

文章编号: 0258-7025(2009)09-2277-05

基于 Al_xN_y 绝缘介质膜的新型窗口大功率半导体激光器

乔忠良 薄报学 么艳平 高欣 张晶 王玉霞 刘春玲 卢鹏 李辉 曲轶

(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 提升半导体激光器的腔面抗光学灾变(COD)损伤的能力,改善半导体激光器的工作特性,一直是大功率半导体激光器器件工艺研究的难点。基于薄膜应力使基底半导体材料带隙变化的原理,采用直流磁控溅射方法在不同条件下溅射生成不同内应力的 Al_xN_y 绝缘介质膜。通过研究大功率半导体激光器腔面退化机理,借助 Al_xN_y 等应力膜设计制作了一种新型非吸收透明窗口结构的宽条形半导体激光器,使器件平均最大输出功率提高 46.5%,垂直发散角达到 21° ,水平发散角达到 6.1° ,2000 h 加速老化试验,其千小时退化速率小于 0.091%。

关键词 激光器; 高功率半导体激光器; 非吸收窗口; AlN; 应力

中图分类号 O471.5 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093609.2277

High Power Semiconductor Lasers of New Window on Insulation Film of Al_xN_y

Qiao Zhongliang Bo Baoxue Yao Yanping Gao Xin Zhang Jing Wang Yuxia
Liu Chunling Lu Peng Li Hui Qu Yi

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

Abstract It is the most difficult point for high power semiconductor lasers to improve the abilities of lasers to resist catastrophic optical damage(COD) and work characteristic of LDs. According to the principle that the energy gap of film materials can be influenced by internal strain stress, direct current magnetron sputtering has been used for preparing Al_xN_y dielectric films with different stresses under different deposition conditions. Broad area semiconductor lasers with a new no-absorption window has been designed considering cavity degradation of devices, peak power output has increased by 46.5 percent for the new structural device, perpendicularity divergence angle is up to 21° , parallel divergence angle is up to 6.1° . It has been less than 0.091 percent of aging speed per thousand of the LDs after testing of 2000 h aging.

Key words lasers; high power semiconductor lasers; no-absorption window; AlN; stress

1 引言

抑制高功率半导体激光器腔面光学灾变(Catastrophic Optical Damage, COD)主要有以下几种技术途径:减小腔面处电流注入;抑制端面光吸收;改善端面处的散热。国外许多大公司和研究所

如美国的 Coherent, nLight, Bookham, Spectra Physics, JDSU 公司和俄罗斯的约飞物理研究所等,均投入大量的人力和物力研究提高 COD 水平的途径。基于真空解理镀膜技术、腔面钝化技术^[1,2]和腔面处的无吸收窗口技术^[3]等研制的大功率半导体

收稿日期: 2008-10-31; 收到修改稿日期: 2009-01-16

基金项目: 国家 973 计划(6135602)资助项目。

作者简介: 乔忠良(1980—),男,博士,助理研究员,主要从事光电子方面的研究。

E-mail: qiao2320002002@yahoo.com.cn

导师简介: 薄报学(1964—),男,研究员,主要从事光电子方面的研究。E-mail: bobaoxue@yahoo.com.cn

激光器的退化速率达到每千小时小于 0.1%^[4], COD 水平也大大提高, 激光器在 80 °C 环境下工作, 寿命可超过 14000 h^[5]。

本文采用一种 Al_xN_y 绝缘介质膜的半导体激光器新型窗口结构, 可进一步提高 GaAs/AlGaAs 激光器的 COD 阈值, 提高器件最大输出功率; 另外, 该种结构可以更好地抑制应变量子阱激光器腔面处有源区应力的释放, 适用于高性能 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器的研制。

2 材料制备与器件设计

AlN 晶态薄膜属于 III-V 族化合物半导体材料^[6], 具有宽带隙直接能带结构, 禁带宽度 $E_g = 6.2 \text{ eV}$ 。AlN 薄膜具有很多优异的物理化学性质: 热导率高 [约 $300 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$], 接近 BeO 和 SiC, 是 Al_2O_3 的 10 倍以上; 介电常数、介质损耗、体电阻率、介电强度优良; 机械性能好, 抗折强度高于 Al_2O_3 和 BeO; 光传输特性好; 无毒、化学性能稳定, 在 1000 °C 时才与空气发生氧化, 在真空中可稳定到 1500 °C, 常温下几乎不与浓无机酸发生反应。由此, AlN 是一种很有前途的光学介质膜材料和高功率封装基片材料。直流反应溅射方法制备的具有较大内部压应力的 Al_xN_y 薄膜, 可应用于激光器的前后腔面附近, 引入一个压应力, 在这个压应力作用下, 腔面附近材料的带隙会比未引入应力膜的材料带隙大, 光吸收会下降, 从而减少热量产生, 形成非吸收窗口。图 1 为在文献[7]方法的基础上, 增加了厚度修正因子(在一定薄膜厚度范围内, 基底所受应力值随膜厚度的线性增加)即基底一定深度内材料的带隙与应力值成正比例的关系。同时由试验知, 基底材料带隙受其上所溅射的 Al_xN_y 薄膜材料中铝组分的影响。图 2 为设计的大功率 GaAs/AlGaAs 激光器的结构示意图。图中 1

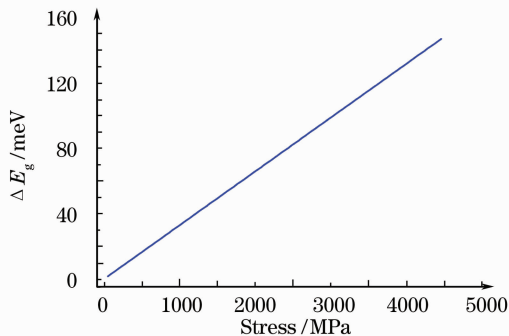


图 1 GaAs 应力与带隙的变化关系

Fig. 1 Relation between the stress and the energy gap of GaAs

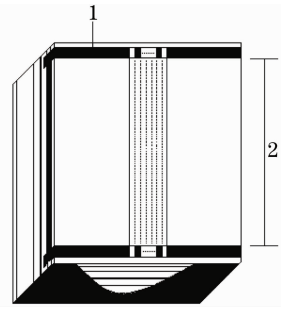


图 2 非吸收窗口激光器结构设计

Fig. 2 Structure design of LDs with no-absorption window

是高应力生长的 Al_xN_y 窗口区; 2 是低应力生长的 Al_xN_y 条形注入区。通过反应溅射方法实现了高质量 Al_xN_y 薄膜的制备^[8]。性能测试表明, Al_xN_y 薄膜^[9~12]可用于制备设计激光器的非吸收窗口工艺。

溅射设备采用美国 DENTON 公司生产的 Discovery-18 磁控溅射镀膜机。系统通过可编程逻辑控制器 (PLC) 实现了半自动抽运和通气序列控制。该镀膜机具有 4 个溅射源、两个质量流量计 (0-100 sccm), 一路氩气、一路氧气或氮气, 可方便用于直流、射频、反应溅射成膜。

对玻璃基片上制备的氮化铝薄膜进行了电导率测量。100 nm 厚 AlN 膜的面电阻约为 $5.0 \times 10^{11} \Omega/\text{cm}^2$ 。AlN 膜原子力显微镜 (AFM) 表面形貌测量表明, 薄膜表面呈现细小的颗粒状紧密排布, 没有明显的孔洞现象, 作为激光器绝缘介质膜有利于抑制器件结构中的漏电流现象。图 3 为制备的 AlN 薄膜的 AFM 测试结果, 均方根 (RMS) 为 0.201 nm。

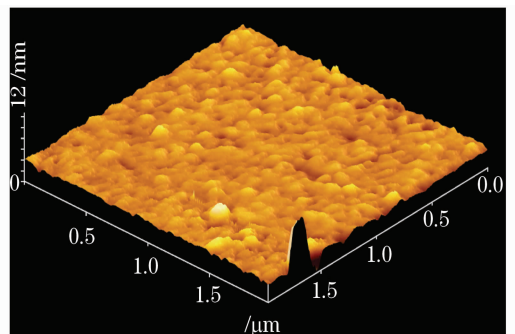


图 3 氮化铝介质膜的 AFM 表面形貌

Fig. 3 AFM measurement of sputtered AlN films

在 K9 玻璃上镀制的氮化铝薄膜的透过率如图 4 所示, 对应的 808 nm 波长光透过率可达 91.9%, 对比裸片 K9 玻璃平均 92% 的透过率, 制备的氮化铝膜在一定厚度内, 对应特定波长具有较高的光透过率, 其材料某波段光吸收率可小于 0.1%。

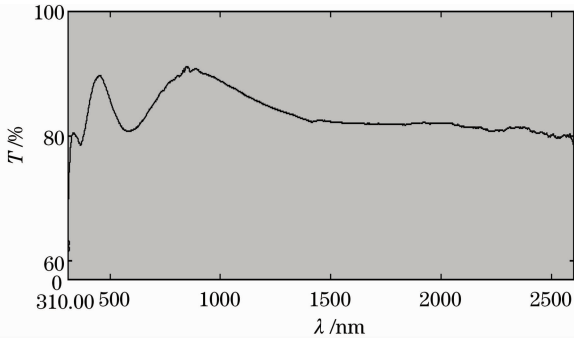


图 4 K9 玻璃上溅射 AlN 薄膜的光学透过率特性

Fig. 4 Transmittance of AlN films on K9 glass

在 170 °C 基底温度 $V(Ar):V(N_2)=2:3, 5.0$ Pa 溅射气压, 150 W 溅射功率条件下, 以本征砷化镓为基底材料常温磁控溅射生长的氮化铝进行了能谱仪 (EDS) 成分分析, 如表 1 所示。结果表明, 氮元素的含量超过了铝元素含量, 镓元素含量超过了砷元素含量, 但镓、铝总量与砷、氮总量近似相当。由此可见, 可能会有其他氮化物存在, 有可能在材料表面存在 GaN 组分。

表 1 砷化镓基底镀制氮化铝介质膜 EDS 测量结果

Table 1 EDS analysis of AlN film on the substrate of GaAs

Element	Ga	As	Al	N
Atom percentage /%	39.44	34.00	11.11	16.45

用溅射 AlN 制作了非吸收窗口大功率 GaAs/AlGaAs 激光器。其主要工艺包括: 1) 利用光刻技术, 在激光器的前后腔面处 (距腔面 30~60 μm 处) 光刻出非吸收窗口区; 2) 窗口区中腔面附近 10~20 μm 区域为预留区, 以保证腔面的镜面效果不被破坏; 3) 对窗口区中的条形区域进行间隔式深

表 2 不同溅射功率条件下的 GaAs 能带偏移

Table 2 Offset energy band of GaAs under different sputtering power

Sputter power /W	100	150	200	250	300	350
ΔE_g /meV	-47.0	5.0	49.0	84.0	104.0	118.0
$T_g=50\text{ }^\circ\text{C}; P=5.0\text{ Pa}; V(Ar):V(N_2)=1:1$						

表 3 不同溅射压力条件下的 GaAs 能带偏移

Table 3 Offset energy band of GaAs under different sputtering pressure

Sputter pressure /Pa	0.5	1	2	3	4	5
ΔE_g /meV	-72.0	-51.0	-32.0	-17.0	-5.0	2.0
$T_g=250\text{ }^\circ\text{C}; V(Ar):V(N_2)=1:2; P_{rf}=150\text{ W}$						

腐蚀, 腐蚀深度为 0.8~1.2 μm, 间隔距离为 8~10 μm (该方法可适用于任意条宽 GaAs/AlGaAs 激光器的非吸收窗口结构), 窗口区条形以外区域全部深腐蚀接近有源区, 然后在 50 °C 温度下生长氮化铝层, 其厚度为 0.5 μm; 4) 对注入区中的条形以外的区域进行微腐蚀, 除去欧姆接触层, 然后在 250 °C 温度条件下, 溅射厚度约 0.2 μm 的氮化铝膜代替传统的二氧化硅膜作为绝缘层。器件的其他工艺与常规器件相同。

通过成膜条件试验, 实现了 AlN 膜应用于激光器非吸收窗口的原理验证。在 GaAs 衬底片上通过磁控溅射生长 AlN 膜, 然后, 利用荧光光谱仪测试 GaAs 材料本征峰的中心波长漂移量。在 50 °C 基底温度, $V(Ar):V(N_2)=1:1, 5.0$ Pa 溅射气压, 300 W 射频功率条件下, 获得了具有明显压应力特征的 Al_xN_y 薄膜, 比较得出镀膜 GaAs 的带隙变化 ΔE_g 可达 100 meV 以上, 如表 2 所示。同时, 在 250 °C 基底温度, $V(Ar):V(N_2)=1:2, 5.0$ Pa 溅射气压, 150 W 溅射功率条件下, 获得了弱应力特征的 Al_xN_y 薄膜, 比较得出镀膜 GaAs 的带隙变化 ΔE_g 可控制在 10 meV 以上, 如表 3 所示。由表 2, 3 间的对比可知, 溅射制备的 Al_xN_y 膜层中铝含量的不同直接影响基底材料的应力值, 功率越大, 氮气组分越小, 溅射生成的 Al_xN_y 薄膜中 Al 含量越高, 薄膜在恢复室温状态下时对基底产生的收缩拉力越大, 基底一定尺度范围内产生的压应变越大, 最终使得基底材料的带隙变化越大。总结 EDS 测定得到 x 和 y 的经验值范围为 $1.4y \geq x \geq 1.1y$ 时, 溅射的 Al_xN_y 材料保证基底产生收缩应力的同时, 也保证了所溅射材料的绝缘性。

3 器件测试

图 5 为非吸收窗口 AlGaAs/GaAs 材料宽条形激

光器 (腔长 1 mm, 条宽 100 μm) 与普通条形激光器 (采用 SiO₂ 作为绝缘介质膜, 无非吸收窗口) 激光阈

值温度特性的比较结果。该图是在恒温箱中,恒定在不同温度下所测得的阈值电流值, T_r 为相对参考点温度,从图中可以看出,两种激光器的阈值电流均随着温度的升高而增加,具有非吸收窗口的激光器阈值电流要比普通激光器增加得缓慢得多。由公式

$$I_{th} = I_{th}(T_r) \exp[(T - T_r)/T_0]$$

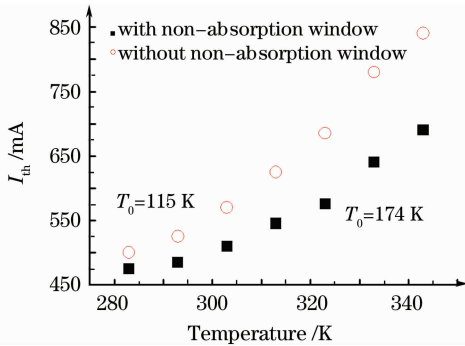


图5 激光器阈值电流随温度的变化曲线
Fig. 5 Threshold current I_{th} versus operation temperature

可算得相对于传统的无非吸收窗口的半导体激光器的特征温度为 115 K,带有非吸收窗口的氮化铝绝缘介质膜的半导体激光器的特征温度是 174 K。得出这样的结果主要有两方面的原因:一是氮化铝的高热导性;二是相对良好的绝缘性。非吸收窗口的激光器腔面吸收减少,产生的热量也相应减少,而且 AlN 作为绝缘介质膜热导率比 SiO_2 高几十倍。因此,带有非吸收窗口激光器的温度稳定性明显好于传统激光器。

为了比较有无非吸收窗口激光器的 COD 阈值

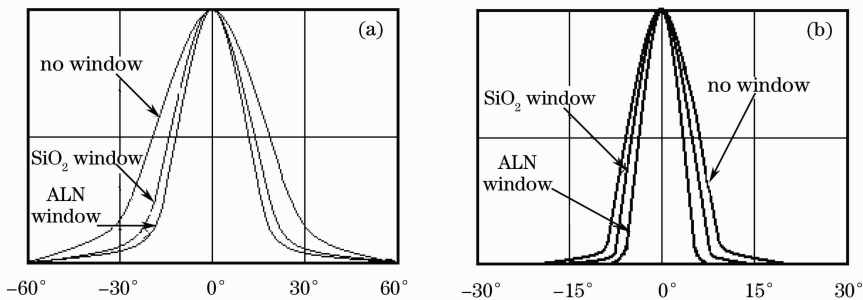


图7 激光器近场的水平、垂直发散角比较。(a)近场垂直发散角比较;(b)近场水平发散角比较;
Fig. 7 Comparison of horizontal divergence angle and vertical divergence angle of the near field.

(a) Vertical divergence angle of near field; (b) horizontal divergence angle of near field

图7为3种器件的近场比较,图7(a),(b)分别是传统LDs与带有溅射 SiO_2 绝缘介质膜窗口的LDs和带有溅射AlN绝缘介质膜窗口的LDs的垂直、水平方向上近场发散角。均在注入条宽 $100\ \mu\text{m}$,激光器腔长 $1000\ \mu\text{m}$,连续工作条件下,输出功率 $2.2\ \text{W}$

特性,在连续电流条件下对3种条形结构激光器进行了输出特性测试。测试得到的典型器件 $P-I$ 曲线如图6所示。曲线1代表传统的半导体激光器,对应的COD阈值为 $2.15\ \text{W}$,斜率效率 $1.01\ \text{W/A}$;曲线2代表镀有非吸收窗口的 SiO_2 绝缘介质膜的半导体激光器,对应的COD阈值为 $2.75\ \text{W}$,斜率效率 $1.1\ \text{W/A}$;曲线3代表镀有 Al_xN_y 绝缘介质膜的有非吸收窗口的半导体激光器,对应的COD阈值为 $3.15\ \text{W}$,斜率效率为 $1.15\ \text{W/A}$ 。从曲线1和2比较可知,非吸收窗口的存在使激光器的COD阈值提高了 27.9% ;曲线2和3比较可知,镀有 Al_xN_y 介质膜比镀有 SiO_2 介质膜的带有非吸收窗口的激光器COD阈值提高了 14.5% ;两者结合使用可以使 $808\ \text{nm}$ 的GaAs/AlGaAs激光器的COD阈值提高 46.5% 以上。

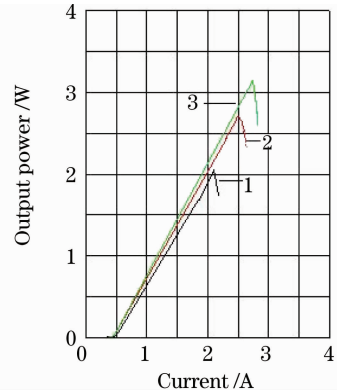


图6 激光器输出功率曲线比较
Fig. 6 Comparison of light output property on different kinds of LDs

时所测得。三者垂直方向上近场发散角大小依次是 $37^\circ, 28^\circ, 21^\circ$;三者水平近场发散角比较,其大小分别是 $14^\circ, 9^\circ, 6.1^\circ$ 。从近场比较分析,其发散角的不同可能源于窗口部位材料带隙增大,致使窗口部位波导层宽度向水平方向和垂直方向上拓展的结果。同

时进行了 2000 h 加速老化试验,比较三者的退化速率,氮化铝窗口 LDs 和二氧化硅窗口 LDs 慢于传统 LDs,三者的千小时退化速率依次是 0.091%, 0.11%, 0.25%。以上实验数据说明 Al_xN_y 非吸收窗口技术对大功率激光器功率输出特性的明显改善。

4 结 论

提出一种新型非吸收窗口技术,具有工艺简单、适合不同条宽的激光器。实验研究了 AlN 薄膜的直流反应溅射工艺,获得了不同内应力 AlN 薄膜的工艺制备条件,设计并制作了 AlN 介质膜非吸收窗口宽条形激光器。结果表明,采用 AlN 制作绝缘膜和无吸收窗口对提升半导体激光器输出功率、减小输出发散角、增加器件寿命具有明显作用。

致谢 感谢李梅教授在材料测试方面给予的帮助,感谢马建立博士、魏星博士在论文资料查找方面给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 Ulrich Martin. COMD behavior of semiconductor laser diodes [R]. *Annual Report 1999, Dept. of Optoelectronics, University of Ulm.*, 1999, 39~46
- 2 H. Jaeckel. Very high-power (425 mW) AlGaAs AQW-GRINSCH ridge laser with frequency-doubled output (41 mW at 428 nm)[J]. *IEEE J. Quantum. Electron.*, 1991, **27**: 1560
- 3 M. Matsumoto, Mitsuhiro, SasaKi *et al.*. High-power 780 nm AlGaAs narrow-stripe window structure lasers with window grown on facets[J]. *Japan. J. Appl. Phys.*, 1993, **32**(5): 665
- 4 C. Silfvenius, P. Blixt, C. Lindstrom *et al.*. High COMD, nitridized InAlGaAs laser facets for high reliability 50 W bar operation at 805 nm[C]. *SPIE*, 2004, **5336**: 132~143
- 5 Xingsheng Liu, Martin Hai Hu, Hong Ky Nguyen *et al.*. Comparison between epi-down and epi-up bonded high-power single-mode 980 nm semiconductor lasers [J]. *IEEE, Transactions on Advanced Packaging*, 2004, **27**(4): 640~646
- 6 Qiao Guanru. *Chemical Principle on Semiconductor Process*[M]. Nanjing: Science Technology Press, 1979. 57
乔冠儒. *半导体工艺化学原理*[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1979. 57
- 7 Cheng Bufei, Yao Fei, Xue Chunlai. A method to estimate the strain state of SiGe/Si by measuring the bandgap [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(9): 4350~4353
成步文, 姚 飞, 薛春来. 带隙法测定 SiGe/Si 材料的应变状态 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(9): 4350~4353
- 8 G. F. Iriarte, F. Engelmark, M. Ottosson *et al.*. Influence of deposition parameters on the stress of magnetron sputter-deposited AlN thin films on Si(100) substrates[J]. *J. Mater. Res.*, 2003, **18**(2): 423~432
- 9 Wang Honghai, Xiong Guiguang, Tian Decheng *et al.*. Residual stress and thermal stability of AlN thin films deposited by reactive laser ablation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(9): 857~860
汪洪海, 熊贵光, 田德成等. 激光熔蚀反应淀积 AlN 薄膜残余应力及热稳定性的研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(9): 857~860
- 10 Ling Hao, Shi Wei, Sun Jian. Preparation of aluminum nitride films using pulsed laser deposition[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A28**(3): 272~274
凌 浩, 施 维, 孙 剑. 用脉冲激光沉积方法制备氮化铝薄膜 [J]. *中国激光*, 2000, **A28**(3): 272~274
- 11 Wang Honghai, Zheng Qiguang, Qiu Junlin. Study of the preparation and properties of AlN films by reactive laser deposition [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A26**(1): 89~92
汪洪海, 郑启光, 丘军林. 反应淀积氮化铝薄膜及其性质的研究 [J]. *中国激光*, 1998, **A26**(1): 89~92
- 12 Gong Hui, Fan Zhengxiu. Preparation of *c*-axis oriented AlN film [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 933~936
龚 辉, 范正修. *c* 轴定向氮化铝薄膜的制备 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 933~936