

# p 型掺杂 1.3 $\mu\text{m}$ InAs/GaAs 量子点激光器的最大模式增益特性的研究\*

季海铭 曹玉莲 杨涛<sup>†</sup> 马文全 曹青 陈良惠

(中国科学院半导体研究所纳米光电子实验室, 北京 100083)

(2008 年 7 月 23 日收到, 2008 年 9 月 2 日收到修改稿)

对 p 型掺杂 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs 量子点激光器的最大模式增益进行了实验和理论分析. 实验上, 测量了不同腔长激光器阈值电流密度与总损耗的对应关系, 拟合出的最大模式增益为  $17.5 \text{ cm}^{-1}$ , 与相同结构非掺杂量子点激光器的最大模式增益一致. 同时理论分析表明, p 型掺杂对 InAs/GaAs 量子点激光器的最大模式增益并无影响, 并且最大模式增益的计算结果与实验值相符. 具有较小高度或高宽比的量子点能达到更高的最大模式增益, 而较高的最大模式增益对 p 型掺杂 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs 自组织量子点激光器在光通信系统中的应用具有重要意义.

关键词: 最大模式增益, p 型掺杂, InAs/GaAs 量子点激光器

PACC: 6865, 7320D, 4255P

## 1. 引 言

自从对理想量子点激光器进行理论分析以来<sup>[1]</sup>, 量子点激光器因与传统体材料和量子阱激光器相比具有低阈值电流密度( $J_{th}$ )、高特征温度( $T_0$ )、高调制带宽等性能而备受关注. 1994 年发光波长在 1.3  $\mu\text{m}$  的自组织生长 InAs/GaAs 量子点被报道后<sup>[2]</sup>, 几个研究小组相继研制出了激光波长在 1.3  $\mu\text{m}$  的 InAs/GaAs 量子点激光器<sup>[3-5]</sup>. 然而自组织生长的 InAs/GaAs 量子点因其密度有限以及存在一定的尺寸分布导致了激光器的增益饱和和辐射波长的非均匀展宽, 使得实际器件的性能受到一定的限制<sup>[6,7]</sup>. 此外量子点价带能级间隔过窄(约 10 meV)严重影响了器件的热稳定性. 量子点密度可以通过优化生长参数和多层量子点结构来改善<sup>[4]</sup>, 而非均匀展宽可以通过优化生长参数来减小<sup>[8]</sup>. 近来研究表明, 对量子点激光器的有源区进行 p 型调制掺杂有助于提高器件的特征温度<sup>[9,10]</sup>. 富士通和东京大学的研究人员通过结合在有源区引进 p 型调制掺杂和增加量子点密度的方法, 证明了输出与温度无关(20—70  $^{\circ}\text{C}$ )、高速(10 Gbit/s)直接调制的 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs 自组装量子点激光器<sup>[11]</sup>, 使这种激光

器成为下一代高速局域网光源的有力候选者之一.

增加激光器有源区量子点的密度、生长多层量子点结构、减小自组织生长量子点的非均匀展宽在本质上其实都是提高了激光器的最大模式增益( $G_{max}$ ). 简单地说, 最大模式增益表征的是激光器模式增益随着注入的增加所能达到的最大值. 较高的最大模式增益一直是许多研究小组研发的目标<sup>[4]</sup>. 本文从实验和理论两方面对 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs 量子点激光器的最大模式增益进行了研究. 我们生长和制作了不同腔长的 p 型掺杂和非掺杂 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs 量子点激光器, 对不同腔长器件阈值点的模式增益与阈值电流密度的对应关系进行拟合得出了激光器的最大模式增益. 同时, 为了加深对器件性能的理解和制作性能优异的 p 型掺杂 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs 量子点激光器, 本文对 InAs/GaAs 量子点激光器的最大模式增益进行了理论推导和计算, 进而分析了提高最大模式增益的一些途径.

## 2. 实验和理论

我们用 Veeco Gen II 分子束外延生长系统在 2 英寸  $n^+$  GaAs(100)衬底上生长了 p 型掺杂 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs 量子点激光器外延片. 图 1 是激光器外延

\* 国家高技术研究发展计划(863)批准号: 2006AA03Z401; 中国科学院“百人计划”和国家自然科学基金(批准号: 60776043, 60706008)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: tyang@semi.ac.cn

结构示意图.如图 1 所示,在 p 型和 n 型 1.4  $\mu\text{m}$   $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  限制层之间生长了五层量子点结构的有源区,每层量子点的生长温度为 485  $^{\circ}\text{C}$ ,淀积量为 2.3 ML.量子点形成后在低温下淀积了 4 nm  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$  应力缓解层和 5 nm GaAs 盖层,然后在 600  $^{\circ}\text{C}$  下生长了包括 5 nm Be 掺杂层在内的 35 nm GaAs 隔离层.5 nm Be 掺杂层的掺杂浓度为  $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ .为了比较,我们还在相同生长条件下生长了相同结构的非 Be 掺杂激光器的外延片.

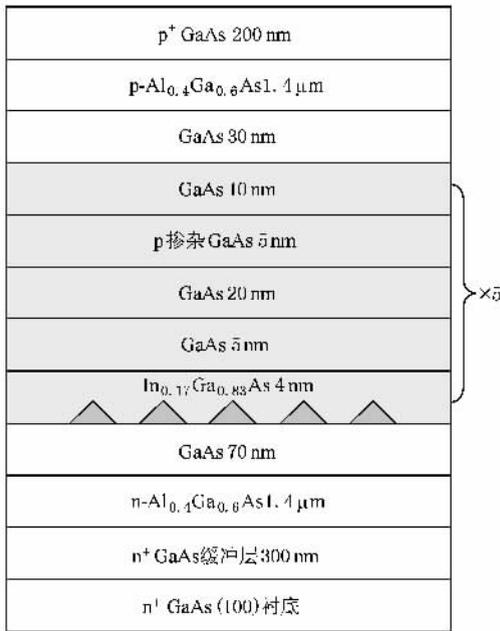


图 1 p 型掺杂 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs 量子点激光器的外延结构示意图

根据原子力显微镜 (AFM) 对单层量子点的观测,量子点的密度约为  $2.8 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ ,高度约为 8 nm,横向尺寸约为 40 nm.将生长的外延片制作成 2.5  $\mu\text{m}$  条宽、不同腔长的激光器后,在脉冲条件下 (30  $\mu\text{s}$ , 100 Hz) 测试了激光器的阈值电流和斜率效率.利用外微分子效率的倒数  $1/\eta_{\text{D}}$  和腔长  $L$  的关系拟合出内损耗  $\alpha_i$  [12],然后根据公式  $\alpha_{\text{total}} = \alpha_i + (1/L)\ln(1/R)$  可以得到激光器的总损耗  $\alpha_{\text{total}}$ ,其中  $R$  为腔面功率反射率.同时根据激光器激射时模式增益等于激光器总损耗,可以得到对应于不同阈值电流密度的模式增益,将这些数据点拟合起来可以得到模式增益随注入电流密度变化的曲线,相应的饱和值即为最大模式增益.

同时,为了分析器件性能我们对最大模式增益进行了理论推导.首先采用三维谐振子模型来近似

描述 InAs/GaAs 量子点的能级结构 [13],导带和价带的子能级间距分别设为 60 meV 和 10 meV.根据半导体的自发辐射和受激辐射理论 [14],InAs/GaAs 量子点基态跃迁模式增益的表达式可以写为

$$\Gamma_0 g_0(n_s) = G_{\text{max}} [f_{\text{c0}}(n_s) - f_{\text{v0}}(n_s)], \quad (1)$$

其中  $f_{\text{c}}(f_{\text{v}})$  是基态能级上电子(空穴)的准费米分布函数,可以表示为  $f_{\text{c}}(f_{\text{v}}) = \{\exp[(E_{\text{c}(\alpha_{\text{c}})}) - E_{\text{F}(\text{Fv})}] / (kT) + 1\}^{-1}$ ,  $E_{\text{c}(\alpha_{\text{c}})}$  是导带(价带)基态能级,  $E_{\text{F}(\text{Fv})}$  是导带(价带)准费米能级,  $k$  是波尔兹曼常数,  $T$  是温度.  $[f_{\text{c0}}(n_s) - f_{\text{v0}}(n_s)]$  表征了导带和价带基态能级上载流子的反转程度随注入载流子浓度  $n_s$  变化的情况,而  $G_{\text{max}}$  则表征了在注入无限大时所能达到的对应于基态跃迁的最大模式增益,它的具体形式为

$$G_{\text{max}} = G_{\text{au}} \frac{\Gamma_0}{V_{\text{QD}}} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{\lambda_0^2}{2n^2 \Delta\omega} s_0 A_{21}, \quad (2)$$

其中  $A_{21}$  是自发辐射复合系数,  $V_{\text{QD}}$  是量子点体积,  $n$  是 GaAs 体材料折射率,  $\hbar \Delta\omega$  是量子点的非均匀展宽,  $\lambda_0$  是激射波长,  $s_0$  是量子点基态能级简并度,  $\Gamma_0$  是对应于基态跃迁的光限制因子,它可以表示为

$$\Gamma_0 = D^2 n_{\text{QD}} \sum_{i=1}^{N_{\text{st}}} \int_i |E_m(z)|^2 dz / \int_{-\infty}^{\infty} |E_m(z)|^2 dz, \quad (3)$$

其中  $D$  是量子点横向尺寸,  $n_{\text{QD}}$  是量子点面密度,  $D^2 n_{\text{QD}}$  即量子点有源区面积占空比,  $N_{\text{st}}$  是量子点堆叠层数,  $E_m(z)$  是沿着外延方向的光场强度分布.

$G_{\text{au}}$  是引入的一个比例系数,表征对模式增益有贡献的量子点所占的比例.由于 InAs/GaAs 量子点采用自组织方式生长,它们的尺寸存在一定的分布,这使得量子点基态复合发光波长存在一定的非均匀展宽.由于量子点材料的增益谱宽度有限,因此只有一部分发光波长落在增益谱中的量子点通过模式竞争获得了增益参与了激射过程.我们采用一个高斯积分因子  $G_{\text{au}}$  来表示这部分量子点所占的比例,积分限为量子点的均匀展宽  $E_{\text{ho}}$ :

$$G_{\text{au}} = \frac{2}{\hbar \Delta\omega} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \int_{-E_{\text{ho}}/2}^{E_{\text{ho}}/2} e^{-4\ln 2 \frac{E^2}{(\hbar \Delta\omega)^2}} dE. \quad (4)$$

### 3. 结果分析

图 2 给出了不同腔长 p 型掺杂与非掺杂 1.3  $\mu\text{m}$

InAs/GaAs 量子点激光器在阈值点的模式增益与阈值电流密度的对应关系. 为了得到最大模式增益, 我们通过经验公式  $g_{\text{mod}} = G_{\text{max}} \{1 - \exp[-\gamma (J_{\text{th}} - J_{\text{tr}})]\}^{15}$  对数据点进行拟合, 其中  $J_{\text{th}}$  是阈值电流密度,  $J_{\text{tr}}$  是透明电流密度,  $\gamma$  是非线性系数. 图中离散数据点代表着实验测量数据, 实线和虚线分别代表了对 p 型掺杂和非掺杂激光器实验数据的拟合结果. 对于 p 掺杂和非掺杂, 拟合曲线的  $\gamma$  分别为 1.35 和 0.65. 从图上可以看出, p 型掺杂  $1.3 \mu\text{m}$  InAs/GaAs 量子点激光器的最大模式增益约为  $17.5 \text{ cm}^{-1}$ , 平均每层量子点的最大模式增益为  $3.5 \text{ cm}^{-1}$ . 而作为参照的非掺杂  $1.3 \mu\text{m}$  InAs/GaAs 量子点激光器的最大模式增益拟合值也达到了  $17.5 \text{ cm}^{-1}$ , 与 p 型调制掺杂的量子点激光器的最大模式增益相同. 从最大模式增益的表达式(如(2)式所示)可以看到, 最大模式增益与光限制因子、非均匀展宽、波长、自发辐射复合系数等参数相关. 除自发辐射复合系数  $A_{21}$  外, 其余参数与 p 掺杂并无联系, 并且两片激光器外延片的生长条件和结构参数完全相同. 由于 p 型调制掺杂区在距离量子点一定距离的 GaAs 隔离层中, 并且根据文献[16]量子点样品的光电流吸收谱表明 p 掺杂对量子点中载流子的波函数基本没有影响, 这样可以认为自发辐射复合系数  $A_{21}$  不受 p 型掺杂的影响. 因此, 理论和实验均表明量子点激光器的最大模式增益几乎不受有源区 p 型调制掺杂的影响.

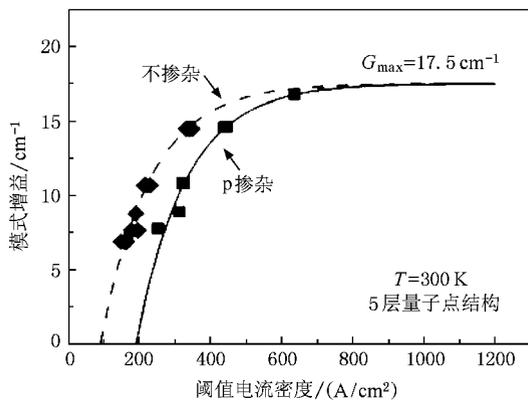


图2 不同腔长 p 型掺杂与非掺杂  $1.3 \mu\text{m}$  InAs/GaAs 量子点激光器在阈值点的模式增益与阈值电流密度, 以及它们的拟合曲线

图3给出了激光器样品模式增益随注入载流子浓度变化情况的理论结果, 计算过程采用了(2)式以及前述实验参数. 从图中可以看出, 模式增益随着注

入的增加先迅速上升, 随后上升趋势变得平缓, 最后趋于饱和, 相应的饱和值即为最大模式增益. 计算得到的最大模式增益为  $17.2 \text{ cm}^{-1}$ , 与实验结果相符.

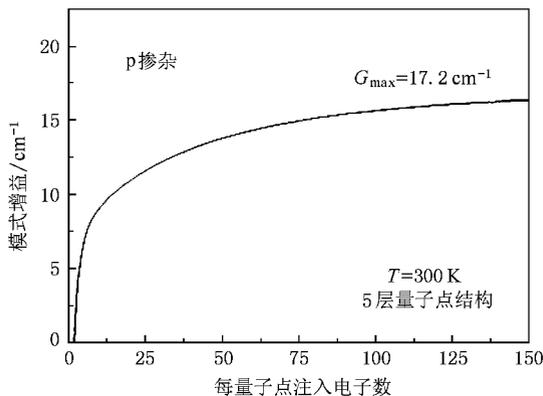


图3 量子点激光器模式增益随注入变化的理论计算结果

虽然 p 型调制掺杂并不能提高最大模式增益, 但较高的最大模式增益对器件性能的提升有着明显的帮助. 如图4所示, 两条曲线表示的是最大模式增益  $G_{\text{max}}$  分别为  $50 \text{ cm}^{-1}$  和  $100 \text{ cm}^{-1}$  时模式增益随注入电流密度变化的情况. 根据模式增益曲线的变化情况, 将图4划为 A, B 两个区域. 在区域 A 内, 模式增益随着注入电流密度的增加快速上升, 相应的在此区域中微分增益会比较大. 而在区域 B 内, 模式增益随着注入电流密度的增加缓慢上升, 逐渐趋于饱和, 即达到最大模式增益值. 相应的在此区域中微分增益会较小. 从图上可以看到, 假设激光器的总损耗不变,  $G_{\text{max}}$  较大的激光器的稳态工作点可以落在区域 A 内, 即在区域 A 内即可使得模式增益达到阈值, 激光器实现激射. 这样激光器稳态工作点处的微

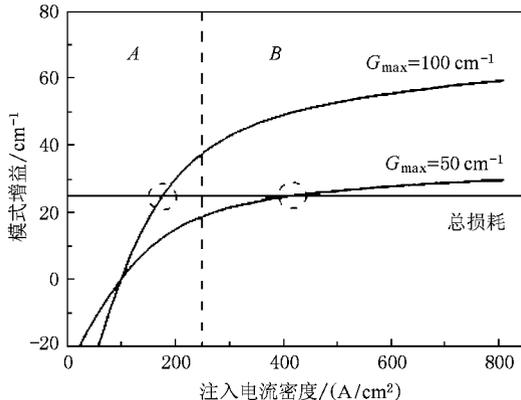


图4 不同最大模式增益 InAs/GaAs 量子点激光器的模式增益随注入电流密度的变化情况(图中线圈表示的是器件的稳态工作点)

分增益较高同时阈值电流密度较低. 而  $G_{\max}$  较小的激光器的稳态工作点有可能落在微分增益较低的区域  $B$  内, 同时阈值电流密度也会增加. 可见稳态工作点落在区域  $A$  可以实现高微分增益低阈值电流密度, 而这些对量子点激光器的调制带宽的增加十分有益<sup>[10]</sup>. 因此, 较高的  $G_{\max}$  对 p 型掺杂 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs 自组织量子点激光器在光通信系统中的应用非常有帮助.

根据 (3) 式, 最大模式增益可以通过多种途径来实现. 增加有源区量子点的堆叠层数和量子点的密度是非常常用的手段, 因为从 (3) 式可以看到这样可以增加光限制因子, 从而提高了最大模式增益. 另外根据 (4) 式, 降低自组织量子点的非均匀展宽可以使得更多的量子点光跃迁辐射波长落在增益谱内, 进而使得参与激射过程的量子点比例增加, 因此可以提高最大模式增益. 除了上述几条途径之外, 高度较小的量子点或者高宽比 (aspect-ratio) 较小的量子点对最大模式增益的提高也有帮助. 根据 (3) 式, 最大模式增益  $G_{\max}$  与量子点的体积  $V_{\text{QD}}$  成反比, 与有源区的光限制因子  $\Gamma_0$  成正比. 同时 (4) 式中  $\Gamma_0$  与量

子点的横向面积  $D^2$  成正比. 因此, 最大模式增益  $G_{\max}$  与量子点的体积  $V_{\text{QD}}$  成反比, 但却与量子点的横向面积  $D^2$  成正比. 综合考虑这两方面, 高度较小的量子点或者高宽比例较小的量子点有益于最大模式增益的提高, 而这一点与文献 [4] 通过实验得到的结论相一致.

## 4. 结 论

我们从实验和理论上研究了 p 型掺杂 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs 量子点激光器的最大模式增益. p 型掺杂和非掺杂的 5 层量子点结构的激光器其最大模式增益均达到了  $17.5 \text{ cm}^{-1}$ , 表明 p 掺杂对最大模式增益没有影响, 这与我们从推导的最大模式增益理论公式得到的结论一致. 利用推导的最大模式增益公式和实际参数计算了激光器样品的最大模式增益, 计算结果与实验值相符合. 理论分析表明高度较小的量子点或者高宽比例较小的量子点有益于获得较高的最大模式增益.

- [1] Arakawa Y, Yariv A 1986 *IEEE J. Quantum Electron.* **22** 1887
- [2] Mukai K, Otsuka N, Sugawara M, Yamazaki S 1994 *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** L1710
- [3] Liu H Y, Childs D T, Badcock T J, Groom K M, Sellers I R, Hopkinson M, Hogg R A, Robbins D J, Mowbray D J, Skolnick M S 2005 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **17** 1139
- [4] Salhi A, Fortunato L, Martiradonna L, Cingolani R, Vittorio M D, Passaseo A 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 123111
- [5] Niu Z C, Ni H Q, Fang Z D, Gong Z, Zhang S Y, Wu D H, Sun Z, Zhao H, Peng H L, Han Q, Wu R H 2006 *Chinese Journal of Semiconductors* **27** 482
- [6] Tang N Y, Chen X S, Lu W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5855 (in Chinese) [汤乃云、陈效双、陆卫 2005 物理学报 **54** 5855]
- [7] Wang C, Liu Z L, Chen P P, Cui H Y, Xia C S, Yang Y, Lu W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5418 (in Chinese) [王莽、刘昭麟、陈平平、崔昊杨、夏长生、杨宇、陆卫 2007 物理学报 **56** 5418]
- [8] Yang T, Tatebayashi J, Tsukamoto S, Nishioka M, Arakawa Y 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 2817
- [9] Shechkin O B, Deppe D G 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 2758
- [10] Deppe D G, Huang H, Shechkin O B 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 1587
- [11] Otsubo K, Hatori N, Ishida M, Okumura S, Akiyama T, Nakata Y, Ebe H, Sugawara M, Arakawa Y 2004 *Japan. J. Appl. Phys.* **43** L 1124
- [12] Mukai K, Nakata Y, Otsubo K, Sugawara M, Yokoyama N, Ishikawa H 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 472
- [13] Park G, Shechkin O B, Deppe D G 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 1065
- [14] Du G T 2002 *Physics of semiconductor laser devices* (Changchun: Jilin University Press) p67 (in Chinese) [杜国同 2002 半导体激光器件物理 (长春: 吉林大学出版社) 第 67 页]
- [15] Zhukov A E, Kovsh A R, Ustinov V M, Egorov A Y, Ledentsov N N, Lunev A V, Kop'ev P S, Bimberg D and Alferov Z I 1999 *Semicond. Sci. Technol.* **14** 118
- [16] Smowton P M, Sandall I C, Liu H Y, Hopkinson M 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 013107

# Characteristic study of maximum modal gain of p-doped 1.3 $\mu\text{m}$ InAs/GaAs quantum dot lasers<sup>\*</sup>

Ji Hai-Ming Cao Yu-Lian Yang Tao<sup>†</sup> Ma Wen-Quan Cao Qing Chen Liang-Hui  
( *Nano-optoelectronics Lab , Institute of Semiconductors , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100083 , China* )  
( Received 23 July 2008 ; revised manuscript received 2 September 2008 )

## Abstract

We report an experimental and theoretical study of maximum modal gain of p-doped 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs quantum dot ( QD ) lasers . The maximum modal gain of the QD laser with five stacks of QDs is as high as  $17.5 \text{ cm}^{-1}$  , which is the same as that of the undoped laser with identical structures . The expression of the maximum modal gain is derived and it is indicated that p-doping has no effect to the maximum modal gain . We theoretically calculated the maximum modal gain of the QD lasers and the result is in a good agreement with the experimental data . Furthermore , QDs with lower height or smaller aspect ratio are beneficial to achieving a greater maximum modal gain that leads to lower threshold current density and higher differential modal gain , which is good for the application of p-doped 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs QD lasers in optical communications systems .

**Keywords** : maximum modal gain , p-doped , InAs/GaAs quantum dot laser

**PACC** : 6865 , 7320D , 4255P

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China ( Grant No. 2006AA03Z401 ) , ' One-Hundred Talents Program ' of CAS and the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60776043 , 60706008 ) .

<sup>†</sup> E-mail : yang@semi.ac.cn