

文章编号: 0258-7025(2006)08-1013-04

高功率、高效率线阵半导体激光器的 阳极氧化制备方法

高 欣, 张 晶, 李 辉, 曲 轶, 薄报学

(长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要 在分子束外延(MBE)生长的基础上,采用脉冲阳极氧化工艺制作了非对称、宽波导 InGaAlAs/AlGaAs/GaAs 应变双量子阱(DQW)结构准连续(QCW)线阵半导体激光器,实现了 808 nm 波段线阵激光器的高效率、高功率运转。脉冲阳极氧化工艺主要用于器件工艺中的蚀刻与绝缘膜制备,电解液采用乙二醇:去离子水:磷酸:2% 盐酸的体积比为 40:20:1:1 的混合溶液。研制的准连续线阵半导体激光器的填充因子约为 72.7%,100 Hz,200 μ s 准连续工作条件下的阈值电流约为 24 A,斜率效率达到 1.25 W/A,最大电-光转换效率达到 51%。

关键词 激光器;半导体激光器;阳极氧化;应变量子阱;线阵激光器

中图分类号 TN 248.4 文献标识码 A

Fabrication on High Power, High Efficiency Linear Array Diode Lasers by Pulse Anodic Oxidation

GAO Xin, ZHANG Jing, LI Hui, QU Yi, BO Bao-xue

(State Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of
Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract InGaAlAs/AlGaAs/GaAs strained double quantum well (DQW) linear array diode lasers with asymmetric wide waveguide have been successfully fabricated by pulse anodic oxidation process upon molecular beam epitaxy (MBE) material growth, high efficiency and high power quasi-continuous-wave (QCW) output has been realized at 808 nm wavelength. The pulse anodic oxidation process is used to etching and insulating film preparation in QCW device process with electrolyte solution of 4:20:1:1 ratio of glycol:deionization water:phosphoric acid:2% hydrochloric acid. The fill factor of the prepared linear array is about 72.7%, the threshold current and slope efficiency of the prepared devices are 24 A and 1.25 W/A respectively under QCW operation condition of 100 Hz repetitive frequency and 200 μ s pulse width, a maximum electrical-optical conversion efficiency of 51% has been achieved.

Key words lasers; semiconductor lasers; anodic oxidation; strained quantum well; linear array diode laser

1 引 言

线阵大功率半导体激光器作为基本的激光器单元已经广泛用于固体激光抽运、材料处理、空间通信、医疗及工业加工等领域^[1~3]。线阵激光器芯片工艺涉及量子阱激光器的材料外延、阵列条工艺、欧姆接触、腔面镀膜与钝化等方面,其中的阵列条工艺对线阵激光器的输出特性具有至关重要的影响。为

了抑制阵列条的电流侧向扩展及提高激光器的电流注入效率,通常需要一道专门刻蚀工艺将非注入区的高掺杂欧姆接触层去除,由此可以使器件的阈值电流减少 15% 左右;对于高填充因子的准连续(QCW)线阵半导体激光器,其横向光场隔离通常采用直至量子阱有源层的深刻蚀工艺,要求对外延结构材料的无选择刻蚀,隔离沟槽的分层钻蚀将容易

收稿日期:2005-11-21;收到修改稿日期:2006-03-23

基金项目:国家自然科学基金(60474026,60477010)资助项目。

作者简介:高 欣(1965—),女,吉林人,长春理工大学研究员,目前主要从事大功率半导体激光器制备技术的研究。

E-mail:bbx@public.cc.jl.cn

导致后续绝缘膜工艺困难、电流泄漏、器件可靠性下降等问题；电流阻挡层通常采用化学气相沉积(CVD)或射频溅射法制备的SiO₂, Si₃N₄介质薄膜, Si₃N₄由于其较高的致密性而为多数器件工艺所采纳。以上阵列条形工艺均需要复杂的设备及较长的工艺周期。脉冲阳极氧化是由直流阳极氧化发展而来的一种新的阳极氧化工艺,具有成膜速率快、均匀性高的优点^[4~8]。为此,本文尝试将脉冲阳极氧化方法应用于高功率、高效率线阵半导体激光器的芯片制备工艺。

2 器件制备工艺

激光器外延片采用全固态分子束外延(MBE, V80H)方法进行生长。宽波导结构激光器具有较低的光学限制因子Γ,因而具有较低的腔面光功率密度、腔面温升和腔面应力,有利于提高器件的腔面光学灾变损伤(COD)水平,是高功率半导体激光器的主要结构形式之一。激光器外延结构采用了非对称宽波导InGaAlAs/AlGaAs/GaAs应变双量子阱(DQW)结构(图1给出了激光器外延结构的能带示意图),有源层采用In组分应变材料有利于降低器件的阈值电流密度、提高器件的工作可靠性,非对称波导将光强分布中心偏离阱区(如图2所示)有利于减少量子阱区的自由载流子光吸收。各层生长依次为:首先在GaAs衬底上生长一层0.5 μm厚的掺Si(1×10¹⁸ cm⁻³)GaAs缓冲层,然后生长1.5 μm厚的渐变Si掺杂(1.0×10¹⁸ ~ 0.5×10¹⁸ cm⁻³)Ga_{0.50}Al_{0.50}As下限制层和0.5 μm厚的非掺杂Ga_{0.61}Al_{0.39}As波导层。有源区由两个应变量子阱8 nm In_{0.18}Ga_{0.59}Al_{0.23}As阱及三个10 nm Ga_{0.61}Al_{0.39}As势垒构成。然后,生长0.5 μm厚的非掺杂Ga_{0.56}Al_{0.44}As波导层和1.2 μm厚的渐变Be掺

杂(0.5×10¹⁸~1×10¹⁸ cm⁻³)Ga_{0.50}Al_{0.50}As上限制层,最后生长100 nm厚的重掺杂(2×10¹⁹~5×10¹⁹ cm⁻³)GaAs欧姆接触层。GaAs缓冲层、接触层的生长温度为580 °C,其他各层的生长温度均为680 °C。外延过程中GaAs的生长速度保持在1.0 μm/h,Ⅲ/V流速比控制在8~15。

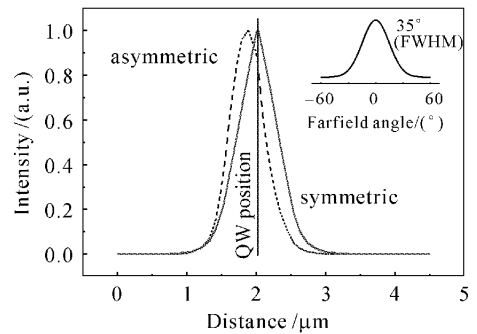


图2 对称与非对称波导内的光强分布与远场特性计算结果

Fig.2 Calculated intensity distribution and farfield for symmetric and asymmetric waveguides

对于线阵半导体激光器,横向增益抑制是需要解决的一个基本问题,特别是对高填充因子的高功率阵列器件,横向的光增益很容易导致侧向激射,降低激光器的输出效率。抑制横向增益最有效的方法就是各阵列激射条之间进行横向光隔离,其中包括引入极大损耗区的离子注入隔离和蚀刻至激活区的沟槽隔离。采用脉冲阳极氧化(PAO)方法在激射条之间腐蚀出深度约为2 μm的V形沟道,可以有效阻断光场的横向传播,同时自然生成厚度约为200 nm的氧化物绝缘膜,对隔离沟槽起到钝化和绝缘作用。15 mm×20 mm的实验样片通过一垂直放置的金属管用真空吸附固定,并作为脉冲阳极氧化的阳极,阴极采用一面积约为40 mm×40 mm的不锈钢片,电解液采用体积比为40:20:1:1的乙二醇:去离子水:磷酸:2%盐酸的混合溶液。阳极氧化过程由一脉冲电源提供电流,脉冲宽度为1 ms,重复频率为1.43 kHz,本实验中脉冲电压的幅度控制在80 V并通过一10 Ω取样电阻监控阳极氧化电流的变化,图3为脉冲阳极氧化实验装置示意图。采用脉冲阳极氧化方法制作了高填充因子准连续型线阵半导体激光器,线阵器件由90单元条形发光区构成,条形宽度为80 μm,间隔为30 μm,腔面处采用了30 μm长的非注入窗口,线阵激光器的条形结构如图4所示。非注入窗口有助于减少腔面区的温度升

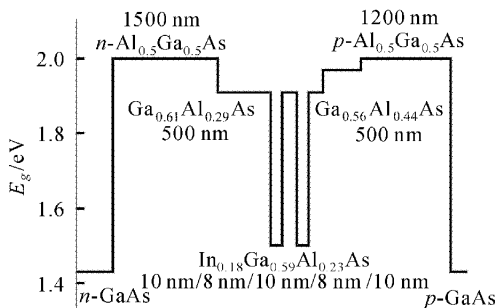


图1 非对称、宽波导双量子阱激光器能带结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of energy band gap of DQW diode lasers with asymmetric wide waveguide

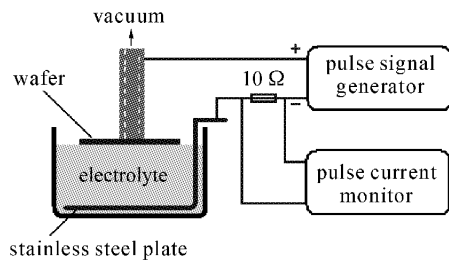


图 3 阳极氧化实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of anodic oxidation setup

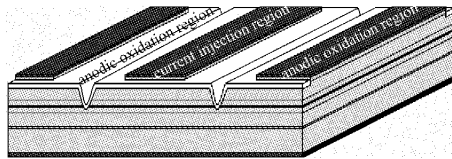


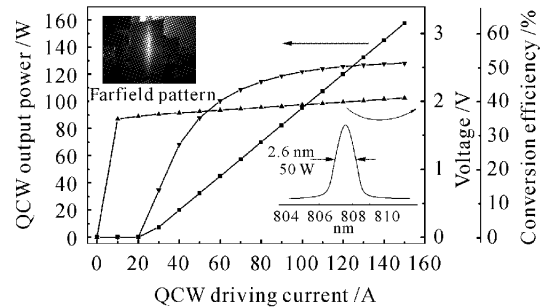
图 4 准连续线阵激光器的条形结构

Fig. 4 Schematic diagram of QCW linear array diode lasers

高,其中包括由正常温升和由于腔面界面态引起的非辐射复合温升。由于激光器芯片封装上的特点(紧靠热沉边缘),前腔面的局部温升会更加明显,由此会导致腔面处带隙收缩及光吸收加剧,使器件输出的量子效率降低,直至腔面损坏。注入条形采用了浅脊形(刻蚀深度 $0.4\ \mu\text{m}$)条形,有助于减少注入区的电流扩展,提高器件的电流注入效率,光场横向隔离采用宽度 $5\ \mu\text{m}$,深度 $2\ \mu\text{m}$ 的V形沟道。芯片的具体工艺如下:首先,采用标准光刻方法形成光场横向隔离沟道光刻胶窗口,然后脉冲阳极氧化 $40\ \text{min}$,在光刻胶窗口氧化刻蚀至 $1.6\ \mu\text{m}$ 深并形成厚度约为 $0.2\ \mu\text{m}$ 的绝缘氧化层,再进行二次光刻形成电流注入区光刻胶图形,然后脉冲阳极氧化 $10\ \text{min}$,在电流非注入区(含沟道区)氧化刻蚀 $0.4\ \mu\text{m}$ 深并形成厚度约为 $0.2\ \mu\text{m}$ 的绝缘氧化层,使隔离沟道区的氧化深度接近 $2.0\ \mu\text{m}$ (过量子阱层),丙酮超声去除光刻胶后直流溅射Ti/Pt/Au($100\ \text{nm}/100\ \text{nm}/150\ \text{nm}$),减薄至 $120\ \mu\text{m}$ 后n面溅射AuGe/Ni/Au($100\ \text{nm}/50\ \text{nm}/200\ \text{nm}$), $400\ ^\circ\text{C}$ 氢气气氛下进行合金 $5\ \text{min}$,然后n面电镀 $2\ \mu\text{m}$ 厚金用于Au丝超声引线。最后,用LOOMIS LSD100解理机将外延片解理成腔长为 $1000\ \mu\text{m}$,宽度为 $1\ \text{cm}$ 的激光器线阵芯片,前、后腔面电子束分别蒸镀反射率为 5% (AR), 95% (HR)的Si/SiO₂组合介质膜。为了使线阵半导体激光器具有良好的散热途径,将线阵半导体激光器芯片p面朝下In焊在无氧铜热沉上。

3 结果和讨论

封装的准连续线阵激光器在 $100\ \text{Hz}$ 脉冲频率, $200\ \mu\text{s}$ 脉冲宽度的驱动条件下进行了性能测试(器件的最大输出受到驱动电源的限制),图5为测得的 $10\ \text{mm}$ 线阵激光器的光功率-电流曲线、电-光转换效率变化曲线及其典型的光谱分布。线阵器件输出功率的斜率效率高达 $1.25\ \text{W/A}$,阈值电流约为 $24.0\ \text{A}$,微分电阻约为 $2\ \text{m}\Omega$,器件的最大电-光转换

图 5 $10\ \text{mm}$ 准连续线阵激光器的光功率-电流曲线、电-光转换效率变化曲线及其典型的光谱分布Fig. 5 Power output, electrical-optical conversion efficiency versus injection current and typical spectra for $10\ \text{mm}$ wide QCW linear array diode lasers

效率为 51% 。大功率半导体激光器的电-光转换效率主要由器件电流注入效率、波导损耗、辐射复合效率、异质结附加电压降及电阻热耗散等因素决定。通过 $100\ \mu\text{m}$ 宽条、不同腔长的单条形器件性能测试,获得器件的波导损耗约为 $2\sim 3\ \text{cm}^{-1}$,内量子效率高达 90% 以上。通常的器件工艺中一般采用化学气相沉积或溅射、电子束蒸发等方法形成SiO₂, Si₃N₄等绝缘层,绝缘层窗口需要与蚀刻掉GaAs欧姆接触层的脊形条光刻对准,工艺中必然存在的对准偏差除了减小注入条的有效面积外还可能造成一定的电流扩展,使器件的串联电阻增加,电流注入效率下降。其次,器件工艺中光场横向隔离沟道的深度达到甚至超过量子阱有源层,暴露的异质界面可能存在较多的异质界面态、表面态和悬挂键。常规绝缘膜工艺中的应力、轰击会使暴露的异质界面产生更多的表面缺陷,增加器件的侧向漏电流。采用脉冲阳极氧化形成的材料本体氧化膜由于不涉及高温、离子轰击等特殊成膜因素,膜层内部应力也相对较低,不容易诱发产生新的界面缺陷;同时由于其膜层由本体氧化形成,可能有助于减少暴露异质界面的界面态、表面态和悬挂键,起到表面钝化作

用,有利于抑制量子阱内载流子在隔离沟槽附近的非辐射复合,提高器件的辐射复合效率。采用扫描法测量了线阵器件的输出光束分布,图6表示线阵器件在不同注入水平时的光束远场特性,垂直于结平面的发散角为 33.6° (半峰全宽,FWHM),平行于结平面的光束发散角随注入水平的提高而有所增加($4.5^\circ\sim 8.7^\circ$),可能由高注入水平下电流扩展引起的侧向横模及波导的热透镜效应等因素而产生。由于线阵激光器的每个发光单元均是典型的宽条形($80\ \mu\text{m}$ 宽)半导体激光器,在侧向方向上虽然采用了浅脊形的电流限制(波导)结构,但随着注入电流的增加仍然会有一定的侧向电流扩展,使有效波导宽度增加。根据波导理论可知,波导宽度增加会使横向波导容许更多高阶模的存在与激射。同时,由于浅脊形波导为弱折射率波导与增益波导共存的波导机制,其侧向有效折射率差一般小于 5×10^{-3} ^[9~11],由于温度变化引起折射率变化的温度系数约为 10^{-3} 量级,激光器高注入条件下其内部温升可高达 $20\ ^\circ\text{C}$ 以上,由内部温升导致的折射率变化(热透镜现象)可明显高于浅脊形波导原有的侧向有效折射率差值,必然使器件的侧向波导结构随注入电流的变化而明显变化,使器件更倾向于高阶横模的多模激射,发散角也随着变大。另外,增益波导中由于增益饱和而导致的载流子空间烧孔现象也是宽条形器件侧向波导不稳定、高阶模激射以至于发散角变大的一个因素。

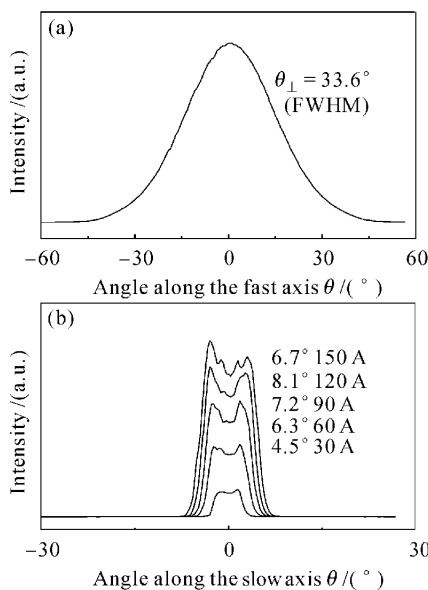


图6 线阵器件的光束远场特性

Fig.6 Farfield of linear array diode lasers

4 结 论

在分子束外延(MBE)手段生长非对称、宽波导InGaAlAs/AlGaAs/GaAs应变双量子阱结构激光器材料的基础上,成功进行了准连续线阵激光器的脉冲阳极氧化工艺,实现了808 nm波段线阵激光器的高效率、高功率工作。研制的高填充因子准连续器件的阈值电流约为24 A,斜率效率达到 $1.25\ \text{W/A}$,最大电-光转换效率达到51%。

参 考 文 献

- Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang *et al.*. 10 W double-cladding fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9):1080~1081
楼祺洪,周 军,朱健强等. 10瓦级双层包层光纤激光器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9):1080~1081
- Pan Yuzhai, Zhang Jun, Hu Guijun *et al.*. High-power ytterbium-doped fiber laser based on fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9):1237~1239
潘玉寨,张 军,胡贵军等. 利用光纤光栅的高功率掺镱光纤激光器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9):1237~1239
- Hu Chunhua, Bi Yong, Sun Zhipei *et al.*. Laser-diode pumped 500 W continuous wave Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):13~15
胡春华,毕 勇,孙志培等. 连续波500 W全固态Nd:YAG激光器研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1):13~15
- C. W. Fischer, S. W. Teare. Anodic oxidation of AlGaAs and detection of the AlGaAs-GaAs heterojunction interface [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **67**(5):2608~2612
- Jinzhong Yu, Yoshinobu Aoyagi, Sohachi Iwai *et al.*. Anodic oxidation of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ [J]. *J. Appl. Phys.*, 1984, **56**(6):1895~1896
- M. J. Grove, D. A. Hudson, P. S. Zory *et al.*. Pulsed anodic oxides for III-V semiconductor device fabrication [J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, **76**(1):587~589
- Shu Yuan, C. Y. Liu, F. Zhao. Effects of pulsed anodic oxide on the intermixing in InGaAs/GaAs and InGaAs/AlGaAs quantum wells [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**(12):9823~9829
- Yi Qu, C. Y. Liu, S. G. Ma *et al.*. High-power ridge waveguide InGaAsN lasers fabricated with pulsed anodic oxidation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(11):2406~2408
- Akihiro Shima, Hiroataka Kizuki, Akira Takemoto *et al.*. 0.78- and 0.98- μm ridge-waveguide lasers buried with AlGaAs confinement layer selectively grown by chloride-assisted MOCVD [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1995, **1**(2):102~109
- L. S. Heath, K. Meehan, A. K. Chin *et al.*. 980 nm ridge waveguide laser reliability at 100 mW [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(16):1869~1871
- H. Wenzel, M. Braun, J. Fricke *et al.*. High-power ridge-waveguide distributed-feedback lasers emitting at 860 nm [J]. *Electron. Lett.*, 2002, **38**(25):1676~1677