

文章编号 1004-924X(2006)01-0054-04

金属有机化合物汽相淀积技术制备 布拉格反射镜确定外延厚度的方法

盖红星,陈建新,邓 军,廉 鹏,俞 波,李建军,韩 军,沈光地
(北京工业大学 电控学院 光电子技术实验室,北京 100022)

摘要:外延膜层厚度的精确性对垂直腔面发射激光器(VCSEL)是十分重要的。应用传输矩阵方法分析了厚度偏差对半导体布拉格反射镜(DBR)反射谱的影响,并利用这种影响提出了一种金属有机化合物汽相淀积(MOCVD)制备布拉格反射镜精确确定外延厚度的方法。据此,应用MOCVD生长了980 nm VCSEL外延片,其反射谱中心波长为982 nm。结果表明,应用这种方法能够实现材料厚度、MOCVD系统生长参数的定标以及为VCSEL的材料生长提供可靠的依据。

关键词:金属有机化合物汽相淀积;布拉格反射镜;反射谱;膜厚测定

中图分类号:O484.5 文献标识码:A

Determining method of the thickness of the distributed Bragg reflector grown by metal-organic chemical vapor deposition

GAI Hong-xing, CHEN Jian-xin, DENG Jun, LIAN Peng, YU Bo, LI Jian-jun, HAN Jun, SHEN Guang-di

*(Department of Electrical Engineering, Beijing Optoelectronic Technology Laboratory
Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)*

Abstract: For a vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL), the epilayer thickness accuracy is very important. The influence of the thickness deviation on the reflection spectrum of semiconductor materials DBR was analyzed using the transfer matrix method. By the influence, a determining method of the thickness of the DBR grown by MOCVD was presented. Based on the approach, the 980 nm VCSEL wafer was grown by MOCVD, in which center wavelength of the VCSEL reflection spectrum is 982 nm. The results show that the method can be used in verifying the thickness of the epitaxy materials and growth parameters of the MOCVD and provide the reliable information for the VCSEL growth.

Key words: MOCVD; DBR; reflection spectrum; thin film thickness measurement

收稿日期:2005-09-22;修订日期:2005-11-18.

基金项目:本项目得到国家973计划(No. TG2000068302)、国家自然科学基金(No. 60276033)和北京市教委(No. 01kJ-014)的资助。

1 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 与传统的边发射半导体激光器相比,具有阈值电流低、单纵模光输出、输出光束方向性、对称性好、调制频率高等特点,在光信息处理、光互联、光交换、光电集成、光计算、光存储和光显示等许多领域有广阔的应用前景^[1-3]。

VCSEL 结构十分复杂,激励条件苛刻,除了要求材料性能良好以外,还要使其内含的布拉格反射镜 (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,但是 VCSEL 的布拉格反射镜厚度准确与否不仅对反射率有影响而且会引起谐振腔位置的移动,所以对材料生长厚度的精确确定和控制十分关键^[4-5]。

金属有机化合物汽相淀积 (MOCVD) 技术由于生长速度快、生产率高、条件易控制,已经成为 VCSEL 等发光器件的主要制备方法。尽管先进的 MOCVD 设备一般都配有在位监测技术对生长速度进行监测,但仍不能通过此技术准确地确定材料的实际生长厚度。因此,为了能够快速精确的对生长材料厚度定量化,本文首先应用传输矩阵方法分析了中心波长为 980 nm, GaAs 和 AlGaAs 材料组成的 DBR 的厚度偏差对反射谱的影响,并利用这种影响提出了一种 MOCVD 两次生长 DBR 精确确定外延厚度的方法。应用这种方法能够实现 MOCVD 外延方法方便地确定 DBR 对每层的生长厚度标定,为垂直腔面发射激光器的 MOCVD 材料外延提供可靠的依据,另外也可以用来对外延系统生长速度进行定标。

2 原理

矩阵法是广泛应用于周期性光学薄膜的光学特性研究,其基本思想采用 2×2 矩阵描述电磁场在光学薄膜中的传播规律^[6]。对于图 1 所示的多层光学薄膜^[7],将其划分为一系列的等折射率膜层,每一个膜层都有唯一的特征矩阵。通过光学矩阵的连乘可以描述电磁波在整个膜堆里任何位置的传播特性。垂直腔面发射激光器由上、下布拉格反射镜和一个半波长整数倍的谐振腔近百层的半导体材料组成,满足薄膜定义。因此 VCSEL

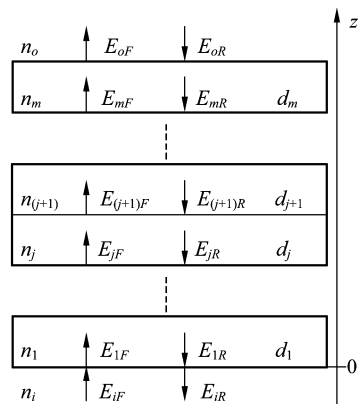


图 1 多层光学薄膜结构示意图

Fig. 1 Structure of a multi-layer thin film

或者 DBR 光学薄膜特性都可以由光学传输矩阵法计算得到。假设光是垂直入射,膜系中第 i 层的特征矩阵可以描述为:

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} \cos(k_0 n_i d_i) & -\frac{i}{n_i} \sin(k_0 n_i d_i) \\ -i n_i \sin(k_0 n_i d_i) & \cos(k_0 n_i d_i) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 \mathbf{M}_i 、 n_i 、 d_i 分别为第 i 层介质的传输矩阵、折射率和薄膜的厚度, k_0 为真空中的波数。

那么整个膜堆的特征矩阵为:

$$\mathbf{M} = \prod_{i=1}^N \mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 N 为布拉格反射镜的周期数。振幅反射率可以表示为:

$$r = \frac{n_0 M_{11} - n_g M_{22} + n_0 M_{12} - M_{21}}{n_0 M_{11} + n_g M_{22} + n_0 M_{12} + M_{21}}, \quad (3)$$

功率反射率 R 为振幅反射率模的平方:

$$R = |r|^2, \quad (4)$$

GaAs 基 VCSEL 一般采用厚度为 $1/2$ 波长的 GaAs/AlGaAs DBR 对,将此膜系参数代入公式(1)-(4)中可以得到 DBR 的反射谱,其中心波长应该是激光器工作波长,然而实际的 MOCVD 外延由于生长的误差会引起 DBR 对的厚度偏差使得中心波长偏离设计值。为了标定 GaAs 层和 AlGaAs 层的具体厚度,使生长的 DBR 厚度尽可能与设计值一致,可以根据这种厚度偏差对中心波长的影响来准确地确定 MOCVD 外延生长的 DBR 对每层的厚度值。

基本思想是,首先设计厚度为 $d_1 = 113.7$ nm GaAs 和 $d_2 = 30$ nm $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 的 8 对 DBR,

其反射谱中心波长为 980 nm, 并应用 MOCVD 外延技术生长设计 DBR1 结构; 其次, 在第一次生长基础上外延的 DBR2 结构固定 d_1 (或者固定 d_2) 生长条件改变 d_2 (或者改变 d_1) 层的生长条件。假设, 成倍增加 d_2 的生长厚度 (MOCVD 外延容易实现), 测量制备的 2 个 DBR 反射谱可以得到他们的中心波长, 设分别为: λ_1 和 λ_2 。那么可以得到以下公式:

$$n_1 d_1 + n_2 d_2 = \lambda_1 / 2, \quad (5)$$

$$n_1 d_1 + n_2 d_2 \times 2 = \lambda_2 / 2. \quad (6)$$

其中, n_1 和 n_2 分别为 GaAs 和 AlGaAs 材料的折射率, 通过材料组分定标能够间接求得所需材料的折射率。另外, 前面提到 DBR 设计厚度分别为 113.7 nm 和 30 nm, 这里只是材料生长的目标, 对生长完的 DBR 结构其厚度, 这两个参数当作未知数来处理。求解上述两式可以精确地确定 DBR 对的每层的实际厚度, 也就是确定了 d_1 和 d_2 。根据所求得厚度值反过来修正 MOCVD 生长参数达到对布拉格反射镜和垂直腔面发射激光器外延的准确生长, 另外也可以用来对外延系统生长速度进行定标。需要指出的是这种方法依赖于 MOCVD 系统的性能, 现代 MOCVD 外延技术厚度控制已经达到原子尺寸的生长水平, 并且其良好的可重复再现性和高均匀性为实验提供了基础^[8]。

3 计算与实验结果

不论是 1/4 波长的还是非 1/4 波长的布拉格反射镜的反射谱的中心波长反映的都是 DBR 对的厚度, DBR 对中某一层的厚度变化都会引起反射镜的中心波长的偏移。应用前面叙述的矩阵理论, 很容易模拟由于厚度偏差带来的中心波长的移动。为了与实验一致, 实验模拟了非 1/4 波长的两种 DBR 的反射谱, 如图 2 中实线和划线所示。布拉格反射镜结构 DBR1 设计为 GaAs (113.7 nm)/Al_{0.98}Ga_{0.02}As (30 nm), 另一个 DBR2 结构为 GaAs (113.7 nm)/Al_{0.98}Ga_{0.02}As (60 nm), 周期数都是 8 对。从图中可以看出 DBR1 的中心波长为 980 nm, 而 DBR2 则因为 Al_{0.98}Ga_{0.02}As 设计厚度加倍使得反射镜的中心波长向长波长移动。正是基于 DBR 中心波长受厚度偏差的影响, 可以根据式 (5) 和式 (6) 对外延

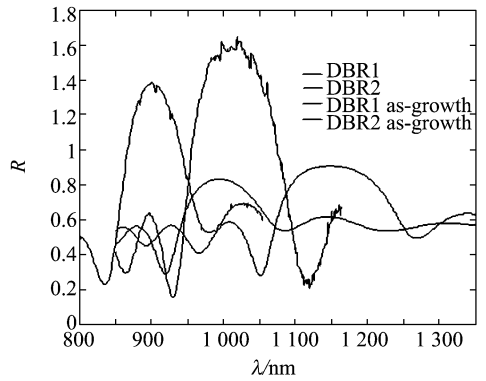


图 2 计算和测量的 DBRs 反射谱

Fig. 2 Calculated and measured reflection spectrum of the DBRs

材料的厚度进行定标。

图 2 中也给出了使用 EMCORE 公司的 D125 系列 MOCVD 外延设备制备的前面设计的 DBR1 和 DBR2 的反射谱, 点线代表 DBR1-growth 的反射谱线, 反射谱测试系统为 AC-CENT RPM Sigma, 点划线代表 DBR2-growth 测量结果。比较图 2 中结果, 设计值与实际生长的有几十纳米的偏差, 这是由于在材料的生长前对生长速度预计偏快造成的。MOCVD 系统的生长速度的这种误差对确定 DBR 对每层的厚度并没有影响, 因为在式 5 和式 6 中的厚度值 d_1 和 d_2 被当作变量来求解, 而实验关心的仅仅是中心波长的位置。DBR1-growth 和 DBR2-growth 的中心波长分别为 900 nm、1 016 nm 左右, 由式 5 和式 6 即可确定 GaAs 层和 Al_{0.98}Ga_{0.02}As 层实际生长厚度是: $d_1 = 111$ nm 和 $d_2 = 19$ nm。其中 GaAs 层的厚度与设计相差不到 3 nm 而 Al_{0.98}Ga_{0.02}As 层的厚度相差 1/3 还多, 说明对它们的生长速度估计都过快。

应用此方法标定的材料厚度除去在材料折射率选择上引入的误差以外, 所确定的厚度值是一个真实的数据。反过来根据 MOCVD 系统材料生长参数又可以推断真实的生长速度。在确定了 DBR 对每层厚度的同时校正了 MOCVD 系统的生长参数, 外延生长了 980 nm 的垂直腔面发射激光器。其上 DBR 包括 22 对不掺杂 GaAs (70 nm)/Al_{0.98}Ga_{0.1}As (80 nm), 光学厚度为 980 nm 的谐振腔是由 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 本征材料作为谐振腔调节层和 3 个 In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs 量子阱构

成的,下 DBR 为 26 对 n 型 GaAs(70 nm)/Al_{0.98}Ga_{0.1}As(80 nm),整个结构生长在 Si 掺杂的 GaAs(001)偏(111)2°衬底上。VCSEL 外延片测量同样使用 ACCENT RPM Sigma 测试系统,测试结果如图 3 所示。从图中可以看出,反射谱的中心波长为 982 nm,高反射带宽 93 nm,说明我们根据前面分析对 MOCVD 系统的调整达到了预期的目的。在高反射区的凹陷为 VCSEL 谐振

腔波长约 960 nm 附近,比设计的 980 nm 要短,这是因为生长的 VCSEL 谐振腔的光学厚度要比设计的薄。为了使谐振腔模式波长向 980 nm 移动,可调节谐振腔调节层的厚薄,使之于 DBR 中心波长和量子阱增益峰值波长尽量一致。

4 结 论

为了制备高质量的垂直腔面发射激光器,严格控制外延厚度,本文首先应用传输矩阵方法分析了中心波长为 980 nm,GaAs 和 AlGaAs 材料组成的 DBR 厚度偏差对反射率以及对谐振腔位置的影响,并利用这种影响提出了一种 MOCVD 两次生长精确确定 DBR 等器件结构厚度的方法。根据实验结果调整 MOCVD 生长参数,测量制备 VCSEL 反射谱,其中心波长与设计基本一致,从而验证了应用 MOCVD 两次生长 DBR 结构来确定材料厚度是一种可靠方法,同时也可以为对材料生长系统生长参数定标提供真实的数据,为垂直腔面发射激光器材料准确生长提供保障。

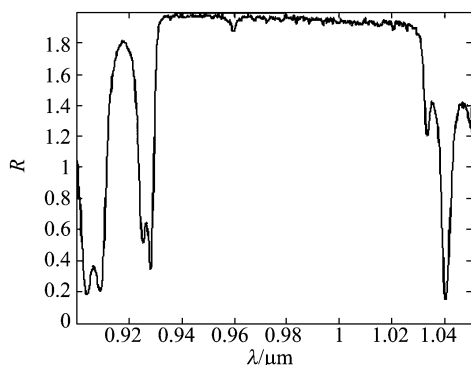


图 3 VCSEL 器件反射谱测量结果

Fig. 3 Reflection spectrum of VCSEL

参考文献:

- [1] KOSAKA H. Smart integration and packaging of 2D VCSEL's for high speed parallel links[J]. *IEEE J. Select. Topics in Quant. Electron.* 1999,5(2):184-193.
- [2] 孙艳芳,金振花,宁永强,等.高功率低发射 VCSELs 的制作与特性研究[J]. *光学精密工程*,2004,12(5):449-453.
SUN Y F, JIN ZH H, NING Y Q, *et al.* Fabrication and experimental characterization of high power bottom-emitting VCSELs[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004,12(5):449-453. (in Chinese)
- [3] KOSAKA H. VCSEL array module and its applications for optical inter connection and switch [J]. *Jpn. J Appl. Phys.*, 1998,37:1394-399.
- [4] JEWELL J L, HARBISON J P, SCHERER, A. Vertical-cavity surface-emitting lasers: Design, growth, fabrication, characterization[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1991,27(6):1332-1346.
- [5] 张益,潘钟,杜云.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[J]. *半导体学报*. 1998,19(1):76-80.
ZHANG Y, PAN ZH, DU Y. Determining the influence of growth deviation on mode wavelength of VCSEL by selective etching [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1998,19(1):76-80. (in Chinese)
- [6] 杨树梅. CAD 在光学薄膜设计和生产中的应用[J]. *光学精密工程*, 1996,4(6):22-24.
YANG SH M, Application of CAD in design and manufacture for optical thin films[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996,4(6):22-24. (in Chinese)
- [7] KIM B G, GARMIRE E. Comparison between the matrix method and the coupled wave method in the analysis of Bragg reflector structures[J]. *JOSA A*, 1992,9:132-136.
- [8] BREILAND W G, COLTRIN M E, CREIGHTON J R, *et al.* Organometallic vapor phase epitaxy (OMVPE)[J]. *Materials Science and Engineering*, 1999,R24: 241-274.

作者简介:盖红星(1977—),男,山东泰安人,现为北京工业大学北京市光电子技术实验室在读博士研究生,主要研究方向为半导体材料 MOCVD 生长和半导体激光器研制工作。E-mail:gate@emails. bjut. edu. cn