

InGaAsP/InP 外延薄膜折射率与厚度测量

刘永智 余般枚 边 红

电子科技大学,成都 610054

(1991年12月16日收到;1992年3月9日收到修改稿)

本文报道一种应用波导耦合光栅测量 InGaAsP/InP 外延薄膜折射率与厚度的方法。该法测量精度高,具有非破坏性与工艺实时性优点。外延薄膜折射率与厚度测量精度分别可达到 $\pm 2 \times 10^{-3}$ 与 $\pm 1 \times 10^{-2} \mu\text{m}$,这完全满足 DFB 与 DBR 等一类半导体激光器以及有源导波光学器件的设计需要。

PACC: 4280S, 4280L, 7865, 4280F

一、引言

在半导体激光器以及其它有源导波光学器件的研究中常常需要很好掌握有源层以及波导层参数:折射率与厚度情况。这些参数直接影响着激光器发射波长与模谱特性。特别是在 DBR 与 DFB 半导体激光器中,模折射率 0.01 误差即会引起 Bragg 波长约 50 Å 的变化。对于 InGaAsP/InP 四元系的器件来说,外延层参数不仅决定于外延前各组分的配比而且与外延工艺过程密切有关。因此,如何从工艺上保证器件满足预定设计要求,提高工艺上的一致性,一定时期对外延层参数进行抽样检查也是很有必要的。目前,已有几种确定 InGaAsP 四元系折射率的方法^[1-4]。对 InGaAsP/InP 结构外延层折射率的直接测定则是由 C. H. Henry 等人于 1985 年报道的^[5]。该法将 Ar⁺激光通过外延层上刻蚀光栅耦合入外延层,由 Ar⁺激光激发的荧光再由光栅耦合输出。通过对输出光谱线的测量与计算即可得到外延层折射率与厚度值。这一方法的主要缺点是需要在外延层上制作刻蚀光栅,并且计算是在事先假定光栅槽深 0.1 μm 下得到的,因此所得到的折射率精度较低,仅在±0.01 左右。本文介绍一种利用光胶光栅进行外延层参数测量的方法。该法将 1.3 μm 波长激光通过光胶光栅耦合进 InGaAsP 外延层,然后对所激励的 TE、TM 导模的输入耦合角分别进行测量,最后借助相应导模色散方程的计算机数值求解来得到外延层折射率与厚度。同 C. H. Henry 所报道的方法比较,该法不仅测量精度高(不必考虑光栅材料折射率大小以及槽深),而且由于测量后光胶光栅很容易去掉,因而是一种不影响工艺流程进行的具有很强工艺实时性的测量方法。同平板介质光波导参数测量中常用的棱镜耦合法相比,该法对被测表面的平整度与光洁度要求不高。这点正适于半导体液相外延层表面情况。此外,光栅耦合测量法对被测样品材料折射率没有任何限制,而棱镜耦合法则要求棱镜材料折射率必须高于被测样品材料折射率。对于 GaAs、InP、GaAlAs、InGaAsP 这类高折射率材料来说,棱镜材料的选择则是很困难的。

本文将介绍该法的测量原理,样品准备、测量结果以及对测量误差的分析讨论。

二、测量原理

实验测量原理如图 1 所示, 这实际是一波导光栅耦合器。波长 $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ 的激光束通过光胶光栅耦合入 InGaAsP 外延层, 并在其中激励起正向传输的导模。紧靠在样品另一端的 Ge 光电探测器可以指示从外延层输出的光。在这里空气、InGaAsP 以及 InP 缓冲层构成了一个三层非对称平板光波导。按照光栅耦合理论, 入射光与导波光间满足如下 Bragg 条件

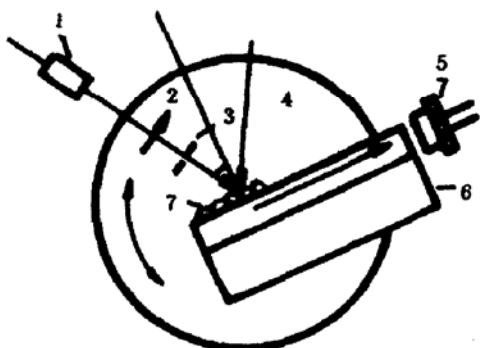


图 1 应用耦合波导光栅测量波导参数的原理

- 1. 光束准直器
- 2. 起偏器
- 3. 光栅
- 4. 测角转台
- 5. Ge 探测器
- 6. InGaAsP/InP 样品片
- 7. 光胶光栅

$$n_0 k_0 \sin \theta = \pm N_m k_0 + q \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (1)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda},$$

$$q = \pm 1, \pm 2, \dots,$$

$$m = 0, 1, 2, \dots,$$

θ 为光入射角; N_m 为 InGaAsP 波导层中导模折射率, 当其沿 Z 方向传播时取正, 反之取负; Λ 为光栅周期; 对于空气折射率 $n_0 = 1$ 。从公式(1)可见在一定波长下, 每一导模对应一定入射角(q 一定)。因此, 只要准确测量输入耦合角由已知光栅周期 Λ 就能计算出对应导模折射率 N_m 。由导波光学理论可知, 三层非对称波导的色散方程可写为

$$k_0(n_1^2 - N_m^2)^{1/2}d = \varphi_{10} + \varphi_{12} + m\pi, \quad (2)$$

$$\varphi_{10} = \operatorname{tg}^{-1}\left[\left(\frac{n_1}{n_0}\right)^{2\rho}\left(\frac{N_m^2 - n_0^2}{n_1^2 - N_m^2}\right)^{1/2}\right],$$

$$\varphi_{12} = \operatorname{tg}^{-1}\left[\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{2\rho}\left(\frac{N_m^2 - n_2^2}{n_1^2 - N_m^2}\right)^{1/2}\right],$$

$$\rho = \begin{cases} 0 & \text{TE 模} \\ 1. & \text{TM 模} \end{cases}$$

d 为波导厚度(即外延层厚度)。从(2)式可见, 只要获得两个以上模折射率数据 N_n 、 N_m 以及 n_2 值即可导出一个仅含 n_1 而与波导层厚度无关的方程

$$\left(\frac{n_1^2 - N_n^2}{n_1^2 - N_m^2}\right)^{1/2} = \frac{\operatorname{tg}^{-1}\left[\left(\frac{n_1}{n_0}\right)^{2\rho}\left(\frac{N_n^2 - n_0^2}{n_1^2 - N_n^2}\right)^{1/2}\right] + \operatorname{tg}^{-1}\left[\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{2\rho}\left(\frac{N_n^2 - n_2^2}{n_1^2 - N_n^2}\right)^{1/2}\right]}{\operatorname{tg}^{-1}\left[\left(\frac{n_1}{n_0}\right)^{2\rho}\left(\frac{N_m^2 - n_0^2}{n_1^2 - N_m^2}\right)^{1/2}\right] + \operatorname{tg}^{-1}\left[\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{2\rho}\left(\frac{N_m^2 - n_2^2}{n_1^2 - N_m^2}\right)^{1/2}\right]}. \quad (3)$$

方程(3)为一超越方程, 利用计算机数值计算可以求得 n_1 的值; 而由式(2)可求得厚度 d , 例如对 TE 模有

$$d = k_0^{-1}(n_1^2 - N_m^2)^{-1/2} \left[\operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{N_m^2 - n_0^2}{n_1^2 - N_m^2}\right)^{1/2} + \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{N_m^2 - n_2^2}{n_1^2 - N_m^2}\right)^{1/2} + m\pi \right]. \quad (4)$$

三、样品准备

从公式(2)可见,为了保证光在 InGaAsP 层中传输,作为样品该层的厚度至少应满足下式

$$d > k_0^{-1} (n_1^2 - n_2^2)^{-\frac{1}{2}} \operatorname{tg}^{-1} \left[\left(\frac{n_1}{n_0} \right)^{2\rho} \left(\frac{n_2^2 - n_0^2}{n_1^2 - n_2^2} \right)^{1/2} \right]. \quad (5)$$

为了避免光栅多级衍射给测量带来干扰,有必要严格选择光栅周期 Λ ,使其只发生 $q=+1$ 级或 $q=-1$ 级衍射。对于由空气正向入射($\theta>0$)产生 -1 级衍射、激励正向导模时 Λ 应为

$$\frac{\lambda}{n_2 - 1} > \Lambda > \frac{\lambda}{n_2 + 1}. \quad (6)$$

激励反向导模时 Λ 应为

$$\frac{\lambda}{n_2} > \Lambda > \frac{\lambda}{n_2 + 1}. \quad (7)$$

由(5)、(6)、(7)式取 $\lambda=1.3\mu\text{m}$, $n_1 \approx 3.52$, $n_2 = 3.16$ 可得

$$d > 0.15\mu\text{m},$$

$$0.6\mu\text{m} > \Lambda > 0.41\mu\text{m}, \text{(正向导模)}$$

$$0.41\mu\text{m} > \Lambda > 0.31\mu\text{m}. \text{(反向导模)}$$

实验样品的外延层厚度 d 一般控制在 $0.5-0.7\mu\text{m}$ 左右。波导层上光栅是由厚约 $0.15\mu\text{m}$ 的 AZ1350 正性胶经 He-Cd 激光($0.4416\mu\text{m}$)全息制成(只保留耦合段)。正向耦合时取 $\Lambda=0.45\mu\text{m}$, 反向耦合时取 $\Lambda=0.33\mu\text{m}$ 。

四、实验结果与讨论

测量用光源为一光束经准直的 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP 单模半导体激光器。为使所激励的 TE 与 TM 模严格分开, 输入光路放有一起偏器。样品放置在精密旋转台上, 其角度读数精度为 $\pm 1'$ 。光栅周期经 $\lambda=633\text{nm}$ 的 He-Ne 激光衍射测量确定。表 1 列出一组样品在基模激励下测量计算的 TE_0 与 TM_0 模的有效折射率以及由此利用式(3)与(4)计算的 InGaAsP/InP 外延层折射率 n_1 与厚度 d 。应用(3)式进行计算时所选取的迭代精度为 10^{-6} 。

表 1 (a) 测量计算的 TE_0 模和 TM_0 模的有效折射率

片号	测量方式 模折射率	正向耦合		反向耦合		平均值	
		TE_0	TM_0	TE_0	TM_0	TE_0	TM_0
1		3.429	3.406	3.425	3.402	3.427	3.404
2		3.425	3.398	3.421	3.394	3.423	3.396
3		3.424	3.397	3.420	3.393	3.422	3.395

(b)由(a)数据根据(3)、(4)式计算的 InGaAsP 的薄膜参数

片号	薄膜参数	n_1	$d(\mu\text{m})$
1		3.530	0.57
2		3.531	0.55
3		3.531	0.54

实验所作 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 外延层样品, 其 $\lambda_c = 1.3\mu\text{m}$, $x = 0.27$, $y = 0.61$. 为了证实结果的可靠性, 我们把所得的数据同其它一些研究工作者在同一组分下给出的结果在表 2 中进行了比较. 其间的差异除各自所采用方法不同外, 一定程度还与 InGaAsP/InP 外延方式与过程有关. 在表 2 中还将所得的 d 值同电子显微镜测量值进行了比较, 其结果是令人满意的.

表 2 $\text{In}_{0.73}\text{Ga}_{0.27}\text{As}_{0.61}\text{P}_{0.39}$ 薄膜参数同其它方法结果比较

参 数	测量方法	本实验*	文献[1]	文献[4]	文献[6]	文献[8]	电子显微镜*
n_1		3.531	3.52	3.52	3.53	3.52	/
$d(\mu\text{m})$		0.55	/	/	/	/	0.57

* 平均值

测量结果误差主要来自以下几方面

1. 耦合角 θ 的测量

由(1)式有 $\delta N_m = \pm (\frac{\lambda}{\Lambda^2} \delta \Lambda - \cos \theta \delta \theta) \simeq \pm \cos \theta \delta \theta$ 在 $\theta = 45^\circ$ 下, $\delta \theta = \pm 1'$ 由此所计算的有效折射率误差约为 $\delta N_m \simeq \pm 2 \times 10^{-4}$;

2. 用于测量的光束发散角

设光束均匀光强区发散角为 $\pm \delta \alpha$, 则由此带来误差为 $\delta N_m \simeq \pm \cos \theta \delta \alpha$, 实验中 $\delta \alpha \simeq 10'$, 因此 $\delta N_m \simeq \pm 2 \times 10^{-3}$.

3. 理论计算误差

确定 N_m 所造成的误差将引入(3)式对 n_1 的计算产生影响, 计算表明 δn_1 与 δN_m 变化在同一数量级. 由(4)式 d 的误差主要来自 n_1 的确定.

从上述分析可以看到, 整个测量精度主要受限于光束发散角, 因此在实验中引入光阑是必要的.

综上所述, 我们利用光栅耦合法在 $1.3\mu\text{m}$ 波长下通过测量计算得到 $\text{In}_{0.73}\text{Ga}_{0.27}\text{As}_{0.61}\text{P}_{0.39}$ 四组分外延层折射率与厚度. 所得到的折射率与文献[6]、[8]报道的结果基本吻合, 而厚度也为电子显微镜的测量所证实. 折射率与厚度测量精度分别可达到 $\delta n \simeq \pm 2 \times 10^{-3}$, $\delta d \simeq 1 \times 10^{-2}\mu\text{m}$. 该法的最大优点是精度高, 操作具有非破坏性, 不会象棱镜耦合法那样要求测量表面十分平整光滑, 对被测材料折射率也没有任何限制. 该法可用于其他高折射率波导层参数以及折射率色散测量. 因此, 应用这一方法测量外延层参数将给半导体

激光器以及半导体导波光学器件设计带来莫大好处。

参 考 文 献

- [1] P. Chandra, L. A. Coldren and K. E. Steuge, *Electron. Lett.*, **17**, 6(1981).
- [2] S. Adachi, *J. Appl. Phys.*, **53**, 5863(1982).
- [3] K. Utaka, Y. Suematsu, K. Kobayashi and H. Kawanishi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **19**, L137(1980).
- [4] H. Burkhard, H. W. Dinges and E. Kuphal, *J. Appl. Phys.*, **53**, 655(1982).
- [5] C. H. Henry, L. F. Johnson, R. A. Logan and D. P. Clarke, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-21**, 1887(1985).
- [6] R. E. Nahory, M. A. Pollack, W. D. Johnston and R. L. Barnes, *Appl. Phys.*, **33**, 659(1978).
- [7] G. H. Olsen, T. Z. Zamerowski, R. T. Smith and E. P. Fertin, *J. Electron. Mater.*, **9**, 977(1980).
- [8] Y. Itaya, S. Katayama and Y. Suematsu, *Electron. Lett.*, **15**, 123(1979).

Determination of Refractive Index and Thickness of InGaAsP/InP Epitaxial Layers

Liu Yongzhi, Yu Banmei and Bian Hong

University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054

(Received 16 November 1991; revised manuscript received 9 March 1992)

Abstract

A method for determining the refractive index and thickness of InGaAsP/InP epitaxial layers using the optical waveguide grating coupler is presented. The advantages of this method are of the high measuring accuracy, no mechanical damage to the film, and it is timely for the technological process. The deduced accuracys of the refractive index and thickness of the film are ± 0.002 and $\pm 0.01\mu\text{m}$, respectively. They are quite sufficients for the designing of the DFB, DBR semiconductor lasers or active optical waveguide devices.

PACC: 4280S, 4280L, 7865, 4280F