

# MBE 生长面发射激光器的原位厚度监测

周增圻 潘 钟 林耀望 吴荣汉 王 圩

(国家光电子工艺中心 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

**摘要** 在 MBE 生长“DBR 型结构性材料”的过程中,由于生长中的多层结构干涉效应,使高温黑体辐射谱呈现振荡现象,利用此现象辅以计算机数据拟合,可以实现 MBE 生长中层次、组分和厚度的实时监控,对 MBE 系统生长垂直腔型结构材料的实时质量监控有重要意义.我们首次在国内采用这项技术,利用红外高温仪对 VCSEL 器件生长全过程(包括谐振腔)及多种组分 DBR 的表观衬底热辐射振荡进行监测,采用准黑体模型,结合扫描电镜、光反射谱等结果进行了分析,理论与实验得到了较好的吻合.

PACC: 4255P, 6855B, 4430

## 1 引言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)由于其在光通讯、光互联及光信息处理等领域广阔的应用前景引起了人们极大的兴趣.一个典型的 VCSEL 结构包括 100 层以上的  $\lambda/4$  DBR 镜面层,因而其生长需要很长的时间(12~17 小时).优化的 VCSEL 器件要求三个波长相匹配:P 型及 N 型 DBR 高反膜的中心波长,F-P 腔的谐振波长,增益谱的峰值波长.由于 VCSEL 的单程增益长度极短,因而对于多层介质高反膜堆 DBR 的反射率及腔膜位置要求极为严格,这就要求在这么长的生长过程中,维持稳定的生长速率,以严格控制 DBR、有源区各层的厚度及均匀性,这就使得生长过程的精确控制较为困难.在国外 VCSEL 生长中全过程的监控手段已有 RHEED 测量<sup>[1]</sup>、光反射谱测量<sup>[2,3]</sup>、多波长高温干涉仪测量<sup>[4]</sup>等方法.本文利用现有的 MBE 条件采用红外高温仪在整个生长过程对热辐射进行检测,这种方法对衬底转动、样片大小、环境辐射影响要求很低,并且是一种无源的控制手段,简单易行,厚度控制精度较高,国外也正在探索.我们由辐射振荡曲线分析外延质量,并对照扫描电镜及光反射谱结果,二者得到了较好的吻合.

周增圻 男,1937 年出生,高级工程师,北京大学物理系半导体专业毕业,现从事光电子器件的 MBE 工作

潘 钟 男,1969 年出生,博士,现从事面发射激光器的研制工作

1995 年 4 月 12 日收到初稿,1995 年 8 月 24 日收到修改稿

## 2 红外高温仪(infrared thermometer)测量原理及准黑体模型

图 1 中单线框内为红外高温干涉仪测量原理示意图. 红外辐射光经过一组光学透镜聚

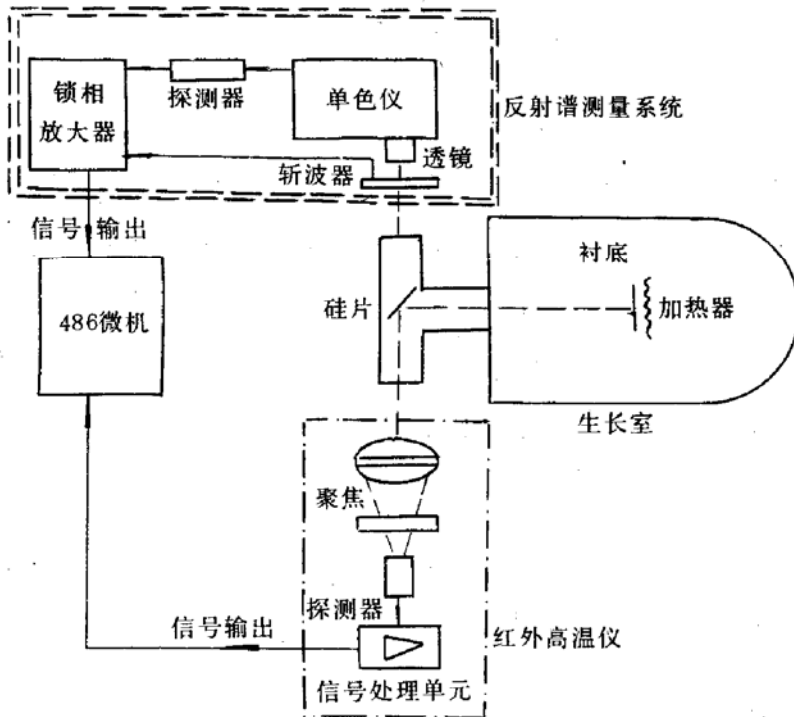


图 1 MBE 生长 VCSEL 原位厚度监测系统示意图  
单线框为红外高温仪测量系统; 双线框为反射谱测量系统.

焦至探测器,同时由特殊的滤光片选择出所需要的工作波段,在我们的测量设备中选定波段为,  $940 \pm 30\text{nm}$  在这一波段内滤波片的传递函数为一近高斯分布. 由探测器将辐射信号转化为电信号,传至信号处理单元. 经过放大整形等处理一方面转化为温度显示,另一方向由异步通讯 RS232 口传输至计算机. 观察窗口的三通接管是根据不间断监测的需要自行改装的. 采用一个 45 度倾斜安置的大面积硅片将衬底及系统热辐射反射至红外高温仪窗口,同时大大减少了直射的砷分子对窗口的沾污.

在超高真空的生长室中,衬底加热器辐射出的热量被衬底吸收,通过热传导转移至外延层后,被再

次辐射向真空系统. 如果生长的外延结构中含有不同材料,如 AlAs 和 GaAs,形成异质界面时,由于界面之间的多次反射产生的干涉效应,辐射能量在某一给定波长将会呈现出一个与生长速率及材料折射率有关的周期性振荡. 这是一个极为复杂的多次再辐射吸收过程,不同材料、不同厚度、温度下的发射系数不同,对热的贡献不同,逐层分析极为困难,采用黑体辐射模型可以将这一过程大为简化:将整个外延片看作一个黑体,假设某一波长的光入射至外延片上,由能量守恒定律可知,反射率  $R$ 、透射率  $T$  及吸收率  $A$  之和为一,根据 Kirchhoff 定律我们得到其发射系数等于吸收系数  $A$ . 当高温下衬底对这一波长全部吸收时,我们有  $R + A = 1$ . 这样发射率与反射率的关系为  $\epsilon = 1 - R$ . 所以计算这一含多层薄膜结构的黑体发射率的复杂工作转变为计算给定入射波长下的反射率的工作.

黑体辐射的 Planck 定律为: 
$$f_{\text{plank}}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$$

由上式可知辐射几率是波长与温度的函数,而与材料本身性质无关.

我们考虑在生长过程中如果存在一个由不同材料形成的异质界面时,两种材料的折射率及消光系数分别为  $(n_1, \kappa_1)$  及  $(n_2, \kappa_2)$ , 均为波长与温度的函数,随着生长厚度的增加,反射

率可以表达为: 
$$R = \left| \frac{r_1 + r_2 e^{-2i\delta_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta_1}} \right|^2$$

其中  $r_1, r_2$  分别为两层的菲涅耳系数;  $\delta_1 = 2i \tilde{N}_1 d$  为上层的复相位;  $\tilde{N}_1 = n_1 - i\kappa_1$  为上层的

复折射率,这样当生长这一层时由红外高温仪测量得到的表观衬底辐射能量为:

$$E = P_0 + \int_{\Delta\lambda} P_1(\lambda) f_{\text{plank}}(\lambda, T) (1 - R) d\lambda$$

其中  $P_0$  为系统背景能量,是由整个生长室系统包括各个源炉的辐射影响共同形成的.  $P_1(\lambda)$  是红外高温仪的滤波片的传递函数(近高斯分布),对波长的积分是考虑了在这一波段内所有波长对热辐射的贡献.而各种材料的折射率、消光系数均为特定生长温度下的系数,这需要在实际生长中通过测量拟合才能得到,各种资料文献报道甚少,而且不同系统生长时温度不同条件不同,这些光学参数也就不同.在我们计算中发现,如果选择 GaAs 的消光系数  $\kappa_{\text{GaAs}}$  很大,而 AlAs 的消光系数  $\kappa_{\text{AlAs}}$  很小,近似为零时,理论拟合曲线与实际振荡曲线吻合得很好.从材料吸收的角度分析,它主要包括两大部分,一是晶格振荡引起的声子吸收,对热辐射的贡献最大.二是带边吸收.在实际生长温度 570 度左右下,AlAs 的吸收带边由室温下的 600nm 红移到 800nm 附近,对于 940nm 的观测波长而言,带边吸收近似为零.热辐射主要归功于声子的作用,因而可将 AlAs 视为一个标准黑体,这正与上面计算取值相吻合,我们称这种模型为准黑体模型.

由多层薄膜反射干涉原理可知,在生长至第  $j$  层时整个外延片的反射率  $R_j$  为层厚  $d_j$ 、入射波长  $\lambda$ 、 $j$  层的 Fresnel 常数  $r_j$  及  $j$  层以上结构的等效 Fresnel 常数  $r_{j+1}$  的函数,利用递推公式或光学传输矩阵元方法<sup>[5]</sup>可以计算得到这时的反射率,那么由红外高温仪测量得到的热辐射功率为:  $E_j = P_0 + \int_{\Delta\lambda} P_1(\lambda) f_{\text{plank}}(\lambda, T) (1 - R_j) d\lambda$

通过计算可以看出由于界面之间的多次反射干涉效应,辐射能量将会呈现出周期性地振荡.在实际生长过程中,通过监控各层的起始位相点与停止位相点的变化,即可准确地控制层厚的生长.

### 3 实验

我们采用国家光电子工艺中心的 V80H MK II MBE 系统生长垂直腔面发射激光器.整个生长过程中生长室的压强小于  $1.3 \times 10^{-5}$  Pa,为兼顾 InGaAs 量子阱有源区及多层半导体高反射膜堆的生长,衬底温度始终维持在 750℃,这也保证了在监测全过程表观温度振荡时各种光学参数均稳定不变.在 N 型 DBR 生长过程中 AlAs 生长速率为 0.47  $\mu\text{m}/\text{h}$ , GaAs 生长速率为 1  $\mu\text{m}/\text{h}$ .而在有源区及 P 型 DBR 生长过程中 AlAs 生长速率为 0.3  $\mu\text{m}/\text{h}$ , GaAs 生长速率为 0.7  $\mu\text{m}/\text{h}$ .

在本工作中我们采用的垂直腔面发射激光器结构包括 23.5 对突变型 N 型  $\lambda/4$  AlAs/GaAs (80nm/66nm) 多层半导体高反射膜堆 DBR,3 个阱的 InGaAs/GaAs 应变量子阱有源区,20.5 对四层结构阶梯型 P 型  $\lambda/4$  AlAs/GaAlAs/GaAs/GaAlAs 多层半导体高反射膜堆 DBR,其中的 GaAlAs 层使 P 型 DBR 的串联电阻减小约一个量级.衬底用 In 粘于钼托之上,整个生长过程中维持衬底转速为 20rpm.

利用 IRCON V-12C05 红外高温仪在整个生长过程中观测表观衬底温度来进行原位厚度监测,如图 1 所示.窄带范围为 940nm  $\pm$  30nm.利用自建的微区小光点测量设备对整个样片进行逐点反射谱测量.后工艺制作采用质子轰击及台面两种方式形成侧向波导及电流限制,出光孔径为  $\Phi 5\mu\text{m}$  至  $\Phi 16\mu\text{m}$ .

## 4 结果分析

红外高温仪监测表观衬底温度结果如图 2(a)所示,我们取其中有源区生长附近 N 型 P 型 6 对  $\lambda/4$  DBR 及有源区示于图上. N 型 AlAs/GaAs DBR 生长时实线表示 AlAs,虚线表

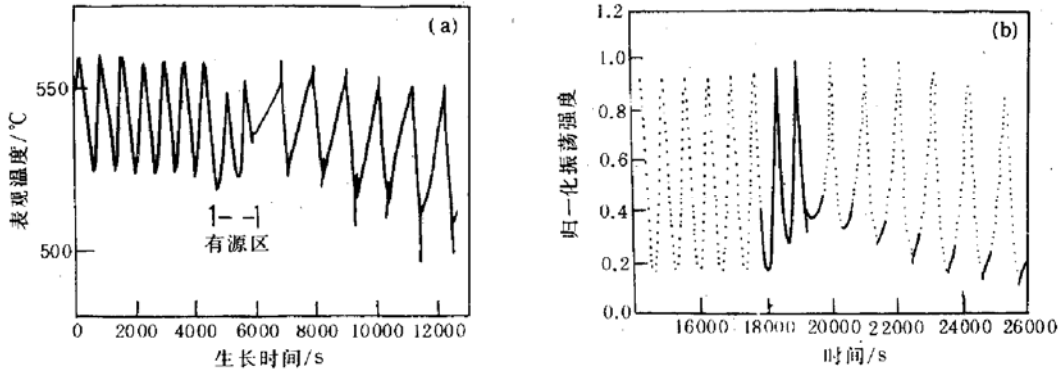


图 2 表观温度振荡曲线

(a) 实验测量得到曲线(起始坐标为 13342 秒); (b) 理论计算得到曲线(实线为有源区部分).

示 GaAs. 可以看出热辐射呈现出周期性振荡,每层 AlAs 和 GaAs 的起始位相点与停止位相点基本稳定不变,AlAs 起始点温度为 543°C,停止点温度为 540°C,GaAs 起始点温度为 538°C,停止点温度为 540°C. 当 GaAs 转变至 AlAs 生长时温度上跳 3°C 左右,其原因是 Al 炉温度高于 Ga 炉温度,导致快门开关时引起温度上跳,反之当 AlAs 转变至 GaAs 生长时温度下跳 3°C 左右,图 2(b)为采用准黑体模型计算机拟合的结果,可以看出二者基本吻合. 我们利用计算机模拟开始的 15 对 N 型 AlAs/GaAs  $\lambda/4$  DBR 的实际热辐射振荡,得到在 570°C 条件下的各种光学参数,如 GaAs、AlAs 的折射率和消光系数,在得到合适的参数后

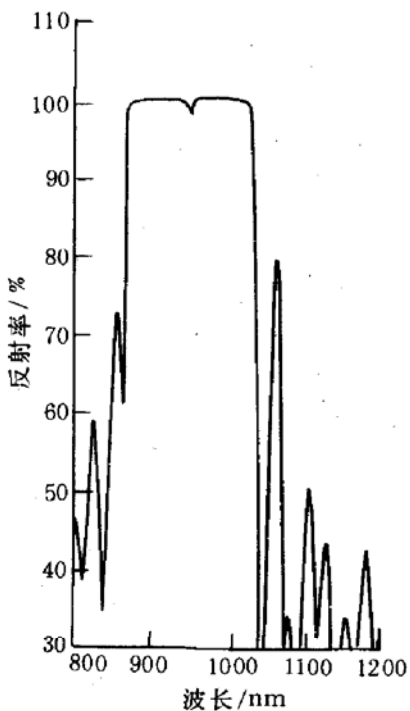


图 3 反射谱测量结果

我们再模拟后面的 DBR 及有源区生长. 比较图 2(a)、(b)中的有源区部分,我们发现在整个有源区生长过程中位相经历了近两个周期的变化,实际生长中有源区振荡时间比设计值短 40 秒,与计算值相比生长厚度相差 8nm,根据等效腔长对模式波长的影响<sup>[6]</sup>这样的偏差会导致模式波长向短波方向移动 8nm,这与反射谱模式波长测量结果相吻合,设计值为 950nm,生长结果为 943nm,如图 3 所示. 在 P 型 DBR 生长过程中,一个周期出现 GaAlAs 曲线的两次跳变,其原因也是由于 GaAlAs 生长时三个炉子较 GaAs、AlAs 生长时的两个炉子背景辐射有所不同,在实际控制中这一点可以通过计算机数据处理将其消除.

由于实时原位监控要求的数据处理较为复杂,通过以上热辐射振荡的实验,我们可以发展一种新型的中测手段如图 1 双框虚线所示,利用这种被动式的无源热辐射,在 N 型或有源区生长结束后,通过快速光谱仪将一段波长范围(如 0.7 $\mu\text{m}$  至 1.2 $\mu\text{m}$ )的热辐射谱输入计算机,考虑高温光学参数的变化

及黑体辐射几率谱,可以将反射谱拟合出来.通过分析反射谱的峰谷点及模式波长,我们可以判断出设计与实际生长的偏差,从而调整有源区、匹配层及 P 型 DBR 的生长,得到满意的外延片质量,进一步的工作正在进行中.

采用这种条件下得到的外延片制作的 VCSEL 器件测量结果如图 4 所示,室温阈值电流为 16mA,输出功率高于 8mW,单纵模、单横模工作,模式波长为 943nm,模式谱线半宽小于 0.2nm(受限于仪器分辨能力),微分量子效率可达 40%.

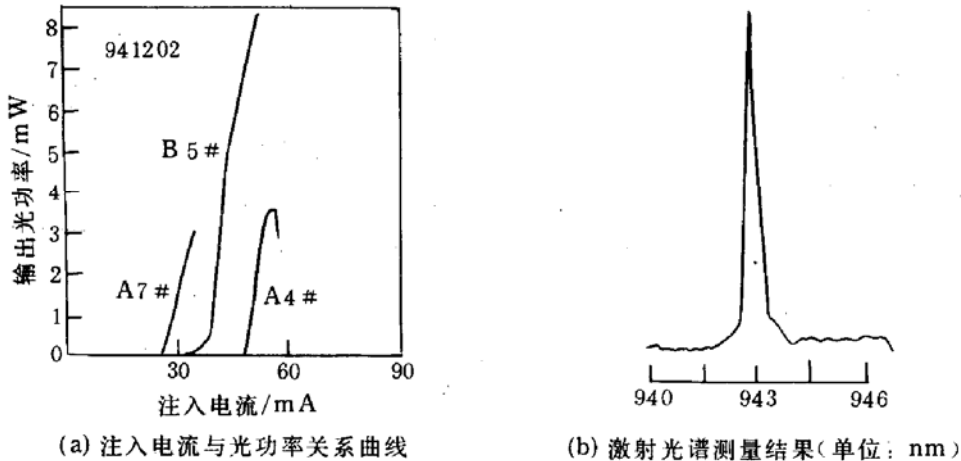


图 4 InGaAs/GaAs VCSEL 器件测量结果

## 5 结论

我们利用红外高温仪对 MBE 生长 VCSEL 器件全过程(包括谐振腔)及多种组分 DBR 的表观衬底热辐射振荡进行监测.实验分析表明,采用准黑体模型结合扫描电镜、光反射谱等结果,能够很好地分析外延片生长层厚控制,进一步发展,对 MBE 系统生长垂直腔型结构材料的实时质量监控有重要意义.

**致谢** 感谢美国 U. C. I. 的 Prof. Herry Lee, 北京清华大学的刘小明老师在本项工作中的有益的交流和讨论.

## 参 考 文 献

- [1] J. D. Walker *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1990, **56**: 2494.
- [2] K. Bacher *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1992, **61**: 1378.
- [3] J. V. Armstrong *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1990, **61**: 2770.
- [4] H. Grothe *et al.*, J. Cryst. Growth, 1993, **127**: 10105.
- [5] 唐晋发, 郑权编著, 应用薄膜光学, 上海: 上海科学技术出版社(1984), 174 页.
- [6] 潘钟, 吴荣汉, 王启明, Acta Physica Sinica, 1995, **4(11)**: 810~815.

## In Situ Thickness Monitoring for MBE-VCSEL Growth by Infrared Thermometer

Zhou Zengqi, Pan Zhong, Lin Yaowang, Wu Ronghan and Wang Wei

*(National Research Center for Opto-Electronic Technology, Institute of Semiconductors,  
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)*

Received 12 April 1995, revised manuscript received 24 August 1995

**Abstract** We monitor the apparent substrate temperature oscillation during the whole growth of MBE-VCSEL including multi-composition DBR and resonant cavity using an infrared thermometer. The simulation analysis based on quasi-blackbody model coincides with in situ thickness monitoring experiment results.

**PACC:** 4255P, 6855B, 4430