

质子注入能量对垂直腔面发射激光器的阈值和功率的影响*

毛明明 徐晨[†] 魏思民 解意洋 刘久澄 许坤

(北京工业大学光电子技术实验室, 北京 100124)

(2012年4月16日收到; 2012年5月14日收到修改稿)

文章研究了如何兼顾质子注入型垂直腔面发射激光器的功率和阈值性能. 从模拟和实验两方面分析了质子注入能量与器件功率和阈值特性的关系. 发现注入能量过高时, 损伤有源区, 降低了功率性能. 而能量过低则会减弱对注入电流的限制, 增加阈值. 计算和实验结果表明, 对于文中的器件结构, 315 keV 的注入能量是合适的. 在 10 μm 的注入孔径下获得器件的阈值为 4.3 mA, 功率为 1.7 mW.

关键词: 质子注入能量, 垂直腔面发射激光器, 功率, 阈值

PACS: 42.55.Px, 61.72.-y, 71.55.Eq

1 引言

垂直腔面发射激光器由于高光束质量、易于与光纤或其他光学器件耦合及便于阵列集成等特点, 在激光打印、光通信及其相关领域得到了广泛的应用^[1,2]. 传统的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 结构有很多种^[3], 如空气柱形、掩埋异质结型、质子注入型和氧化限制型等. 氧化限制型器件性能有很多优点. 氧化层不仅能限制电流, 还引入内建折射率波导, 能更好地限制光场, 降低阈值电流. 然而, 质子注入型 VCSEL 由于采用平面化工艺, 便于集成和形成阵列, 也是一种重要的技术^[4-6]. 特别是近年来, 为得到单模大功率而进行的反波导面发射激光器及其同相耦合的阵列模式的研究^[7-10], 质子注入更是其中一步非常重要也必不可少的工艺.

质子注入型垂直腔面发射激光器主要是利用质子注入所形成的高阻区^[11,12]来限制注入电流的路径. 由于质子注入的特点, 其产生的高阻区域几乎和质子最终停留的位置相一致^[13]. 质子注入

所形成的横向分布主要由掩模决定, 而纵向分布由注入能量决定. 能量过高, 对注入电流的路径限制越充分, 器件的阈值会越小, 但质子最终的分布可能进入有源区, 所造成的损伤形成非辐射复合中心, 影响发光, 对器件的功率和长期工作的可靠性都会产生不良影响^[14]. 能量过低, 质子的最终分布距离有源区太远, 激光器工作时进入质子注入孔的电流横向扩展加剧, 使得电流限制的实际孔径远大于质子注入孔径, 阈值电流增加. 所以注入能量所引起的高阻区位置的不同, 对器件的性能会产生很重要的影响.

程知群等^[15]已研究了质子注入剂量对器件隔离的影响, Ananth 等^[16]对质子注入型垂直腔面发射激光器的电流特性做了较深入的研究并得出了完整的电路模型, 但却未考虑不同注入能量时对器件性能的影响. 本文通过研究由注入能量所决定的高阻区的位置对通过质子注入孔后电流的扩展和对有源区所造成的损伤两方面的影响, 来优化质子注入能量, 以获得器件输出功率和阈值电流特性的优化.

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2008AA03Z402)、国家自然科学基金 (批准号: 61076044) 和北京市自然科学基金 (批准号: 4092007, 4102003, 4112006) 资助的课题.

[†] E-mail: xuchen58@bjut.edu.cn

2 模型建立及计算结果

实际的器件结构及制作过程已在文献 [17] 中进行过描述, 有源区以上部分的器件结构如图 1 所示.

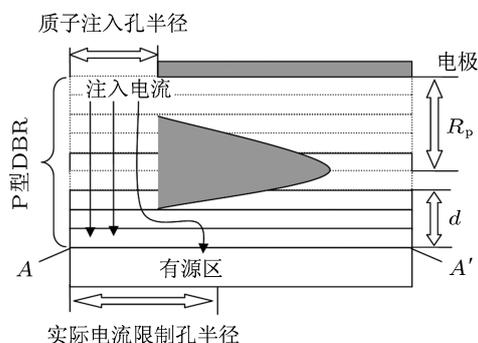


图 1 器件部分结构示意图

图 1 中, 分布式布拉格反射区 (DBR) 由组分渐变的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 所构成, 共计 22 对, 其平均掺杂浓度为 $3.5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, 总厚度为 $2.93 \mu\text{m}$. 由于注入近似呈高斯分布, 在平均射程 R_p 两侧是对称的. 我们把质子注入浓度降至峰值 1% 时的位置 ($R_p + 2\Delta R_p$ 处, 其中 ΔR_p 为射程 R_p 的均方差) 与有源区之间的距离用 d 来表示, 而 d 可以用 DBR 的对数 (从有源区往上计) 来表示.

2.1 d 值与电流扩展的关系

对于不同 d 值, 利用上述模型, 采用 ANSYS 软件进行分析. 由于器件工作时的电流大约为 20 mA , 估算在上电极与有源区之间的电压约为 0.25 V [18]. 计算此恒定电压的条件下, 不同注入孔径 (掩模孔径) 情况下, d 值不同时在有源区边缘 A—A' 面上沿径向电流密度的分布情况. 注入孔径为 $6 \mu\text{m}$ 时的计算结果如图 2 所示.

从图 2 中可以看出, d 值越大, 则电流通过质子注入孔后扩展得越厉害. 插图部分显示了在注入孔边缘部分的电流分布情况. 我们定义电流密度值下降至注入孔边缘处电流密度值的 20% 之处为实际电流限制孔半径, 则容易计算出三种情况下, 其实际电流限制孔径分别为 $6.6, 7, 7.8 \mu\text{m}$. 实际限制孔径的变大势必会引起阈值电流的增加, 对器件性能产生影响.

根据之前的定义, 容易得到注入孔径为 $8 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 时其实际电流限制孔径分别为: $9, 9.2, 9.8$ 和 $11, 11.2, 11.6 \mu\text{m}$.

图 3 显示出了不同 d 值时的实际电流限制孔径相对注入孔径的增加百分数.

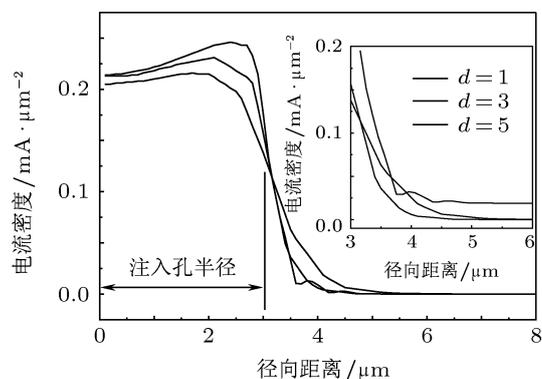


图 2 注入孔径为 $6 \mu\text{m}$ 时不同 d 值 (以 DBR 对数表示) 下电流密度的径向分布

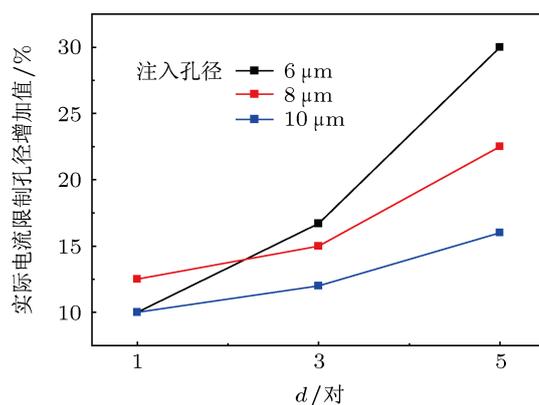


图 3 实际电流限制孔径增加值百分数与 d 值的关系

从图 3 中可以看出, 实际电流限制孔径与 d 值的关系密切. 特别是注入孔径较小时, 实际限制孔径随 d 值增加迅速提高. 此时, 应尽量减小 d 值, 以减少阈值电流. 对质子注入能量的控制显得更为重要, 实际器件的测试效果也反映了这一结论的正确性.

2.2 高阻区位置与有源区损伤的关系

如前所述, 高阻区的位置最终是由质子注入的能量所决定. 根据有关质子注入的计算软件 TRIM [19] 可以得到, 对于 GaAs-AlGaAs 材料系来说, 每 10 keV 的注入能量近似射程为 $0.1 \mu\text{m}$. 对

本文实际的器件结构来说, 每 15 keV 的能量所产生的 d 值近似相差一对 DBR. 所以 330, 315, 300 keV 这三种注入能量所形成的高阻区的分布与有源区的距离对应的 d 值分别为 1,3,5 对 DBR.

图 4 显示了注入孔径为 6 μm 时, 注入的最高能量依次为 300, 310, 315, 325, 330 keV, 注入剂量为 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 时, 在 A—A' 截面处所产生的缺陷空位浓度 N 的计算结果. 为便于比较, 我们将计算得到的实际电流限制孔径也一并标记于其中.

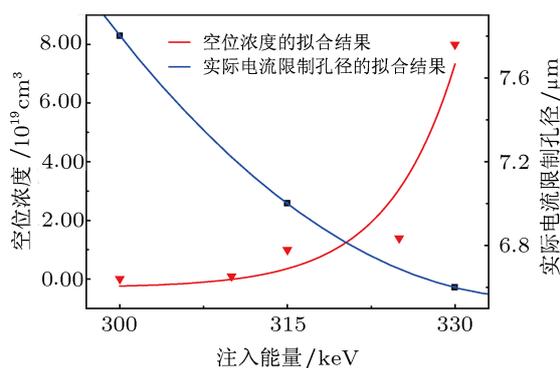


图 4 注入孔径为 6 μm 时注入能量与缺陷空位浓度及实际电流限制孔径的关系

很明显, 实际限制孔径的变化和缺陷空位浓度的变化呈现相反的变化趋势, 它们从两个侧面反映了器件的阈值和功率特性对注入能量的依赖关系. 根据这一计算结果, 结合实验我们可找到能兼顾二者的优化注入能量.

3 实验结果

根据上述的计算和仿真结果, 我们实际进行了三批器件的制作. 质子注入能量分别为 300, 315, 330 keV, 注入剂量为 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$. 详细制作过程不再赘述, 这里只列出统计测试结果见表 1.

从表 1 中统计结果可以发现, 同一注入孔径尺寸下, 最高注入能量越大, 即 d 值越小, 阈值电流越小. 说明此时电流扩展程度越小, 实际电流限制孔径和注入孔径越接近, 这和之前的计算结果非常符合. 从功率情况来看, 最高注入能量为 330 keV 时, 器件功率较小. 根据前面的模拟结果, 在此注入能量下, 在有源区边界处所产生的缺陷空位浓度高达 $8 \times 10^{19}/\text{cm}^3$. 过多的质子注入进有源区, 使得非辐射复合现象严重, 限制了出光功率. 综合来看,

对于本文所采用的外延结构, 我们发现 315 keV 是一个优化的注入能量, 可使阈值和功率得到兼顾. 图 5 为该注入能量下, 注入孔径为 10 μm 的器件的 P - I - V 测试结果.

表 1 器件测试统计结果

| 注入孔径 / μm | 最高注入能量 / keV | 阈值 / mA | 功率 / mW |
|----------------------|--------------|---------|---------|
| 6 | 300 | 5.78 | 0.54 |
| | 315 | 5.64 | 0.74 |
| | 330 | 4.6 | 0.125 |
| 8 | 300 | 5.65 | 0.85 |
| | 315 | 4.77 | 1.23 |
| | 330 | 4.08 | 0.2875 |
| 10 | 300 | 6.16 | 0.7625 |
| | 315 | 4.3 | 1.7 |
| | 330 | 3.46 | 0.2778 |

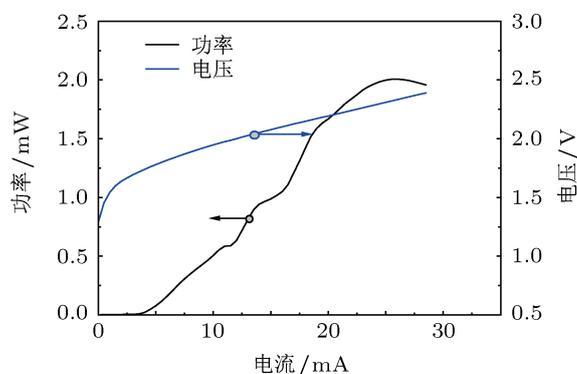


图 5 注入能量为 315 keV 时注入孔径为 10 μm 的 P - I - V 测试曲线

4 结论

通过模拟分析和实验, 确定了优化的质子注入能量, 能兼顾质子注入 VCSEL 的阈值和功率特性. 对于我们的器件结构, 315 keV 的注入能量是合适的选择. 在 10 μm 注入孔径下获得的 VCSEL 阈值为 4.3 mA, 功率为 1.7 mW.

- [1] Hugues-Salas E, Jin X Q, Giddings R P, Hong Y, Mansoor S, Villafranca A, Tang J M 2012 *IEEE Photonics J.* **4** 143
- [2] Tian Z B, Chen C, Plant D V, Hugues-Salas E, Jin X Q, Giddings R P, Hong Y, Mansoor S, Villafranca A, Tang J M 2012 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **4** 13
- [3] Chow W W, Choquette K D, Crawford M H, Lear K L, Hadley G R 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 1810
- [4] Zan-Kuin S, Jingchang Y, Shooti-Jinn C 2002 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **14** 1388
- [5] Ressel P, Strusny H, Gramlich S, Zeimer U, Sebastian J, Vogel K 1993 *Electron. Lett.* **29** 918
- [6] Leisher P O, Sulkin J D, Choquette K D 2007 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **13** 1290
- [7] Mawst L J 2003 *IEEE Circuits Dev. Mag.* **19** 34
- [8] Bao L, Kim N H, Mawst L J, Elkin N N, Troshchieva V N, Vysotsky D V, Napartovich A P 2007 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **19** 239
- [9] Bao L, Kim N H, Mawst L J, Elkin N N, Troshchieva V N, Vysotsky D V, Napartovich A P 2005 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **11** 968
- [10] Zhou D L, Mawst L J 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 1599
- [11] Pearton S J 1993 *Int. J. Mod. Phys. B* **7** 4687
- [12] Zavada J M, Jenkinson H A, Wilson R G, Sadana D K 1985 *J. Appl. Phys.* **57** 2299
- [13] Morgan D V, Eisen F H, Ezis A 1981 *Solid-State Electron.* **128** 109
- [14] Jiang W, Gaw C, Kiely P, Lawrence B, Lebby M, Claisse P R 1997 *Electron. Lett.* **33** 137
- [15] Cheng Z Q, Sun X W, Xia G Q, Li H Q, Sheng H M, Qian R 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 375 (in Chinese) [程知群, 孙晓伟, 夏冠群, 李洪芹, 盛怀茂, 钱蓉 2000 物理学报 **49** 375]
- [16] Ramaswamy A, van der Ziel J P, Biard J R, Johnson R, Tatum J A 1998 *IEEE J. Quantum Electron.* **34** 2233
- [17] Mao M M, Xu C, Wei S M, Xie Y Y, Cao T 2012 in *Photonics and Optoelectronics Meetings (POEM) 2011: Optoelectronic Devices and Integration* Wuhan November 2–5, 2011, p8333
- [18] Wang B Q, Xu C, Liu Y M, Xie Y Y, Liu F, Zhao Z B, Zhou K, Shen G D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8542 (in Chinese) [王宝强, 徐晨, 刘英明, 解意洋, 刘发, 赵振波, 周康, 沈光地 2010 物理学报 **59** 8542]
- [19] Ziegler J F, Biersack J P, Littmark U 1985 *Stopping and Range of Ions in Solids* (New York, Pergamon Press) pp17–25

The effects of proton implant energy on threshold and output power of vertical cavity surface emitting laser*

Mao Ming-Ming Xu Chen[†] Wei Si-Min Xie Yi-Yang Liu Jiu-Cheng Xu Kun

(Key Laboratory of Optoelectronics Technology Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 16 April 2012; revised manuscript received 14 May 2012)

Abstract

A method of balancing the output power and threshold current property of vertical cavity surface emitting laser is studied. The relationship between proton implantation energy and device performance is analyzed by simulation and experiment. It is found that a higher injection energy can destroy the active region, thus reducing the output power property. The threshold current will be increased since a lower injection energy may weaken the restriction on the injection current. The results indicate that 315 keV injection energy is the right choice for our device structure. The output power and threshold current obtained under 10 μ m aperture are 1.7 mW and 4.3 mW, respectively.

Keywords: proton injection energy, vertical cavity surface emitting laser, output power, threshold current

PACS: 42.55.Px, 61.72.-y, 71.55.Eq

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2008AA03Z402), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61076044), and the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant Nos. 4092007, 4102003, 4112006).

[†] E-mail: xuchen58@bjut.edu.cn