

3~5 μm 波段铅盐二极管激光器

朱筱春 王海龙 曹根娣 张位在

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 用水平无籽晶气相生长技术、自扩散和台面条形结构制成了直到 162 K 脉冲运转的 $\text{Pb}_{0.97}\text{Cd}_{0.03}\text{S}_{0.9}\text{Se}_{0.1}$ 二极管激光器和 28 K 下 CW 运转的 $\text{PbS}_{0.53}\text{Se}_{0.47}$ 二极管激光器。其发射波长分别为 3.22 μm 和 5.53 μm , 脉冲和 CW 运转最低阈值电流密度分别为 143 A/cm^2 和 41 A/cm^2 。

关键词 铅—盐, 二极管激光器

Lead-salt diode laser at 3~5 μm wavelength region

Zhu Xiaochun, Wang Hailong, Cao Gendi, Zhang Weizai

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract A $\text{Pb}_{0.97}\text{Cd}_{0.03}\text{S}_{0.9}\text{Se}_{0.1}$ diode laser with pulsed operation at up to a temperature of 162 K and a $\text{PbS}_{0.53}\text{Se}_{0.47}$ diode laser with CW operation at 28 K have been fabricated by a horizontal unseeded vapor growth technique, self diffusion and mesa stripe-geometry. Their emission wavelengths are 3.22 μm and 5.53 μm respectively. In pulsed operation and CW operation the threshold current density are as low as 143 A/cm^2 and 41 A/cm^2 at 12 K respectively.

Key words lead-salt, diode laser

1 引 言

近年发展起来的氟化物玻璃光纤是一种用于光通讯的新型光缆, 预期损耗比石英光纤低 1~2 个数量级, 最低损耗波长在 2~5 μm 之间, 因此研究在这个波段范围内工作的发射和接收器件是很有意义的。

IV-VI 族铅盐化合物 $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}_{1-y}\text{Se}_y$ 和 $\text{PbS}_{1-x}\text{Se}_x$ 晶体就是制作 3~5 μm 波段中红外激光器的重要材料。通过改变材料组份, 可获得 3~5 μm 激光输出。R. W. Ralston 等人曾用 $\text{PbS}^{[1]}$ 获得 CW 激光输出, 波长为 4.32 μm (20 K), A. R. Calawa^[2] 等人用 $\text{Pb}_{0.942}\text{Cd}_{0.058}\text{S}$ 二极管观察到脉冲受激发射, 波长为 2.5 μm (4.2 K), K. W. Nill 等^[3] 用 $\text{Pb}_{0.98}\text{Cd}_{0.02}\text{S}$ 材料制成 CW 激光器, 发射波长为 3.5 μm (20 K), Koji. Shinohara 等^[4] 用 $\text{PbS}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ 材料制成发射波长为 4.75 μm (77 K), CW 运转的激光器。上述几种组份的铅盐材料制成的同质结激光器, 工作温度较低, 不符合光纤通讯的实用化要求。因此为了提高激光器的工作温度, 我们选择了四元系

PbCdSSe 铅盐材料,制成了 3.22 μm 波段脉冲运转的激光器,工作温度达到 162 K。同时制成了 5.53 μm 波段 CW 工作的 PbS_{0.53}Se_{0.47} 激光器。这两种铅盐二极管激光器还可用于高分辨率光谱、大气污染监视、毒气控制等。本文主要介绍三元 PbSSe 和四元 PbCdSSe 铅盐晶体生长、激光器制作及器件性能。

2 实 验

采用曾报道的水平无籽晶气相生长技术^[5],生长了具有低位错密度和合适载流子浓度的 *n* 型单晶。生长的单晶呈分立的块状晶体,通常为〈100〉取向,表面平滑如镜。我们用 10 ml H₂O + 10 g KOH + 1 ml C₃H₃O₃ + 0.5 ml H₂O₂^[6] 溶液腐蚀晶体,晶体位错密度一般为 ~10⁴/cm²。采用范德堡法 77 K 下测量了 *n* 型 PbS_{0.53}Se_{0.47} 和 Pb_{0.97}Cd_{0.03}S_{0.9}Se_{0.1} 单晶载流子浓度均为 ~2 × 10¹⁸/cm³。

根据同一单晶片各部位制作的激光器光谱测量表明,单晶组份是均匀的。同时由光谱测量可检验单晶组份,PbS_{0.53}Se_{0.47} 和 Pb_{0.97}Cd_{0.03}S_{0.9}Se_{0.1} 激光器发射波长分别为 5.53 μm (28 K) 和 3.22 (12 K),根据禁带宽度 (*E*) 与组份 (*x, y*)、温度 (*T*) 的关系,可分别计算出这二种晶体材料的组份。对于 PbS_{1-x}Se_x 三元晶体:

$$E = 264.5 - 140x + (400 + 0.265T^2)^{1/2} \text{ meV}^{[7]} \quad (1)$$

对于 Pb_{1-x}Cd_xS_{1-y}Se_y 四元晶体,根据经验,将文献[8]中用于三元 Pb_{1-x}Cd_xS 的带宽公式修正为

$$E = 264.5 + 3600x - 140y + (400 + 0.265T^2)^{1/2} \text{ meV} \quad (2)$$

接着(1)、(2)式计算,可分别得到 *x* = 0.464 和 *x* = 0.0315 (*y* = 0.1),基本与我们设计的组份 (*x* = 0.47 和 *x* = 0.03) 相吻合。表明激光晶体质量是好的。

生长的 *n*-PbS_{0.53}Se_{0.47} 和 Pb_{0.97}Cd_{0.03}S_{0.9}Se_{0.1} 块状单晶不需切、磨、抛等工艺,可直接用 Pb_{0.49}(S_{0.53}Se_{0.47})_{0.51} 和 Pb_{0.49}S_{0.51} 作扩散源,600 °C 温度自扩散 4 min,形成 S 富 *P* 型表面层,结深分别为 ~12 μm 和 ~30 μm,扩散后晶体减薄到 ~200 μm。再用标准光刻技术和选择腐蚀技术制成如图 1 所示台面条形结构,台面上开出 10~20 μm 窗口作 *P* 侧接触,*n* 侧和 *P* 侧同时电镀 Au、In 得到较好的欧姆接触。最后将芯片解理成约 500 μm 长的管芯,装在特制的镀 In 管座上。

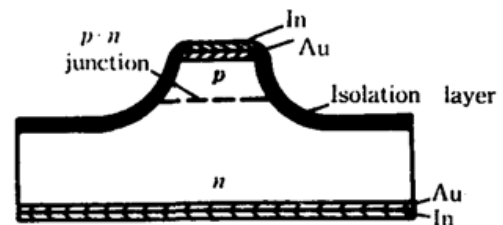
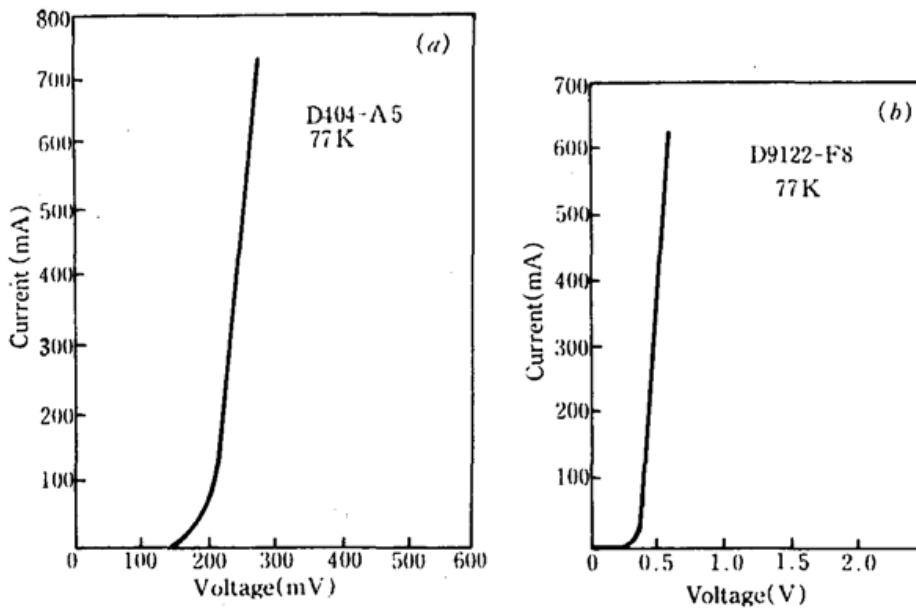


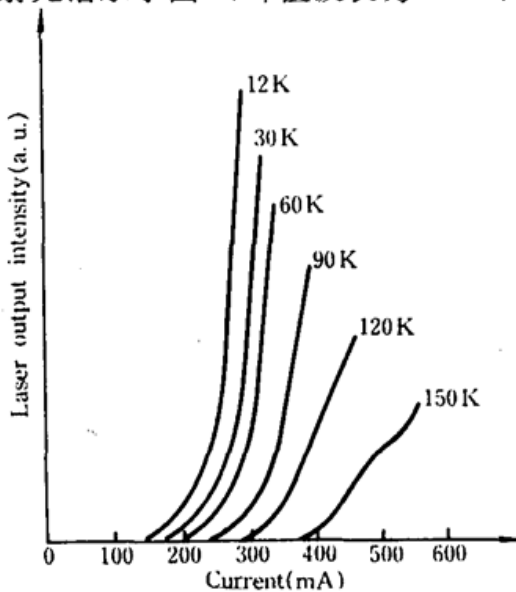
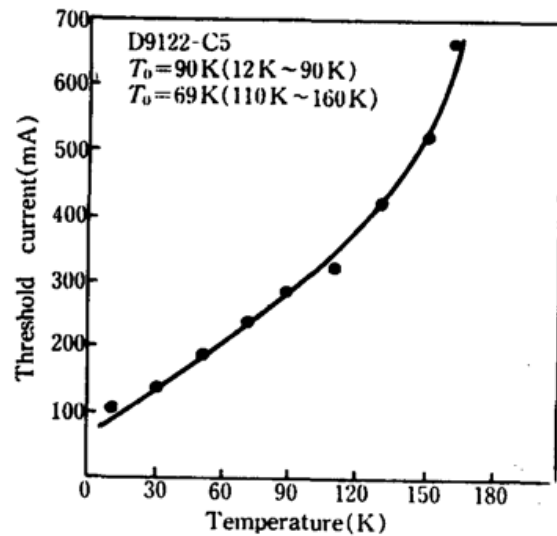
Fig. 1 Schematic structure of etched mesa diode laser

3 结果与讨论

77 K 下测量了二极管的 *I*-*V* 特性,如图 2 所示,由曲线的线性段斜率可得到串联电阻分别为 ~120 mΩ 和 ~500 mΩ。根据二极管的串联电阻、导通电压等参数,可初步分析二极管的质量。然后将二极管安装在氦气循环的致冷机中,进行激光特性测试。Pb_{0.97}Cd_{0.03}S_{0.9}Se_{0.1} 二极管用重复频率 10 kC,脉宽为 2 μs 的脉冲电源驱动,激光输出用液氮致冷的 HgCdTe 探测器接收。图 3 为该激光器不同温度下典型的 *I*-*L* 特性曲线,由图给出 12 K 下阈值电流为 250 mA。在 12~160 K 范围内测量了脉冲工作下激光器阈值电流与温度的关系,图 4 表示测量的阈值电流的典型数据,阈值电流与温度的关系用 $I(T) \propto \exp(T/T_0)$ 表示,在 12 K~90 K 范围内,阈值电流随温度变化较缓慢,特征温度 $T_0 = 90$ K,在 110 K~160 K 温度范围,阈值电流随温度变

Fig. 2 I - V characteristics at 77 K(a) $\text{PbS}_{0.53}\text{Se}_{0.47}$ diode laser; (b) $\text{Pb}_{0.97}\text{Cd}_{0.03}\text{S}_{0.9}\text{Se}_{0.1}$ diode laser

化较快,特征温度 $T_0 = 69$ K。最好的器件运转温度达到 162 K。540 mA 脉冲电流、12 K 下受激发射光谱示于图 5,峰值波长为 $3.22 \mu\text{m}$ 。

Fig. 3 Light intensity vs current of a typical $\text{Pb}_{0.97}\text{Cd}_{0.03}\text{S}_{0.9}\text{Se}_{0.1}$ diode laser at different temperaturesFig. 4 Threshold current vs temperature for $\text{Pb}_{0.97}\text{Cd}_{0.03}\text{S}_{0.9}\text{Se}_{0.1}$ laser at temperature ranging from 12 K to 162 K

$\text{PbS}_{0.53}\text{Se}_{0.47}$ 二极管激光器采用台面条形结构获得了 CW 激光输出,12 K 下连续阈值电流密度为 41 A/cm^2 ,最高运转温度为 28 K。图 6 为该激光器典型的温度调谐和电流调谐光谱,温度调谐率为 $\sim 3 \text{ cm}^{-1}/\text{K}$,12 K 下电流调谐率为 $\sim 0.05 \text{ cm}^{-1}/\text{mA}$,光谱可调谐范围为 30 cm^{-1} ,中心波长为 $5.53 \mu\text{m}$ (28 K)。

由于硫化物铅盐材料热导性能较差(热导率为 $0.02 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$),限制了这种同质结激光器只能在较低温度下工作。如果在扩散同质结中引入载流子浓度梯度^[9,10],或用组份内扩散(CID)法制成 SH、DH 结构^[11,12],或用 MBE 制成 DH 结构^[13],并进一步改善欧姆接触和散热条件,可实现高温下连续运转。

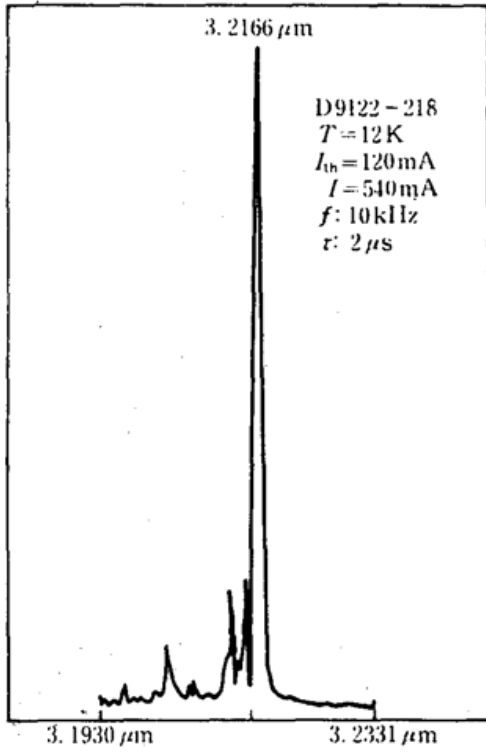


Fig. 5 Emission spectrum of a typical $\text{Pb}_{0.97}\text{Cd}_{0.03}\text{S}_{0.9}\text{Se}_{0.1}$ diode laser (pulsed operation) at 12 K

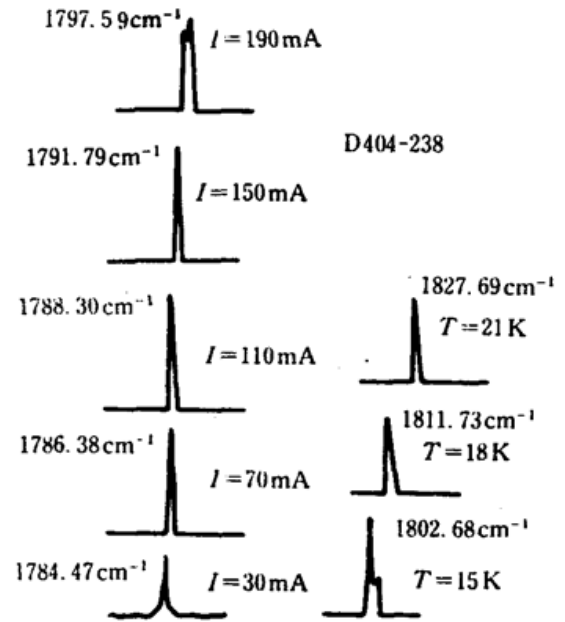


Fig. 6 Current-tuning spectra and temperature-tuning spectra of a typical $\text{PbS}_{0.53}\text{Se}_{0.47}$ diode laser

本实验载流子浓度是由上海技术物理所一室唐荷珍同志测试的,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 R. W. Ralston *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **45**, 1323(1974)
- 2 A. R. Calawa *et al.*, *J. Electr. Mater.*, **1**, 191(1972)
- 3 K. K. Nill *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **22**, 677(1973)
- 4 Koji Shinohara *et al.*, *Japan J. Appl. Phys.*, **20**, 779(1981)
- 5 朱筱春 *et al.*, *中国激光*, **12**(1), 515(1971)
- 6 Osamu Ohtsuki *et al.*, *Japan J. Appl. Phys.*, **10**, 515(1971)
- 7 Band parameters for these expressions were taken from: G. Appold, R. Grisar *et al.*, Proc. 14th Inten. Conf. Phys. Semicond, Edinburgh (1978) Inten. Phys. Conf. Ser. No. 43, 1101(1979)
- 8 Kurt J. Linden, Arlan W. Mantz, *SPIE*, **320**(11), 109(1982)
- 9 Wayne Lo, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-13**, 591(1977)
- 10 Wayne Lo, Don E. Swets, *Appl. Phys. Lett.*, **33**, 938(1978)
- 11 F. J. Bryant, A. Qadeer, *J. Appl. Phys.*, **55**, 60(1984)
- 12 Prof. F. J. Bryant *et al.*, *Solid-State and Electr. Devices*, **131**, 113(1984)
- 13 N. Koguchi *et al.*, *J. of Crystal Growth*, **81**, 400(1987)