

选择腐蚀确定垂直腔面发射激光器 生长偏差对模式波长的影响

张 益 潘 钟 杜 云 陈志标 郑联喜 吴荣汉

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 本文提出一种可在垂直腔面发射激光器外延生长后准确确定其模式生长偏差的简便方法。利用选择性湿法腐蚀,分别测出器件各主要部分的微区光反射谱,通过模拟计算得到这些部分的厚度偏差及其对模式波长偏移的影响,使调整后再生长的器件模式位置大为改善,并为器件后期制备的模式调节提供了可靠的依据。

PACC: 4255P, 4260D, 8160C

1 引言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有许多独特的优点,如阈值电流低、单纵模工作、发散角度小、调制频率高、易于实现列阵及光电集成等,在光信息处理和光互连等领域有着广阔的应用前景。近年来其研究进展相当迅速,并逐渐走向实用阶段^[1,2]。但由于其结构十分复杂,激射条件苛刻,除了要求材料性能良好以外,还要使其内含的布拉格反射器(DBR)的中心波长、光腔的谐振波长和有源区增益的峰值波长对准,所以生长十分困难^[3]。而且VCSEL的生长时间一般较长,对层厚精度控制和均匀性的要求都较高。为了提高外延片成品率,更需要为多次生长的调整提供准确的信息。

我们在VCSEL的MBE生长过程中曾用红外高温仪进行在位监测,取得了一定效果^[4],也有人用高能电子衍射(RHEED)或光反射谱等方法进行监测和校准^[5,6],但其设备和方法都十分复杂,而且也不能提供VCSEL各层生长偏差的具体情况。MOCVD的生长速度快、生产率高、条件易控制,现已成为生长VCSEL的主要方法,由于受设备的限制,目前尚无很好的在位监测技术^[7]。不管怎样,VCSEL在外延生长后各层都会存在一定的生长偏差,从而导致其模式波长偏移。而模式波长对激射相当关键,如何能准确地调节模式波长也就十分重要。

为此,本文提出一种可在垂直腔面发射激光器外延生长后快速、准确地确定其模式生长偏差的中测方法,采用选择腐蚀技术,分别测出VCSEL各主要部分的微区光反射谱,通过模拟计算得到各层的厚度偏差及其对模式偏移的贡献,为生长调整和器件制备提供了可靠

张 益 男,1970 年出生,博士生,现从事垂直腔面发射激光器的研制工作
吴荣汉 男,1938 年出生,研究员,现从事光电子学研究工作
1997-05-23 收到,1997-07-21 定稿

的依据

2 实验方法

2.1 材料制备

我们用MOCVD生长了结构如图1所示的VCSEL,主要有三部分:底层为 $\lambda/4$ GaAs/AlAs N型DBR,中间是光学厚度为 λ 的量子阱有源区和Al-GaAs限制层,顶层为 $5\lambda/4$ 的GaAs和 $\lambda/4$ 的AlAs,其中 λ 为激光器设计工作波长。一般VCSEL顶层为 $\lambda/4$ P型DBR,而我们所用结构的顶层DBR可通过镀多层介质高反膜来获得。这种结构的优点是:没有顶层P型DBR,可缩短生长时间,保证生长质量,减小器件串联电阻,并简化器件后期制作工艺,易于实现高密度列阵等^[8]。经过优化生长条件,我们已使外延片的层厚均匀性基本控制在2%以内。

为了VCSEL器件制备的需要,我们研究了GaAs和AlAs的选择性化学湿法腐蚀技术,分别得到了对GaAs和AlAs相互的腐蚀速率比很高的选择腐蚀液。由于腐蚀液对GaAs和AlAs的高选择性,可使腐蚀按需要停止在某一层上。为得到VCSEL结构的不同部分,对小面积取样外延片的腐蚀分两步进行:第一步腐蚀先去掉顶层的GaAs和AlAs,第二步腐蚀再去掉有源区及限制层。这样就可对各部分进行测量分析以获取具体信息。

2.2 测量和分析方法

由于VCSEL的纵向谐振腔结构,其光反射谱可显示出模式波长的位置。VCSEL结构中的P型DBR和N型DBR可分别等效为两个反射界面,中间有源区腔体部分光学厚度为一个波长,其光程差加上界面的相移,正好使两层界面的反射光相位相反,迭加后光强出现极小值。通过对两层界面反射率的简单计算可知,其反射谱高反射带中出现极小值的条件和激光器的谐振条件相同,因此VCSEL的反射谱在高反区中出现的极小点即其模式波长的位置。

为了测量外延片小区域的反射谱,准确确定模式和高反带中心波长的分布情况,我们建立了一套微区光反射谱测量系统。该系统利用显微镜技术将入射光和出射光分离聚焦,将入射光斑直径缩小到 $40\mu\text{m}$ 左右,因此所测得的反射谱可精确反映外延片微区的生长情况和不同位置的均匀性。

为模拟计算器件结构的反射谱,可采用多层介质膜的光学传输矩阵方法,通过选取相应的膜层参数,即可计算出器件的反射谱,并得到模式位置。当光垂直入射时,多层膜系的特征矩阵为^[9]:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos(kn_j d_j) & \frac{i}{n_j} \sin(kn_j d_j) \\ i n_j \sin(kn_j d_j) & \cos(kn_j d_j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_{k+1} \end{bmatrix}$$

其中 n_j 和 d_j 分别为第 j 层的折射率和厚度; i 为虚数因子; k 为真空波数 $2\pi/\lambda$,如某一层有吸收,则 n_j 应取为复数形式。于是该膜系的反射率可表示为 $R = \left| \frac{n_0 B - C}{n_0 B + C} \right|^2$, n_0 为入射介

GaAs	350nm	P ⁺
AlAs	84.5nm	P ⁺
Al _{0.5} Ga _{0.5} As	115nm	P+i
GaAs	10nm	i
In _{0.2} Ga _{0.8} As	8nm	i
GaAs 3×	10nm	i
Al _{0.5} Ga _{0.5} As	115nm	N+i
AlAs	84.5nm	N ⁺
GaAs 28×	70nm	N ⁺
衬底		N ⁺

图1 VCSEL结构示意图

质的折射率

3 实验结果和分析

3.1 反射谱测量结果及分析

图 2 为腐蚀前和两步腐蚀后分别测得的 VCSEL 不同部分的微区光反射谱。为清楚起见, 曲线 1、2 的反射率坐标值各减去 0.2 和 0.1。

图 2 中曲线 1 是全结构的光反射谱。如上所述, 由顶层的 GaAs/AlAs 界面和下面的 N 型 DBR 共同形成谐振腔, 起到选模作用, 于是在反射谱中显示出模式位置, 即高反区中的凹陷处。由于其非对称结构, 即顶层反射率远小于底层 DBR 的反射率, 使模式半宽很宽 (约 15 nm)。另外我们已通过光致发光谱测得该结构中 InGaAs 量子阱的发光峰在 975 nm 左右, 所以至少对波长小于 975 nm 的光都有吸收作用, 而且顶层无多对 DBR, 测反射谱时大部分入射光都能进入到有源区, 加上谐振腔共振作用, 使 InGaAs 量子阱的吸收作用大大增强, 模式位置更加明显。从图中可确定模式波长在 937 nm 左右, 而整个反射谱高反带的中心波长在 955 nm, 可见模式位置和高反中心相比向短波偏移 18 nm, 即约 2%。

曲线 2 是腐蚀去掉顶层 GaAs/AlAs 以后所测得的光反射谱。这时有源区层 (包括 AlGaAs 限制层, 下同) 和 N 型 DBR 起谐振腔选模作用, 使模式宽度更宽, 但其位置只受有源区层厚的影响。曲线 2 的模式位置在 960 nm 左右, 比高反中心长 5 nm, 结合曲线 1, 可确定有源区层稍偏厚, 而顶层 GaAs/AlAs 偏薄较多。

曲线 3 是再腐蚀去掉有源区后测得的光反射谱, 其高反射带的位置和曲线 1、2 基本重合。这时实际上只有 N 型 DBR, 因为 GaAs/AlAs 对数很多, 反射率相当高, 使得 N 型 DBR 对模式的作用是一致的, 而影响模式位置的主要是有源区和顶层 GaAs/AlAs 。

为了具体确定各部分的厚度偏差及其对模式偏移的贡献, 我们对其反射谱进行了模拟计算。以 N 型 DBR 的中心波长为设计的模式位置, 选取合适的材料折射率, 通过改变有源区和顶层的厚度, 依次计算几种结构的反射谱, 直到模拟结果和测量的模式位置相符为止。由于该结构中 InGaAs 量子阱的吸收是主要的, 所以计算中只在 InGaAs 层加入适当的吸收, 而其它层的吸收忽略不计。当有源区层厚比设计值偏长 2%, 而顶层 GaAs/AlAs 的厚度偏短 7% 时, 模拟反射谱和测量结果基本一致, 如图 3 所示, 曲线标号分别和图 2 相对应。于

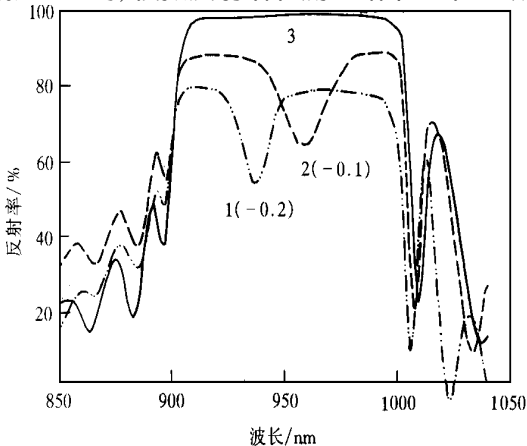


图 2 VCSEL 不同部分的测量反射谱

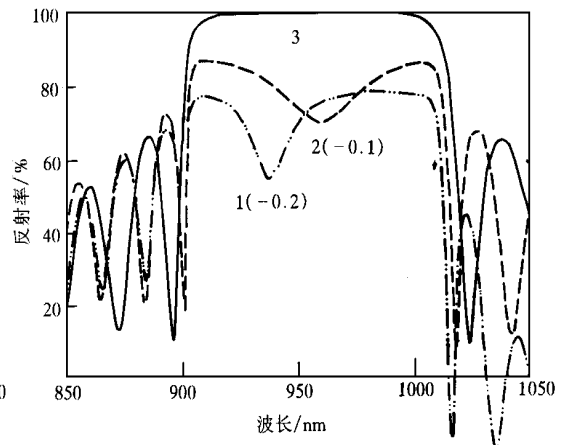


图 3 VCSEL 不同部分的模拟反射谱

是可确定该 VCSEL 结构中有源区限制层和顶层 GaAs/AlAs 的厚度偏差分别为 +2% 和 -7%, 使模式波长偏移 -2%.

3.2 模式调整

我们在再次生长该 VCSEL 结构时以上述数据为依据对生长过程进行了调整, 即在上次生长时间的基础上对有源区限制层减少 2%, 顶层 GaAs/AlAs 增加 7%, 而其它条件不变, 特别是 InGaAs 量子阱层. 结果这次生长的 VCSEL 结构光反射谱如图 4 所示, 图中虚线为调整后的理论反射谱曲线, 可见二者十分吻合, 模式位置已大为改善, 基本对准高反带中心, 这说明了本方法非常有效.

在器件制备中, 需在上述结构 VCSEL 的表面镀上介质高反膜, 以形成顶层 DBR. 在 VCSEL 模式波长偏移不大的情况下, 可通过改变镀膜层厚来调节模式位置, 使之和有源区增益峰对准. 对这一调节以上结果可作为重要依据, 以保证器件性能和质量, 提高成品率. 该 VCSEL 结构的器件制备正在进一步进行之中.

另外, 许多新型光电子器件都要利用纵向谐振腔的选模作用进行工作, 比如窄带光电探测器^[10]和多量子阱光调制器等^[11], 一般这些器件也需要进行模式波长的确定和调节. 对此本文提出的方法普遍适用.

4 结论

为了在垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 外延生长后快速、准确地确定其模式生长偏差, 我们提出了一种简便的中测方法. 通过对 MOCVD 生长的 VCSEL 结构进行选择性的湿法腐蚀, 分别得到了含有顶层、有源区限制层以及 N 型 DBR 等结构的不同部分, 再测量其微区光反射谱而得到激光器的模式波长位置, 最后由模拟计算确定各部分的生长偏差及对模式偏移的贡献. 并以此为依据对生长过程进行调整, 使再生长的 VCSEL 结构的模式位置大为改善, 同时为器件后期工艺的模式调节提供了准确的信息. 该方法也适用于确定其它内含谐振腔的器件的生长偏差和模式偏移的关系.

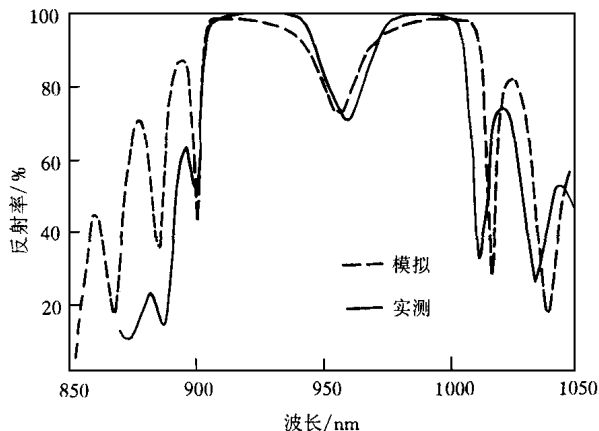


图 4 调整后生长的 VCSEL 的反射谱

参 考 文 献

- [1] Y.M. Wong *et al.*, *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(6): 995~ 1015.
- [2] Hideo Kosaka *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(2): 244~ 246.
- [3] J.L. Jewell *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(6): 1332~ 1346.
- [4] Pan Zhong *et al.*, *LEOS '96*, WY5, November, 1996.
- [5] M. Sugimoto *et al.*, *J. Crystal Growth*, 1993, **127**: 1~ 4.
- [6] G.S. Li *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **7**(9): 971~ 973.

- [7] H. Q. Hou *et al* , IEEE Photon Technol Lett , 1996, **8**(10): 1285~ 1287.
[8] D. L. Huffaker *et al* , IEEE Photon Technol Lett , 1996, **8**(5): 596~ 598.
[9] M. Born and E. Wolf, Principles of Optical, 6th edition, 1980.
[10] S. S. Murtaza *et al* , J. Lightwave Technol , 1996, **14**(6): 1081~ 1089.
[11] 陈志标, 等, 半导体学报, 1996, **17**(12): 891~ 897.

Determining the Influence of Growth Deviation on Mode Wavelength of VCSEL by Selective Etching

Zhang Yi, Pan Zhong, Du Yun, Chen Zhibiao, Zheng Lianxi and Wu Ronghan

(Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Received 23 May 1997, revised manuscript received 21 July 1997

Abstract A simple and convenient method that could determine the mode growth deviation of vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL) has been provided. The micro-spot reflection spectra of the main parts of the devices are measured through selective etching, and then the thickness deviation of these parts and their influence on the mode wavelength shift are obtained by simulative calculation. As a result, the mode position of the device grown after a process regulation have been improved greatly, and the reliable information can be provided for the mode adjusting in the device fabrication.

PACC: 4255P, 4260D, 8160C