

漏光波导机制四元系半导体激光器

晏长岭

钟景昌

(中国科学院长春物理研究所 长春 130023) (长春光学精密机械学院国家重点实验室 长春 130022)

提要 给出了漏光波导机制在四元系长波长半导体激光器中的一个应用实例。从理论上证明了漏光波导机制在四元系半导体材料中应用的可行性,并设计了相应结构的激光器件;然后由 LPE 技术获得这一器件。实践证明,理论和实验结果符合得很好。

关键词 半导体激光器,漏光波导,四元系,长波长,LPE

半导体激光器的发展,一方面是依靠新材料和新工艺的不断探索,另一方面则是依靠对激励过程,特别是对波导结构及其传播模式的深入研究取得的。在半导体激光器中由于引入了光波导,大幅度改善了激光器件的性能,这一点在 DH 激光器的发展过程中体现得最为明显。近年来由于光通讯、光信息处理等方面的需求,人们开始关注漏光波导在器件设计中的作用^[1,2]。

对四层平板漏光波导进行分析,从电场和磁场在各界面上连续的边界条件,推导出了它的本征方程,利用数值计算方法对发射波长为 1.55 μm 激光的四层漏光波导结构进行了器件设计。在实验上,采用过冷法和两相溶液法相结合的液相外延技术生长了这一结构的器件。实验结果表明这种漏光波导机制在改善器件性能方面起到了作用:器件总的光波导层增厚,从而降低了端面临界光通量,实现了器件的较高的光功率输出。

1 漏光波导的理论分析及器件结构设计

我们所研究的激光器,其波导是由有源层和漏光波导层组成的。如图 1 所示,设它们的厚度和折射率分别为 $d_2, n_2; d_3, n_3$,两个限制层相对有源层和漏光波导层可视为无限厚,只设它们的折射率分别为 n_1, n_4 。通过调整 d_2, d_3 的值可以使传播常数 β_z 或模式折射率 $N = \beta_z/k_0$ (其中 $k_0 = 2\pi/\lambda_0, \lambda_0$ 为真空光波长)落入图 2 中的 2 区。在图 2 中,1 区, $n_2 > \beta_z/k_0 > n_3$,漏光波导层因有指数衰减解而起限制作用,传播层的厚度为 d_2 ,称为原厚传播;2 区, $n_3 > \beta_z/k_0 > n_1 = n_4$,漏光波导层因有简谐解而起传播作用,传播层的厚度增为 $d_2 + d_3$,称为漏光波导增厚传播;3 区, $n_1 = n_4 > \beta_z/k_0$,四层皆有简谐解,导波模式截止,出现辐射模式。只有当 $n_2 > n_3 > \beta_z/k_0 > n_1 = n_4$ 时^[3],才能使所加上的漏光波导层起到传播模式的作用,即漏光波导层起作用。

对 $n_2 > n_3 > \beta_z/k_0 > n_1 = n_4$ 有

$$\begin{aligned} \gamma_1^2 &= \beta_z^2 - k_0^2 N_1^2 > 0; & k_2^2 &= k_0^2 N_2^2 - \beta_z^2 > 0; \\ k_3^2 &= k_0^2 N_3^2 - \beta_z^2 > 0; & \gamma_4^2 &= \beta_z^2 - k_0^2 N_4^2 > 0; \end{aligned}$$

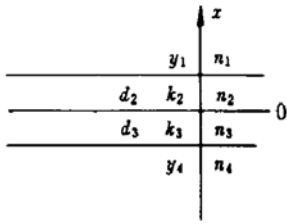


图 1 波导结构图

Fig. 1 Schematic diagram of waveguide structure

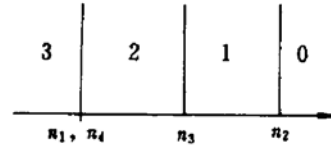


图 2 传播模式图

0 区:无解;1 区:原厚传播;2 区:漏波导增厚传播;3 区:辐射解

Fig. 2 Mode-travelling diagram

0: no solution; 1: travelling normally;

2: travelling in the leaky waveguide; 4: radiation solution

由于在两个限制层中光场是指数衰减解,因此可以令电场分别为

$$E_{y_1}(x) = A_1 \exp[-\gamma_1(x - d_2)] \quad x \geq d_2;$$

$$E_{y_4}(x) = A_4 \exp[\gamma_4(x + d_3)] \quad x \leq -d_3;$$

而在内层的有源层和漏光波导层中光场应为简谐解,即光场可以表示成正弦项与余弦项的和,因此可以在这两个区域内令电场为:

$$E_{y_2}(x) = A_2 \cos(k_2 x) + B_2 \sin(k_2 x) \quad 0 \leq x \leq d_2;$$

$$E_{y_3}(x) = A_3 \cos(k_3 x) + B_3 \sin(k_3 x) \quad -d_3 \leq x \leq d_2$$

然后由 $H_z(x) = i/\omega\mu_0 dE_y(x)/dx$ 可以求出磁场的分布情况.令电场和磁场在各界面上连续,可以给出诸系数的齐次线性方程组.解这一方程组可以得出各系数之间的关系,以及这一漏光波导的本征方程

$$\tan(k_2 d_2) = \frac{\gamma_1 k_2 [k_3 + \gamma_4 \tan(k_3 d_3)] + k_2 k_3 [\gamma_4 - k_3 \tan(k_3 d_3)]}{k_2^2 [k_3 + \gamma_4 \tan(k_3 d_3)] - \gamma_1 k_3 [\gamma_4 - k_3 \tan(k_3 d_3)]}$$

当 $n_1, n_4, n_2, n_3, d_2, d_3$ 确定后,可以给出这一结构的传播常数 β_z .

设计了发射波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的器件,具体的结构参数为

$$n_1 = n_4 = 3.20; \quad n_2 = 3.53; \quad n_3 = 3.52; \quad d_2 = 0.5 \mu\text{m}; \quad d_3 = 1.0 \mu\text{m}$$

把它们代入到本征方程中不能得到关于 β_z 的显函数,但可以通过计算机进行数值计算求解 β_z 的值.其数值计算得出 $\beta_z = 13.4424$.

由 β_z 求出相应的有效折射率

$$N = \beta_z/k_0 = 3.32$$

可见, β_z/k_0 正好满足 $n_1 = n_4 = 3.20 < \beta_z/k_0 = 3.32 < n_3 = 3.52 < n_2 = 3.53$ 的漏光波导传播的条件.这样,在理论上说明了漏光波导机制在四元系长波长半导体激光器件中可以实现.

接下来,对器件传播模式的截止条件进行分析计算.由于漏光波导层与有源层的折射率相差很小,因此可以把这一四层漏光波导结构近似视为一个对称三层平板波导结构分析其截止条件.对称三层平板光波导的截止条件为

$$D = \frac{m\lambda_0}{2 \times (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}$$

针对设计的器件结构

$$\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}; \quad n_1 = 3.52; \quad n_2 = 3.20$$

代入以上的截止条件得: $m = 0$, 对称三层平板波导基模不截止; $m = 1, D_1 = 0.529 \mu\text{m}$; $m = 2$,

$D_2 = 1.058 \mu\text{m}; m = 3, D_3 = 1.587 \mu\text{m}.$

在器件结构中, $d_2 + d_3 = 1.5 \mu\text{m} < 1.587 \mu\text{m}$, 因此在此光学谐振腔中只可能存在基模 TE_0 , 一阶模 TE_1 , 二阶模 TE_2 , 三阶模以上的高阶模式被截止了。可见, 这样设计的漏光波导结构也有利于器件的模式选择, 使器件在较低阶模式条件下运转。

2 器件的制备

为了实现所设计的器件结构, 并尽可能地减小杂质、缺陷、晶格失配等因素对外延生长质量产生的不良影响, 采用两相溶液法^[4]和过冷法相结合的 LPE 技术。外延层的生长结构如图 3 所示。外延生长的温度在 $600 \sim 650^\circ\text{C}$ 之间。温度超过 650°C 时, InP 表面的热蚀作用会迅速增加, 生长温度低于 600°C 时, 将引起溶液中的 P 的过重消耗, 使得外延层组分的变化成为一个严重问题。用脱氧处理的 In 配制生长各层的溶液, 650°C 熔源半小时, 然后以 $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率降温生长, 连续生长 $n\text{-InP}$ ($n = 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 限制层, 温度降至 637°C 时生长漏光波导层 $\text{In}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{As}_{0.71}\text{P}_{0.29}$ (非掺杂)、有源层 $\text{In}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}_{0.64}\text{P}_{0.36}$ (非掺杂)、抗回熔层 $\text{In}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{As}_{0.71}\text{P}_{0.29}$ (非掺杂)、 $p\text{-InP}$ ($\text{Zn}, P = 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 限制层、重掺杂顶层 $P^+\text{-In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}_{0.72}\text{P}_{0.28}$ ($\text{Zn}, P = 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$)。

有源层的生长温度为 630°C , 其生长厚度 d 与生长时间 t 的关系大致如图 4 所示。生长过程在过冷条件下进行, 过冷度大约为 5°C 。外延片生长质量采用双晶 X 射线衍射法对生长的晶格进行失配检测, 结果如图 5 所示。

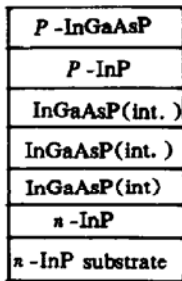


图 3 外延结构图

Fig. 3 Schematic diagram of epitaxial structure

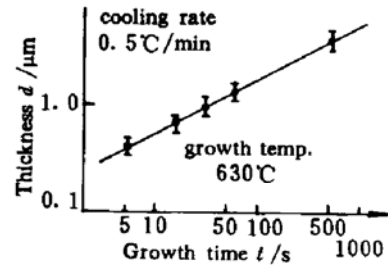


图 4 有源层生长厚度 d 与生长时间 t 的关系

Fig. 4 Growth thickness d of active layer as a function of growth time t

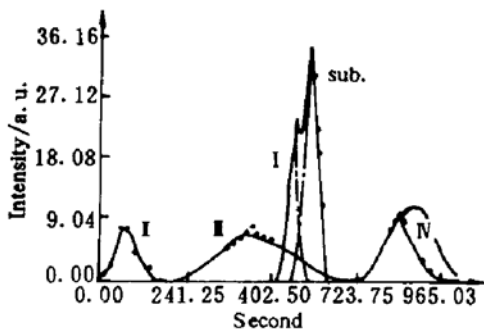


图 5 双晶 X 射线衍射测试图

Fig. 5 Rocking curves of double-crystal X-ray diffractometer



图 6 电子束感生电流

Fig. 6 The EBIC photograph

失配度 $\Delta a/a = [(a_{\text{InGaAsP}} - a_{\text{InP}})/a_{\text{InP}}] = 10^{-3}$ 左右, 满足要求。用金相显微镜观察外延片, 表面光滑, 不带 In 的痕迹。显结后观察, 各外延层界面清晰平直。用扫描电子显微镜摄取外延层的电子束感生电流 (EBIC) 照片如图 6 所示, $p-n$ 结正好落在非掺杂的 InGaAsP 有源层内。

3 器件的性能

外延片经光刻后解理成腔长为 $380 \sim 390 \mu\text{m}$, 条宽为 $120 \mu\text{m}$ 左右的宽接触型器件, 采用脉冲工作方式, 脉冲宽度为 $210 \sim 250 \text{ ns}$, 重复频率为 $8 \sim 9 \text{ kHz}$ 。

(1) 电学性能 从器件典型的电流-电压曲线测出的器件正向微分电阻为 3Ω 左右, 与普通的双异质结激光器件类似。可见漏光波导的引入对器件的电学性能并没有造成大的影响。

(2) 光谱性能 图 7 是 $1.55 \mu\text{m}$ 漏光波导结构器件的光谱特性图。实验结果表明, 在阈值电流附近时, 大部分的器件呈现出单模激射, 而当工作电流加大后, 出现多模运转, 同时, 光谱峰值波长向短波方向有轻微的漂移。同一外延片上的不同部位的器件, 激射波长起伏在 20 nm 以内。证明外延生长具有较好的均匀性。

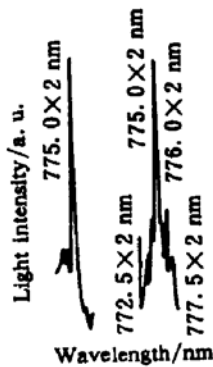


图 7 光谱特性

Fig. 7 The emission spectrum of lasers

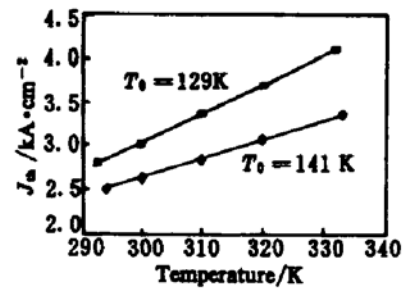


图 8 阈值电流密度与温度的关系

Fig. 8 Dependence of threshold current density on temperature

(3) 阈值电流密度与温度的关系 图 8 表示不同器件在不同环境温度下的阈值电流密度分布情况, 由此测量的结果表明, 器件的特征温度 T_0 在 $100 \sim 130 \text{ K}$ 左右。(在通常的半导体激光器件中 T_0 值为 $40 \sim 100 \text{ K}$ 左右^[4])。

(4) 端面退化实验 器件在三倍阈值条件下工作数小时后, 只有很少的器件出现端面退化现象。可见器件端面损伤的敏感程度降低了。

(5) 器件的输出光功率 器件的阈值电流在 $1.6 \sim 2.1 \text{ A}$ 之间, 集中在 2.0 A 左右, 对应的阈值电流密度为 $2.7 \sim 3.5 \text{ kA/cm}^2$ 。用 InGaAs 探测器作为器件的接收元件, 配以低噪声放大器和指示器, 经标准功率装置标定后, 测得为 3 W 左右。

4 总结与讨论

实验结果表明, 由于在器件中引入了漏光波导机制, 从而改善了器件的性能。一方面提高了器件的特征温度 T_0 , 达到 $100 \sim 130 \text{ K}$ 左右, 使器件具有较好的温度稳定性。另一方面, 由于增大了光出射面积, 降低了端面光功率流密度, 减小了器件的端面退化效应, 从而实现了较高的脉冲光功率输出; 同时也有利于器件的模式选择, 使器件在较低阶模式下运转。

漏光波导结构相对传统的全反射波导结构有更优越的模式选择能力^[5],它主要是基于:增益层中存在的不同振荡的横向模式有不同的反射损耗,在有了与增益层紧密相连的漏光波导层时,在这些模式当中,只有基横模具有最小的泄漏损耗,因此是最易于激射的,这样就起到了模式选择的作用。在侧向方向,漏光波导机制也有很好的应用^[6],侧向漏光波导结构展示了稳定的基模运转和高于普通的损耗波导结构 1.5 倍的光功率输出。漏光波导机制不仅在横向与侧向结构中起到了很好的作用,在新型的垂直腔面发射激光器中也有望被用来实现单个或列器件的高光功率单基模输出^[7]。

参 考 文 献

- 1 Guang S. He, Chan F. Zhao, Chi-Kyun Park *et al.*. Dye film leaky waveguide laser. *Opt. Commun.*, 1994, 111 (1/2): 82~85
- 2 V. Priye, B. P. Pal, K. Thagarajan. Analysis and design Of a novel leaky YIG film guided wave optical isolator. *J. Lightwave Technol.*, 1998, 16(2): 246~250
- 3 Guo Changzhi. Mode Theory of Semiconductor Laser. Beijing: People's Post and Telecommunication Press, 1989 (in Chinese)
- 4 T. P. Pearsall. GaInAsP Alloy Semiconductors. Beijing: People's Post and Telecommunication Press, 1990. 40~58 (in Chinese)
- 5 Guang S. He, Raffaella Signorini, Paras N. Prasad. Longitudinally two-photon pumped leaky waveguide dye film laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, 34(1): 7~13
- 6 Isao Kidogachi, Satoshi Kamiyama, Hideto Adachi *et al.*. High power single mode operation of AlGaInP visible laser diode with lateral leaky waveguide structure. *IEEE Photon. Technol.*, 1994, 6(6): 684~686
- 7 Weng W. Chow, Kent D. Choquette, Mary H. Crawford *et al.*. Design, fabrication, and performance of infrared and visible vertical-cavity surface-emitting lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, 33(10): 1810~1824

Quaternary Semiconductor Lasers with Leaky Waveguide Mechanism

Yan Changling

(Changchun Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130023)

Zhong Jingchang

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, National Key Lab, Changchun 130022)

Abstract A practical application of leaky waveguide mechanism in quaternary long wavelength semiconductor lasers is given in this paper. It theoretically describes the possibility for application of the leaky waveguide mechanism in the quaternary semiconductor materials and the semiconductor long-wavelength laser devices with the related structure are designed. The devices are then grown by LPE technique. It shows that the theory and experiments agree well with each other. Therefore, the leaky waveguide mechanism is used in the semiconductor long-wavelength lasers theoretically and experimentally. This is a successful effort for the further applications of the leaky waveguide mechanism in other kinds of semiconductor lasers.

Key words semiconductor lasers, leaky waveguide, quaternary, long-wavelength, LPE