

# 采用单边大光腔结构改善电吸收调制器的光场分布<sup>\*</sup>

杨 华<sup>†</sup> 朱洪亮 潘教青 冯 文 谢红云 周 帆 安 欣 边 静 赵玲娟 陈妮兮 王 圩

(中国科学院半导体研究所,国家光电子集成重点实验室,北京 100083)

(2006 年 6 月 22 日收到,2006 年 8 月 22 日收到修改稿)

设计并制备了具有单边大光腔结构的半导体电吸收(electroabsorption, EA)调制器.模拟和测试的结果均表明:单边大光腔结构能有效地改善 EA 调制器的光场分布,使椭圆形的近场光斑变得圆形化,从而达到与圆形模式光纤之间的匹配,有利于提高耦合效率.

关键词:单边大光腔,电吸收(EA)调制器,光场分布,耦合效率

PACC:4280L,4280S,7280E,8115H

## 1. 引 言

近年来,人们对信息传输的需求量呈现爆炸式增长,建立高速、长距离和超大容量的光纤通信传输系统已成为当今社会发展的核心要求.在该系统中,调制过程是决定整个系统传输速率和传输容量的关键因素.由于采用调制器的外调制技术可以获得比激光器直接调制下更大的调制带宽、低啁啾以及高的消光比,因此得到了大量的研究<sup>[1-4]</sup>.其中电吸收(EA)调制器由于尺寸小、驱动电压低、调制效率高以及易于与其他半导体光电子器件集成等优点更是受到人们的青睐,将越来越多地运用在光纤通信系统中.

对于双端与光纤耦合的 EAM 来说,耦合效率是设计中必须考虑的重要问题,过大的耦合损耗将导致低的射频增益和大的相对噪声.光纤与波导之间的耦合效率  $\eta$  可以用

$$\eta = \frac{\left| \iint U_b^* g U_{wg} dx dy \right|^2}{\iint |U_b|^2 dx dy \iint |U_{wg}|^2 dx dy} \quad (1)$$

来计算,其中  $U_b$  与  $U_{wg}$  分别为光纤和波导的模式光场分布.假设光纤模式和波导模式分布为高斯型,则两者之间的耦合效率近似表示为<sup>[5]</sup>

$$\eta = \frac{4}{\left( \frac{W_x}{a} + \frac{a}{W_x} \right) \left( \frac{W_y}{a} + \frac{a}{W_y} \right)}, \quad (2)$$

式中  $W_x$  与  $W_y$  分别为 EAM 光场分布在水平和垂直方向上的模式半径,  $a$  为光纤的模式半径.可以看到, EAM 与光纤的耦合效率主要取决于两者模式之间的匹配.如果  $W_x = W_y = a$ , 则  $\eta = 1$ , 即模式完全匹配时,耦合效率可以达到 100%(不考虑反射损耗和由于未对准引起的损耗).但是, EA 调制器最大的缺点是由于其传统对称三明治波导结构在垂直方向和水平方向上对光场限制的较大差别而导致椭圆形的近场光斑,水平方向的光斑尺寸远大于垂直方向.而光纤的模式直径为  $8 \mu\text{m}$  的圆形光斑,两者的失配不但使耦合难度和耦合成本大大增加,而且耦合效率很低,因此提高 EA 调制器与光纤之间的耦合效率得到了广泛的关注和研究,例如在 EA 调制器双端集成模斑转换器(spot size converter, SSC)来改善 EA 调制器出光端面的光斑形状和尺寸<sup>[6-8]</sup>,虽然这种方法取得了好的结果,但是其伴随的缺点是器件尺寸较大,一般为单 EA 调制器的 2—3 倍,而且工艺非常复杂、成品率低、成本高.

本文直接从 EA 调制器本身的波导结构入手,采用单边大光腔结构来改善 EA 调制器的光场分布,获得与光纤匹配的圆形光斑,提高耦合效率.模拟和实验的结果表明,该方法不但可以有效地使 EA 调制器的椭圆形光斑变得圆形化,而且在工艺上非常简单,与传统单 EA 调制器的工艺完全相同.

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展规划(973)项目(批准号:G2000068301),国家高技术研究发展计划(863)项目(批准号:2002AA312150),国家自然科学基金(批准号:90101023,60176023,60476009)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: yanghua@red.semi.ac.cn

2. 器件结构设计

器件采用浅脊形波导结构 如图 1 所示 在传统对称三明治波导结构基础上引入厚的下波导限制层 形成单边大光腔结构. 材料体系采用 InGaAsP/ InP 体系.

图 1 中 ,1.1Q ,1.2Q 分别表示光荧光谱波长为  $1.1\text{ }\mu\text{m}$  和  $1.2\text{ }\mu\text{m}$  的四元层. 有源区为多量子阱结构 阱和垒分别为 1.1Q 和 1.6Q 的 InGaAsP 材料. 各层的厚度如图中所示.

采用束传播方法 ( beam propagation method , BPM ) 对于具有不同厚度下波导层器件的基模近场光场分布进行了模拟 ,模拟结果如图 2 所示. 其中 ,图 2(a) 对应的是传统对称三明治波导结构的模拟结果 ,上下波导限制层厚度均为  $100\text{ nm}$  ,而图 2(b) , (c) (d) 对应的上波导为  $50\text{ nm}$  ,下波导厚度  $t$  分别为  $0.6\text{ }\mu\text{m}$  , $1.0\text{ }\mu\text{m}$  和  $1.5\text{ }\mu\text{m}$  .

从模拟结果中可以看出 ,对称三明治波导结构 EA 器件的光场分布为椭圆形 ,如图 2(a) ,水平尺寸远大于垂直方向. 而随着下波导层厚度的逐步增加 ,光场分布在垂直方向上逐步向下波导扩展 ,如图 2

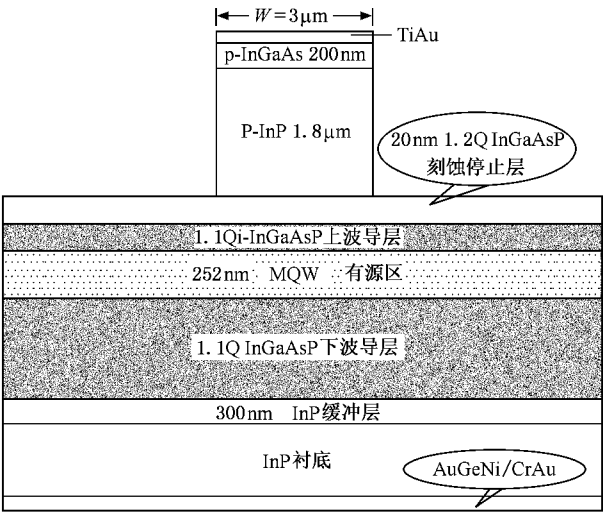


图 1 EA 调制器结构横截面图

(b) (c) (d) ,使得垂直方向的光斑尺寸变大 ,椭圆形的光斑变得圆形化 ,当下波导的厚度为  $1.5\text{ }\mu\text{m}$  时 ,其光斑尺寸在水平方向和垂直方向大小已经很接近 ,从而可以与圆形的光纤模式达到良好的匹配. 由于太厚的下波导层对外延生长来说难以实现 ,因此本实验最终选用  $1.5\text{ }\mu\text{m}$  的下波导限制层形成单边大光腔结构.

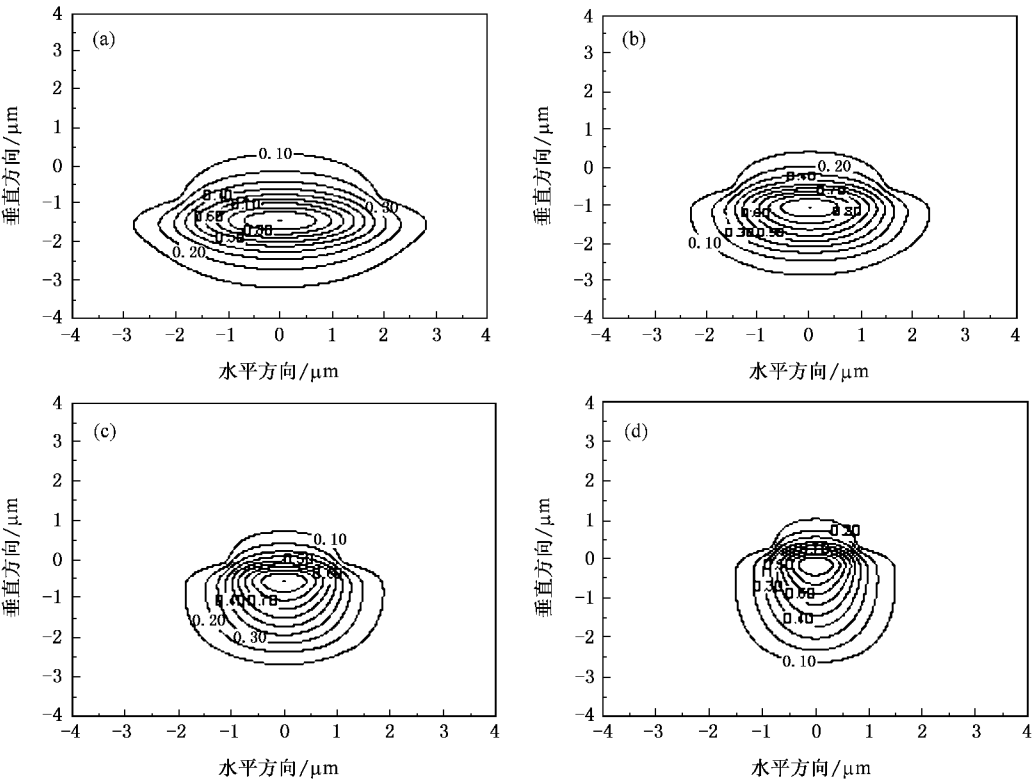


图 2 BPM 方法模拟的具有不同下波导厚度器件的近场光斑图形

3. 实验制备

本文采用金属有机化学气相沉积( metal-organic chemical vapor deposition ,MOCVD )技术制备了如图 1 所示的 InGaAsP/InP EA 调制器的外延结构材料. MOCVD 设备为 AIXTRON-200 型 ,采用三甲基铟 ( TMIn ) ,三甲基镓( TEGa )作为 III 族源 ;砷烷( AsH<sub>3</sub> )和磷烷( PH<sub>3</sub> )作为 V 族源 ,高纯氢气( H<sub>2</sub> )作为载气 ,衬底为( 100 )<sub>n</sub>-InP 衬底 .在外延沉积过程中 ,衬底温度为 650℃ ,沉积气压为 22mbar .在厚的下波导层生长过程中很容易由于大的应变产生缺陷 ,从而导致外延过程的失败 ,因此需要严格地控制生长条件 .为了对比实验 ,同时还外延生长了没有大光腔结构的材料 ,即图 1 结构中的上下限制波导层厚度均为 100 nm .

采用传统的半导体工艺制备了 EA 调制器 .工艺比较简单 ,主要包括脊波导的刻蚀、SiO<sub>2</sub> 包脊和电极制备 .具体过程为首先采用 PECVD 方法生长 1000Å 左右的 SiO<sub>2</sub> 作为掩膜 ,采用湿化学方法腐蚀 InGaAs 盖层和 p-InP 层 ,形成宽为 3 μm 的脊 ;接着去掉 SiO<sub>2</sub> 掩膜后重新生长 3500Å 的 SiO<sub>2</sub> 包脊 ;腐蚀掉脊顶处的 SiO<sub>2</sub> 形成电极窗口 ,蒸发 p 型金属电极 TiAu ,并腐蚀出电极图形 ;然后将衬底减薄到 100 μm 左右 ,在背面蒸发 N 电极金属 AuGeNi ,快速退火金属化 ,形成良好的欧姆接触后 ,再蒸 CrAu 加厚 ,以便于压焊 .最后 ,根据测试要求将器件解理为不同的腔长 ,并烧焊在镀铟( In )热沉上进行相关的测试 .

4. 结果与讨论

由于浅脊的 EA 调制器在结构上相当于 FP 腔

的激光器 ,在正向偏置电流注入下可以激射 ,从而方便研究其工作波长以及光场分布特性 .本文在正向电流偏置下 ,对其 *P-I* 特性以及近场光斑和远场发散角进行了测试 ,测试结果分别如图 3、图 4 和图 5 .

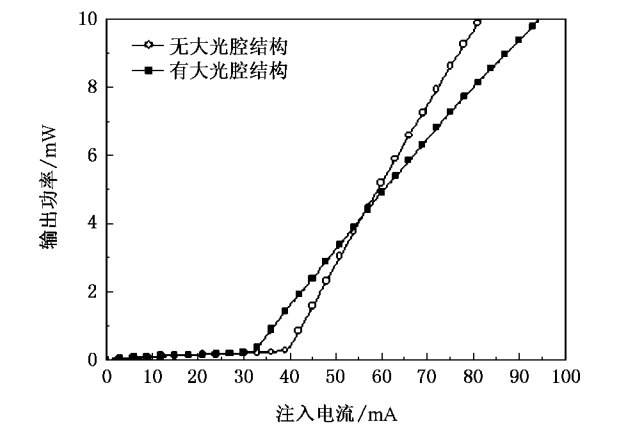


图 3 EA 调制器的 *P-I* 特性曲线

从图 3 的 *P-I* 特性曲线中可以看出 ,具有大光腔结构和无大光腔结构的两种器件在正向电流注入下 ,均可以激射 ,阈值电流在 30—40 mA 之间 ,出光功率均可以达到 10 mW 以上 ,从而表明外延材料特性良好 .从图 4 的结果对比可见 ,当引入大光腔结构后 ,器件的近场光斑由椭圆形变得圆形化 ,光场分布在垂直方向向下波导扩展 ,与 BPM 模拟的结果一致 .同时从图 5 中可以看出 ,与普通结构的器件相比 ,具有大光腔结构的器件其远场发散角在水平方向变化不大 ,但在垂直方向明显减小 ,从 52°减小到 35° ,这与近场光斑在垂直方向变大的结论一致 .通过对制备的器件进行手动对准耦合实验 ,结果显示 ,在相同的耦合条件和耦合水平下 ,具有大光腔结构的 EA 调制器易获得相对较大的耦合效率 .

综合以上计算与测试结果 :在 EA 调制器的波导结构中引入单边大光腔结构 ,能有效地改善器件

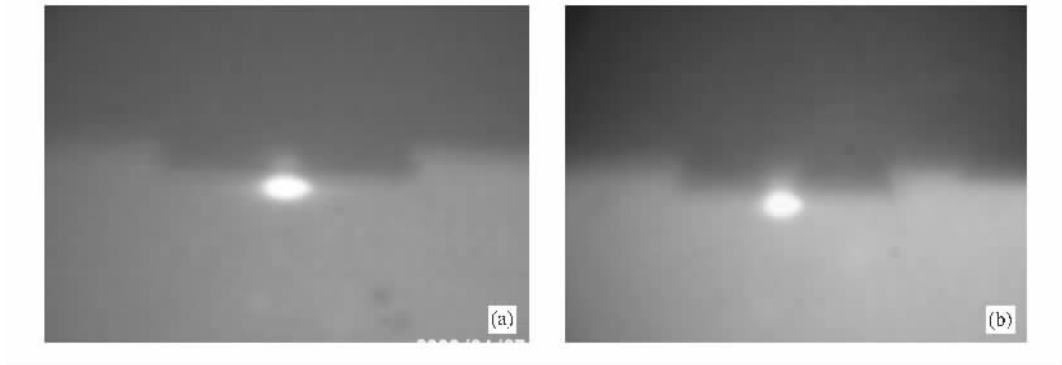


图 4 EA 调制器的近场光斑 ( a )无大光腔结构 ;( b )有大光腔结构

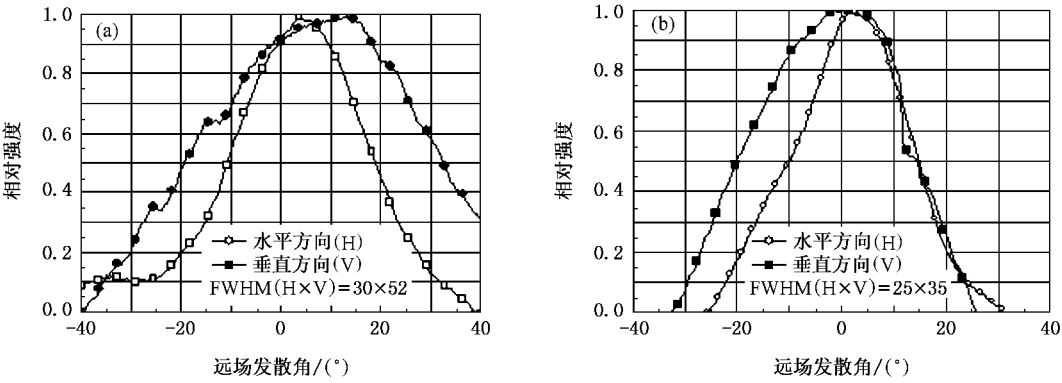


图 5 EA 调制器的远场发散角 (a)无大光腔结构 ;(b)有大光腔结构

的光场分布 ,使其在垂直方向向下波导扩展 ,椭圆形的近场光斑变得圆形化 ,从而有利于获得与光纤匹配的光斑模式 ,提高耦合效率 .

5. 结 论

本文设计并成功制备了具有单边大光腔结构的 EA 调制器 ,下波导的厚度为 1.5 μm. 器件的模拟和

测试结果均表明 :当引入大光腔结构后 ,EA 调制器的光场分布得到了明显的改善 ,近场光斑在垂直方向向下波导扩展 ,从而使椭圆形的光斑变得圆形化 ,有利于与光纤的圆形模式相匹配 ,获得高的耦合效率 .而且 ,与双端集成 SSC 方法相比 ,该方法直接从器件本身结构入手 ,工艺更加简单 ,与传统结构调制器的制作方法完全相同 ,有利于获得小的器件尺寸和低的成本 .

[ 1 ] Trezza J A , Powell J S , Harris J S , Jr. 1997 *IEEE Photonic Technol. Lett.* **9** 330

[ 2 ] Bian Z X , Christofferson J , Shakouri A 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3605

[ 3 ] Zhao Q ,Pan J Q , Zhang J , Zhou G T , Wu J ,Zhou F , Wang B J , Wang L F , Wang W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 261[ in Chinese ] 赵 谦、潘教青、张 靖、周光涛、伍 剑、周 帆、王宝军、王鲁峰、王 圩 2006 物理学报 **55** 261 ]

[ 4 ] Zhao Q ,Pan J Q , Zhang J , Li B X , Zhou F , Wang B J , Wang L F , Bian J , Zhao L J , Wang W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1259[ in Chinese ] 赵 谦、潘教青、张 靖、李宝霞、周 帆、王宝军、王鲁峰、边 静、赵玲娟、王 圩 2006 物理学报 **55** 1259 ]

[ 5 ] Wang S Y , Lin S H 1988 *J. Lightwave Technol.* **6** 758

[ 6 ] Hou L P , Wang W , Zhu H L 2005 *Chinese Optical Lett.* **3** 49

[ 7 ] Wada M , Kohtoku M , Kawano K , Kondo S , Tohmori Y , Kondo Y , Kishi K , Sakai Y , Kotaka I , Noguchi Y , Itaya Y 1995 *Electron. Lett.* **31** 1252

[ 8 ] Hou L P , Zhu H L , Zhou F , Wang L F , Bian J , Wang W 2006 *Semicond. Sci. Technol.* **20** 912

Improving the optical profile of electroabsorption modulator  
using single-sided large optical cavity structure<sup>\*</sup>

Yang Hua<sup>†</sup> Zhu Hong-Liang Pan Jiao-Qing Feng Wen Xie Hong-Yun Zhou Fan An Xin  
Bian Jing Zhao Ling-Juan Chen Wei-Xi Wang Wei

( *National Key Lab of Integrated Optoelectronics , Institute of Semiconductors ,Chinese Academy of Sciences , Beijing 100083 , China* )

( Received 22 June 2006 ; revised manuscript received 22 August 2006 )

Abstract

An electroabsorption modulator with large optical cavity was designed and fabricated successfully. Both the simulated and experimental results show that , the larger optical cavity structure introduced could obviously improve the optical profile of EA modulator , the traditional elliptical near-field spot becomes more rounded , so it will match better with the optical fiber and is beneficial for raising the coupling efficiency .

**Keywords :** single-side large optical cavity , electroabsorption modulator , optical profile , coupling efficiency

**PACC :** 4280L , 4280S , 7280E , 8115H

<sup>\*</sup> Project supported by the National “ 973 ” Program( Grant No. G2000068301 ) , the National “ 863 ” Program( Grant No. 2002AA312150 ) , and the National Natural Sciences Foundation of China( Grant Nos. 90101023 60176023 60476009 ).  
<sup>†</sup> E-mail : yanghua@red.semi.ac.cn