

三种结构的室温连续工作

GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs 双异质结激光器的制造

北京大学物理系激光一组

提 要

我们采用宽接触、台面条形和质子轰击条形等三种结构制作 GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs 双异质结激光器,均已实现室温下连续工作。本文介绍了这三种结构激光器的工艺和一些测量结果。

我们采用正交设计的数学方法,找到多层液相外延的最佳条件,在 *n*-GaAs 单晶衬底上依次生长 ① *n*-GaAlAs, ② *p*-GaAs, ③ *p*⁺-GaAlAs, ④ *p*⁺-GaAs 等单晶薄层,形成二个异质结,制成的双异质结激光器阈值电流密度可以达 1000~2000 安/厘米^{2[1]}。为了实现室温下连续工作,积累我们自己的经验,采用不同结构以便相互比较是必要的。根据我们的具体条件采用三种结构,如图 1 所示。不同结构的激光器,欧姆接触工艺相同,*p*-GaAs 用 Au-Cr 合金、*n*-GaAs 用 Ag-Sn 合金^[2]。

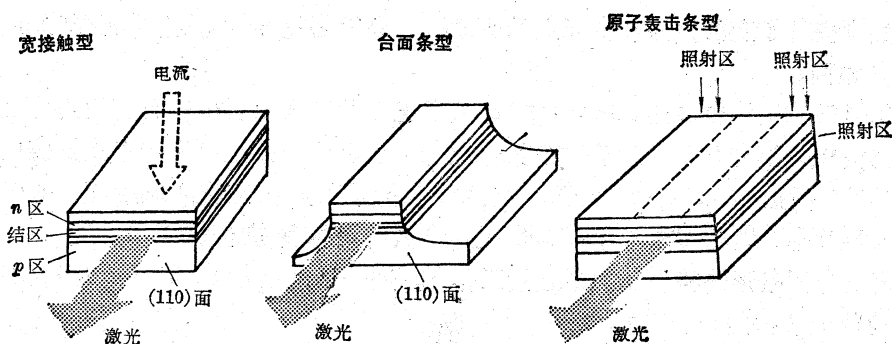


图 1 三种结构的双异质结激光器

一、宽接触双异质结激光器

宽接触双异质结激光器制管方法简单,参见资料[3]。激光器谐振腔长通常为 300 微米左右,宽度 50~100 微米。器件的装架方法,一是冷压:在二只银电极片之间,用 502 胶及环氧树脂固定;一是烧结:在二只镀锡银电极片之间,在真空中(优于 10⁻⁴ 托)350°C 烧结 5 分钟。这

样做成的激光器,其阈值电流密度取决于外延片的质量,好的外延片一般可达 1000~2000 安/厘米²的水平。如果能减小器件的热阻和串联电阻,便可以实现室温下连续工作^[3]。例如,外延片 C3-14, 阈值电流密度 < 2000 安/厘米², 第三层厚度~1 微米, 第四层厚度~3 微米; 测量 C3-14/l₂-5# 管子, 脉冲工作阈值 1100 安/厘米², 热阻 21.7 度/瓦, 串联电阻 0.89 欧^[4], 表明具有室温连续工作的条件。根据此测量结果, 我们用该外延片同一部位制作的 C3-14/l₂-4# 管子进行直流测量, 实现了室温连续工作, 有关的数据如下: 管芯面积 300 微米×200 微米, 冷压装架, 30°C 下直流阈值约 900 毫安。

实验表明, 宽接触双异质结激光器要实现室温连续工作, 条件很苛刻, 要求阈值小于 2000 安/厘米², 单位面积的热阻小于 10×10^{-3} 度/瓦, 串联电阻小于 3×10^{-4} 欧, 这就要求外延片质量好, 外延第四层薄而均匀, 管子正向压降小, 管芯与管座热接触良好等等。此外, 宽接触双异质结激光器激光模式结构复杂, 相干性差。优点是制作简单, 外延片制管率高, 输出光功率较大。

二、台面条形双异质结激光器^[5]

上述宽接触激光器的缺点可以认为是由于对有源区在平行于 $p-n$ 结方向上电学与光学限制不充分的缘故, 采用条形结构可以解决这个问题。条形激光器有三个优点^[3]: ① 减小激光器宽度可以减小扩展热阻, 因而减小激光器总热阻, 有利于室温连续工作; ② 条形激光器可以改善光束的空间分布, 有利于获得单横模输出; ③ 条形激光器有较窄的发射谱线宽度。

台面条形结构采用光刻方法制管。将已做好欧姆接触的管芯片置于甩胶机上, 在 p 侧表面甩上“金属光致抗蚀剂”2 次, 每次一分钟, 然后取下片子在红外灯上烘烤 4 分钟; 用接触式光刻机光刻条形图案, 所用模版条宽 60 微米, 利用莫尔条纹法可以对准模版使与片子的解理面很好地平行, 紫外灯曝光时间为 3 分钟, 用甲苯显影 3 分钟, 然后于 150°C 坚膜 2.5 小时。台面腐蚀的方法如下: 片子背面涂保护黑漆, 先放入王水中腐蚀 5 至 10 秒, 纯水冲净, 再放入 (311) 腐蚀液中 ($H_2SO_4:H_2O_2:H_2O=3:1:1$), 置于超声清洗槽内, 超声腐蚀约 5 分钟, 纯水冲净, 然后用甲苯煮刷去片子上的黑漆和台面上的光刻胶。最后解理装架, 采用冷压制管方法, 与宽接触型激光管相同。

用金相显微镜估测台高达 10~20 微米, 从激光器的近场图测出发光宽度约 40 微米, 扫描电子显微镜的观测清楚显示已经腐蚀到第一层外延层。台面条形激光器直流阈值电流降低至 250 毫安以下。例如 C3P2/l₁-1# 管子, 室温 28°C 连续工作, 其直流阈值为 220 毫安。另取一只台面条形激光器, 编号 C3P9/l₁-4#, 腔长 380 微米, 测得热阻为 30 度/瓦, 串联电阻为 0.54 欧, 表明台面条形结构易于实现连续工作^[4]。进一步减小条宽, 可以降低工作电流, 这方面的工作尚待继续努力。

台面条形激光器机械强度低, 很易损坏, 应改进装架方法。优点是制作工艺简单, 激光器性能得到改善。

三、质子轰击条形双异质结激光器

1. 制作

质子轰击 GaAs 和 GaAlAs 材料产生高浓度晶格缺陷, 可以使之变成高阻区。如在外延

片表面用一定厚度的高原子序数金属(如 Au、W 等)做成条形掩模, 则除条形区外的外延片其他部分均被轰成高阻, 可以做成条形激光器^[6]。

已报导 *p* 型和 *n* 型 GaAs 和 GaAlAs 单晶样品质子轰击后电阻率变化的数据^[7], 但是在高温下退火将使轰击样品的电阻率复原; 而高温处理则是制作欧姆接触所不可避免的, 因而从制管的角度, 外延片先做欧姆接触后再进行质子轰击是方便的, 可是样品表面的 Cr、Au、Ag 等金属薄层对质子轰击效果有什么影响我们不清楚。为了选择质子轰击条件, 我们选取二种样品做试验, 一种是表面扩散 Zn 的 *p*-GaAs 样品, 一种是把表面扩散 Zn 的 *p*-GaAs, 蒸镀 Cr-Au 合金后表面再镀银以模拟实际的外延片。我们安排一个正交试验 $L_4(2^3)$ ^[9], 二种样品作为第一个因素; 第二个因素为质子剂量, 根据样品的载流子浓度, 参照资料^[7]选定 1×10^{16} 质子/厘米² 和 5×10^{15} 质子/厘米² 二个位级; 第三个因素考虑质子能量, 根据外延层厚度并参照资料^[8], 选 400 千电子伏和 600 千电子伏二个位级。轰击试验是由中国科学院高能物理所 V-2 组在静电加速器上进行的。

表 1 $L_4(2^3)$

| 试 验 号 | 列 号 | | |
|-------|---------|---------|---------|
| | 剂 量 (1) | 能 量 (2) | 样 品 (3) |
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 1 | 2 |
| 3 | 1 | 2 | 2 |
| 4 | 2 | 2 | 1 |

剂量: 位级 1: 1×10^{16} 质子/厘米²; 位级 2: 5×10^{15} 质子/厘米²。

能量: 位级 1: 400 千电子伏; 位级 2: 600 千电子伏。

样品: 位级 1: *p* 型 GaAs, 表面扩 Zn。

位级 2: *p* 型扩 ZnGaAs, 蒸 Cr—Au 合金, 镀 Ag。

质子轰击后的四块样品, 进行载流子浓度和轰击深度的测量。图 2 表示 4# 样品质子轰击前后红外反射光谱的变化, 虚线表示轰击前的样品由于等离子体共振而引起的反射率的变化, 根据我们对 *p*-GaAs 的校准曲线^[10], 由反射极小位置测得样品表面浓度为 $\sim 2 \times 10^{19}$ /厘米³。实线表示轰击后的反射光谱, 干涉花纹的出现表明轰击层载流子吸收很小, 即载流子浓度下降, 因而反射极小, 位置移向长波, 在仪器测量范围内不出现, 这为进一步的 C-V 法测量所证实。根据干涉花纹的波数间隔可估算轰击深度约 8 微米, 这与样品剖面金相观测结果一致。轰击后样品的载流子浓度用电阻测量估算, 并由中国科学院半导体物理研究所协助用 C-V 法测量。为了避免接触电阻对电阻测量的干扰, 未做欧姆接触的轰击样品两侧沾镱作为欧姆接触, 而后测量电阻估算载流子浓度。电阻测量与 C-V 法结果一致, 列入表 2。由表 2 可以看出, 轰击深度与样品是否做了欧姆接触合金层无关, 100 千电子伏质子穿透深度略大于 1 微

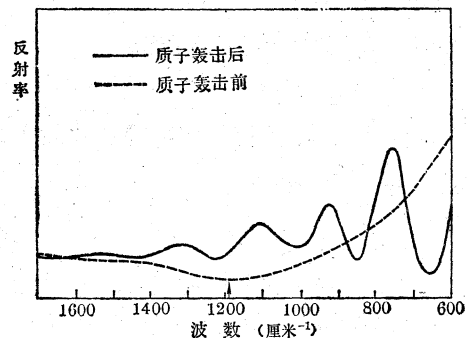


图 2 质子轰击前后 4# 样品红外反射光谱的变化

米;做了欧姆接触的 2[#]、3[#] 样品轰击后载流子浓度均约为 $\sim 10^{17}$ /厘米³, 而单晶样品 1[#]、4[#] 为 $\sim 10^{16}$ /厘米³, 可见欧姆接触合金层等对于质子轰击结果是有影响的, 但是轰击前后载流子浓度变化在二个数量级以上, 初步满足条形工艺的需要。

表 2 质子轰击测量结果

| 样 品 | 轰击前浓度* | 轰击后浓度 | 轰 击 深 度 | 测 量 方 法 |
|-----|---------------------------------------|---------------------------------------|---------|-------------|
| 1 | 1.8×10^{19} /厘米 ³ | 7.8×10^{15} /厘米 ³ | 6 微米 | 红外反射, C-V 法 |
| 2 | 8.5×10^{19} /厘米 ³ | 1×10^{17} /厘米 ³ | 6 微米 | 电阻测量, 剖面观测 |
| 3 | 8.5×10^{19} /厘米 ³ | 2×10^{17} /厘米 ³ | 8 微米 | 电阻测量, 剖面观测 |
| 4 | 1.8×10^{19} /厘米 ³ | 1.6×10^{16} /厘米 ³ | 8 微米 | 红外反射, C-V 法 |

* 轰击前浓度指表面浓度。样品实际浓度均为 $\sim 2 \times 10^{19}$ /厘米³

根据试验结果, 轰击外延片时选用质子剂量为 1×10^{16} /厘米², 质子能量则根据外延层厚度而定。外延片上用 $\phi 30$ 微米金丝垂直于解理面拉直粘牢作为条形掩模, 轰击后先在 $\sim 5 \times 10^{-4}$ 托低真空下蒸发一层银黑, 这样更易于区别条形区, 然后取下金丝, 解理制管, 冷压在银电极片间, 即得质子轰击条形激光器。

2. 特性

用外延片进行质子轰击, 制管工艺比较简单(静电加速器的操作、维护等工作不包括在内)。III L-5-2/质 6[#] 管子室温下连续工作的直流阈值 ~ 200 毫安, 并进行光谱、近场图样、发散角、扫描电子显微镜等一系列测量。从近场图样可以测出条形区宽约 40 微米, 而有源区距管芯表面约 12 微米^[10] (从扫描电镜也得 12~14 微米), 但轰击时质子能量为 700 千电子伏, 穿透深度约 8~9 微米, 因此高阻层只到达外延第四层开始处, 电流有扩展现象。测得热阻为 50 度/瓦, 串联电阻 ~ 0.42 欧, 而这是外延第四层厚达 12 微米的情况, 说明轰击后高阻层导热较好, 对减小器件热阻有贡献。利用扫描电镜可以清楚观察到质子轰击的效果, 图 3 所示为北京大学电子显微镜实验室拍摄的一只质子轰击条形激光器的扫描电镜照片。

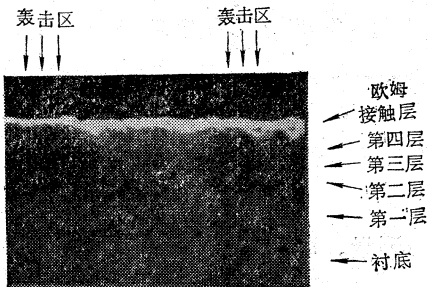


图 3 质子轰击双异质结激光器扫描电镜照片, 加正向偏压, 阴影区为轰击区

根据初步的实验结果, 表明质子轰击条形激光器散热条件更好, 有利于实现室温连续工作。粘金丝的掩蔽方法应改进, 质子轰击后激光器的性能还应进一步研究。

参 考 资 料

- [1] 北京大学物理系激光一组, 《GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs 双异质结激光器液相外延最佳条件》, 1975 年全国半导体激光技术交流会报告。
- [2] 北京大学物理系激光一组, 《GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs 双异质结激光器欧姆接触问题研究》, 1975 年全国半导体激光技术交流会报告。
- [3] 北京大学物理系激光一组, 《半导体激光器》讲义, 1974. 10.
- [4] 北京大学物理系激光一组, 《GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs 双异质结激光器的阈值, 光谱和扫描电镜测量》, 1975 年全国半导体激光技术交流会报告。
- [5] 京字 129 部队编, 《台面条形 GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs DH 激光器》, 《半导体通讯》, 1973 年, 第二期。

(下转第 12 页)

机器外型: $\phi 94 \times 3350$ 毫米;
 工作气压: $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He} = 23$ 兆;
 工作电压: 150 千伏;
 输出能量: 8~10 焦耳/脉冲;
 脉冲宽度: 100 微秒;
 峰值功率: 10^5 瓦;
 最大效率: 6.4%;
 发散角: 25 毫弧度;

工作寿命: 每工作日更换气体, 可发射 50000 脉冲以上。

激光打号机经过试生产的考验, 有下列效能与优点:

1. 激光打号机的打号速度为每分钟 15~18 套注射器(即 30~36 个字符), 比喷砂法可提高工效一倍以上;

2. 激光打号清洁而简便, 大大改变了原工序尘砂飞扬, 污染环境, 损害工人健康的落后面貌, 而且还可省去清洗成品的后继工序;

3. 激光打号属于“无接触”加工, 易于实现机械化、自动化;

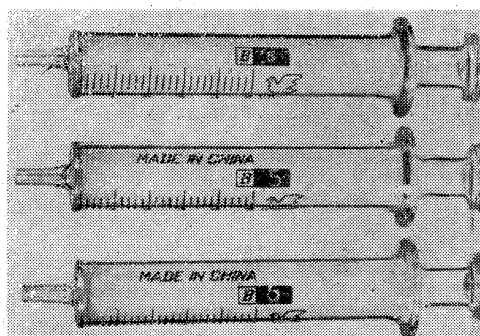
4. 激光打号采用金属掩模, 无损坏, 可长期使用, 而原喷砂法打号却必须消耗大批由人工雕刻的橡皮掩模, 费工耗时;

5. 激光打号机的耗电省, 约为原工序的十分之一;

6. 激光打号机所加工的字符痕迹可深入玻璃表面达 0.1 毫米以上, 字符轮廓清晰, 不变形, 字样美观, 便于识别和使用。

激光打号机的研制得到工人们的热情支持, 应用于试生产时更受到操作工人的欢迎, 他们赞扬说:“激光机, 高产优质耗电低, 清洁简便省力。撇撇电扭摆摆齐, 我们工人真欢喜。”

从采用激光新技术的事实, 使我们认识到要发展生产, 一定要技术革命, 技术革新。我们将在原来的基础上, 继续提高性能, 不断扩大应用范围, 进一步促进生产的不断发展。



样品比较。上面一支注射器是用激光打号的, 下面两支是用喷砂法打号的, 可以看出, 由于橡皮掩模的损坏, “B5”字样已明显变坏。

* * * * *

(上接第 20 页)

[6] J. C. Dymont et al.; *Proc. IEEE*, **60** (1972), No. 6, 726.
 [7] K. Wohlleben, W. Beck; *Zeit. für Natur.*, **21A** (1966), 1057.
 P. N. Favennec, D. Diquet; *Appl. Phys. Lett.*, **23** (1973), No. 10, 546.
 [8] 叶铭汉等, 《物理学报》**19**, (1963), 60.
 [9] 北京大学数力系高等数学教研室, 《正交表及其应用》, 1973, 11.
 [10] 北京大学物理系激光一组, 《砷化镓结型激光器研制过程中的观察和测量》, 1972 年砷化镓学术报告文集, 323.