

钨丝掩模大角度倾斜离子注入 850nm 垂直腔面发射激光器及其高频调制特性*

王海嵩¹ 杜国同¹ 许成栋¹ 宋俊峰¹ 唐君² 陈弘达² 刘宇² 祝宁华²

(1 吉林大学电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点实验室, 长春 130023)

(2 中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 采用钨丝掩模技术, 通过调整制作过程中的工艺参数, 研制出批量器件阈值在 2mA 以内, 最低阈值为 1.25mA 的 850nm 垂直腔面发射激光器。同时对 TO 封装的器件进行了高频特性测试, 结果表明 3dB 带宽最高为 4.0GHz, 在应用于光通信收发模块的商品化同类器件中处于较好的水平, 适合中、高速光通信应用。

关键词: 钨丝掩模; 垂直腔面发射激光器; 高频特性

EEACC: 4320J

中图分类号: TN 248.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)09-1143-05

1 引言

随着信息时代的到来, 对于信息的发布、交换、获取的需求呈几何级数上升, 促使光通信市场飞速发展。根据通信理论, 通信容量与电磁波频率成正比。光波的频率比无线电微波通信频率大一万倍, 相应地, 光纤通信容量也要比微波通信的容量大一万倍。光纤比铜缆具有体积小、重量轻、容量大、不怕干扰、保密性好等特点。这些都使光纤在与铜缆的竞争中处于绝对优势。光纤通信目前已成为现代通信网的主体, 并在世界范围内得到了迅猛发展。光纤通信系统中, 激光器是主要部件, 因此低成本、高性能、便于集成的激光器是光通信进一步普及的主要需求。自从 1977 年东京工业大学的 Iga 教授提出垂直腔面发射激光器 (vertical cavity surface emitting laser, VCSEL) 的构想以来, VCSEL 就以其独特的结构和良好的特性吸引了许多科研人员的注意。VCSEL 的输出光为圆形, 发散角很小, 非常利于与光纤耦合, 因而在光通信、光存储、光互联等领域中有非常好的应用前景。而且, 微米量级的腔长还有利于实现器件的动态单模工作。它还有一个突出的优

点就是出光窗口在外延片的表面, 出光方向与外延片垂直, 这样不必进行解理就可以进行测试, 便于实现低成本、大规模的工业化生产。此外, 它还可以很方便地制成二维阵列, 实现大规模光电集成。可以说, VCSEL 正是为适应光纤通信需要应运而生的理想光源^[1]。目前应用最广泛的商品化 VCSEL 及其收发模块的发射波长一般都在 850nm 左右。这主要是由于^[2](1)出于成本上的考虑, InP 系材料的折射率差不大, 以目前的工艺水平, 制造以 InP 系材料为 DBR 反射镜的 VCSEL 成本过高, 而 DBR 烧结在有源区上制作长波长 VCSEL 的办法又不适合工业化生产。(2)由于 VCSEL 的谐振腔极短, 增益不高, 所以它的输出功率不大, 一般都在毫瓦量级。而且 850nm 波长在光纤中损耗较大, 因而暂时不能应用于长距离通信网, 却足够满足局域网内数据传输的需要。(3)短波长 VCSEL 的技术成熟, 工艺简单, 器件的可靠性和工作寿命高。如果单从研究水平来看, 现有的收发模块最高数据速率已经达到 10Gbps 以上。但目前把这种为远程通信设计的产品应用于局域网过于昂贵, 因此在实际商业应用中, 常用 4 个 2.5Gbps 并行以达到 10Gbps 的局域网带宽要求。而一般应用于局域网收发模块的面发射激光器其调

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 60077021, 60107002)

王海嵩 1975 年出生, 博士研究生, 现主要从事垂直腔面发射激光器及其相关研究工作。

2003-08-23 收到, 2003-11-28 定稿

©2004 中国电子学会

制带宽通常在几百兆到 2.5 GHz 左右,采用离子注入工艺或氧化物限制工艺制作。

面发射激光器的高频特性与通常的半导体激光器相同,受弛豫振荡周期数、非线性增益引起的阻尼效应和分布电容等因素影响。其中,分布电容是现在市场上常见的氧化物限制技术制作的面发射激光器在光通信应用中需要面临的一个问题。为了降低散射损耗,器件通常只做几十纳米厚的薄膜,分布电容将增大。另外,在器件微型化的时候,器件的串联阻抗将增加^[3]。这些都将对器件的高频特性产生不好的影响。相比之下,更低制作成本的离子注入器件在高频应用方面具有比氧化限制器件更大的潜力和优势。

在以前的报道中,我们介绍了制作离子注入器件的钨丝掩模技术^[4~6]。这种技术简单实用,完全避免了光刻和剥离等工艺,大大简化了制作工艺,提高了器件的成品率并进一步降低了制作成本,适合工业化生产。而且,这种技术方便在离子注入过程中对注入角度、次数等注入参数进行优化,制作出不同特性的面发射激光器。本文中,我们采用钨丝掩模技术,优化离子注入角度,制作了垂直腔面发射激光器并测量了其高频调制特性。实验证明,在初级封装条件下,器件的 3dB 调制带宽为 4GHz,达到了同类产品的较好水平,适合应用于收发模块等光通信领域。

2 器件制作与测试系统

外延片采用金属氧化物化学气相沉积(MOCVD)系统生长。衬底为 n 型(Si: $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) GaAs 单晶片。光学谐振腔主要由 16.5 对 1/4 波长的 p 型(Be: $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) AlAs/Al_{0.1}Ga_{0.9}As 上 DBR 层,半波长的 p 型(Be: $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) Al_{0.25}Ga_{0.75}As 上限制层,3 个 8nm 厚的 GaAs 量子阱有源区,半波长的 n 型(Si: $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) Al_{0.25}Ga_{0.75}As 下限制层,以及 30.5 对 1/4 波长的 n 型(Si: $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) AlAs/Al_{0.1}Ga_{0.9}As 下 DBR 层组成。为了降低串联电阻,在上下 DBR 层的 AlAs 和 Al_{0.1}Ga_{0.9}As 层之间引入了 25nm 厚的组分 x 从 0.1 到 1 渐变的 Al_xGa_{1-x}As 层。25nm 的 Al_xGa_{1-x}As 层包含在 1/4 波长内。引入渐变层的 DBR 的反射率与突变层相比只稍降低一些,可以用调整 DBR 层数的方法弥补。12nm 厚的高掺杂 p 型(Be: $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) Al_{0.1}Ga_{0.9}As 作为欧姆接触层。外延片的结构示意图如图 1 所

示。

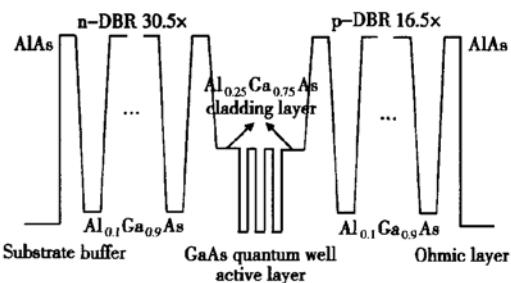


图 1 器件的外延片结构示意图

Fig. 1 Schematic of the epitaxy structure

制备好的外延片经清洁处理后,用直径 20μm、钨丝间距 300μm 的模架作掩模,掩模板上的钨丝与外延片的解理边对齐。外延片连同掩模板在进行离子注入前先溅射一层大约 150nm 厚的 TiPtAu,如图 2(a) 所示,用于保护外延片在离子注入过程中不受沾污,减小溅射电极后的串联电阻。进行四次离子注入来减小有源区的面积进而减小阈值电流,器件制作的具体过程如图 2 所示。采用倾斜角度为 17°、剂量为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的氢离子(即质子)进行注入,质子的能量为 450keV。在第一次注入后,钨丝掩模板连同外延片旋转 180°,再进行第二次注入,如图 2(b),(c) 所示。完毕后,把外延片相对于钨丝掩模板旋转 90°,如图 2(d) 所示,进行第三、四次离子注入,能量为 410keV,剂量为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 。前两次的注入能量比后两次大是因为开始时溅射的 Ti-Pt-Au 层对离子起到阻挡作用。这样两种不同的能量使最后在外延片的有源区部分离子的分布仍然保持一致。四次注入完毕后,器件溅射 200nm 厚的 TiPtAu 作为上表面电极,再经过减薄,蒸下电极等步骤,最后在 450°C 高温下保持 30s,达到退火、恢复外延片表面晶格以形成电流通路的目的。钨丝的交叉点形成出光窗口,面积为 20μm × 20μm,如图 2(h) 所示,而经过简单计算内部有源区的面积应为 17.8μm × 17.8μm。但是在实际中,由于钨丝的截面是圆形,它对外延片的保护不够紧密,因此实际上有源区的面积应该略小于计算面积。

高频特性的测试系统如图 3 所示。面发射激光器在直流电流源和来自矢量分析仪的高频正弦信号叠加下工作,发出的信号光耦合进多模光纤,通过高频探测器转换成电信号再由矢量分析仪收集并给出测量结果。

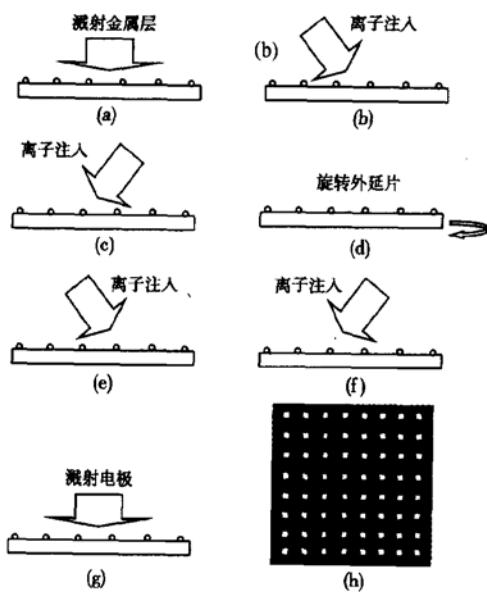


图2 工艺流程示意图 (a) 外延片溅射金属保护表面; (b) 倾斜离子注入; (c) 对称的倾斜离子注入; (d) 旋转外延片 90°; (e) 倾斜离子注入; (f) 对称的倾斜离子注入; (g) 溅射上电极; (h) 工艺完成后外延片的顶视图

Fig. 2 Process of the fabrication method (a) Metal was deposited to protect the surface of the wafer; (b) Ion inclined implantation on one direction; (c) Ion inclined implantation on the symmetric direction; (d) Wafer was rotated for 90°; (e) Ion inclined implantation on one direction; (f) Ion inclined implantation on the symmetric direction; (g) Top electrode was deposited; (h) Top view of the wafer when fabrication process is finished

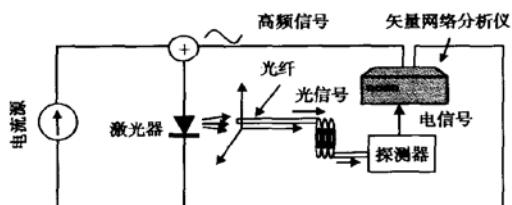


图3 高频测试系统示意图

Fig. 3 Measurement system of the high frequency

3 实验结果

在室温直流条件下,器件的阈值电流一般在2mA以内,电阻为200Ω左右。图4给出了进行高频特性测试的器件的光功率曲线和伏安特性曲线。从图中可以看到,器件的阈值电流为1.25mA,最高光

功率输出约0.92mW,器件的线性工作区为1.5~6mA,串联电阻为180Ω。

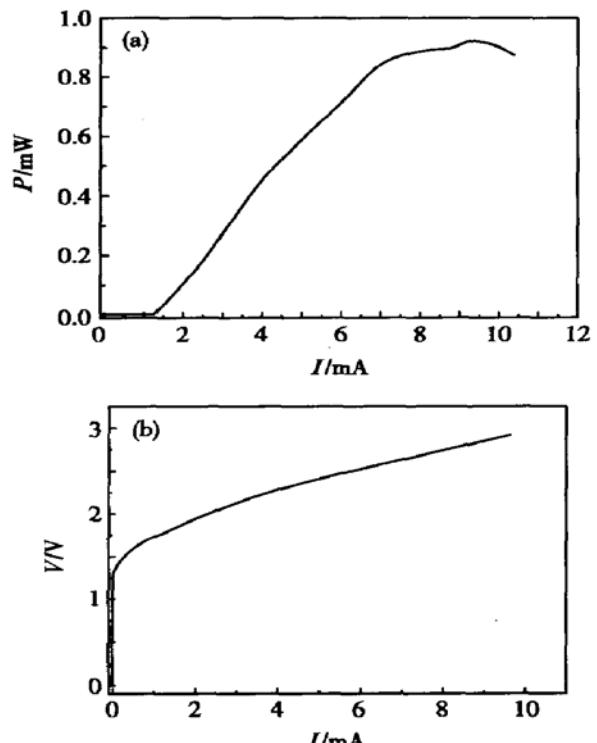


图4 器件的光功率-电流特性曲线(a)和伏安特性曲线(b)

Fig. 4 Curves of the light power (a) and voltage (b) versus current

我们对器件只进行了TO封装,图5给出了矢量分析仪测得的器件在直流偏置电流下阈值电流附近时的高频特性。从图中可以看出,器件的3dB带宽为4.0GHz,强度响应曲线在4GHz以内比较平缓,说明器件输出功率稳定地随电信号变化,当频率

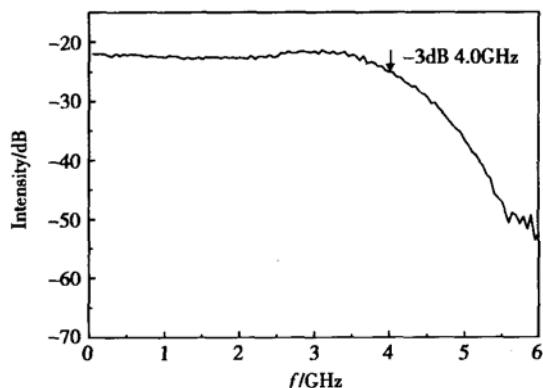


图5 器件的高频特性曲线

Fig. 5 Character of the high frequency response

超过 4.0GHz 时, 响应强度急剧下降。在 3dB 响应范围内器件的响应强度的大小与器件的功率和多模光纤的耦合效率有关。4GHz 的 3dB 带宽在目前应用于光通信用收发模块中的离子注入型面发射激光器商品中处于较高的水平, 如果对器件进行专门的高速封装, 应该可以进一步提高器件的高频性能。

图 6 给出了器件在正弦电流信号幅度分别为 3.0, 3.4, 3.8mA 下的调制特性曲线, 对应的 3dB 调制带宽分别为 2.7, 3.4, 3.7GHz。在响应范围内, 响应曲线平滑, 说明了器件具有较好的调制特性。

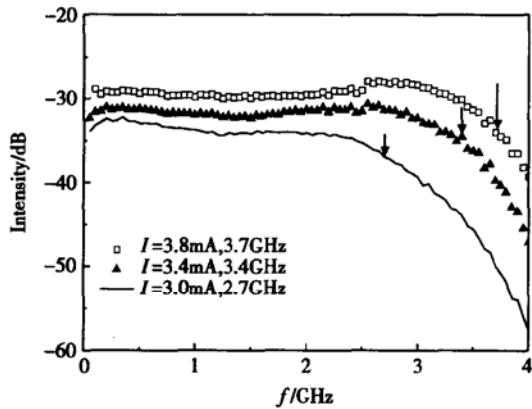


图 6 不同电流信号下器件的高频特性曲线

Fig. 6 Character of the high frequency response under different current signal

4 结论

采用钨丝掩模技术, 通过采用大角度倾斜离子注入, 制作出在室温直流下工作的 850nm GaAs/AlGaAs 垂直腔面发射激光器。批量器件的阈值在 2mA 以内, 最好的器件阈值为 1.25mA, 最高功率为 0.92mW, 电阻为 180Ω。同时对器件的高频特性

进行了测试, 在 TO 封装的情况下, 器件的 3dB 带宽为 4GHz, 在同类器件中达到了较好水平, 完全适合光通信中使用。最重要的是, 这种钨丝掩模技术工艺上极其简单, 适合工业化生产。

参考文献

- [1] Wang Haisong, Song Junfeng, Xu Chengdong, et al. Progress in transceivers based vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL). Semiconductor Optoelectronics, 2002, 23(3): 145 [王海嵩, 宋俊峰, 许呈栋, 等. 基于垂直腔面发射激光器的收发模块研究进展. 半导体光电, 2002, 23(3): 145]
- [2] Huang Zhenyong. Optoelectronic devices and modules in optical fiber communication. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2001: 89 [黄章勇. 光纤通信用光电子器件和组件. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001: 89]
- [3] Iga Kenichi, Koyama Fumio. Basis and application of surface emitting lasers. Beijing: Science Press, 2002: 178 [伊贺健一, 小山二三夫. 面发射激光器基础与应用. 北京: 科学出版社, 2002: 178]
- [4] Liu Ying, Zhang Xiaobo, Jiang Xiuying, et al. High efficiency top surface-emitting lasers fabricated by four implantation using tungsten wire as mask. Appl Phys Lett, 1995, 57(24): 3549
- [5] Liu Ying, Du Guotong, Wang Zhiling, et al. Vertical-cavity surface-emitting laser fabricated by two implantations using tungsten wires as mask. Optical and Quantum Electronics, 1996, 28: 1781
- [6] Liu Ying, Du Guotong, Jiang Xiuying, et al. Room temperature CW novel vertical-cavity surface emitting semiconductor lasers. Chinese Journal of Semiconductors, 1995, 16(12): 951 [刘颖, 杜国同, 姜秀英, 等. 室温连续的新结构垂直腔面发射半导体激光器. 半导体学报, 1995, 16(12): 951]

850nm Vertical Cavity Surface Emitting Laser Fabricated by Large Inclined Angle Ion Implantation Using Tungsten as Mask and Its Modulation Character^{*}

Wang Haisong¹, Du Guotong¹, Xu Chengdong¹, Song Junfeng¹,
Tang Jun², Chen Hongda², Liu Yu² and Zhu Ninghua²

(1 State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,
Jilin University, Jilin 130023, China)

(2 State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: By optimizing the technology parameters, 850nm vertical cavity surface emitting laser is fabricated by large inclined angle implantation using tungsten as mask, which is continuous operating at room temperature. The threshold current is lowest to 1.25mA. The light output power is about 0.92mW. The modulation performance of the device in TO package indicated that the -3dB bandwidth is 4.0GHz, which can be applied in middle and high-speed optical communication.

Key words: using tungsten as mask; vertical cavity surface emitting laser; modulation character

EEACC: 4320J

Article ID: 0253-4177(2004)09-1143-05

* Project supported by National Nature Science Foundation of China(Nos. 60077021, 60107002)

Wang Haisong male, was born in 1975, PhD candidate. His research interest focuses on vertical cavity surface emitting laser and related work.