法.以前对注入载流子分布的研究缺乏系统性,也没有明确的衡量标准.而要通过改善载流子的分布来提高 MQW 器件的性能,就必须引入明确而有效的衡量载流子分布的标准,并在此基础上系统地研究 MQW 的结构和工作参量对载流子分布的影响.这正是本文的重点.

1 MQW 结构的载流子运输模型

在一定的注入电流下,空穴从 P 端注入,向 N 端运输,电子从 N 端注入,向 P 端运输. MQW 结构中单侧注入载流子(空穴或者电子)的运输过程如图 1.

载流子穿越 SCH (Separate Confinement Heterostructure)层的时间为^[8]

$$\tau_s = \frac{L_s^2}{2D} \quad (1)$$

式中, D 为 SCH 域中载流子的扩散系数, L_s 为 SCH 层的宽度.量子阱对载流子的俘获时间为 τ_{ca} , 其影响可以忽略^[7].载流子阱间运输时间 τ_c 由式

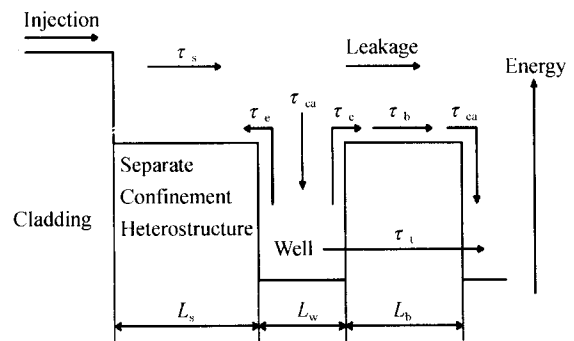


图 1 多量子阱中注入载流子的运输过程
Fig. 1 The transport process of the injected carriers in MQW (2)决定^[7]

$$\frac{1}{\tau_c} = \frac{1}{\tau_e + \tau_b + \tau_{cb}} + \frac{1}{\tau_t} \quad (2)$$

式(2)右边第一项和第二项分别表征了载流子的热发射运输过程和隧穿过程.其中

$$\tau_e = \left(\frac{2\pi m^* L_w^2}{k_B T} \right)^{1/2} \exp \left(\frac{E_B}{k_B T} \right) \quad (3)$$

$$\tau_t = \frac{h}{2\Delta E} \quad (4)$$

分别为载流子的热发射时间^[8]和载流子的隧穿时间^[9]. m^* 为载流子的有效质量, L_w 为量子阱厚度, E_B 为有效势垒高度, T 为绝对温度. τ_b 为载流子在势垒中的扩散时间. ΔE 为利用相干隧穿与传递矩阵方法计算的势垒透射率洛仑兹分布的半高半宽^[9].

在此模型基础上,得到关于空穴的速率方程组

$$\frac{dP_{S1}}{dt} = \frac{\eta I}{qV_s} - \left(\frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_{ns}} \right) P_{S1} + \frac{P_1}{\tau_e} \cdot \frac{L_w}{L_s} + \zeta \frac{P_{S2}}{\tau_s} \quad (5.1)$$

$$\frac{dP_1}{dt} = (1 - \zeta) \frac{P_{S1}}{\tau_s} \cdot \frac{L_s}{L_w} - \frac{P_1 - P_2}{\tau_c} - \left(\frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_e} \right) P_1 - \Gamma \nu_k g (1 - \epsilon \Gamma S) S \quad (5.2)$$

$$\frac{dP_i}{dt} = \frac{P_{i-1} - P_i}{\tau_c} + \frac{P_{i-1} - P_{i+1}}{\tau_c} - \frac{P_i}{\tau_n} - \Gamma \nu_k g (1 - \epsilon \Gamma S) S \quad (5.3)$$

* 深圳市科技计划项目(200515)、广东省关键领域重点突破项目(No. 2B2003A107)和深圳大学省、部重点实验室开放基金资助

Tel: 0755-26558542 Email: gd_sw@163.com

收稿日期: 2005-06-01

$$\frac{dP_M}{dt} = (1-\zeta) \frac{P_{S2}}{\tau_s} \cdot \frac{L_s}{L_w} + \frac{P_{M-1} - P_M}{\tau_c} - \left(\frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_c}\right) P_M - \Gamma \nu_g g (1 - \epsilon \Gamma_s S) S \quad (5.4)$$

$$\frac{dP_{S2}}{dt} = -\frac{P_{S1}}{\tau_s} - \frac{P_{S2}}{\tau_{ns}} + \frac{P_M}{\tau_c} \cdot \frac{P_w}{V_s} + \zeta \frac{P_{S1}}{\tau_s} \quad (5.5)$$

$$\frac{dS}{dt} = \sum_{i=1}^M \Gamma_s \nu_g g (1 - \epsilon \Gamma S) - \frac{S}{\tau_p} + \frac{\beta}{M} \sum_{i=1}^M \frac{P_i}{\tau_{nw}} \quad (5.6)$$

式中, P_{S1} 和 P_{S2} 分别为 P 端和 N 端 SCH 层中空穴的浓度, P_1, P_i 和 P_M 分别为从 P 端向 N 端依次排列的第 1 个阱、第 i 个阱和第 M 个阱中的空穴浓度 (类似地可以得到关于电子浓度 N_{S1}, N_{S2}, N_1, N_i 和 N_M 的速率方程). S 为光子数密度, I 为注入电流, q 为电子电量, V_s 是 SCH 层的体积. L_s 和 L_w 分别为 SCH 层和量子阱的宽度. ζ 为泄漏因子, Γ 为 MQW 结构总的光限制因子, Γ_s 为单量子阱光限制因子, τ_p 为光子寿命, ϵ 为增益压缩因子, β 为自发辐射因子, η_i 为内量子阱效率. τ_{ns} 和 τ_n 分别为 SCH 层和量子阱中的载流子复合寿命. g 是第 i 个量子阱的光增益系数, 与空穴和电子浓度相关.

和电子相比, 空穴的相关时间常量要大得多, 空穴输运机制对载流子的分布特性起决定性的作用^[6]. 因而只计算空穴的分布. 相应的载流子复合寿命^[10]和光增益系数^[11]也采用与空穴相关的表达式.

$$\tau_n = \frac{1}{A + BP + CP^2} \quad (6)$$

$$g = G_0 \ln \left(\frac{AP + BP^2 + CP^3}{AP_0 + BP_0^2 + CP_0^3} \right) \quad (7)$$

A、B 和 C 分别为材料的单分子复合系数、双分子复合系数和俄歇复合系数, P 为载流子浓度, P_0 为透明载流子密度. 计算采用的参量取自文献[6].

2 结果和讨论

图 2 为量子阱数 $M=10$ 的多量子阱激光器中载流子分布和光子数密度的张弛振荡过程. 可见, 注入载流子在多量子阱中分布是不均匀的, 由于

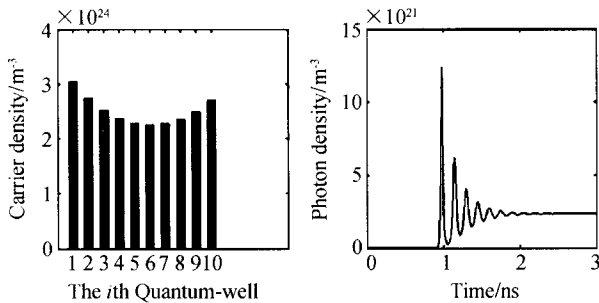


图 2 10 量子阱中载流子的稳态分布和光子数密度的张弛振荡
Fig. 2 Non-uniform distribution and oscillation of injected carriers in 10 wells MQW

SCH 层的作用, 两端的量子阱较中间的量子阱有较高的载流子浓度, 注入端的量子阱载流子浓度最高. 这与 Christopher Silfvenius 等人通过实验推算载流子分布所得到的结论是一致的^[3].

引入不均匀度参量

$$A_{sy} = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\text{average}}} \quad (8)$$

作为衡量载流子非均匀分布的尺度. 其中, P_{\max} 和 P_{\min} 分别为最大和最小载流子浓度, P_{average} 为平均载流子浓度. 通过计算得到 A_{sy} 与量子阱数 M 、注入电流 I 、有效势垒高度 E_B 和绝对温度 T 的关系, 分别如图 3、4、5、6.

从图 3, 图 4 可以看出: A_{sy} 强烈地依赖于阱数 M 与注入电流 I , 量子阱数越多、注入电流越大, 载流子的分布越不均匀. 在 MQW 激光器的设计 and 应用中, 增加量子阱数目和注入电流是增加输出功率的手段. 然而, 这同时使载流子分布的非均匀

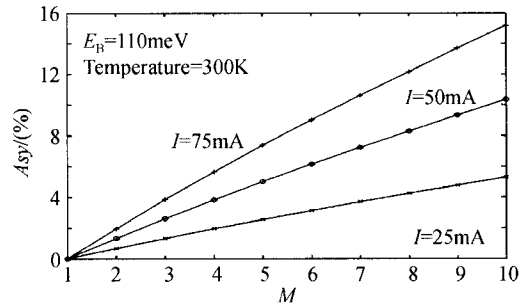


图 3 A_{sy} 随量子阱数 M 的变化
Fig. 3 Dependence of A_{sy} on the number of quantum wells M

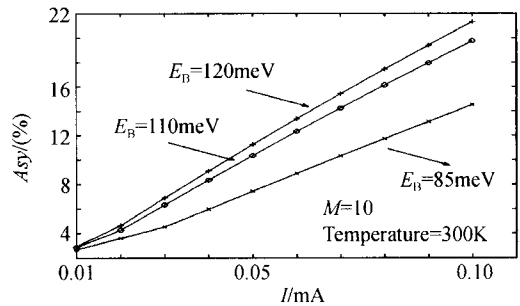


图 4 A_{sy} 随注入电流 I 的变化
Fig. 4 Dependence of A_{sy} on the injected current I

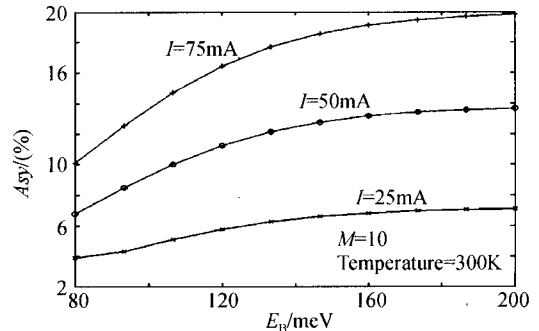


图 5 A_{sy} 与有效势垒高度 E_B 的关系
Fig. 5 Dependence of A_{sy} on the effective barrier height E_B

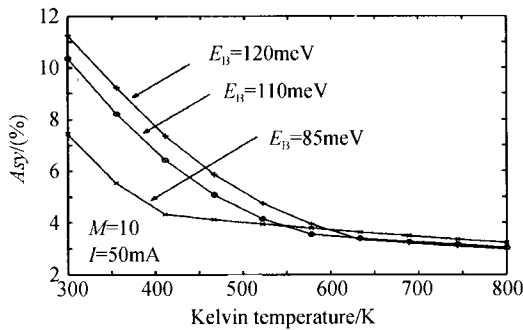


图6 A_{sy} 与绝对温度 T 的关系

Fig. 6 Dependence of A_{sy} on the Kelvin temperature T

性上升。而载流子的非均匀分布又会造成输出功率的下降和阈值电流的增加,其主要原因是载流子的不均匀分布增加了非辐射复合(主要是俄歇复合)。MQW 激光器输出光功率随注入电流而增大的过程会出现饱和,其部分原因应归于载流子的非均匀分布。图5表明, A_{sy} 随有效势垒高度 E_b 的增加而增加,这是由于高的势垒增大了载流子阱间输运时间。这一结论已有实验证明^[5]。图6中 A_{sy} 随绝对温度 T 上升而下降。通过比较不同有效势垒高度 E_b 所得到的 $A_{sy}-T$ 曲线可知,随着温度上升由有效势垒高度 E_b 造成的载流子分布的非均匀性显著下降。这是因为温度的上升减小了载流子的热发射时间,从而使得载流子的分布趋向均匀。

3 结论

为了研究 MQW 激光器中载流子的分布机制,本文以 MQW 中载流子的输运机制为基础列出一套详细的动态时域模型。相比以前的研究^[6,7],本文给出的模型更为详尽,适用于必须分别考虑电子和空穴动态特性的情况。利用数值计算方法得到了载流子的稳态分布,验证了载流子分布的非均匀性,计算结果与相应的理论和实验分析结果^[3,5,6] 符合得很好。为了研究 MQW 的结构和各种工作参量对载流子分布的影响,本文引入了载流子分布不均匀度参量 A_{sy} 来衡量载流子分布的非均匀性,并从注入电流、量子阱数、势垒高度、温度等方面分析了影响载流子非均匀分布的因素及其规律。结果表明载流子分布的非均匀性随量子阱数、注入电流、有效势垒高度的增大而增大,随温度的升高而减小。因此,对于 MQW 激光器,存在着最佳的量子阱数和最佳的温度范围。同时,降低量子阱的势垒高度有利于其高性能的实现。

参考文献

- 1 Lin C F, S Y S, Wu C H, *et al.* Influence of separate confinement heterostructure layer on carrier distribution in InGaAsP laser diodes with nonidentical multiple quantum wells. *JapJ Appl Phys*, 2004, **43**(10):7032~7035
- 2 董建绩,张新亮,黄德修. 基于单端耦合 SOA 的波长转换器啁啾特性分析. *光子学报*, 2005, **34**(2):255~258
Dong J B, Zhang X L, Huang D X. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2):255~258
- 3 Christofer S, Gunnar L, Saulius M. Hole distribution in InGaAsP 1.3- multiple-quantum-well laser structures with different hole confinement energies. *IEEE J Quantum Electronics*, 1999, **35**(4):603~607
- 4 张嵬,马军山,陈家璧. 半导体激光器型全光波长转换器的啁啾分析. *光子学报*, 2005, **34**(7):1042~1045
Zhang W, Ma J S, Chen J B. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7):1042~1045
- 5 Michael J H, Daniel T C, Robinson B J, *et al.* Effect of barrier height on the uneven carrier distribution in asymmetric multiple-quantum-well InGaAsP lasers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(10):1380~1382
- 6 Linh V T N, Arthur J L, Phillip C R G, *et al.* A time-domain model for high-speed quantum-well lasers including carrier transport effects. *IEEE J Selected Topics in Quantum Electronics*, 1995, **1**(2):494~504
- 7 Radhakrishnan N, Toru F, Scott W C, *et al.* Effects of carrier transport on high-speed quantum well laser. *Appl Phys Lett*, 1991, **59**(15):1835~1837
- 8 Radhakrishnan, Nagarajan, Masayuki I, *et al.* High speed quantum-well lasers and carrier transport effects. *IEEE J Quantum Electronics*, 1992, **28**(10):1990~2008
- 9 夏建白,朱邦芬. 半导体超晶格物理. 上海:上海科学技术出版社, 1995. 338~347
Xia J B, Zhu B F. *Semiconductor Superlattice Physics*. Shanghai: Shanghai scientific and Technical Publishers, 1995. 338~347
- 10 Andrea R, Aldo D C, Paolo L, *et al.* Study of gain compression mechanisms in multiple-quantum-well In_{1-x}Ga_xAs semiconductor optical amplifiers. *IEEE J Quantum Electronics*, 1999, **35**(11):1697~1703
- 11 俞忠兴,李荣玉,衡志德,等. 高掺杂碲基 EDFA 增益噪声特性的数值模拟. *光子学报*, 2005, **34**(9):1385~1388
Yu Z X, Li R Y, Hen Z D, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9):1385~1388

Non-Uniform Distribution of Injected Carriers in Multiple Quantum Wells

Shi Wei¹, Huang Lirong², Duan Ziguang¹, Feng Yuchun¹

¹ Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen 518060

² Optoelectronics Engineering Department, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

Received date: 2005-06-01

Abstract Based on the injected carrier transportation mechanisms in multiple quantum wells (MQW), non-uniform distribution of injected carriers in MQW was computed numerically. And several parameters, which significantly affect the carrier non-uniform distribution in MQW, were investigated. Results show that with the increase of the number of quantum wells, injected current and quantum barrier height increases the non-uniformity of carrier distribution in MQW, but with the decrease of working temperature it will also decrease.

Keywords Optoelectronics and Laser technology; MQW; Injected carrier; Non-uniform distribution



Shi Wei was born in Henan, China in 1982. He received the Bachelor's Degree from Huazhong University of Science and Technology and joined Institute of Optoelectronics, Shenzhen University as a Master's Degree candidate in 2004. His interests include semiconductor optoelectronics material and device.