

InGaAsP/InGaP/AlGaAs 大光学腔 量子阱激光器的优化

曹玉莲[†] 李 慧 何国荣 王小东 王 青 吴旭明 宋国峰 陈良惠

(中国科学院半导体研究所 纳米光电子实验室, 北京 100083)

摘要: 本文对 808nm InGaAsP/InGaP/AlGaAs 材料的大光学腔结构激光器进行了理论优化. 为确保激光器是单横模激励, 我们使用传递矩阵的方法, 分别计算了限制层和欧姆接触层厚度对 TE₂ 和 TE₀ 模式损耗的影响, 对上下限制层和欧姆接触层的厚度进行了优化, 其优化后的厚度分别为 0.8、0.6 和 0.11 μm . 高折射率的欧姆接触层被低折射率的限制层和金属层包围形成了无源的次级波导, 泄漏波在次级波导中形成了寄生模式. 欧姆接触层厚度对模式损耗的影响是周期性的, 当欧姆接触层厚度为该模式的 $\lambda_1/4$ 时发生第一次共振, 发生共振的间隔为其垂直注入的泄漏波波长 λ_1 的一半.

关键词: InGaAsP/InGaP/AlGaAs; 限制层厚度; 欧姆接触层厚度; 共振

PACC: 4255P; 4260B

EEACC: 4320J

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)12-2173-05

1 引言

高功率半导体激光器的结构设计, 主要是指横向方向即沿外延材料生长方向的设计, 其中, 有源区的设计, 如量子阱的厚度、应变等参数早已被广泛研究^[1]. Botez 等人首先对宽波导大光学腔 (LOC) 结构激光器的设计从理论上进行了分析总结, 特别是对波导层厚度的优化提出了简单的公式^[2,3]; 除了对量子阱激光器的有源区和波导结构进行了优化设计外, Liu 等人首先对限制层进行了优化设计^[4,5], 但是他们都没有涉及欧姆接触层的设计. 直到 2003 年, Buda 等人才提及了 980nm 激光器的光场在高折射率的欧姆接触层中分布呈周期性的震荡^[6], 但并没有揭示其分布的规律性. 而且和 980nm 的激光器不同, GaAs 欧姆接触层能够强烈吸收 808nm 的光, 所以分析欧姆接触层对优化 808nm 激光器的性能具有非常重要的意义.

目前国内对 InGaAsP/InGaP/AlGaAs 材料体系的研究少有报道, 在本文中, 我们使用传递矩阵的方法在国内首次对该材料体系的大光学腔结构激光器的波导层厚度、限制层厚度和欧姆接触层厚度进行了比较全面的理论优化, 其优化后的厚度分别为 0.8、0.6 和 0.11 μm . 本文计算了模式损耗与欧姆接触层厚度的关系, 首次提出了寄生模式的概念, 并总结了光场在高折射率的欧姆接触层中分布的规律

性. 这对以后大光学腔高功率半导体激光器的结构设计和无铅大功率激光器的生长有很重要的指导意义.

2 计算与分析

2.1 结构和参数

该器件的结构为分别限制异质结构, 其结构如下: n^+ -GaAs 衬底; n^+ -GaAs 缓冲层; n^+ -Al_{0.55}-Ga_{0.45}As 限制层 (厚度为 D_n); 被厚为 D_w 的 In_{0.49}-Ga_{0.51}P 波导层包围着的 15nm 厚的 In_{0.13}Ga_{0.87}-As_{0.75}P_{0.25} 量子阱; p^+ -Al_{0.55}Ga_{0.45}As 限制层 (厚度为 D_p); p^+ -GaAs 欧姆接触层. 材料的折射率分布决定着光场的分布, 对于宽接触的大功率激光器结构, 采用一维平板波导模型, 利用传递矩阵的方法来计算光场分布、有效折射率和模式损耗^[4]. 器件的模式损耗或增益可以通过下面的公式得到:

$$G_m = 2k_0 \text{Im}(N_{\text{eff}}) \quad (1)$$

其中 N_{eff} 为有效折射率; $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为波数. 为了计算不同限制层和欧姆接触层厚度时的模式损耗, 我们取量子阱层的折射率虚部为 0, 然后根据公式 (1) 计算模式损耗^[4]. 表 1 列出了该结构激光器在计算中所需的参数. 表 1 中, Au 层的折射率为 $n_{\text{Au}} = 0.1829 - 5.2056i$, 是由带隙的线性插值得到的^[7], 其他各层折射率均由改进的单振子折射率模型得到^[8].

[†] 通信作者. Email: caoyl@red.semi.ac.cn

2006-05-24 收到, 2006-07-25 定稿

表 1 分别限制异质结构激光器的参数

Table 1 Parameters of separate confinement hetero-structure LD

| 层数 | 各层材料 | 厚度 /nm | 折射率实部 n_i | 折射率虚部 n_i |
|----|--|--------|-------------|-------------|
| 8 | Au p 面电极 | 200 | 0.1829 | -5.2056 |
| 7 | GaAs 欧姆接触层 | D_c | 3.6776 | -0.0706 |
| 6 | $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$ 上限制层 | D_p | 3.268 | |
| 5 | $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ 上波导层 | D_w | 3.38 | |
| 4 | $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}_{0.75}\text{P}_{0.25}$ 阱层 | 15 | 3.612 | $G_m/2k_0$ |
| 3 | $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ 下波导层 | D_w | 3.38 | |
| 2 | $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$ 下限制层 | D_n | 3.268 | |
| 1 | GaAs 缓冲层 | 500 | 3.6776 | -0.0706 |

2.2 波导层的优化

通常,对于高功率激光器来说,灾变性光学损伤限制着器件的最大输出光功率^[2].对于某种给定材料,最大输出功率可以通过下式得到:

$$P_{\max, \text{cw}} = \frac{d}{\Gamma} W \left(\frac{1-R}{1+R} \right) \bar{P}_{\text{COMD}} \quad (2)$$

其中 W 是条宽; R 是出光腔面的反射率; \bar{P}_{COMD} 是腔面灾变性光学损伤功率密度,它是一个与材料相关的量,对于某种给定的材料, \bar{P}_{COMD} 可以认为是固定不变的;垂直光斑尺寸 d/Γ 是量子阱厚度 d 与光场限制因子 Γ 的比值.由于量子阱很薄,光场分布主要是由波导层的折射率分布决定的,根据 Botez 等人的理论近似^[2],归一化波导层厚度 D 为:

$$D = \frac{4\pi D_w}{\lambda} \sqrt{n_w^2 - n_{\text{cl}}^2} \quad (3)$$

其中 λ 为真空波长; D_w 是每层波导层厚度; n_w 和 n_{cl} 分别为波导层和限制层的折射率.当 $D = 1\pi$ 或 2π 时,1 阶模或 2 阶模式截止,对于我们的结构,当 1 阶模式和 2 阶模式截止时,对应的波导层厚度分别为 0.234 和 $0.468\mu\text{m}$.图 1 为波导层厚度 D_w 和光场限制因子的关系.在图 1 中,两个箭头分别指示 1 阶模和 2 阶模截止时的波导厚度.从图 1 中看到,

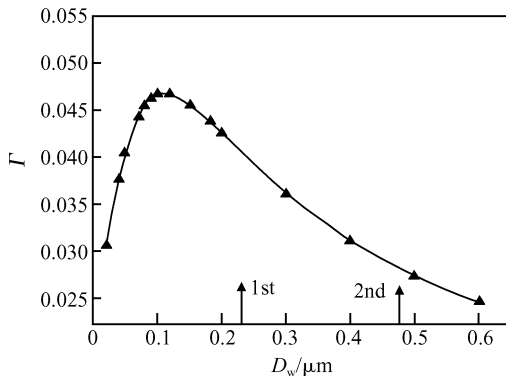


图 1 限制因子与波导厚度的关系.

Fig. 1 Confinement factor dependence on the waveguide thickness

当波导层的厚度约为 $0.1\mu\text{m}$ 时,限制因子最大;当波导层的厚度小于或大于 $0.1\mu\text{m}$ 时,限制因子减小.根据公式(2),最大输出功率与 d/Γ 呈正比,当波导层厚度越大(大于 $0.1\mu\text{m}$),限制因子越小,垂直光斑尺寸越大.为了取得高功率输出和长的寿命,波导层的厚度取为 $0.5\mu\text{m}$,这个厚度大于 2 阶模的截止厚度,所以该波导结构支持三个导波模式,下面我们通过对限制层和欧姆接触层厚度的优化来保证器件只有基模能够激射.

2.3 限制层厚度的优化

传统激光器的限制层通常很厚,减少限制层厚度,优化限制层主要有以下三个优点:首先,能够节省外延生长时间和源材料,这对分子束外延生长技术有很大的吸引力;其次,由于半导体材料的热导率不是很高,减少限制层厚度能够有效地减少结构的热阻,特别是当限制层材料为 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0.3 < x < 0.7$) 时(其热阻约为 GaAs 材料的四倍),减少限制层厚度更能增强器件的热扩散能力^[9];此外,对于大光腔激光器来说,优化的限制层厚度能够增加模式分辨率,抑制宽波导引起的高阶模激射^[10].在设计中,波导层的厚度为 $0.5\mu\text{m}$,该厚度支持三个导波模式,我们通过减薄限制层来增加模式分辨率,同时要保证基模的模式损耗小于 0.1cm^{-1} ^[11],由于奇阶模和有源区的重合很小而不予考虑,所以在接下来的分析中,我们仅研究基横模 (TE0) 和二阶横模 (TE2).

图 2 为模式损耗与限制层厚度的关系.其中,曲线 a 和 d 分别代表着上限制层厚度 D_p 固定为 $1\mu\text{m}$ 时,下限制层厚度分别对 TE0 和 TE2 的影响;曲线 b 和 c 分别代表着下限制层厚度 D_n 固定为 $1\mu\text{m}$ 时,上限制层厚度分别对 TE0 和 TE2 的影响;曲线 e 和 f 是不考虑金属层时的损耗.对比曲线 c 和 d 能够看出, D_n 对 TE2 的影响比 D_p 大,尤其当 $D_n < 0.6\mu\text{m}$ 时,这是因为 p 面比 n 面离金属电极更近,金属电极相当于反射镜把一部分光反射回波导层.另一方面,与 TE0 相比, TE2 模式到达 GaAs 欧姆接触层和金属电极界面的较多,所以后者的模式损耗更大.如果不考虑金属层的作用,分别固定上或下限制层的厚度,计算下或上限制层厚度对模式损耗的影响,发现它们对 TE2 和 TE0 损耗的影响相同,其损耗分别如图中曲线 f 和 e 所示.对比曲线 a 和 b 我们发现,上限制层对 TE0 模式的影响比下限制层大,所以对于 808nm 的激光器,为了减少 TE0 的损失,上限制层要比下限制层厚.根据以上的分析,可以得出结论:下限制层对 TE2 的影响比上限制层大,而上限制层对于 TE0 模式的影响相对下限制层来说要稍大一些.综合以上的分析和图 2,最后

我们选择下限制层和上限层的厚度分别为 0.6 和 $0.8\mu\text{m}$, 这时计算后的 TE0 和 TE2 模式损耗分别为 0.093 和 48.69cm^{-1} .

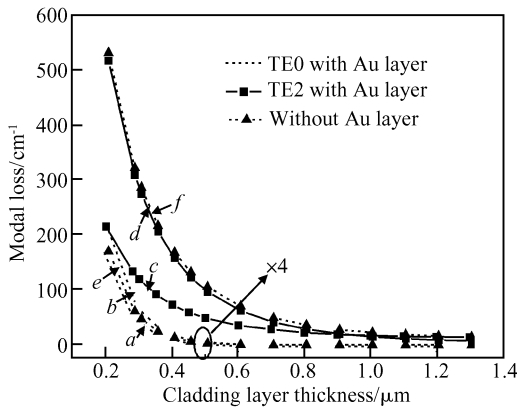


图 2 模式损失与限制层厚度关系

Fig. 2 Modal loss dependence of cladding layer thickness

2.4 欧姆接触层厚度的优化

对于传统的激光器, 根据波导理论, 偶阶模式的光场分布在有源区取得最大值, 然后呈指数衰减. 图 3(a)和(b)分别为 $D_c = 0.2\mu\text{m}$ 与 $0.5\mu\text{m}$ 两种情况下光场与折射率分布图. 但在图 3(a)和(b)中, 当欧姆接触层厚度从 $0.2\mu\text{m}$ 增加到 $0.5\mu\text{m}$ 时, 欧姆接触层中峰值的个数也由一个增加到两个. 在该结构中, 除了由波导层包围所形成的主波导外, 高折射率的 GaAs 欧姆接触层被低折射率的金属层和限制层包围形成了次级波导^[6]. 次级波导是一种无源波导, 我们把泄露波在次级波导中形成的模式称为寄生模式, 这种寄生模式同样具有普通模式的特点, 当欧姆接触层厚度大于 $0.3\mu\text{m}$ 时, 开始出现高阶模, 如图 3(b)欧姆接触层中的双峰为寄生在主波导 TE2 模式上的 1 阶寄生模式. 如果 p 面限制层很厚 ($> 1\mu\text{m}$), 泄漏到次级波导的光场很小, 所以次级波导的作用可以忽略不计. 但是对于 LOC 结构的激光器而言, p 面限制层通常会很薄, 泄漏波在两个波导间的耦合引起了很大的模式损耗, 这时泄漏波在主波导和次级波导的耦合就必须考虑. 我们在上下限制层的厚度分别为 0.8 和 $0.6\mu\text{m}$ 的条件下, 计算了高折射率的 GaAs 欧姆接触层和衬底以及金属层对 TE2 和 TE0 模式的吸收与欧姆接触层的厚度的关系. 计算结果显示了模式损耗的周期性变化, 这意味着当欧姆接触层为某一厚度时, 两个波导之间出现了共振耦合. 图 4 为模式损耗与欧姆接触层厚度的关系, 其中, TE0 模式的损耗被放大了 200 倍, 曲线 a 代表着 TE2 的模式损耗, 曲线 b 代表着 TE0 的模式损耗, 曲线 c 代表着文献[12]中 D_w 等于 $2\mu\text{m}$

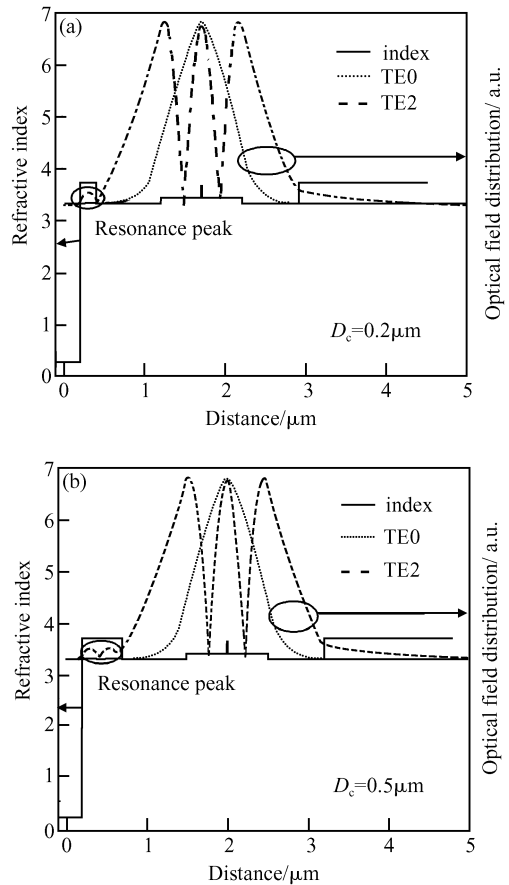


图 3 (a)和(b)分别表示 $D_c = 0.2\mu\text{m}$ 和 $0.5\mu\text{m}$ 两种情况下光场与折射率分布图

Fig. 3 Refractive indices and optical field distributions of the LD structures with different Ohmic contact layer thicknesses (D_c) (a) $D_c = 0.2\mu\text{m}$; (b) $D_c = 0.5\mu\text{m}$

时 TE2 模式的损失. 通过曲线 a 和 b 的对比, 能够看出 TE2 模式的损耗比 TE0 模式高 2~3 个数量级. 所以我们在结构设计中, 为了取得基模激射, 欧姆接触层的优化厚度为 $0.11\mu\text{m}$. 这时, TE2 模式的损耗为 201.8cm^{-1} , TE0 模式损耗仅为 0.0786cm^{-1} , 根据以上的分析可见, 优化欧姆接触层的厚度能够使激光器取得基模激射.

实际上, 主波导和次级波导形成了一种类似于共振反波导的结构^[13,14]. 当一部分光经辐射泄漏到高折射率的欧姆接触层时, 其垂直注入波长 λ_1 为^[14]:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda}{\sqrt{n_1^2 - n_{\text{eff}}^2}} \quad (4)$$

其中 λ 为真空波长, 这里为 $0.808\mu\text{m}$; n_1 和 n_{eff} 分别为欧姆接触层的折射率和激光器结构的有效折射率. 在我们的结构中, TE0 和 TE2 的垂直注入波长分别为 0.55 和 $0.48\mu\text{m}$. TE0 和 TE2 模式的共振峰

间隔分别为 0.28 和 0.24 μm ,最大模式损耗的间隔近似等于各自的 $\lambda/2$,这和反波导发生共振时,间隙厚度所满足的条件相同^[15],当欧姆接触层的厚度分别约为 TE2 和 TE0 模式的 $\lambda/4$ 时,发生第一次共振.从图 4 中,我们也可以看到对于相同的模式,发生共振时的模式损失随着欧姆接触层厚度的增加而变小,这是由于金属层吸收所引起的.

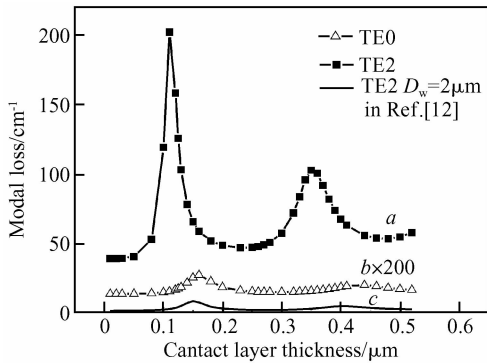


图 4 模式损耗与欧姆接触层厚度的关系

Fig. 4 Modal loss dependence on the contact layer thickness

3 讨论

根据以上分析,上下限制层 $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$ 的厚度分别为 0.8 和 0.6 μm ,欧姆接触层的厚度取为 0.11 μm ,这时候限制因子为 0.0272978,垂直方向的远场发散角为 35°,假设腔面灾变性光功率密度 \bar{P}_{COMD} 为常数 18MW/cm²,条宽为 100 μm 的器件的最大出光功率可达 11W 左右.

近年来,为了取得小的远场发散角和高的输出功率,Knauer 等人提出了超大光学腔结构,所谓超大光学腔就是指波导层的总厚度为通常的大光学腔波导层厚度(1 μm 左右)的两倍多.在参考文献^[12]中,波导层的厚度为 2 μm ,该波导结构支持 10 个导波模式,对于条宽为 200 μm 的单管器件,最大连续输出功率达到 15.3W,垂直结平面方向远场发散角仅为 15°.为了保证器件单模激射,文中对波导层和限制层厚度都进行了优化,但是对于欧姆接触层厚度文中没有进行分析,我们根据作者提供的参数,计算了该超大光学腔结构的欧姆接触层厚度与 TE2 模式的损失关系.由于基模的模式损失很小,我们只对最有可能激射的 TE2 模式进行了分析,同样该模式损失随着欧姆接触层厚度的增加也出现了共振,如图 4 中曲线 c 所示.为了增强模式分辨率,欧姆接触层厚度选取为 TE2 模式,首次发生共振时所对应的厚度为 0.15 μm .

4 结论

从理论上对 808nm InGaAsP/InGaP/AlGaAs 激光器结构进行了优化.通过计算 TE2 和 TE0 模式损耗,优化了大光学腔结构激光器的限制层和欧姆接触层厚度.主波导和次级波导发生了共振耦合,泄漏波在次级波导中产生了寄生模式,当欧姆接触层厚度约为 $\lambda/4$ 时,发生了第一次共振.为了取得单横模激射,优化后的上限制层、下限制层和欧姆接触层的厚度分别为 0.8,0.6 和 0.11 μm .根据参考文献中提供的超大光腔结构参数,我们对文献中未进行优化的欧姆接触层厚度也进行了优化.

参考文献

- [1] Uppal K, Mathur A, Dapkus P D. Strain effects on InGaP-InGaAsP-GaAsP tensile strained quantum well lasers. IEEE Photonics Technol Lett, 1995, 7(10): 1128
- [2] Botez D. Design considerations and analytical approximations for high continuous-wave power, broad-waveguide diode lasers. Appl Phys Lett, 1997, 74(21): 3102
- [3] Wang Jun, Ma Xiaoyu, Lin Tao, et al. Design of SCH structure for high-power broad area 808nm GaAsP/AlGaAs quantum well lasers. Chinese Journal of Semiconductors, 2005, 26(12): 2449 (in Chinese)[王俊, 马晓宇, 林涛, 等. 大功率宽面 GaAsP/AlGaAs 量子阱激光器分别限制结构设计. 半导体学报, 2005, 26(12): 2449]
- [4] Liu D C, Lee P, Tsai C M, et al. Role of cladding layer thicknesses on strained-layer InGaAs/GaAs single and multiple quantum well lasers. J Appl Phys, 1993, 73(12): 8027
- [5] Smowton P M, Thomson J D, Yin M, et al. The effect of cladding layer thickness on large optical cavity 650-nm lasers. IEEE J Quantum Electron, 2002, 38(3): 285
- [6] Buda M, Hay J, Tan H H, et al. Low loss, thin p-clad 980-nm InGaAs semiconductor laser diodes with an asymmetric structure design. IEEE J Quantum Electron, 2003, 39(5): 625
- [7] Palik E D. Handbook of optical constants of solids. New York: Academic Press, 1985
- [8] Wemple S H, Didomenico M. Behavior of the electronic dielectric constant in covalent and ionic materials. Phys Rev B, 1971, 3: 1338
- [9] Afromowitz M A. Thermal conductivity of $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ alloys. J Appl Phys, 1973, 44: 476
- [10] Yang G W, Hwu R J, Xu Z T, et al. Design consideration and performance of high-power and high-brightness InGaAs-InGaAsP-AlGaAs quantum-well diode lasers ($\lambda = 0.98\mu\text{m}$). IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 2000, 6(4): 577
- [11] Wade J K, Mawst L J, Botez D, et al. 8.8W power from broad-waveguide Al-free active region ($\lambda = 805\text{ nm}$) diode lasers. Electron Lett, 1998, 34(11): 1100
- [12] Knauer A, Erbert G, Staske R. High power 808nm lasers with a super-large optical cavity. Semicond Sci Technol, 2005, 20(6): 621
- [13] Wenzel H, Bugge F, Erbert G, et al. High-power diode lasers with small vertical beam divergence emitting at 808nm. Electron Lett, 2001, 37(16): 1024

- [14] Botez D, Mawst L J, Peterson G. Resonant leaky-wave coupling in linear arrays of antiguides. *Electron Lett*, 1988, 24(21):1328
- [15] Botez D, Mawst L J, Roth T J, et al. Phase-locked arrays of antiguides; model content and discrimination. *IEEE J Quantum Electron*, 1990, 26(3):482

Theoretical Optimization of an 808nm Large Optical Cavity Quantum Well Laser

Cao Yulian[†], Li Hui, He Guorong, Wang Xiaodong, Wang Qing, Wu Xuming
Song Guofeng, and Chen Lianghui

(*Nano-Optoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: An optimized 808nm InGaAsP/InGaP/AlGaAs laser diode structure with a large optical cavity is analyzed. To achieve single-transverse mode lasing, the thickness of the cladding layers and cap layers are optimized to improve the modal discrimination. The optimal thicknesses are 0.8, 0.6, and 0.11 μm for the upper cladding layer, lower cladding layer, and cap layers, respectively. An ohmic contact layer with a high refractive index surrounded by the metal layer and cladding layer acts as a secondary waveguide. A leaky wave forms a parasitical mode in the secondary waveguide. The modal loss dependence on the cap thickness is periodic. The first resonance occurs when the cap thickness is $\lambda_1/4$, and the interval between resonances is $\lambda_1/2$, where λ_1 is the perpendicular projected wavelength of the leaky wave for some mode.

Key words: InGaAsP/InGaP/AlGaAs; cladding layer thickness; cap layer thickness; LOC; resonance

PACC: 0260; 7280E; 8160C **EEACC:** 4320J

Article ID: 0253-4177(2006)12-2173-05

[†] Corresponding author. Email: caoyl@red.semi.ac.cn

Received 24 May 2006, revised manuscript received 25 July 2006