

# 隐埋波导耦合 GaAs/(GaAl)As 纵模 可控集成激光器

潘慧珍 徐国华 肖宗耀 程宗权 沈彭年 富小妹 王惠民  
(中国科学院上海冶金研究所)

## 提 要

本文报告一种带输出波导的沟道条形集成激光器的设计、制作和测量结果。通过沟道内的凸透镜型二维无源波导,使两个激光器的光辐射相互耦合注入进行选频放大,从而获得单纵模激光输出。

## 一、引 言

近年来,由于发展单模光纤通信的需要,已研制出多种具有  $p-n$  结面侧向光场限制的半导体激光器<sup>[1]</sup>。这类激光器通常能以稳定的基横模工作,并且往往也具有单纵模输出。然而,应用在光纤系统中时,发现存在附加噪声。研究表明,附加噪声除来自光纤系统对激光器的光反馈所引起的激光输出起伏外<sup>[2]</sup>,还来自直流偏置下单纵模工作的激光器在直接高速调制时会出现多模振荡,并发生纵模间激射能量分配的变化<sup>[3]</sup>,从而使系统的色散和噪声均增加,限制了通信速率和容量。

利用光注入锁频技术可以有效地保证激光器在高速调制时仍保持稳定的单纵模工作<sup>[4]</sup>。但是用分立器件实现光注入锁频,需要挑选激射频率基本相同的器件,并严格控制 and 精细调节器件的工作温度及注入电流,以求得两个激光器之间的频率匹配。同时,光的耦合注入损耗也相当大。

作者前已报导一种单片集成的具有注入选频特性的波导耦合双台面型激光器。该器件的两个台面辐射的光,通过无源薄膜波导相互耦合注入,实现了单纵模输出<sup>[5]</sup>。但由于器件是  $100\ \mu\text{m}$  宽接触台面结构,阈值电流通常在 1A 以上。为降低阈值电流并改善器件的侧模特性,本文进一步设计并研制了一种带输出波导的沟道条形激光器,利用隐埋在衬底中的凸透镜型二维波导,实现了光的耦合注入,并初步获得了近于单纵模的激光输出。

## 二、器件的设计考虑

### 1. 器件结构的选择

图 1 是已报导的波导耦合双台面型激光器的结构及其  $p-n$  结垂直方向上的折射率和光场分布。(a)是器件结构,(b)是光场分布,(c)是折射率分布。由于在有源层和限制层之

间增加了折射率介于两者之间的另一波导层, 当有源层很薄, 其折射率与波导层折射率之差又较小时, 激射模功率大部分在波导层传播, 光传输率在 30% 以上。

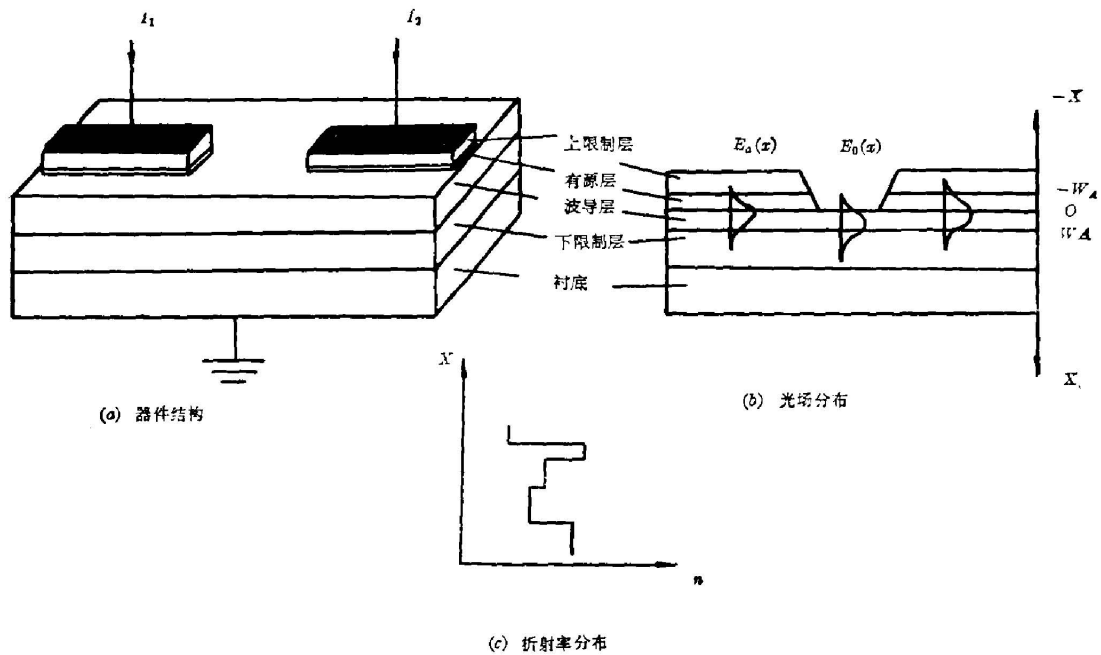


图 1 波导耦合双台面型激光器结构和折射率、光场分布

Fig. 1 The refractive index profile, optical field distribution, and configuration of the waveguide integrated twin-mesa laser

为了使器件的阈值电流降低, 我们进一步设计了如图 2 所示的结构。将宽接触台面型激光器改成平面型条形电极接触, 并将一维平面波导改为二维凸透镜型波导。

## 2. 波导参数的设计

在设计波导参数, 即各层材料的折射率和厚度时, 必需兼顾两个方面: 光场在有源层中的限制因子和波导层中的传输率。增大限制因子, 固然能降低阈值, 但使波导传输率降低。从图 3 中所示三层不对称 GaAs/(GaAl)As 平板波导内电磁场分布的本征方程计算结果可见, 限制因子的数值主要由含 Al 量较低的  $Al_yGa_{1-y}As$  层所决定。考虑到 (GaAl)As 材料的电导和热导均随含 Al 量的增加而降低, 且在高 Al 的 (GaAl)As 材料上不易制作良好的欧姆接触, 因此, 取上限制层的  $\Gamma$  值为 0.35。由图 3 还可见, 波导层  $y$  值若取 0.1, 则当有源层较薄时, 限制因子将急剧下跌而使阈值大为升高。显然  $y$  值以取 0.2 为宜。下限制层的  $x$  值相应取为 0.25。

决定了各层组份后, 按空气  $|Al_yGa_{1-y}As|Al_xGa_{1-x}As$  三层不对称波导, 计算得到器件的无源输出波导区的基模和一次模的截止厚度分别为  $0.42$  和  $1.35 \mu m$ , 取波导层厚度为  $1 \mu m$ , 使波导区只能传输基模。再采用文献[6]的四层复合波导模型, 计算得到器件的有源区基模存在的厚度应在  $0.06 \sim 0.5 \mu m$  之间。至于上、下限制层的厚度只要大于光场的穿透深度即可。一般取  $1 \mu m$ 。

以上设计是按平板波导模型考虑。当在平行  $p-n$  结面方向引入如图 2 的透镜型二维

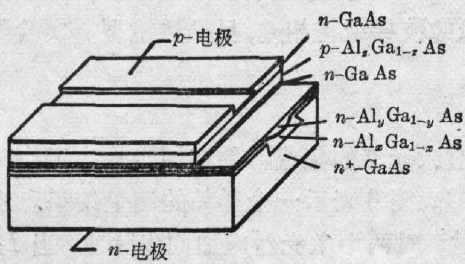


图 2 带凸透镜型输出波导的平面条形激光器结构

Fig. 2 The schematic diagram of the planar stripe laser with convex output waveguide

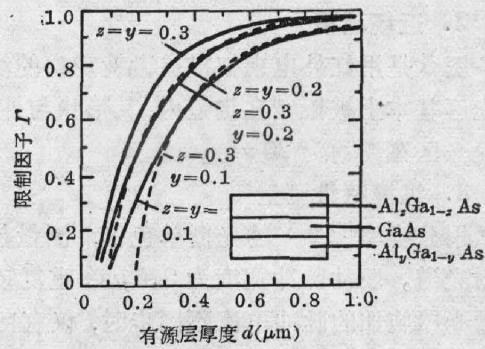


图 3 三层平板波导的限制因子与波导参数的关系

Fig. 3 The dependence of confinement factor on waveguide parameters for three layer slab-waveguide

波导层后，可作为厚度渐变的四层复合波导结构处理。我们对圆弧形渐变波导进行了计算机运算，得到有效折射率的侧向分布曲线，再用有效折射率法算得支持基模的侧向导宽度应小于  $6\mu\text{m}$ 。为获得较好的电流限制，电极条宽也应小于  $6\mu\text{m}$ 。但由于高阶模的光场限制因子小于基模，实际上容许的侧向尺寸可稍大于  $6\mu\text{m}$ 。详细的器件结构参数最佳化模拟设计结果，将另文报导。

### 三、实验和结果

#### 1. 器件制作

在(100)面  $n$  型 GaAl 衬底上，沿 $\langle 011 \rangle$ 方向用常规光刻法刻蚀出宽  $10\mu\text{m}$ 、深  $3\sim 5\mu\text{m}$  的沟道。利用液相外延时沟内的生长速率比平面上快得多的特点，一次连续生长五层结构。由于起始生长时沟道肩部略有回熔，实际的波导宽约为  $15\mu\text{m}$  左右。典型的外延片剖面如图 4 所示。

外延片表面以光刻胶为掩膜，进行化学选择腐蚀，刻去  $10\mu\text{m}$  宽的条形电极区内的  $n$ -GaAs 表面层。去胶后蒸 Au-Zn 制作欧姆接触，然后进行第二次化学选择腐蚀，刻去激光器腔面。在  $n$  面制出 Au-Ni-Ge 欧姆接触后，解理出包含一对或单个激光器的管芯。详细的外延生长条件和制管工艺已在前文报导<sup>[7, 8]</sup>。

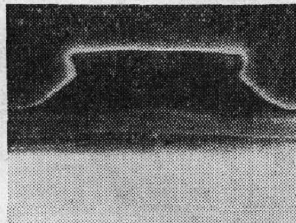


图 4 外延片沟道五层结构的 SEM 照相  
Fig. 4 SEM photo of the five layered channel substrate epitaxial wafer



图 5 小电流注入时的近场发光图象  
Fig. 5 The near-field pattern at low injection

## 2. 近场观察

图5是用红外电视扫描显微镜观察的小电流注入时器件解理端面上的发光图象。可见,发光区基本上被限制在沟道内,其形状与外延生长的波导结构相应,呈凸透镜型。实验测量的发光区宽度约为  $20\ \mu\text{m}$ 。

## 3. 纵模特性测量

用分辨率  $< 2\ \text{\AA}$  的光栅单色仪,测量包含一对激光器的集成器件在同步脉冲工作时的激射光谱。驱动脉冲宽度为  $0.5\ \mu\text{s}$ , 重复频率  $1\ \text{kHz}$ 。图6表示一个样品的测量结果。当两个激光器施加的脉冲电流不同步时,仅有自发辐射。对两个激光器施加同步脉冲,当  $I_1$  为  $400\ \text{mA}$ ,  $I_2$  为  $510\ \text{mA}$  时,器件开始受激,其激射光谱如图6(a),是多纵模激射,其中波长  $8689\ \text{\AA}$  的纵模最强。当  $I_1$  为  $400\ \text{mA}$ ,  $I_2$  为  $600\ \text{mA}$  时,  $8689\ \text{\AA}$  处的纵模强度急剧增加,其它纵模受抑制而发展成单纵模激射,半宽度为  $1.6\ \text{\AA}$ , 见图6(b)。保持单纵模激射的电流调节范围约为  $30\ \text{mA}$ 。

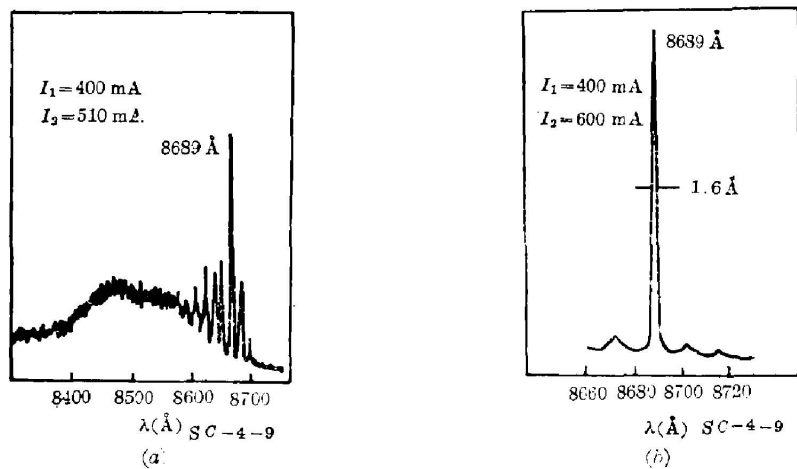


图6 集成器件同步脉冲工作时的激射光谱

Fig. 6 Lasing spectra of the integrated device under synchronous pulse operation

## 四、讨 论

### 1. 有源层厚度与模功率传输率、端面反射率及阈值的关系

当器件的无源波导层厚度一定时,有源层的厚度是决定器件的光传输率和阈值的关键。为简单起见,本文以图1的平板波导模型来讨论。采用文献[9]的方法,分别解出器件的有源部分和无源波导部分的电场分布  $E_a(x)$  和  $E_p(x)$ , 从激光器耦合输入波导的模功率传输率( $T$ )为:

$$T = \left[ \int_0^{\infty} E_a E_p^* dx \right]^2 / \int_{-\infty}^{\infty} E_a E_a^* dx \int_{-\infty}^{\infty} E_p E_p^* dx,$$

光场在有源层内的限制因子( $\Gamma$ )为:

$$\Gamma = \int_{-w/2}^0 E_a E_a^* dx / \int_{-\infty}^{\infty} E_a E_a^* dx,$$

腐蚀端面的模功率反射率( $R_e$ )可表示为:  $R_e = \Gamma R$ ,  $R$  是解理端面反射率, 等于 0.31。

设波导层厚度为  $1 \mu\text{m}$ , 计算得到的有源层厚度与  $T$ 、 $R_e$  的关系示于图 7。随着有源层厚度的增加,  $T$  降低,  $R_e$  增大。

根据下式计算了激光器的阈值, 示于图 8:

$$J_{th} = \frac{d}{\eta} \left\{ 4.5 \times 10^8 + \frac{20\alpha}{\Gamma} \left[ 1 - \frac{\ln(R R_e)^{1/3}}{\alpha L} \right] \right\},$$

计算时取内量子效率  $\eta$  为 0.5, 吸收系数  $\alpha$  为  $40 \text{ cm}^{-1}$ , 腔长  $L$  为  $350 \mu\text{m}$ 。

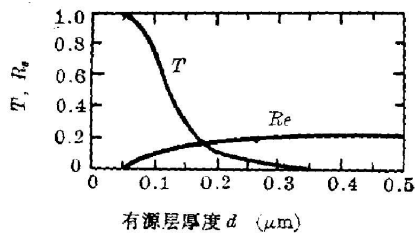


图 7 有源层厚度  $d$  与模功率传输率  $T$ 、模功率反射率  $R_e$  关系

Fig.7 The dependence of the mode power transfer efficiency  $T$  and the mode power reflectivity  $R_e$  on the active layer thickness  $d$

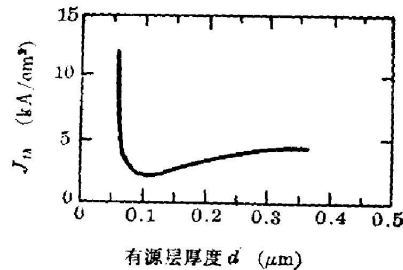


图 8 有源层厚度  $d$  与  $J_{th}$  关系

Fig. 8 The dependence of  $J_{th}$  on the active layer thickness  $d$

由图 7、图 8 可见, 有源层厚度取  $0.1 \sim 0.15 \mu\text{m}$  为最佳。此时, 若电极条宽为  $10 \mu\text{m}$ , 则阈值电流为  $80 \text{ mA}$  左右。但从图 4 可见, 目前器件的实际有源层厚度达  $0.3 \mu\text{m}$ , 且实验测量表明, 由于电流的侧向扩散, 实际作用区宽度增加到  $30 \mu\text{m}$  左右, 因而使器件的阈值电流增加至  $500 \text{ mA}$  左右。因此, 必需进一步改善外延生长的厚度控制和减小电极条宽。

## 2. 纵模的选择性

本集成器件包含两个有源谐振腔, 并具有纵模选择性。设两个谐振腔的腔长分别为  $L_1$  和  $L_2$ , 可认为有两种情况:

(1) 当  $L_1/L_2 > 2$  时, 其相应的纵模距  $\Delta\lambda_2/\Delta\lambda_1 > 2$ , 则集成器件的纵模间距应取决于  $L_2$ 。如增大  $L_1/L_2$  的比值, 以致使  $\Delta\lambda_2$  超过增益谱的宽度, 即可选出单一的纵模。但在这种情况下, 因  $L_2$  过短, 在  $L_2$  腔内所能获得的单程增益将不能满足受激振荡所要求的增益条件, 因此  $L_2$  对  $L_1$  的作用相当于一个电流控制的 F-P 外调制腔。

(2) 当  $L_1 \approx L_2$  时, 两个激光器可视为基本相同。在施加同步脉冲电流时, 它们将发射相似的荧光光谱, 其发射光的一部分通过无源波导而相互注入。因此, 就每个激光器而言, 激励条件除电注入外, 还有光注入。其增益谱不仅取决于电注入水平, 而且取决于注入光的场强和频率。由于能量较高的光子在波导中的传输损耗较大, 注入光的光谱峰值将移向长波长一边, 从而使被注入激光器的增益谱峰值移向长波。随着注入电流的增加, 注入的光场强度也增加, 受激振荡首先在长波长一边的某几个谐振频率处发生, 正如图 6(a) 所示。由于两个激光器基本等同, 它们的主模频率也十分相近。此时, 若保持激光器 A 的电注入水平不变, 增加激光器 B 的注入电流, 则注入到 A 中的主模光强增加, 反过来又促使 B 中该频率处的感应受激增加, 产生正反馈。因而该模式的光在模式竞争中不断得到加强, 而其它

模式将猝灭,形成单纵模输出。

### 3. 保持单纵模激射的注入电流调节范围

为阐明影响电流调节范围的因素,我们观察了不同注入电流下,平面波导集成条形激光器两个端面上的近场图象与纵模谱的对应关系。初步实验表明,单纵模工作条件的破坏与激光器存在双光丝激射有关。详细的研究结果即将另文报导。我们认为,产生双光丝激射的原因是器件的条宽过大。

根据以上分析,要进一步提高集成器件的单纵模工作范围,必需改进制造工艺,使波导尺寸符合设计要求。此外,由于两个激光器之间没有光隔离器,在动态工作条件下,其相互影响程度也有待研究和解决。

## 五、结 语

应用瞬态场耦合原理和平板波导模型,设计了一种波导耦合的 GaAs/(GaAl)As 沟道条形集成激光器。

利用沟道衬底液相外延和化学选择腐蚀,成功地制作了凸透镜型二维波导,并实现了两个平面条形激光器的单片集成。实验证明,通过调节集成器件两个有源区的注入电流,可产生选频放大而获得单纵模激光输出。

本工作与王德宁同志进行了有益的讨论并由他协助进行计算机运算;唐圣明、林绥娟同志进行了外延片扫描电镜测量;朱黎明同志承担芯片热压装架工作,特此一并致谢。

## 参 考 文 献

- [1] D. Bo'ez, *Proc. S. P. I. E.*, 1980, **224**, 103.
- [2] O. Hirota, Y. Suematsu: *IEEE J. Q. E.* 1979, **QE-15**, No. 3 (Mar), 142.
- [3] K. Seki, H. Yanai *et al.*: *Technical Digest, Third Intern. Conf. on Integrated Opt. and Opt. Fiber Commun.*, (San Francisco, California 1981, Mh4).
- [4] J. Yamada *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1980, **19**, No. 4 (Apr), 689.
- [5] 肖宗耀等;《光学学报》, 1983, **3**, No. 2 (Mar), 107.
- [6] P. K. Tien *et al.*; *Appl. Opt.*, 1973, **12**, No. 8 (Aug), 1909.
- [7] 徐国华等;《上海金属,有机分册》, 1982, **3**, No. 4, 26.
- [8] 潘慧珍等;《科学通报》, 1981, **26**, No. 18 (Sep), 1141.
- [9] J. L. Merz, R. A. Logan *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1979, **QE-15**, No. 2 (Feb), 72.

## Channel-substrate planar-stripe GaAs/(GaAl)As integrated lasers with a buried output waveguide

PAN HUIZHEN XU GUORUA XIAO ZONGYAO CHEN ZONGQUAN

SHEN PENGNIAN FU XIAOMEI AND WANG HUIMIN

(*Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica*)

(Received 15 November 1982, revised 21 March 1983)

### Abstract

In order to develop single mode fiber optical communication, an integrated channel-substrate planar-stripe GaAs/(GaAl)As laser coupled with a two dimensional waveguide was designed and fabricated.

The waveguide structure of the integrated device was designed on the base of evanescent field coupling, and the optical parameters including the refractive index and the thickness for each layer were estimated from the numerical solution of the eigenvalue equation for three and four layer slab waveguide. A reversed  $p-n$  junction was adopted for current confinement.

The device was fabricated from an epitaxial wafer grown by liquid phase epitaxy on a channelled substrate with the desired layers, compositions, and carrier concentrations.

Selective chemical etching and conventional device technology were used to fabricate the twin-laser with the two dimensional convex waveguide buried in the channel.

Mode selection and amplification due to optical injection was demonstrated from the spectrum measurement, and single longitudinal mode oscillation was achieved by suitable adjusting the synchronous pulse currents applied on the both active regions.

Finally, the longitudinal mode selectivity and the relation of the active layer thickness to the mode power transfer efficiency and threshold current density are discussed.