

# 多量子阱电吸收调制 DFB 激光器的一种 新型 LP-MOCVD 对接生长方法\*

胡小华 王 圩 朱洪亮 王宝军 李宝霞 周 帆 田惠良 舒惠云 边 静 王鲁峰

(中国科学院半导体研究所 国家光电子工艺中心, 北京 100083)

**摘要:** 提出了一种提高多量子阱电吸收调制 DFB-LD 集成器件(EML) 耦合效率的对接生长方法. 采用 LP-MOCVD 外延方法, 制作了对接方法不同的三种样片, 通过扫描电镜研究它们的表面及对接界面形貌, 发现新对接结构的样片具有更好的对接界面. 制作出相应的三种 EML 管芯, 从测量所得到的出光功率特性曲线, 计算出不同对接方法下 EML 管芯的耦合效率和外量子效率. 实验结果表明, 这种对接生长方案, 可以获得光滑的对接界面, 显著提高了激光器和调制器之间的耦合效率(从常规的 17% 提高到 78%) 及 EML 器件的外量子效率(从 0.03mW/mA 提高到 0.15mW/mA).

**关键词:** 电吸收调制 DFB 激光器; 对接外延; LP-MOCVD; InGaAsP 多量子阱

**EEACC:** 2530C; 2550B; 4320J

**中图分类号:** TN304.055

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2003)08-0841-06

## 1 引言

近年来, 作为长距离光通信系统中的关键元件之一, 电吸收调制分部反馈激光器(electroabsorption modulated distributed feedback laser, EML) 成为研究的热点, 这是由于该器件具有很多优点, 如驱动电压低、尺寸小、易于集成, 而且不需要考虑偏振的灵敏性等. 至今, 已经有多种的 EML, 从采用的有源区可分为: 选择区域生长方法(selective area growth, SAG)、对接耦合方法(butt-joint method)、同一有源区方法(identical active layer)、量子阱扩散方法(quantum well intradiffusion)等. 迄今最好的 EML 器件是用 butt-joint 方法制作出来的, 这是由于该方法具有可独立优化激光器和调制器的显著优点, 因此成为国外许多研究机构和公司的研究热点<sup>[1~6]</sup>. Butt-joint 制作 EML 的关键和困难在于如何获得良

好的激光器和调制器之间的对接界面, 减少散射损耗, 提高耦合效率. 国外文献往往很少对具体的对接耦合实验过程和产生的问题进行深入报道<sup>[7]</sup>, 国内对此进行的研究和报道更是不多见<sup>[8]</sup>, 这些文献中采用的 butt-joint, 都是先干法刻蚀多量子阱层和溴系列腐蚀剂去损伤层, 然后利用激光器条顶上的 SiO<sub>2</sub> 掩膜, 选择生长调制器结构. 由于干法刻蚀和溴系列的非选择性腐蚀难于精确地控制刻蚀的深度, 调制器和激光器的有源层不能很好地对准, 而且多量子阱在对接界面处发生弯曲, 导致很大的散射损耗, 因此集成的 EML 器件出光功率较低, 一般室温下工作电流为 100mA 时, 小于 9mW.

本文提出了一种新型的对接方案, 对于提高激光器和调制器之间的耦合效率具有显著的效果. 对 butt-joint EML 的耦合生长进行了系统深入的研究, 选用不同的对接方案和多种刻蚀技术, 利用扫描电子显微镜直接观察对接界面形貌, 通过对比, 发现

\* 国家高技术研究发展计划(No. 2001AA312050) 和国家重点基础研究发展规划(No. G2000068301) 资助项目

胡小华 男, 博士研究生, 主要研究领域为采用 LP-MOCVD 生长 InGaAsP 多量子阱材料以及高速率电吸收调制器和 DFB 激光器的单片集成等.

王 圩 男, 中国科学院院士, 主要研究方向为半导体集成光电子器件.

2002-08-29 收到, 2003-03-17 定稿

采用波导对接的方法可以获得光滑连续的耦合界面形貌. 制作了完整的 EML 器件, 并比较出了光特性, 计算出不同对接方法的耦合效率分别为 17%、13% 和 78%. 这些研究为制作出高性能的 EML 器件奠定了坚实的技术基础.

## 2 实验

我们共制作了三个样品(A、B和C), A和B采用现在通用的直接对接方法, 而C则采取我们最新提出的方案, 即在激光器和调制器之间插入一段体材料波导的方法(具体见下面描述). 所有衬底都是用国产掺S的 $\text{rr-InP}$ , 外延表面为(001)取向, 采用LP-MOCVD外延技术, 在德国生产的水平式AIX-TRON-200型外延系统上进行生长. 外延时的温度均为 $655\text{ }^\circ\text{C}$ , 反应室压力为 $2.2 \times 10^3\text{ Pa}$ , 三族有机金属源为三甲基铟(TMIn)和三甲基镓(TMGa), 五族源为砷烷( $\text{AsH}_3$ )和磷烷( $\text{PH}_3$ ), 高纯 $\text{H}_2$ 作载气, 总的气体流速为 $6.7\text{ L/s}$ . 为了清楚起见, 我们将采用的激光器和调制器的结构参数列于表1中.

表1 激光器和调制器的结构参数

Table 1 Structure parameters of laser and modulator

结构	组分	厚度/nm	波长/ $\mu\text{m}$
激光器	阱	$\text{In}_{0.61}\text{Ga}_{0.39}\text{As}_{0.98}\text{P}_{0.02}$	6
MQWs	垒	$\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}_{0.49}\text{P}_{0.51}$	10
调制器	阱	$\text{In}_{0.69}\text{Ga}_{0.31}\text{As}_{0.8}\text{P}_{0.2}$	10
MQWs	垒	$\text{In}_{0.70}\text{Ga}_{0.30}\text{As}_{0.57}\text{P}_{0.43}$	5
波导	上	$\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}_{0.43}\text{P}_{0.57}$	120
WG	下	$\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}_{0.43}\text{P}_{0.57}$	100

样品A和B的制作过程如图1所示.(1)首先, 在衬底1上用LP-MOCVD法外延生长激光器(LD)区的结构, 依次为 $1\mu\text{m}$ 的InP缓冲层2、下波导层3、多量子阱层4、上波导层5和150nm的InP盖层6; 接着, 热氧化法淀积生长150nm厚的二氧化硅层7, 形成如图1(a)所示的结构.(2)掩膜光刻出沿[011]方向 $300\mu\text{m}$ 长、 $40\mu\text{m}$ 宽的LD条形(如图1(b)所示). 样品A采用选择化学溶液腐蚀InP材料和InGaAsP四元系材料, 到缓冲InP层自动停止; 样品B采用反应离子刻蚀(RIE)技术, 先用 $\text{H}_2/\text{CH}_4/\text{Ar}_2$ 作为反应离子源刻蚀, 至缓冲InP层附近停止, 然后用溴系列腐蚀液漂去RIE造成的损伤层(约80nm深).(3)清洗干净后, 在LD条以外的区域选择外延生长MD结构, 包括下波导层8、多量子阱

层9、120nm的上波导层10和150nm的InP顶层11, 结果如图1(c)所示.

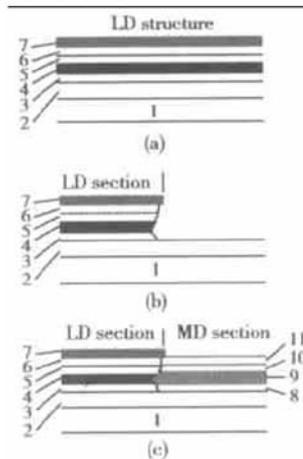


图1 样品A和B的生长过程示意图

Fig. 1 Schematic growth process of samples A and B

样品C的制作过程如图2所示.(1)在清洗干净的 $\text{rr-InP}$ 衬底1上外延生长LD结构, 按外延先后依次生长InP缓冲层2、下波导层3、20nm厚的InP层4、多量子阱5、20nm厚的上波导6、150nm厚的InP盖层7, 其中4作为刻蚀阻止层, 热氧化淀积生

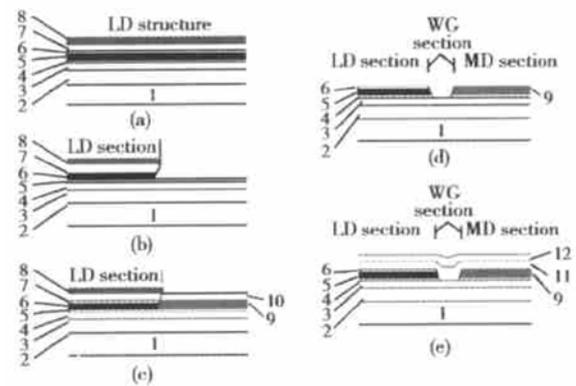


图2 样品C生长过程示意图

Fig. 2 Schematic growth process of sample C

长150nm的二氧化硅8, 结构如图2(a)所示;(2)化学腐蚀成沿[011]方向的LD条形, HF腐蚀去二氧化硅8, HCl系列腐蚀剂去InP盖层7和 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ 腐蚀四元层(6和5)直至InP(4)停止, 形成如图2(b)所示的结构;(3)然后, 二次外延选择生长MD区结构, 包括MD多量子阱9和150nm的InP盖层10, 所得结果如图2(c)所示.(4)腐蚀掉LD条上的 $\text{SiO}_2$ , 掩膜光刻腐蚀去掉对接界面两边宽度各为 $20\mu\text{m}$ 区域内的多量子阱层, 接着大面积

去掉 LD 条和 MD 区的 InP 盖层 7 和 10, 结果如图 2(d). (5) 最后全面积外延生长 100nm 的上波导层 11 和 150nm 的 InP 盖层 12, 结果如图 2(e) 所示.

我们分别从样品 A、B 和 C 中解理一小部分, 用扫描电子显微镜(SEM) 观察剖面, 对比观察这三种方案所得对接界面形貌. 为了进一步考察不同对接技术对实际的 EML 器件耦合效率的影响, 我们分别用 A、B 和 C 三个样品制作成完整的 EML 器件(分别表示为 EML-A, EML-B 和 EML-C), 为了便于比较出光特性和耦合效率, 后面的制作工艺完全相同. 首先, 用全息曝光技术在激光器区域制作光栅, 然后, 外延生长 150nm 的  $\mu$ -InP、20nm 的  $\mu$ -1.2Q 层、1.5 $\mu$ m 厚的  $\mu$ -InP 和 0.3 $\mu$ m 的  $p^+$ -InGaAs 电接触层; 接着, 光刻出脊波导, 光刻去掉激光器和调制器之间宽 50 $\mu$ m 区域里的 InGaAs 顶层, 并用 He 离子轰击该区域, 形成激光器和调制器之间的电隔离区; 热氧化淀积厚为 0.4 $\mu$ m 的 SiO<sub>2</sub> 介质层, 光刻电极窗口和采用带胶剥离技术形成 p 面 Ti/Pt/Au 电极图形, 芯片背面减薄至 100 $\mu$ m 厚, 背面蒸发 Au/Ge/Ni 合金, 解理成长 500 $\mu$ m(激光器、调制器和隔离区分别长 250、200 和 50 $\mu$ m)、宽 250 $\mu$ m 的 EML 管芯, 最后测试器件的出光特性.

### 3 结果和讨论

图 3 为样品 A 二次外延以后的 SEM 照片. 右边为激光器有源结构, 从下到上各层分别为: 衬底 InP(sub InP)、下波导层(lower WG)、多量子阱(LD-MQW)、上波导层(upper WG)、InP 盖层(cap InP) 和作选择外延掩膜的 SiO<sub>2</sub> 介质, 左边是选择外延后的调制器有源结构, 组成结构同 LD 区域, 各层的参数见表 1, 而且顶层没有 SiO<sub>2</sub>. 从该照片可以清楚地看到, LD 侧多量子阱区存在约 0.4 $\mu$ m 深的侧向钻蚀洞. 造成这种腐蚀形状的主要原因是 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O 腐蚀剂对 In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub> 四元化合物具有明显的侧向腐蚀作用, 而且对应不同的组分, 腐蚀速率相差很大, 即 Ga 和 As(尤其是 As) 含量越多, 选择腐蚀的速率越快. 显然, 量子阱层材料比上下波导层所含 Ga 和 As 组分较多, 其侧向腐蚀速度相应快得多. 因此, 量子阱区比上下波导层的侧向钻蚀严重, 最终腐蚀端面出现锥形侧蚀坑洞. 由于这种刻蚀端面上没有可供外延的光滑表面, 再次外延生长调制器 MQW 结构时, 很容易产生如图 3 所示的

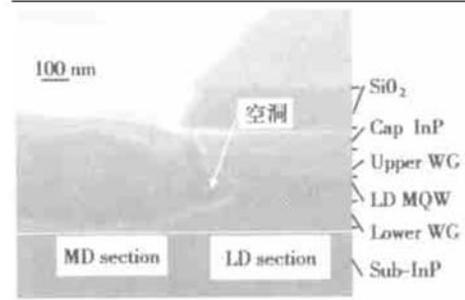


图 3 样品 A 的 SEM 照片

Fig. 3 SEM photograph of Sample A

空洞, 当激光器产生的光场向调制器端传输时, 将有大量的光在此处被散射出去, 从而大大降低两者之间的光强耦合效率.

图 4 是样品 B 的对接 SEM 照片. 由于采用了干法刻蚀, 激光器条端面基本成垂直状, 而没有样品 A 中所存在的侧向钻蚀现象, 如图中所示. 尽管远离掩膜条边缘的地方, 二次外延层较为平整, 但是靠近掩膜条边缘约 0.5 $\mu$ m 区域内, 外延质量很差, 出现许多多晶颗粒, 而且再次外延层没有在台条的侧壁上生长, 形成一条裂缝. 产生这种情况的原因在于干法刻蚀后的侧面起伏不平, 而且残留的聚合物难以完全去掉, 这样的表面无法有效地吸附原子成为良好的生长面. 这正是干法刻蚀在对接外延生长中的困难所在.

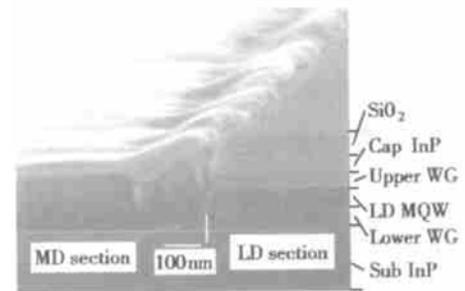


图 4 样品 B 的 SEM 照片

Fig. 4 SEM photograph of Sample B

样品 C 外延调制器多量子阱结构后的对接剖面 SEM 照片如图 5 所示. LD 台条的刻蚀同样品 A 一样采用化学选择腐蚀, 但是, 由于只是腐蚀到多量子阱层, 而不用腐蚀下波导层, 腐蚀时间缩短了很多, 侧向钻蚀不如样品 A 严重, 因此再次外延的调制器结构明显好于样品 A. 外延上波导及对接波导后, 对接处形貌得到很大的改善, 如图 6 所示, LD-MQW 的腐蚀界面成渐变的 taper 形状, 在对接区上

波导层连续光滑. 这种 taper 波导结构, 不仅消除了光散射损耗, 同时可以起到光斑模式低损耗转换的作用<sup>[9]</sup>.

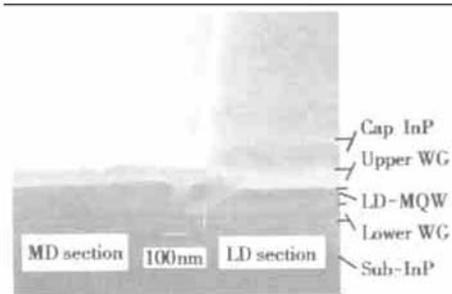


图 5 样品 C 外延 MD 后的 SEM 照片

Fig. 5 SEM photograph of sample C after MD growth

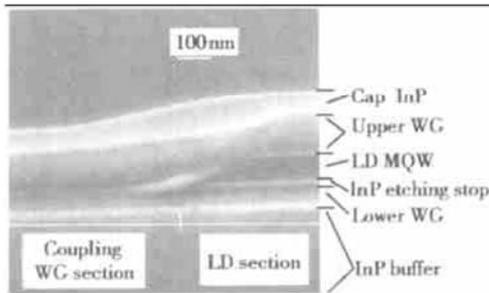


图 6 样品 C 外延对接波导后的 SEM 照片

Fig. 6 SEM photograph of sample C after butt-joint waveguide growth

图 7 所示是 EML-A、EML-B 在室温下所测得的输出光特性曲线, 其中 *a* 为解理去掉调制器后单独的激光器(DFB-LD-A)功率曲线, *b* 和 *c* 分别表示 EML-A 和 EML-B 管芯从调制器端的输出光功率曲线. 样品 A 和 B 的 DFB-LD 具有完全相同的输出光特性, 阈值电流为 23mA, 在 75mA 的工作电流下输出光 10mW, 外量子效率为 0.20mW/mA. EML-A 和 EML-B 的阈值电流相同, 都是 30mA; 100mA 工作电流下的输出光功率分别为 2.5mW 和 2.0mW, 相应的外量子效率为 0.034mW/mA 和 0.027mW/mA. 图 8 是 EML-C 管芯的输出光功率曲线, *a* 和 *b* 分别是单独激光器(DFB-LD-C)和 EML-C 的输出光功率特性. DFB-LD 的阈值电流是 27mA, 10mW 输出光功率时驱动电流是 81mA, 对应的外量子效率为 18.5mW/mA, EML-C 的阈值电流和量子效率分别是 38mA 和 0.15mW/mA. DFB-LD-C 具有比 DFB-LD-A 和 DFB-LD-B 更大的阈值电流, 主要原

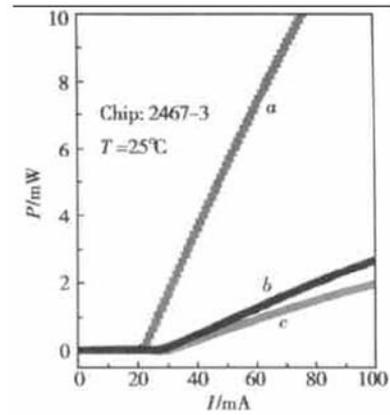


图 7 EML-A 和 EML-B 的输出光功率特性曲线

Fig. 7 Light power characteristic curves of EML-A and EML-B

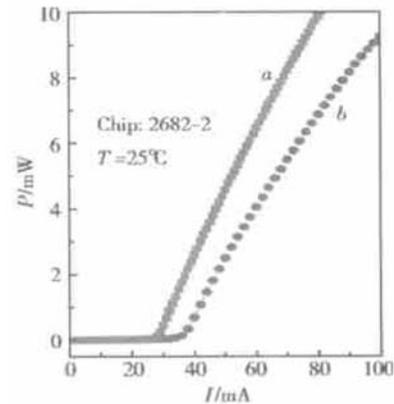


图 8 EML-C 的输出光功率特性曲线

Fig. 8 Light power characteristic curves of EML-C

因在于 DFB-LD-C 的上波导是在第三次外延时才生长上的, 在中间的一些工艺过程中难免会在 LD 和上波导界面之间引入一些缺陷, 从而增加一定的吸收损耗.

如果不考虑调制器区材料的吸收损耗, 可粗略计算出三种 EML 的耦合损耗分别为 7.8、8.8 和 1.1dB, 对应的耦合效率分别为 17%、13% 和 78%, 很显然, 样品 C 具有最高的光耦合效率. 我们认为样品 C 具有很高的耦合效率, 有以下三方面的原因: (1) 激光器和调制器多量子阱夹在同一连续的上、下波导层中间, 具有有源层自动对准的作用, 分布在波导层中的光场可以无损地从激光器传输到调制器区域; (2) 对接界面为缓变光滑的 taper 形状, 消除了对接区域的散射损耗; (3) 另外, 激光器和调制器之间 50 $\mu$ m 区域里插入的 1.2Q 层作为光波导, 较之 EML-A 和 EML-B 的直接对接, 其吸收带边离激

激光器发射的  $1.55\mu\text{m}$  的光波相距更远, 相应地具有更小的吸收损耗.

EML-C 管芯的外量子效率和耦合效率优于许多国外 butt-joint EML 结果<sup>[1,2,6]</sup>, 而国内的最好结果是 1999 年中科院半导体所颜学进等人获得的  $0.104\text{mW}/\text{mA}$ <sup>[10]</sup>; 刘国利等人采用选择外延方法制作的 EML 外量子效率只有  $0.1\text{mW}/\text{mA}$ <sup>[11]</sup>. 因此, 我们首次提出并采用的新型多量子阱对接方案对于降低 EML 的耦合损耗, 提高输出光功率具有显著的效果. EML 器件的其它特性, 如调制器的消光比、线宽增强因子、DFB 激光器的激射谱和 SMSR 等正在测试中, 将另文报道.

## 4 结论

为了提高激光器和调制器之间的耦合效率, 我们提出了一种新型的对接耦合方法, 即将激光器和调制器的多量子阱层夹在同一连续的下波导和上波导之间, 而且光刻去掉隔离沟区域里的多量子阱层, 这样可以有效地消去由于多量子阱弯曲和空洞导致的光损耗, 以及较少隔离沟区域的材料吸收损耗. 共制作了三个样品, 对比研究常规的直接 Butt-joint 方法和我们提出的新的 Butt-joint 方法对对接 MOCVD 外延形貌和 EML 器件耦合效率及外量子效率的影响. 通过扫描电子显微镜观察发现, 我们提出的对接方法可以获得更高质量的对接形貌, 使激光器和调制器之间的耦合效率和 EML 器件的外量子效率得到很大提高, 耦合效率从常规的 17% 提高到 78%, EML 器件的外量子效率从  $0.03\text{mW}/\text{mA}$  提高到  $0.15\text{mW}/\text{mA}$ . 我们认为, 这种新型的对接耦合方法可以应用到各种多量子阱光电子集成器件的制作中.

**致谢** 衷心感谢段丽宏女士在 SEM 测量方面给予的大力支持.

## 参考文献

- [ 1 ] Takeuchi H. Very high-speed DFB-modulator integrated light source. OECC' 97 Technique Digest, 1997: 18
- [ 2 ] Takeuchi H, Tsuzuki K, Sato K, et al. Very high-speed light source module up to 40Gb/s containing an MQW electroabsorption modulator integrated with a DFB laser. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 1997, 3(2): 336
- [ 3 ] Soda H, Furutsu M, Sato K, et al. High-power and high-speed semi-insulating BH structure monolithic electroabsorption modulator/DFB laser light source. Electron Lett, 1990, 26(1): 9
- [ 4 ] Morito K, et al. A high power modulator integrated DFB laser incorporating a strain-compensated MQW and graded SCH modulator for 10Gb/s transmission. IOOC' 95, 1995: 62
- [ 5 ] Suzuki M, Tanaka H, Taga H, et al.  $\lambda/4$ -shifted DFB laser and electroabsorption modulator integrated light source for multigigabit transmission. IEEE Trans Lightwave Technol, 1992, 10(1): 90
- [ 6 ] Adams D M, Rolland C, Yu J, et al. Gain-coupled DFB integrated with a Mach-Zehnder modulator for 10 Gbit/s transmission at  $1.55\mu\text{m}$  over NDSF. Proc SPIE, 1997, 3038: 45
- [ 7 ] Strzoda R, Ebbinghaus G, Scherg T, et al. Studies on the butt-coupling of InGaAsP waveguides realized with selective area metal organic vapor phase epitaxy. J Cryst Growth, 1995, 154(1): 27
- [ 8 ] Yan Xuejin, Xu Guoyang, Zhu Hongliang, et al. Monolithic integration of a MQW DFB laser and EA modulator in the  $1.55\mu\text{m}$  Wavelength. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(5): 412
- [ 9 ] Kawano K, Kohtoku M, Okamoto H, et al. Coupling and conversion characteristics of spot-size converter integrated laser diodes. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 1997, 3(6): 1351
- [ 10 ] Liu Guoli, Chen Weixi, Wang Wei, et al. A novel structure of DFB laser/EA modulator fabricated by selective area growth. 5th OECC' 2000, Japan, 2000: 306

## A Novel LP-MOCVD Butt-Joint Growth Method on MQW Electroabsorption Modulated DFB Lasers\*

Hu Xiaohua, Wang Wei, Zhu Hongliang, Wang Baojun, Li Baoxia, Zhou Fan, Tian Huiliang, Shu Huiyun, Bian Jing and Wang Lufeng

(National Research Center for Optoelectronic Technology, Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A novel butt-joint method to improve the coupling efficiency of MQW electroabsorption modulated DFB lasers (EML) is presented. Three samples with different butt-joint structures are prepared using LP-MOCVD to grow all epitaxial layers. The interface appearance of butt-joint areas of these samples is observed using SEM, and the sample with the new butt-joint structure has better butt-joint interface. Three types of EML chips are fabricated on the basis of these three samples respectively with the same procedure. Their coupling efficiency and slope quantum efficiency are calculated from the out light power characteristic curves. The results show that the new butt-joint approach can obtain smoother butt-joint interface and greatly improve the coupling efficiency and slope quantum efficiency of EML chips from 17% to 78% and from 0.03mW/mA to 0.15mW/mA, respectively.

**Key words:** electroabsorption modulated DFB lasers; butt-joint growth; low pressure metal organic chemical vapor deposition; InGaAsP MQW

**EEACC:** 2530C; 2550B; 4320J

**Article ID:** 0253-4177(2003)08-0841-06

---

\* Project supported by National High Technology ("863") Program (No. 2001AA312050) and National Key Basic Development ("973") Program (No. G2000068301)

Hu Xiaohua male, PhD candidate. His research field is mainly about the growth of InGaAsP MQW materials and the monolithic integration of DFB laser and high speed electroabsorption modulator.

Wang Wei male, academician of the Chinese Academy of Sciences. His research field focuses on the semiconductor integrated optoelectronic devices.

Received 29 August 2002, revised manuscript received 17 March 2003

©2003 The Chinese Institute of Electronics