

一种新型的材料内应力测试方法 ——偏振透射差分法

赵玲慧[†] 陈涌海

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 采用一种全新的偏振透射差分法—PTD(polarization transmittance difference)法来测量半导体衬底材料的内应力分布. 由于该方法使用了偏振调制技术, 无需旋转样品或者偏振元件进行多次测量, 使得测量过程变得简单、迅速, 并准确给出整体材料的内应力二维分布图. 此方法属于无损测试.

关键词: 偏振透射差分; 内应力; 弹光效应; 光弹性调制器

PACC: 8170; 8170G

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0555-03

1 引言

一般来说, 材料在生长及冷却过程中会形成各种微观缺陷从而引起弹性畸变, 导致应力产生; 或者材料经过表面工艺处理、塑性变形后卸载就会在材料内部残留有应力. 内应力的大小直接反映了材料的质量高低和制备工艺的优劣. 但是, 直到目前为止, 国内半导体行业对于材料内应力的测试方法也仅依赖于 X 射线衍射法. 这种方法虽然无损于测试材料, 但其测量误差较大, 并且由于其贯穿深度有限, 只能测试表面层或者浅层的残余应力, 因此发展一种能够准确全面表征材料内应力并且方便快捷的测试方法迫在眉睫.

本文采用了一种全新的偏振透射差分法—PTD(polarization transmittance difference)法来测量材料的内应力, 它由国际流行的表征材料表面各向异性的偏振差分反射谱法——RDS 法演变而来^[1,2]. 用小于测试材料禁带宽度光子能量的线偏振激光光源以特定方向近垂直入射测试材料, 利用光弹性调制器(PEM)结合检偏器对透射光的偏振状态进行检测, 测量出测试材料表面上相互垂直的两个方向上的光强透射比率差 $\Delta T/T$, 再结合弹光原理, 最终计算出材料内应力大小. 由于采用了偏振调制技术, 该方法无需旋转样品或者偏振元件进行两次测量来获得光强透射比率差, 因此可以准确地反映材料整体应力分布情况.

2 实验

2.1 测试原理及装置

众所周知, 材料内应力的存在会使材料产生各向异性应变. 由于弹光效应, 该各向异性应变会产生光学各向异性. 当入射偏振激光穿过测试材料时, 表现出各向异性的两个光学主轴对光的传播速度会有不同, 即在出射点形成一定的相位差, 从而其透射强度会有不同.

图 1 为测试装置, 由光源、起偏检偏棱镜、光弹性调制器(PEM)、样品架、硅探测器以及数据采集控制处理系统组成. 光源采用 Nd:YAG 激光器, 输出波长为 1064nm; 起偏棱镜和检偏棱镜采用的是方解石格兰型偏光棱镜. 样品架采用电控二维平移台控制, 最大可以测试 150mm 的材料基片. 探测器采用了硅探测器. PEM 是美国 Hinds 公司生产的 PEM-90TM, 工作频率为 50kHz. PEM 的作用是: 光波通过其后, 平行于调制器主轴方向的光波分量将额外增加一个周期变化的相位. 图 1 中, PEM 的主轴与光波入射面(水平面)垂直, 实验中一般测量的是材料与 PEM 主轴方向呈 45° 夹角的两个方向上的各向异性(由于应力导致), 做 mapping 就可以获得整片材料的应力分布.

图 1 中, 光波经过起偏棱镜后在 x 和 y 方向上的分量为 (E_x, E_y) , 设样品 x 和 y 方向的透射

[†] 通信作者. Email: lhzhao@semi.ac.cn

2006-11-30 收到, 2006-12-22 定稿

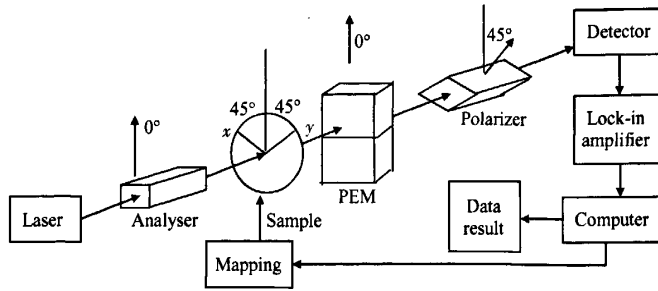


图 1 PTD 法测试材料内应力装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the polarization transmittance difference method

系数分别为 T_x 和 T_y , 则透过样品后的光波可以表示为:

$$(T_x E_x, T_y E_y) \quad (1)$$

那么光波在 PEM 的主轴方向的分量为:

$$\sqrt{2}(T_x E_x + T_y E_y)/2 \quad (2)$$

在水平方向上的分量为:

$$\sqrt{2}(T_x E_x - T_y E_y)/2 \quad (3)$$

经过 PEM 后, 垂直分量被调制, 增加一个周期变化的相位:

$$\sqrt{2}(T_x E_x + T_y E_y)e^{i\phi(t)}/2 \quad (4)$$

水平分量则没有变化. 调制后的光波经过检偏器后只剩下 y 分量:

$$[(T_x E_x + T_y E_y)e^{i\phi(t)} + (T_x E_x - T_y E_y)]/2 \quad (5)$$

其中 $\delta(t) = \phi \sin(\omega t)$, ϕ 为位相振幅.

因为 $E_x = E_y = E$, 所以(5)式可以变为:

$$[(T_x + T_y)e^{i\phi \sin(\omega t)} + (T_x - T_y)]E/2 \quad (6)$$

令 $\Delta T/T = 2 \frac{(T_x - T_y)}{(T_x + T_y)}$, 则探测器探测到的光强信号(正比于(6)式的模)可以表示为:

$$E^2 [1 + \text{Re}(\Delta T/T) \cos(\phi \sin(\omega t)) + \text{Im}(\Delta T/T) \sin(\phi \sin(\omega t))] \quad (7)$$

此式中已经忽略了 $\Delta T/T$ 的二次项, 其中 Re 和 Im 分别代表 $\Delta T/T$ 的实部和虚部. 考虑到如下的关系式:

$$\cos(\phi \sin(\omega t)) = j_0(\phi) + 2j_2(\phi) \cos(2\omega t) + 2j_4(\phi) \cos(4\omega t) + \dots \quad (8)$$

$$\sin(\phi \sin(\omega t)) = 2j_1(\phi) \sin(\omega t) + 2j_3(\phi) \sin(3\omega t) + \dots \quad (9)$$

其中 j_n 表示 n 阶贝塞尔函数. 这样(7)式可以改写为:

$$E^2 [1 + 2\text{Re}(\Delta T/T) j_2(\phi) \cos(2\omega t) + 2\text{Im}(\Delta T/T) j_1(\phi) \sin(\omega t) + \dots] \quad (10)$$

此式只给出了对直流部分、一倍频、二倍频贡献最大的项, 高次项忽略不计.

从(10)式可以看出, 一倍频分量正比于 $\Delta T/T$

的虚部, 是其相位变化 δ 的表征参量; 二倍频分量正比于 $\Delta T/T$ 的实部. 这两个量可以用两台锁相放大器测量出来.

根据(10)式所测得的相位差满足:

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} |n' - n''| \quad (11)$$

其中 n' 和 n'' 分别为测试材料在 x 和 y 方向上对光波的折射率; d 为测试材料厚度; λ 为光源波长. 根据弹光原理^[3]:

$$|n' - n''| = \frac{n^3}{2} (q_{11} - q_{12}) (P' - P'') \quad (12)$$

其中 n 为测试材料在理想状态(应力为零)时对 λ 波长的折射率; q_{11} 与 q_{12} 为测试材料在 λ 波长处的弹光系数^[4]; $(P' - P'')$ 为 x 和 y 方向上的应变之差, 可以直接反映材料在这两个方向上的应力大小. 将(12)式代入(11)式, 则有:

$$P' - P'' = \frac{\delta \lambda}{\pi d n^3 (q_{11} - q_{12})} \quad (13)$$

根据(13)式进行 mapping 测试就可以获得整体材料的应力分布情况.

2.2 实验

我们使用如图 1 所示的系统光路图, 测试了采用 LEC 方法生长的具有(100)面的半绝缘 GaAs 基片, 表面抛光, 整个测试过程完全由计算机控制, 使用 Visual Basic 编程.

3 结果与讨论

图 2, 3 分别为 50 和 100mm 半绝缘 GaAs 基片二维内应力分布图.

可以看到, 这三种基片的应力基本上都呈四维对称分布, 边缘应力明显大于中心应力. 对于厚度为 $500\mu\text{m}$ 的 50mm 基片, 应变最大达到 3.5×10^{-4} , 对应应力大小为 $2.25 \times 10^7 \text{N/m}^2$; 对于厚度为

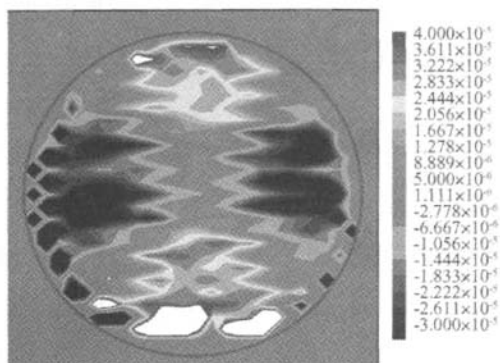


图2 50mm GaAs 应力二维分布图

Fig. 2 A typical two-dimensional distribution map of strains in a LEC-grown 50mm GaAs wafer

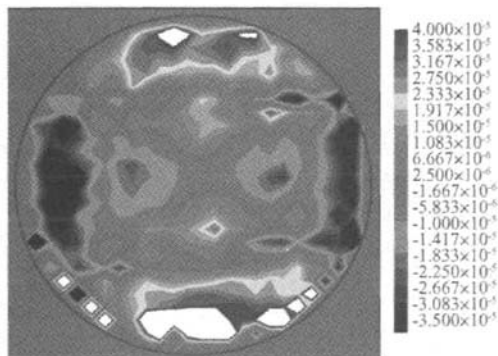


图3 100mm GaAs 应力二维分布图

Fig. 3 A typical two-dimensional distribution map of strains in a LEC-grown 100mm GaAs wafer

625 μm 的 100mm 芯片, 应变最大值得到 7×10^{-4} , 对应应力大小为 $4.55 \times 10^7 \text{ N/m}^2$. 这与 Yamada 等人^[5~7] 的测试结果基本一致.

4 结论

从以上结果可以看到, 偏振透射差分法相对于其他测试方法有无可比拟的优点, 能够快速、便捷、准确并且无损地对材料全区域内应力进行测试, 这对半导体材料研究是非常有意义的.

参考文献

- [1] Aspnes D E, Harbison J P, Studna A A, et al. Application of reflectance difference spectroscopy to molecular-beam epitaxy growth of GaAs and AlAs. *J Vac Sci Technol A*, 1988, 6 (3): 1327
- [2] Chen Y H, Yang Z, Wang Z G, et al. Optical anisotropy of InAs submonolayer quantum wells in a (311) GaAs matrix. *Phys Rev B*, 1997, 56: 6770
- [3] Born M, Wolf E. Principles of optics. Cambridge University Press, 1999
- [4] Suzuki N, Tada K. Elastooptic and electrooptic properties of GaAs. *Jpn J Appl Phys*, 1984, 23(8): 1011
- [5] Yamada M. Quantitative photoelastic measurement of residual strains in undoped semi-insulating gallium arsenide. *Appl Phys Lett*, 1985, 47(4): 365
- [6] Yamada M, Fukuzawa M, Kimura N. Quantitative photoelastic characterization of residual strain and its correlation with dislocation density profile in semi-insulating LEC-grown GaAs wafers. 7th Conf on Semi-insulating Materials, Ixtapa, Mexico, 1992: 201
- [7] Yamada M. High-sensitivity computer-controlled infrared polariscope. *Rev Sci Instrum*, 1992, 64(7): 1815

A New Method for Testing Inner Strains of Semiconductor Substrate Materials——Polarization Transmittance Difference

Zhao Linghui[†] and Chen Yonghai

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

Abstract: A new polarization transmittance difference method has been developed to measure inner strains in semiconductor substrate materials. By using polarization modulation technique in this method, the process becomes simple, quick and the results become more correct for there is no need to rotate samples or polarized elements to measure many times like in other methods. Two-dimensional distribution of inner strains in integral materials can be shown. This method is non-destructive.

Key words: polarization transmittance difference; inner strain; photo-elastic effect; PEM

PACC: 8170; 8170G

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0555-03

[†] Corresponding author. Email: lhzhao@semi.ac.cn

Received 30 November 2006, revised manuscript received 22 December 2006