

室温连续工作的可见光半导体激光器

郑广富 廖先炳 郑显明 胡恩智

(永川光电研究所)

提要: 本文报告我们研制成功的室温连续工作的可见光 GaAlAs 半导体激光器。发射的波长约 7600 Å, 所有电光参数跟红外光 GaAs-GaAlAs 双异质结激光器基本上一致。

A CW visible semiconductor laser at room temperature

Zheng Guangfu, Liao Xianbing, Zheng Xianming, Hu Enzhi

(Yongchuan Opto-Electronics Research Institute)

Abstract: This paper reports a CW visible GaAlAs semiconductor laser at room temperature. The lasing wavelength is about 7600 Å. All the electrical and optical parameters of this visible laser are comparable to those of infrared GaAs-GaAlAs double-heterostructure lasers.

一、前 言

与红外半导体激光器相比, 可见光半导体激光器发射的激光束, 人眼直接可见, 使用操作方便; 波长短, 光斑小, 分辨力高, 信息贮存密度大; 光电接收元件的感光度高。可见光半导体激光器目前已在激光电视唱片、光盘、数字声频唱片、激光高速印刷术、全息照相术、激光文字记录、数码显示、激光准直、测距、雷达、医疗等方面都开发了应用。

我们于 1980 年 11 月制出了室温连续工作的可见光 GaAlAs 半导体激光器, 它具有良好的电光特性参数。

二、研制考虑与工艺

图 1 是我们研制的可见光 GaAlAs 双异

质结激光器的内部结构。它的特点是含高 Al 量的五个外延层结构。

在设计这种激光器时, 首先要考虑的是要使它发射出可见光波长。以 $\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}$ 作激光有源层材料, 只能采用组分 $y \leq 0.37$ 的高发射复合效率的直接带隙 $\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}$ 。室温下它的带隙 E_g^r 跟组分 y 的关系为^[1]:

$$E_g^r = 1.424 + 1.247y, \quad 0 \leq y \leq 0.37 \quad (1)$$

通常光子的能量 $E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.2398}{\lambda}$ (电子伏), 半导体中发射光子的能量近似等于它的带隙, 即 $E \approx E_g^r$, 所以由 (1) 式可得:

$$\lambda = \frac{1.2398}{1.424 + 1.247y} \text{ (微米)}, \quad 0 \leq y \leq 0.37 \quad (2)$$

要制作波长 7600 Å 的可见光激光器, 由 (2)

收稿日期: 1982 年 2 月 1 日。

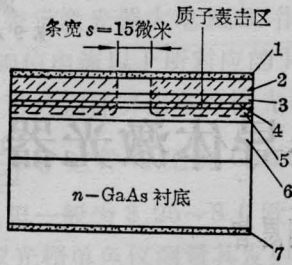


图1 可见光 GaAlAs DH 激光器的内部结构

1—*p*面 CrAu 欧姆接触层； 2—*p*-GaAs 表面层； 3—*P*-Ga_{0.47}Al_{0.53}As 限制层； 4—不掺杂 Ga_{0.83}Al_{0.17}As 有源层； 5—*N*-Ga_{0.47}Al_{0.53}As 限制层； 6—*n*-Ga_{0.9}Al_{0.1}As 过渡层； 7—*n*面 AuGeNi 欧姆接触层

式可计算得有源层材料的组分应为 Ga_{0.83}Al_{0.17}As。

要获得低阈值激射，必须同时满足载流子限制要求的 $\Delta E_g = 0.25 \sim 0.45$ 电子伏和光限制要求的 $\Delta \bar{n} / \bar{n}_1 = 3 \sim 7\%$ [2]。由于前面确定了有源层的组分，理论计算表明，限制层材料组分只能采用 $0.37 < x \leq 1$ 的间接带隙 Ga_{1-x}Al_xAs，室温下这种材料的带隙 E_g^x 应为 [1]：

$$E_g^x = 1.900 + 0.125x + 0.143x^2, \quad (3)$$

$$0.37 < x \leq 1.0$$

而 Ga_{1-y}Al_yAs (或 *y* 改为 *x*) 材料的折射率 \bar{n} 与组分的关系为 [1]：

$$\bar{n} = 3.590 - 0.710y + 0.091y^2 \quad (4)$$

限制层材料选取 $x = 0.53$ ，由 (1)、(3) 和 (4) 式得 $\Delta E_g = 0.37$ 电子伏， $\Delta \bar{n} / \bar{n}_1 = 6.7\%$ ，满足了载流子限制和光限制的要求，所以，对称双异质结限制层材料组分就确定为 Ga_{0.47}Al_{0.53}As。

为了消除衬底材料位错和衬底表面各种微缺陷沾污对生长有源层晶体质量的影响，在生长 *N* 型限制层之前，先生长一个 *n* 型 Ga_{0.9}Al_{0.1}As 过渡层。为了减少激光器内部结构表面的欧姆接触电阻，在 *P* 型限制层上生长低接触势垒的 *p* 型 GaAs 表面层。

为了减少工作电流，希望获得单横模激射，器件内部制成质子轰击条型结构。

我们选用水平舟生长的掺 Si 的 *n*-GaAs 单晶作衬底，载流子浓度 $n = 1 \sim 3 \times 10^{18}$ 厘米⁻³，室温电子迁移率 $\mu_n = 1800 \sim 2500$ 厘米²/伏·秒，位错坑密度 $D < 1000$ 厘米⁻²。在 844~826°C 的温度区间内，以 0.2°C/分的降温速率，在 (100) 晶面 *n*-GaAs 衬底上，依次外延生长掺 Te 的 *n*-Ga_{0.9}Al_{0.1}As 过渡层，厚约 10 微米；掺 Te 的 *N*-Ga_{0.47}Al_{0.53}As 限制层，厚约 1 微米；不掺杂的 Ga_{0.83}Al_{0.17}As 有源层，厚约 0.2 微米；掺 Zn 的 *P*-Ga_{0.47}Al_{0.53}As 限制层，厚约 0.8 微米；掺 Ge 的 *P*-GaAs 表面欧姆接触层，厚约 1.5 微米。外延片于 700°C 下，经高浓度 *p*⁺ 的闭管浅 Zn 扩散后，*p*⁺ 面蒸发 CrAu，*n* 面蒸发 AuGeNi，在 450°C 下通 H₂ 气保护合金，制成欧姆接触。然后用 $\phi 15$ 微米的钨丝作条型掩蔽，于高真空下用剂量 $2 \sim 4 \times 10^{15}$ 厘米⁻² 的质子 (H⁺) 轰击片子，轰击能量约 350 千电子伏。被轰击过的晶体形成高阻隔离区，而被钨丝掩蔽的条型区成为导电的激光有源区。轰击后，沿 (110) 晶面解理，制作约 250 微米长的激光器谐振腔，再切割成宽为 300 微米左右的激光器管芯。经 *V-I* 特性和脉冲工作进行管芯挑选后，把管芯 *p* 面朝下置于热沉上，在氮气保护下作烧结键合，引出 *p* 极和 *n* 极。最后用带透明玻璃窗的管帽在 *F* 氮下封装成如图 2 所示的外观。

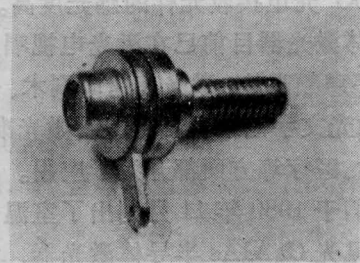


图2 可见光 GaAlAs 激光器的外观照片

三、激光器特性

室温下，对我们制出的可见光 GaAlAs

表 1 可见光 GaAlAs 激光器室温连续工作特性

| 特 性 | 典 型 值 | 最 佳 值 |
|--------------------------------------|------------|---------------------|
| 正向导通电压 V_F (1 毫安) | 1.2~1.6 伏 | |
| 反向击穿电压 V_R (100 微安下) | 5.0~15.0 伏 | |
| 阈值电流 I_{th} (毫安) | 50~180 | 46 |
| 阈值电流密度 J_{th} (安/厘米 ²) | 1400~5000 | 1230 |
| 激光输出功率 P_0 | 1 毫瓦以上 | 几毫瓦, 无 $P-I$ 曲线扭折现象 |
| 串联电阻 R_s (欧姆) | 3.5~8.0 | 3.25 |
| 外微分量子效率 η_D (%) | 15~50 | 76.2 |
| 内量子效率 η_i (%) | 20~60 | 91.4 |
| 峰值波长 λ_p (Å) | 7600~7800 | 多数为~7600 |
| 光谱线宽 $\Delta\lambda$ (Å) | <20 | 4.5 |
| 横模 | | 单光斑 |

激光器加直流偏置工作, 测得激光器一系列电光参数如表 1 所示。图 3 给出了小电流工作下的 $V-I$ 特性, 在正向电流 1 毫安下测得的正向导通电压为 1.2~1.6 伏; 在反向饱和电流 100 微安下测得反向击穿电压为 5.0~15.0 伏。

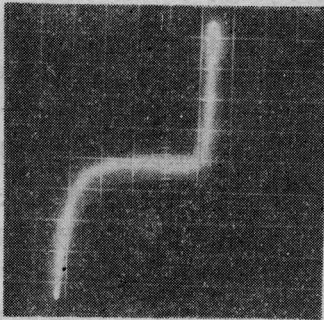


图 3 可见光 GaAlAs 激光器的 $V-I$ 特性
(正向 1.0 伏/分度, 反向 5.0 伏/分度)

用 Si 光电池作接收器, 由 $x-y$ 记录仪自动记录光强-电流 (P_0-I) 特性曲线如图 4 所示。由图中的 P_0-I 特性可知, 室温连续工作的最低阈值电流是 46 毫安, 阈值电流密度为 1230 安/厘米², 外微分量子效率最高为 76.2%, 内量子效率最高为 91.4%。在 100~200 毫安的工作电流下, 激光输出功率大于 3 毫瓦, 在数毫瓦量级的激光功率输出范围内, 尚未发现有 P_0-I 特性曲线的扭折现象。所有这些电光特性, 和红外光的 GaAs-GaAlAs 双异质结激光器完全一样。

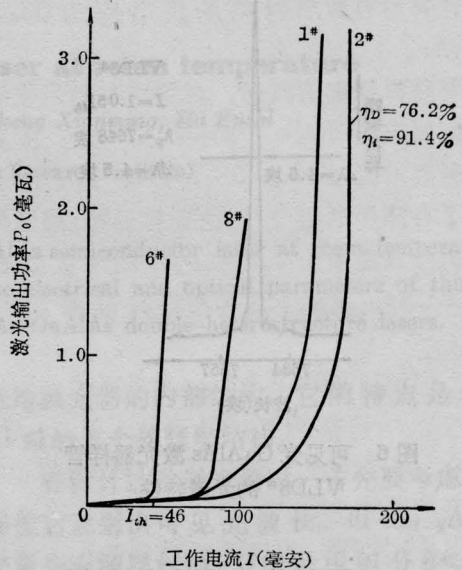


图 4 可见光 GaAlAs 激光器室温连续工作的 $P-I$ 特性曲线
样品 VLD1#、2#、6#、8#; 室温: 25°C

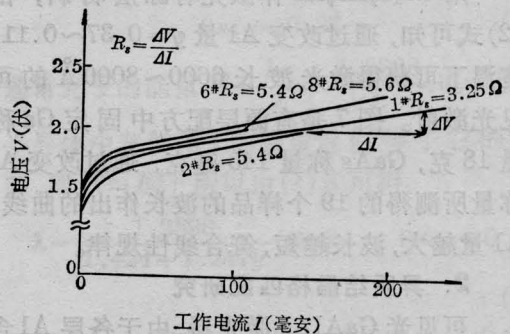


图 5 可见光 GaAlAs 激光器大电流工作下的 $V-I$ 特性曲线

图5表示激光器大电流工作下的 $V-I$ 特性,由阈值电流以上所对应的 $V-I$ 曲线线性部分,可分别计算出各个激光器的串联电阻 $R_s = \frac{\Delta V}{\Delta I}$ 。这种可见光GaAlAs激光器的串联电阻一般为3.25~8.0欧姆。用GDM 1000型双光栅单色仪测量其发射光谱,得知峰值波长 λ_p 一般为7600 Å,光谱线宽(半功率全宽) $\Delta\lambda < 20$ Å。图6是样管VLD8#的光谱特性,其峰值波长 $\lambda_p = 7648$ Å,线宽 $\Delta\lambda = 4.5$ Å。

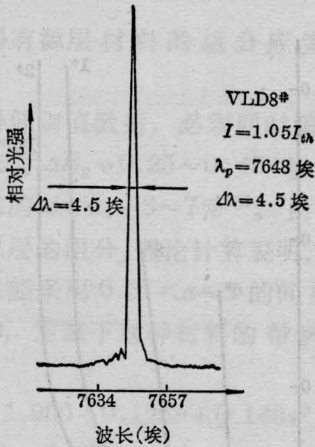


图6 可见光GaAlAs激光器样管VLD8#的光谱特性

四、器件物理研究与分析

1. 有源层组分与可见光波长的关系

用 $Ga_{1-y}Al_yAs$ 作激光有源层材料,由(2)式可知,通过改变Al量 $y = 0.37 \sim 0.11$,室温下可获得激光波长6600~8000 Å的可见光激射。图7是有源层配方中固定Ga称量18克,GaAs称量145毫克,通过改变Al称量所测得的19个样品的波长作出的曲线,Al量越大,波长越短,符合线性规律。

2. 异质结晶格匹配研究

可见光GaAlAs激光器,由于各层Al含量都很高,制作晶格匹配的异质结和良好的结晶质量实为困难。我们曾反复进行液相外

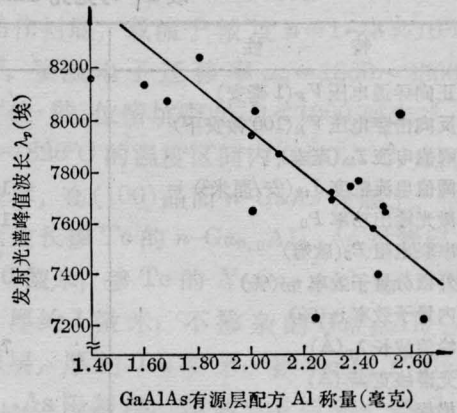


图7 可见光GaAlAs激光器有源层中Al称量与波长的关系

延试验,用 α 射线衍射仪测得我们这种异质结有源层与限制层之间的晶格失配平均 $\Delta a/a_0 \approx 6.5 \times 10^{-4}$,失配应力平均 $\delta \approx 9 \times 10^8$ 达因/厘米²。

3. 各外延层掺杂浓度的研究

为了减少激光器的串联电阻和热阻,必须提高各外延层的掺杂浓度。要达到这一目的,我们做过一系列试验,用掺Cr的高阻GaAs作衬底,分别生长各种掺杂剂的外延层,由霍尔效应实验和范德堡测试法,得出激光器中各外延层的载流子浓度为:掺Te的n型 $Ga_{0.9}Al_{0.1}As$ 过渡层, $n \sim 5 \times 10^{17}$ 厘米⁻³;掺Te的N型 $Ga_{0.47}Al_{0.53}As$ 限制层, $N \sim 4.28 \times 10^{17}$ 厘米⁻³;不掺杂的 $Ga_{0.83}Al_{0.17}As$ 有源层, $n \sim 8.3 \times 10^{15}$ 厘米⁻³;掺Zn的P型 $Ga_{0.47}Al_{0.53}As$ 限制层, $P \sim 2.5 \times 10^{18}$ 厘米⁻³;掺Ge的p型GaAs表面欧姆接触层, $p \sim 2.5 \times 10^{18}$ 厘米⁻³。

4. P型限制层掺杂剂与掺杂浓度的研究

由图8可知^[3],对于我们这种 $x = 0.53$ 的 $Ga_{0.47}Al_{0.53}As$ 限制层,材料的热阻率正处于最高峰,如果材料的掺杂浓度又很低,那么器件的串联电阻和热阻就会很大。

红外光GaAs-GaAlAs双异质结激光器中,P型GaAlAs限制一般都用Ge作掺杂

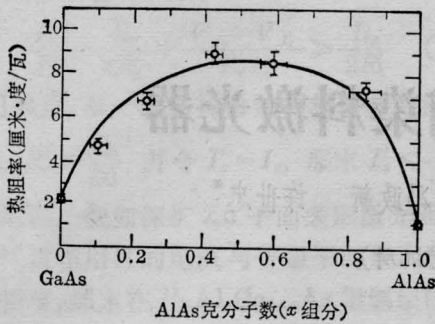


图8 Ga_{1-x}Al_xAs 材料的热阻率与 Al 克分子数 x 的关系曲线

剂^[4]。在可见光 GaAlAs 激光器中, P 型 Ga_{1-x}Al_xAs 层由于 x 值很高, 同样用 Ge 作掺杂剂, 反复试验测量, 只能获得 $P=6.85 \times 10^{15} \sim 9.4 \times 10^{16}$ 厘米⁻³ 的载流子浓度, 这样低浓度的外延层, 使器件的串联电阻和热阻较大, 器件难于室温连续工作。如果希望器件获得大功率输出而置于液氮 (77K) 工作

时, 掺 Ge 材料的载流子还会被冻析, 就更增大了串联电阻。我们在含高 Al 量的 P 型 GaAlAs 限制层中用掺 Zn 代替掺 Ge, 载流子浓度可提高 2 个数量级以上, 这就大大降低了器件的串联电阻和热阻, 容易获得室温连续工作的可见光 GaAlAs 激光器。

研制过程中, 我们得到上海复旦大学、北京有色金属研究院、长春物理所等单位的大力支援和本所内有关同志的积极协作, 在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] H. C. Casey Jr., M. B. Panish; *Heterostructure Lasers Parts*, 1978, p45, p193~194.
- [2] 《日经エレクトロニクス》编辑部, 1980, 2~18, p 96~107.
- [3] M. A. Afromowitz; *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**, 1292.
- [4] 郑广富等;《半导体光电》, 1982, No. 1, 6.

(上接第 694 页)

灭效应是与四磷酸盐晶体相似的。掺钕玻璃态四磷酸盐的受激发射截面虽低于晶态, 但在玻璃中 Nd³⁺ 的吸收谱带较宽, 有利于吸收和储存能量, 能成为高功率的小型激光器的固体材料。

但值得注意的是在制备这种激光玻璃过程中, 要特别采取除水工艺技术, 为的是进一步消除羟基 OH 与 Nd³⁺ 离子相互作用所引起的无辐射跃迁过程, 以便提高量子效率。对样品 4 和样品 7 在近红外区 3000(厘米⁻¹) 附近测出 OH 基的吸收系数分别为 $\delta_4=17$ (厘米⁻¹), $\delta_7=14$ (厘米⁻¹)。这两个数值都超过高 Nd 浓度的四磷酸盐晶体的数值。只要进一步改进制备过程中的工艺技术, 获得比晶体显示出更大优越性的大尺寸高质量激光材料是完全可能的。

作者向提供玻璃样品的林凤英、毛涵芬同志表示感谢。

参 考 文 献

- [1] B. R. Judd; *Phys. Rev.*, 1962, **127**, No. 3, 730. G. S. Ofelt; *J. Chem. Phys.*, 1962, **37**, 258.
- [2] L. A. Riseferg, M. J. Weber; *Progress in Optics*, **14**, E. Wolf. Ed. Amsterdam, The Netherlands: North Holland, 1975.
- [3] 干福熹;《科学通报》, 1978, No. 12, 724; 1979, No. 1, 59.
- [4] 吴光照, 张秀荣;《激光》, 1981, **8**, No. 5, 12~14.
- [5] K. Otsuka *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1975, **QE-11**, 330.
- [6] H. Y-P. Hong; *Mat. Res. Bull.*, 1975, **10**, 635~640.
- [7] Н. Е. Алексеев и др.; *Известия АН СССР Р, Сер. неорганические материалы*, 1980, **16**, 1056.
- [8] Ю. К. Воронько и др.; *ЖЭТФ*, 1976, **71**, 478.
- [9] P. L. Dexter; *J. Chem. Phys.*, 1963, **21**, 876.
- [10] S. Singh *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**, 1191.
- [11] H. G. Danielmeyer; "Advances in Lasers Vol. IV", Editors Levine, N. Y., 1975.
- [12] H. P. Weber; *Optical and Quantum Electronics*, 1975, **7**, 431.