

光学弱相干测温*

曾绍群 徐海峰[√] 刘贤德 李再光

(华中理工大学光电子系, 湖北, 武汉, 430074)

TN407

A 摘要 将光学弱相干层析与激光干涉测温结合, 提出了一种新型测温方法: 光学弱相干测温。该方法利用光源的弱相干性抑制背景反射光, 同时使待测相位通过光学方法放大, 测温精度显著提高, 特别适用于较薄样品、较低温度变化的测量。

关键词 红外激光测温, 芯片温度测量, 非侵入性测量。

引言

在微电子工业中, 特别是在薄膜材料与器件的生产制作过程中, 半导体芯片温度是一个极为重要的工艺参数, 它严重影响薄膜及外延层的生长速度、成分、均匀性等。实验表明, 衬底极小的温度变化对生长的薄膜性质有极大的影响^[1]。因此必须快速精确地监测与控制工艺过程中的温度。热电偶的应用受到工艺环境的限制; 辐射高温计受到发射率矫正的影响, 因而, 人们对激光干涉测温技术 LIT (Laser Interferometric Thermometry) 产生了浓厚的兴趣^[2-3]。LIT 是一种非接触、非侵入性的测量方法, 具有测量准确、响应速度快、测量范围广等优点, 且不受发射率变化的影响, 可实时测量芯片的真实温度。近年来已在金属有机物化学气相外延 (MOCVD)、等离子体刻蚀 (PE)、分子束外延 (MBE) 及快速热处理 (RTP) 等半导体工艺中取得了重要应用^[2-3]。

然而目前 LIT 的测温精度难以进一步提高, 特别是在样品较薄、温度变化较小情况下误差较大, 在应用中存在一些问题。本文将光学弱相干层析^[4]与 LIT 结合, 提出了一种新型的测温方法——光学弱相干测温 OLT (Optical Low-coherence Thermometry), 它不仅具有 LIT 方法的优点, 而且可使测温精度进一步提高, 适用于薄样品、低温升的测量。

1 测温原理

1.1 激光干涉测温 (LIT)

LIT 假设待测芯片前后表面平行, 相当于一个 F-P 腔 (对于微电子工业中半导体芯片, 这一假设通常成立^[6])。当探测光束入射该平面平行平板时, 产生多光束干涉。芯片温度改变时, 平板的光程相应改变, 从而反射光强度发生周期性变化。LIT 通过测量反射光强确定芯片的温度变化。

忽略芯片吸收和散射造成的光能损失, 波长为 λ 的探测光束正入射时光强反射率为^[6]

$$R = \frac{2r^2(1 - 2r^2\cos\varphi)}{1 - 2r^2\cos\varphi + r^4} \quad (1)$$

* 国防预研基金资助项目

本文 1995 年 12 月 21 日收到, 修改稿 1996 年 3 月 25 日收到

式(1)中 r 为非涅尔反射率, φ 为前后表面反射光的相位差. 由式(1)可知, φ 变化 2π , 反射光强变化一个周期(见图 2 中曲线 a). 因此每个振荡周期对应的芯片温度变化 ΔT 为

$$\Delta T = \frac{\lambda}{2nl(A + \alpha)}, \tag{2}$$

式(2)中 l 为芯片厚度, n 为样品折射率, $\alpha = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT}$ 为芯片线性热膨胀系数, $A = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT}$ 为折射率温度系数, LIT 通过计数光强振荡周期, 从而确定芯片温度的变化. 相位测量误差 $d\phi$ 引起的测量误差 dT 为

$$dT = \frac{1}{nl(A + \alpha)4\pi/\lambda} d\phi. \tag{3}$$

由 LIT 的基本原理, 可得出如下结论: $R-\varphi$ 的关系较为复杂, 对 φ 的精确测量难度较大, 只能根据振荡周期计数方法粗略测量相位变化, 因此温度不确定度即为式(2). 由式(2)、(3)可知, 其测温误差与芯片厚度成反比, l 较小时测量误差很大. 产生上述问题的根本原因在于 LIT 不能选择探测光波, 它测量了芯片的全部反射光和各级反射光波的干涉, 形成了 $R-\varphi$ 的复杂关系. 如能选择所需要的反射光波进行测试, 则不但 $R-\varphi$ 之间有简明的关系, 而且可使被测相位通过光学方法放大, 在 l 较小、温度变化较小时都能得到较高的测量精度.

1.2 光学弱相干测温(OLT)

与 LIT 不同, OLT 采用弱相干光源, 工作于双光场干涉方式. 图 1 表示一典型的 OLT 系统, 其核心是一迈克逊干涉仪, 待测样品取代一个反射镜. 参考光及样品中各级反射光相互干涉, 根据统计光学原理^[7], 其中任意两光场产生的干涉信号为

$$I = I_1 \Gamma(\tau) \cos \varphi. \tag{4}$$

式(4)中 φ 为干涉光波相位差, I_1 为两光波相位完全匹配时的干涉信号幅值, $\Gamma(\tau)$ 为光源自相干函数, $\tau = \varphi/2\pi\nu$ 为相应的时延, ν 为光源频率. 式(4)表明干涉信号受到光源自相干函数的调制, 随着两光场间相位失配增大, 干涉信号下降, 其衰减速度由自相干函数半宽度决定, 因此可利用光源的相干性选择信号光. 具体方法如下: 由于样品各级反射光间存在的初始光程差为 $\Delta l_0 = 2nl$ 的整数倍, 那么适当选择光源的谱线宽度, 使其相干长度 $L_c < \Delta l_0$, 则参考镜处于某一位置时, 信号光路中仅有单一级次(设为 m)反射光与参考光干涉, 其余级次反射光产生的干涉信号极小, 可以忽略不计. 由此, 信号形成的机理化简为双光场干涉, 特别是当温度变化引起的最大光程失配远小于光源相干长度时, $\Gamma(\tau) \sim 1, I \sim \cos \varphi$, 即 $R-\varphi$ 关系是简明的余弦关系. 信号简化之后, 测量相位精度可比原来显著提高. 若采用相移干涉技术, 测量精度可达 $\lambda/100$ ^[8].

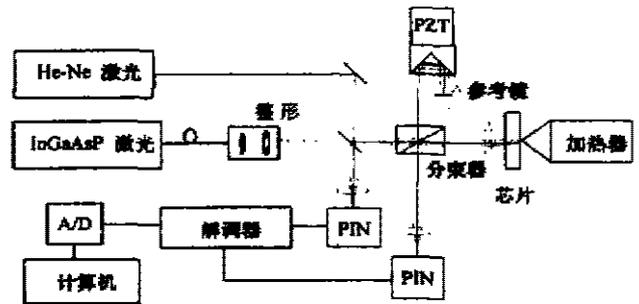


图 1 OLT 原理图
Fig. 1 Schematic diagram of the OLT

设测试时选取 m 级反射光为信号光, 则芯片温度变化 T 为

$$T = \frac{\lambda \varphi}{4\pi mnl(A + \alpha)}, \quad (5)$$

将光强测量值代入式(4)和(5), 即可求得芯片温度变化量.

由式(5)可求得 OLT 方法测温误差为

$$\left(\frac{dT}{d\varphi}\right)_{\text{OLT}} = \frac{1}{mnl(A + \alpha)4\pi/\lambda}, \quad (6)$$

即测温误差与所选择的信号级次 m 成反比. 与描述 LIT 误差的式(3)相比可知, 即使相位误差相同, OLT 测温误差为 LIT 的 $1/m$. 上述关系可由图 2 得到清晰说明.

图 2 为测试信号与相位、温度变化量的关系, 图中下面横坐标 φ 表示光束在芯片内往返一周因温度效应产生的相位差, 上面横坐标为相应温度变化量. 作为对比, 图 2 中画出了 OLT 与 LIT 的结果(分别为曲线 a 和曲线 b). 由图 2 可知, OLT 信号具有余弦波形, 相同的温度变化, OLT 中测试信号振荡次数是 LIT 的 m 倍(图中 $m=4$). 这是因为 OLT 选择 m 级次反射光为测量光, 相同温度变化产生光程差放大为原来的 m 倍, 因此即使采用振荡周期计数方法, OLT 的测温精度仍比 LIT 高 m 倍, 在样品较薄、温升小时也可获得满意的结果.

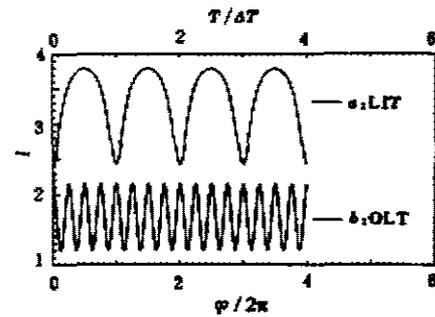


图 2 测试信号 I 与相位、温度变化量的关系
Fig. 2 Signal intensity I as a function of phase change φ and temperature change T

2 实验及其结果

图 1 为根据上述原理设计的 OLT 系统. 检测光源为 InGaAsP 激光二极管, $\lambda=1.3\mu\text{m}$, 阈值附近相干长度约为 $200\mu\text{m}$, 尾纤输出功率约为 1mW . He-Ne 激光用于光路调整. 在参考光路中压电陶瓷 PZT 以 17.3kHz 微振动, 产生正弦调制相移. 信号光路中第 m 级次反射光与参考光产生双光场干涉, 芯片温度变化时, 高灵敏度、宽动态范围的 PIN-FET 组件记录干涉光强的变化, 信号经过解调进入计算机, 由式(4)和(5)求得温度变化量. 调节参考镜的位置, 可选择适当级次反射光进行测量, 以获得最佳测试灵敏度.

图 3、4 为 OLT 测量结果示例. 硅片样品厚度为 $120\mu\text{m}$. 图 3 为室温时扫描参考镜测得芯片的各级反射光强度. 前表面反射光约为 -10dB , 对应表面反射率约为 10% , 低于理论值约为 30% , 这是因为前表面覆盖有 SiO_2 薄膜, 具有增透作用. 图 3 中横线为系统最小可探测功率(约为 71dB), $m \geq 8$ 的反射级次由于低于系统最小可探测功率而不能测量. 图 4 为芯片受热温度上升至稳态过程中测量的光强变化与对应的温度变化. 当注入热量逐渐与损失散热量平衡时, 芯片温度趋于稳定值, 探测光的光程变化极小, 因此测量信号趋于稳定. 采用振荡周期计数方法, OLT 测得的稳定温度约为 $342.0 \pm 3.3\text{K}$, LIT 测量值约为 $339 \pm 13\text{K}$, OLT 的结果与红外辐射测温仪(RAYTEK PM)的结果 345.0K 较为接近. 由此可见, 样品

较薄、温度变化较小时,OLT 方法远优于 LIT.

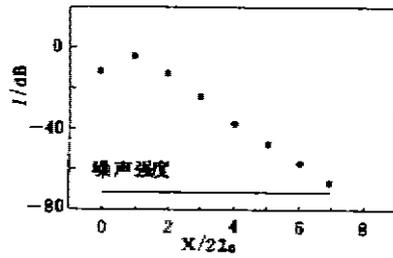


图3 硅片各级反射光强度值
Fig. 3 The reflection profile
of a Si wafer

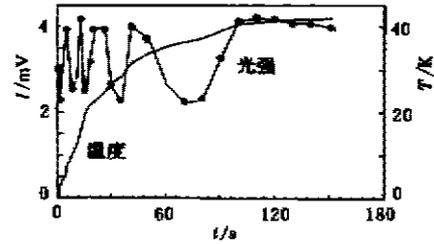


图4 硅片瞬态加热过程
Fig. 4 The transient heating
process of a Si wafer

3 讨论

OLT 采用双光束干涉技术,检测由于温度的变化而产生的光学相位调制信号,从而获得芯片温度变化.测量时探测光在芯片中反射,因此光源的波段及线宽的选取十分关键,应满足以下原则:(1)在芯片温度变化范围内使得对应的光子能量低于被测半导体材料的禁带宽度,此时材料的吸收可以忽略,测量是完全非侵入性的,不影响芯片的工作状态及热状态.例如硅样品 $1.3\mu\text{m}$ 激光在温度小于 800K 条件下测量是非侵入性的,大于 800K 时吸收会逐渐上升^[3],因此低于 800K 时可选用 $1.3\mu\text{m}$ 激光.(2)在所选择波段上样品应有较大的折射率温度系数,使产生足够大的相位变化.(3)应有适当的谱线宽度,在测温范围内,既能以弱相干性抑制背景反射光,又不影响干涉信号的强度.通常选用红外波段半导体激光二极管,并调节工作电流得到所需的谱线宽度.

设光源自相干函数具有高斯线型分布,最大温度变化对应光程差为 Δl_{max} ,相应归一化干涉强度为 K ,则由文献[7]可求得光源谱线宽度应满足下式

$$\frac{0.746}{\Delta l_0} \leq \Delta \lambda \leq 0.448 \frac{\sqrt{-\ln K}}{\Delta l_{\text{max}}}, \quad (7)$$

式(7)中长度单位为 μm .

本文在激光干涉测温(LIT)的基础上提出了一种新型测温方法:光学弱相干测温(OLT).研究表明,OLT 可选择所需要的反射光进行测量,反射光强与相位变化具有简明的余弦关系,同时被测相位可通过光学方法得以放大,因而可更精确测量半导体芯片温度.OLT 不仅具有 LIT 的优点,而且可用于薄样品、低温升的测量.对硅片的测量结果较好地证实了理论分析的结果.

致谢 感谢石家庄 13 研究所蔡树军高工、李云高工、清华大学电子系江剑平教授的精心指导和帮助.

参考文献

- 1 Singh R K, Narayan J, Singh A K, *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**(25): 2271~2273
- 2 Saenger K L, Gupta J. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(10): 1221~1226
- 3 Donnelly V M, McCaully J A. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1990, **8**(1): 84~92
- 4 Lukin O V, Magunov A N. *SPIE*, 1994, **2321**: 439~442
- 5 曾绍群, 骆清铭, 刘贤德, 等. *光学学报*, 1996, **16**(3): 340~344
- 6 Saenger K L, Tong F, Logan J, *et al.* *Rev. Sci. Instrum.* 1992, **63**(8): 3862~8
- 7 李继陶, *统计光学基础*, 成都: 四川大学出版社, 1988: 182~191
- 8 刘冲. *相移干涉技术在表面粗糙度非接触测量中的理论和应用研究*, 华中理工大学博士学位论文, 1993

OPTICAL LOW-COHERENCE THERMOMETRY*

Zeng Shaoqun Xu Haifeng Liu Xiande Li Zaiguang

(Department of Optoelectronic Engineering,

Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The optical low-coherence thermometry (OLT) was proposed for the first time based on the optical low-coherence tomography and laser interferometric thermometry (LIT). The backgrounds were restrained by means of the low-coherence of the optical source. The measured phase was magnified with optical methods. As a result the precision was greatly improved. This method is very effective for the measurement of thin sample with small temperature rise.

Key words IR laser thermometry, wafer temperature measurement, noninvasive measurement.

* The project supported by the National Defence Preliminary Research Foundation of China