

# 低阈值量子结构激光器的优化结构设计\*

彭宇恒 高 强 李 军 王本忠 陈维友 刘式墉

(集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 吉林大学电子工程系 长春 130023)

**提要** 针对低阈值半导体量子结构激光器(简称量子结构激光器), 包括量子阱、量子线和量子点结构, 给出了一个完整简便的方法用以优化设计最低阈值条件所需要的有源区结构。以对数形式给出了量子结构激光器材料增益和注入载流子浓度的关系, 并且以 InGaAs(P)/InP 量子阱激光器和 InAs/GaAs 自组装量子点结构激光器为例, 分别计算了为得到最低阈值电流所需要的量子阱阱数和自组装量子点的面密度以及激光器的腔长。

**关键词** 量子结构激光器, 自组装量子点, 优化结构设计

## 1 引 言

近年来, 量子阱、量子线以及量子点结构激光器以其极低的阈值电流密度、较小的线宽以及较高的特征温度等优良特征在光纤通讯领域占据了举足轻重的地位。人们对量子结构激光器的实验和理论研究做了许多工作。有关多量子阱结构激光器有源区的优化设计工作已有许多报道。从 Kane 的四带或六带模型出发, 首先计算量子阱的能带结构, 进而得出导带和价带的有效状态密度以及电子和空穴的准费米能级, 然后计算量子阱的材料增益, 最终优化设计为得到最低阈值电流密度所需要的有源区结构<sup>[1]</sup>。对多量子阱的波导结构也有专门的报道用以精确求解多量子阱结构激光器的光限制因子。上述方法固然能够给出很好的设计结果, 但是从指导实验的角度来讲, 整个计算和设计过程未免显得过于复杂。Y. Nambu 等在总结了以前的理论研究工作之后, 首次提出了一个行之有效而又非常简便的方法来优化设计低阈值面发射量子结构激光器<sup>[2]</sup>。本文在此基础上, 完善了用于条形量子阱结构激光器的优化设计方法, 并且以 InGaAs(P)/InP 应变量子阱激光器和 InAs/GaAs 自组装量子点结构激光器为例, 分别计算了为得到最低阈值电流所需要的量子阱阱数和自组装量子点的密度以及激光器的腔长。

## 2 理 论

量子结构激光器的阈值条件可用下式表示

$$\Gamma G = \alpha \quad (1)$$

其中,  $G$  表示有源区的材料增益,  $\alpha$  为激光器总的损耗,  $\Gamma$  表示整个有源区所提供的光学限制

\* 国家自然科学基金部分资助项目。

收稿日期: 1997-12-15; 收到修改稿日期: 1998-04-22

因子。

为了把每一个量子结构分离开来,我们同样引入 Nambu 所提出的填充因子

$$\zeta = \frac{Nv}{V} \quad (2)$$

$v$  表示每一个量子结构的体积,  $V$  表示整个光学限制层的体积,  $N$  表示量子结构的个数, 对于量子阱、量子线和量子点结构,  $N$  分别表示阱数、线数和点数。

假定在光限制层内, 光场分布是均匀的, 则光限制因子就可以表示成

$$\Gamma = \zeta \gamma \quad (3)$$

$\gamma$  代表整个光限制层所提供的光限制因子, 它可以简单地由三层波导结构的光场分布直接求得。(3) 式实际上是指有源区所提供的光学限制因子等于整个光限制层所提供的光学限制因子乘以有源区在整个光限制层里所占有的比例。

注入到每个量子结构内的载流子数量之和同整个光限制层的载流子数量之比即为载流子的注入效率

$$\eta = \frac{Nn_w v}{nV} \quad (4)$$

$n_w$  表示每个量子结构内的载流子浓度,  $n$  表示光限制层内的载流子浓度。于是有

$$n = \frac{\zeta}{\eta} n_w \quad (5)$$

对于量子结构激光器, 其材料增益随注入载流子浓度的变化已经不再是线性了。根据我们以往的计算结果, 这里给出量子结构激光器材料增益的对数表示

$$G = G_0 \ln \frac{n_w}{n_0} \quad (6)$$

其中  $G_0$  为增益系数,  $n_0$  为透明载流子浓度。对于量子阱、量子线和量子点,  $G_0$  和  $n_0$  的取值不同。

损耗  $\alpha$  主要由内部损耗和腔面损耗两部分组成, 为简单起见, 我们忽略了内部损耗随载流子浓度的变化, 这样损耗就完全由结构参数所决定。事实上, 对于量子结构激光器, 由于有源区的载流子数量较小, 内部损耗值也很小, 通常都不大于  $5 \text{ cm}^{-1}$ 。当激光器的腔长较短或腔面反射率较低时, 总的损耗主要由腔面损耗来决定

$$\alpha = \alpha_i + \alpha_L = \alpha_i + \frac{1}{L} \ln \left[ \frac{1}{R} \right] \quad (7)$$

其中  $L$  为腔长,  $R$  为腔面反射率。

将(3), (5), (6) 式代入(1) 式得

$$G_0 = \ln \frac{n_w}{n_0} = \frac{\alpha}{\zeta \gamma} \quad (8)$$

从而阈值载流子浓度可以写为

$$n_{th} = \frac{\zeta}{\eta} n_w = \frac{\zeta n_0}{\eta} \exp \left[ \frac{\alpha}{G_0 \gamma \zeta} \right] \quad (9)$$

于是便可以得到阈值电流同填充因子  $\zeta$  之间的关系

$$I_{th} = \frac{eV}{\tau} n_{th} = \frac{eVn_0}{\tau \eta} \cdot \zeta \cdot \exp \left[ \frac{\alpha}{G_0 \gamma \zeta} \right] \quad (10)$$

其中,  $e$  为电子电荷,  $\tau$  为载流子寿命。根据(10) 式, 可以知道在腔长  $L$  确定时, 当  $dI_{th}/d\zeta = 0$

时,  $I_{th}$  最小, 从而得到填充因子  $\zeta$  的优化设计结果

$$\zeta_{opt} = \frac{\alpha}{G_0 \gamma} \quad (11)$$

从上式可以看出, 为得到最低的阈值电流, 在整个光限制层内, 有源区所占有的比例  $\zeta$  与损耗成正比, 与增益系数和光限制层所提供的光限制因子成反比, 而与载流子的寿命和注入效率均无关。也就是说, 虽然阈值电流随着载流子寿命和注入效率的减小而增大, 但对于相同体系的激光器而言, 有源区的优化设计结果与这两个因素无关。

### 3 数值结果

根据(9)式, 我们对 InGaAs(P)/InP 多量子阱结构激光器和 InAs/GaAs 自组装量子点结构激光器进行了数值计算。

对于量子阱情况, 参数为<sup>[1]</sup>: 单边光限制层厚度为 100 nm, 带边波长为 1.2  $\mu\text{m}$ , 这样,  $\gamma$  等于 0.2 左右; 阱和垒的厚度之比为 2:3, 激光器的条宽为 10  $\mu\text{m}$ ; 增益系数为 1500  $\text{cm}^{-1}$ ; 透明载流子密度为  $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ; 腔面反射率为 0.3, 内部损耗取 5.7  $\text{cm}^{-1}$ ; 载流子寿命取  $5 \times 10^{-9} \text{s}$ , 注入效率  $\eta$  取值为 1。

从(10)式可以看出, 阈值电流的最小值受腔长和填充因子两个因素所影响。图 1 给出了三者之间关系的三维数值结果。在数值结果表中可以清楚地看到当腔长为 400  $\mu\text{m}$ , 阱数为 4 时, 能够得到最低的阈值电流。而当阱数  $N_w = 4$ , 腔长为 400  $\mu\text{m}$  时, 填充因子  $\zeta = 0.1142$ , 最接近于  $\zeta_{opt} = 0.11$ 。

对于 InAs/GaAs 自组装量子点的情况, 采用 N. Kirstaedter 等报道的实验和数值分析参数<sup>[3]</sup>: 单边光限制层厚度为 100 nm, 带边波长为 1.0  $\mu\text{m}$ , 这样,  $\gamma$  等于 0.2 左右; 增益系数为 10000  $\text{cm}^{-1}$ ; 透明载流子密度为  $1.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ; 腔面反射率为 0.3, 内部损耗取 2.5  $\text{cm}^{-1}$ ; 载流子寿命取  $5 \times 10^{-9} \text{s}$ , 注入效率  $\eta$  取值为 1。

图 2 给出了阈值电流同填充因子以及腔长之间的关系。利用数值结果表可以知道为得到最低阈值电流所需要的腔长为 800  $\mu\text{m}$ , 填充因子为 0.01。以 InAs/GaAs 自组装量子点为例, 量子点是金字塔形, 底座边长为 7 nm, 塔高为 1.7 nm, 这样便可以得到阈值电流同量子点面密度之间的关系, 如图 3 所示。可以看出优化的量子点面密度为  $1.1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ , 而实际上实验得到的量子点面密度很难达到这样的程度, 所以为了降低自组装量子点激光器的阈值电流, 人们开始采用多层结构。对于实际情况, 还需要指出的是, 由于自组装量子点结构激光器存在着十分严重的尺寸涨落, 并且, 由于非辐射复合引起的载流子寿命降低以及载流子和声子的散射瓶颈引起的注入效率的降低, 使得实际情况下的量子点结构激光器的阈值电流比我们计算的数值要高出许多。应用时, 可以相应地调整  $\tau$  和  $\eta$ , 并且可以同时考虑尺寸涨落引起的微分增益的降低。

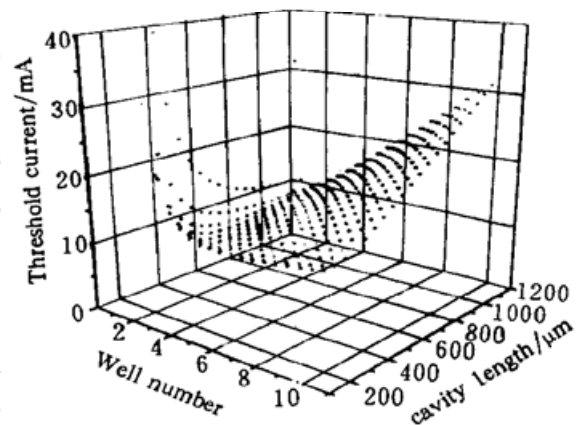


图 1 量子阱激光器阈值电流同阱数和腔长之间的关系

Fig. 1 Relationship between the threshold current and the well number and the cavity length of quantum-well lasers

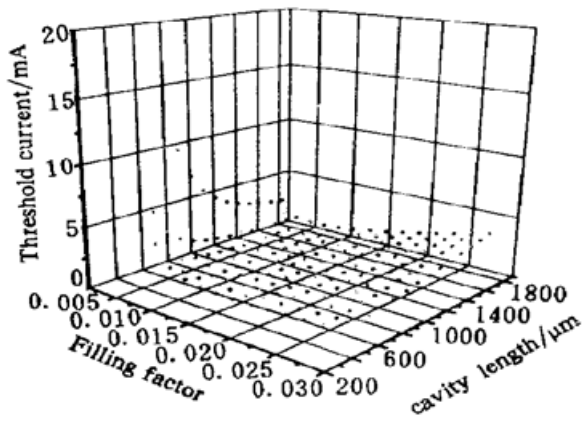


图 2 自组装量子点激光器阈值电流同填充因子以及腔长之间的关系

Fig. 2 Relationship between the threshold current and the filling factor and the cavity length of self-assembled quantum dots lasers

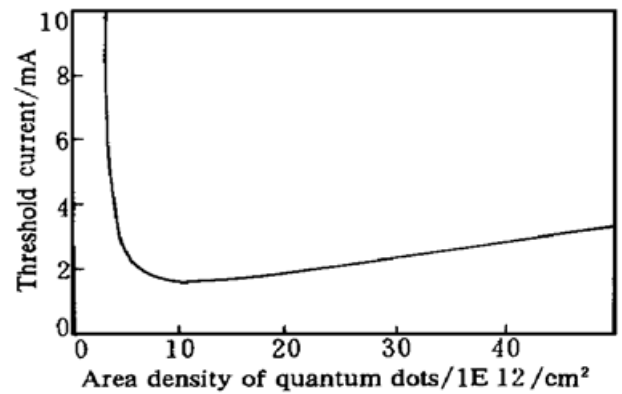


图 3 自组装量子点激光器阈值电流同量子点面密度的关系

Fig. 3 Relationship between the threshold current and the area density of self-assembled quantum dots lasers

### 3 结 论

本文给出了一种简单的分析计算方法用以优化设计低阈值量子结构激光器的有源区。并给出了 InGaAs(P)/InP 量子阱结构激光器和 InAs/GaAs 量子点结构激光器的数值结果。需要指出的是,这种分析方法是有一定适用条件的,在一些特殊情况下,如阱和垒的厚度比例太小或激光器的腔长太长时,用上述方法计算得到的结果将与实际情况有较大的偏差,需要重新调整参数或引入已经忽略的因子等。

#### 参 考 文 献

- 1 Peng Yuheng, Wang Wei, Chen Weiyou *et al.*. Theoretical analysis and optimum design for InGaAs(P) strained multiple quantum well lasers. *Acta Electron. Sinica* (电子学报), 1997, **25**(11): 32~ 35 (in Chinese)
- 2 Y. Nambu, K. Asakawa. Theoretical analysis of optimal conditions in quantum structure semiconductor lasers for low threshold current. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(11): 1509~ 1511
- 3 N. Kirstaedter, O. G. Schmidt, N. N. Ledentsov *et al.*. Gain and differential gain of single layer InAs/GaAs quantum dot injection lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(9): 1226~ 1228

## Optimized Structure Design for Low Threshold Quantum Structure Lasers

Peng Yuheng Gao Qiang Li Jun Wang Benzhong Chen Weiyou Liu Shiyong  
(State Key Laboratory of Integrated Opto-electronic Jilin University Region,  
Department of E. E., Jilin University, Changchun 130023)

**Abstract** For quantum structure lasers, including quantum well, quantum wire and quantum box lasers, a simple method is presented to obtain the optimized structure of the active region for low threshold condition. A logarithmic description is used to describe the relationship between the material gain and the injected carrier density. Taking the InGaAs(P)/InP quantum well laser and the InAs/GaAs self assembled quantum box laser as examples, the optimal condition to obtain the lowest threshold current is provided, including the number of quantum wells, the area density of quantum boxes, and the cavity length.

**Key words** quantum structure laser, self-assembled quantum dots, optimal structure design