文章编号 1004-924X(2024)07-0956-10

高精度激光共焦半导体晶圆厚度测量

李兆宇,刘子豪,王瑶莹,邱丽荣,杨 帅*

(北京理工大学光电学院复杂环境智能感测技术工信部重点实验室,北京100081)

摘要:针对半导体晶圆厚度的高精度非接触测量问题与需求,提出了基于激光共焦的高精度晶圆厚度测量方法。该方 法利用高分辨音圈纳米位移台驱动激光共焦光探针轴向运动扫描,利用激光共焦轴向响应曲线的峰值点对应物镜聚 焦焦点的特性,分别对被测晶圆上下表面进行高精度瞄准定位;通过光线追迹算法精确计算出晶圆表面每个采样点的 物理坐标,实现了晶圆厚度的高精度非接触测量。基于该方法构建了激光共焦半导体晶圆厚度测量传感器,实验和分 析表明,该传感器的轴向分辨力优于5 nm,轴向扫描范围可达5.7 mm,6种晶圆厚度测量重复性均优于100 nm,单次 测量时长小于400 ms。将共焦定焦技术有效地应用于半导体测量领域,为晶圆厚度的高精度、无损在线测量提供了 一种新技术。

关 键 词:激光共焦;厚度测量;半导体晶圆;光线追迹;高精度;无损测量 **中图分类号:**TN307;TH741 **文献标识码:**A **doi**:10.37188/OPE.20243207.0956

High-precision laser confocal measurement of semiconductor wafer thickness

LI Zhaoyu, LIU Zihao, WANG Yaoying, QIU Lirong, YANG Shuai*

 (MIIT Key Laboratory of Complex-field Intelligent Exploration, Beijing Institute of Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)
 * Corresponding author, E-mail: yangshuai_bit@163. com

Abstract: Addressing the need for precise non-contact measurement of semiconductor wafer thickness, this study introduces a method based on laser confocal technology that ensures remarkable accuracy. It utilizes a voice coil nanodisplacement platform for high-resolution actuation of a laser confocal optical probe, enabling precise axial scanning. This method relies on identifying the peak points on the confocal laser's axial response curve, which are indicative of the objective lens's focal point, to accurately align and position the wafer's upper and lower surfaces. By accurately calculating the physical coordinates of each sampling point on the wafer surface through ray tracing algorithms, this technique achieves high—precision non—contact measurement of wafer thickness. A specialized laser confocal sensor for semiconductor wafer thickness measurement was developed, showcasing an axial resolution of under 5 nm, an axial scanning range of up to 5.7 mm, and repeatability in thickness measurement of under 100 nm across six wafer types. The process takes less than 400 ms for a single wafer. This research successfully applies confocal focusing technology to semiconductor measurement, offering a novel solution for high-precision, non-destructive, on-

收稿日期:2023-11-13;修订日期:2023-11-30.

基金项目:国家自然科学基金联合基金集成项目(No. U22A6006)

line wafer thickness measurement.

Key words: laser confocal; thickness measurement; semiconductor wafer; high precision; nondestructive measurement

1引言

晶圆作为集成电路(IC)芯片、发光二极管 (LED)、太阳能电池和MEMS器件等半导体产 品的衬底,是高度纯净的晶体结构,对其减薄有 利于堆叠以获得更高的性能^[1]。随着技术的发 展,研磨后的晶圆厚度更薄,尺寸更小,精准且可 靠的晶圆厚度表征是晶圆厚度控制的先决条件, 有助于提升器件一致性和质量稳定性,而在切 割、蚀刻与抛光过程中反复装卸测厚会增加表面 损坏的风险,因此,当晶圆吸附在支撑板上时进 行高精度无接触测量至关重要。

Park 等^[2]提出了一种谱域干涉测量方法,可 测大型硅片的物理厚度、折射率、弯曲和翘曲,但 测量结果的不确定度为0.692 µm,测量精度有待 提升。Kim 等^[3]使用波长调谐干涉法同时测量了 晶圆的表面轮廓和光学厚度偏差,但干涉法引入 的耦合误差会带来系统误差。Yan等^[1]基于迈克 尔逊干涉原理,使用1550 nm 红外光对掺杂硅片 实现快速检测,但其测量结果受步进电机定位精 度和空气干扰较大,由于定位误差的存在,晶圆 的厚度重复性在2 µm 左右。Zeng 等^[4]使用补偿 式电感测量方法,对标准硅片的测量不确定度达 0.2 μm,但其装置过于复杂,且是接触式测量,极 易损伤晶圆表面。Hirai等^[5]开发出一种双面干 涉仪,可实现非接触测量,但测量过程中需要将 两个测头相对放置在样品两侧,频繁拆卸极易造 成晶圆损坏。

综上所述,半导体晶圆厚度测量目前仍然面临重复测量精度较低、保证精度的同时无法实现表面无接触无损测量等问题。激光扫描共聚焦显微镜(Laser Scaning Confocal Microscopy, LSCM)具有高分辨率、独特的光学层切能力、无损测量等特性^[11],广泛应用于微电子^[6-7]、半导体检测^[8-9]、材料科学^[7,10]等领域。因此,基于高精度激光共聚焦技术的晶圆厚度测量提供有效的解决途径。

本文利用LSCM峰值点与定焦位置对应的

特性实现层析定焦,结合大行程高精度音圈纳米 位移台完成轴向驱动扫描,对晶圆的不同表面进 行高精度定焦并计算得到其光学高度坐标,建立 光线追迹模型实现物理坐标计算,得到不同种类 晶圆的物理厚度,实现了晶圆厚度的高精度、在 线、无损检测,可为工艺优化提供参数依据,对于 提升半导体器件的生产效率和产品质量具有重 要意义。

2 测量原理

2.1 激光共焦晶圆定焦测量原理

激光共焦探测原理如图1所示,点光源和点 探测器处于彼此共轭位置,共焦系统光强值会随 着被测件的轴向离焦移动而变化,形成"钟形"曲 线。该特性成为共焦技术区别传统显微技术的 显著特性,可以实现被测表面的定焦测量。当测 量光束汇聚在晶圆表面时由探测器接收到的信 号为*I(u)*,根据共聚焦成像原理^[12-13],经归一化处 理得到的共焦光强轴向响应为:

$$I(u) = \left| 2 \int_{0}^{1} \exp(ju\rho^{2}) \rho \cdot d\rho \right|^{2} = \left[\frac{\sin(u/2)}{u/2} \right]^{2},$$
(1)

式中:ρ是光瞳面的归一化极径,u为轴向位置z 的归一化光学坐标:

$$u = \left[\pi D_{\rm L}^2 / 2\lambda f_{\circ}^2 \right] z, \qquad (2)$$

其中:λ为单色激光光源的波长,D_L为激光有效通





光口径,f₀为会聚镜的焦距,z为被测表面的轴向 位置。联立式(1)和式(2)可得共焦光强响应信 号为:

$$I(z) = \sin c^2 \left(\frac{\pi D_{\rm L}^2 z}{4\lambda f_0^2} \right). \tag{3}$$

如图1所示,会聚镜将点光源的发散光束会 聚为平行的测量光束,光路中引入光束调制器件 以提高光路性能,测量物镜将平行的测量光束会 聚到待测点并收集返回光。这种光路设计便于 更换物镜从而适应不同参数的被测物,进而更改 测量光束口径和工作距离。在对晶圆上表面A 点进行定焦测量时,共焦曲线的最大值I_A(z)正好 对应于被测面点A的位置,直到测量光束汇聚到 另一个被测表面B点。为了获得共焦曲线,使用 峰值检测算法寻找共焦曲线的峰值点,使用最小 二乘法生成所有归一化坐标值大于0.8的拟合曲 线,最后计算出峰值坐标,得到被测点A和B的 光学位置。当测量物镜沿轴向对晶圆进行扫描 探测时,晶圆的每个反射层面均会有反射光返回 光路。此时,探测器探测到的总光强为系统对各 个层面响应的相干叠加,探测到的总光强为:

$$I_{\text{total}}(u) = \left| 2 \sum_{i=1 \sim N} K_i \int_0^1 \exp\left[j \cdot (u - u_i) \cdot \rho^2 \right] \rho \cdot d\rho \right|^2,$$
(4)

其中:K_i为第*i*个面的振幅反射率,u_i为第*i*个面的 物方归一化轴向坐标。当样品不同表面之间的 间距较小时,如图2(a)所示,两个表面的反射信 号会混叠,对应的峰值点淹没在叠加信号中无法 识别;当两个表面间的间距增大时,如图2(b)所 示,两反射面对应的钟形曲线初步分离,总信号





曲线出现两个峰值;当间距进一步增大时,如图 2(c)所示,两表面对应的钟形曲线完全分离,相 互没有影响,总的响应曲线中两表面信号峰值明 显,可以对不同表面进行层析定位。根据瑞利判 据,两信号叠加,曲线最小值为最大值的 73.5% 时,两峰值之间的中心距为系统能够分辨的最小 间距,曲线如图 2(b)所示。当样品不同表面之间 的物方归一化间距大于当前 $\Delta u = 6.58$ 时系统即 可分辨,进而进行层析定焦探测。

2.2 晶圆物理厚度计算原理

晶圆上表面A点的共焦轴向响应曲线峰值 点坐标记为 $Z_{A,i}(i=1,2,\cdots,n_T)$,当定焦至下表面 B点时,由于存在折射率n,测量光线穿过晶圆上 表面后发生偏转,所得B点轴向响应曲线峰值点 $Z_{B,i}(i=1,2,\cdots,n_T)$ 为其光学位置坐标,并非所需 要的物理坐标 $Z'_{B,i}(i=1,2,\cdots,n_T)$ 。为得到晶圆 表面高度的物理位置坐标,在建立归一化共焦点 扩散函数测量模型后,给出了光线追迹模型^[14], 如图3所示。





根据几何关系,晶圆上表面与下表面的层间 光学厚度 T_{opt}为:

$$T_{\rm opt} = Z_A - Z_B. \tag{5}$$

根据光线追迹公式分析,晶圆上表面与下表 面的层间物理厚度为:

$$T_{\rm phs}(n, R, T_{\rm opt}, \alpha) = R + \frac{n}{n_{\rm air}} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \varphi} (T_{\rm opt} - R), (6)$$

式中:n为晶圆内部介质折射率,a为测量光束的 半孔径角,R为待测样品的曲率半径。由于被测 晶圆表面为平面,取R=∞,式(6)可化为:

$$T_{\rm phs}(n, R, T_{\rm opt}, \alpha) = \frac{\tan \alpha}{\tan \left[\arcsin \left(\frac{n}{n_{\rm air}} \sin \alpha \right) \right]} T_{\rm opt}.$$
(7)

函数 T_{phs}(n, R, T_{opt}, α)只对应半孔径角 α内 一条光线的测量结果,轴向空间应由整个瞳孔平 面内的所有测量光线积分计算。假设光线在瞳 孔平面内均匀分布,则晶圆厚度 T_{phs}满足:



$$Z_{\scriptscriptstyle B} = Z_{\scriptscriptstyle A} + T_{\scriptscriptstyle \rm phs}.\tag{9}$$

3 测量传感器构建

3.1 系统设计

激光共焦晶圆厚度测量传感器系统框图如图 4所示。为满足不同透过率晶圆样品的测量需求, 使用相同的测量光路结构,配合波长为633 nm 和 1064 nm的20 mW单波长激光器,分别完成了不 同波段的传感器搭建。由激光器发出的平行光经 过扩束系统中的针孔形成近似理想的高斯球面 波,球面波经扩束系统后形成可充满物镜后瞳的 平行光,由PBS选择P偏振光进入测量光路,经过 与P光呈45°放置的1/4波片后变为左旋圆偏振 光,由物镜聚焦到被测样品表面。然后,返回的带 有样品表面位置信息的右旋圆偏振光经过1/4波 片后变为S光,经PBS反射后全部进入会聚镜 PL,避免光返回到激光器中影响激光器稳定性。 会聚光束经过 NewPort 物理针孔 PH 后杂散光被 滤除,进而进入放置在焦点位置处的光电探测电 路中,完成光信号探测与电信号的转换。

如图4所示,通过音圈纳米位移台驱动物镜沿 光轴方向对晶圆表面采样点位置扫描定焦,依据 电机实时反馈的位置信息与探测电路得到的光强 电压信息得到用于层析定焦测量的归一化激光共 焦轴向响应曲线,曲线峰值点坐标即为定焦处的



wafer thickness measurement sensor system

光学位置。控制器通过读取上位机控制指令完成 电机使能、参数设定、运动驱控等操作,同时,获取 传感器光栅模拟量读数头细分后的位置检测信号 并进行负反馈控制。经514倍细分后的光栅尺信 号可识别电机1nm的微小位移。高精度音圈纳米 位移台为本课题组自研成果,行程最大可达5.7 mm,分辨力优于1nm,100 μm频响优于30 Hz,既 可以保证高动态定焦触发瞄准,又能兼顾轴向大 范围微位移测量。系统构建实物如图5所示。



图 5 激光共焦半导晶圆厚度测量传感器系统实物

Fig. 5 Physical map of laser confocal semiconducting wafer thickness measurement sensor system

3.2 核心器件参数仿真

根据激光共焦测量光路可知,该传感器的主要影响参数包括测量物镜的数值孔径NA、会聚镜PL的焦距f₀以及针孔物理半径r_d。

3.2.1 测量物镜的数值孔径

受晶圆制备工艺的影响,由式(8)可知,物理 坐标计算过程中,晶圆内部折射率分布误差 Δ*n* 与物镜数值孔径NA均会影响物理厚度测量,而 数值孔径NA又是决定轴向定焦分辨力Δ*u*及横 向分辨力Δ*v*的关键因素,即:

$$\begin{cases} \Delta u = \frac{\lambda}{2\pi \cdot NA^2} \cdot \frac{1}{SNR \cdot \left| \partial I(u) / \partial u \right|_{\max}}, & (10) \\ \Delta v = \frac{0.436\lambda}{NA} \end{cases}$$

这里以硅片样品为例,取空气折射率 $n_{air} = 1, \lambda = 1064 \text{ nm}, 信噪比(Signal-to-Noise$ Ratio, SNR)取300,根据光线追迹公式仿真得到 $当<math>\Delta n = 10^{-4}$ 及 $\bar{n} = 3.42$ 时,对应不同的测量物 镜数值孔径NA,晶圆内部折射率不均匀性 Δn 对 晶圆物理厚度 T_{phs} 测量结果的影响,如图6所示。 根据式(10)仿真得到物镜数值孔径NA对传感器 轴向定焦分辨力 Δu 及横向分辨力 Δv 的影响曲 线,如图7所示。

由仿真结果可知,当晶圆内部介质存在折射 率不均匀性 Δn 时,定焦误差随着样品厚度的增 加而变大,物镜数值孔径NA越大,厚度 T_{ph} 一定 时由 Δn 引起的定焦误差越小,系统的轴向定焦 分辨力 Δu 及横向分辨力 Δv 越高,但通常情况下







物镜 NA 值和工作距是呈负相关的, NA 值越大 工作距便越小, 极易在晶圆在线测量过程中与加 工设备产生碰撞。因此, 针对不同样品仿真结果 综合考虑, 对应1064 nm 波段硅片等样品选用 NA=0.75 近红外显微物镜, 其工作距离为 Dw=12 mm。据2.1节分析, 此时共焦系统可分 辨的物方间距为:

$$\Delta z = \frac{\lambda}{2\pi \cdot \mathrm{NA}^2} \cdot \Delta u = 1.98 \,\mu\mathrm{m.} \qquad (11)$$

对应 633 nm 波段 SiC 等样品选用数值孔径 NA=0.55 的 显 微 物 镜 , 工 作 距 离 $D_w = 8.7 \text{ mm}, \text{可对} \Delta z = 2.19 \, \mu \text{m}$ 的物方间距进 行层析定焦。

3.2.2 会聚镜焦距

除物镜 NA 直接影响分辨力 Δu 外, Δu 还与 共焦曲线斜率有关, 而后者直接受针孔轴向离焦 量 u_M的影响。u_M和实际离焦量 M_{OP}与会聚镜焦 距f₀的关系如下:

$$M_{\rm OP} = \frac{2\lambda}{\pi} \left(\frac{f_0}{D_{\rm L}}\right)^2 u_{\rm M}.$$
 (12)

当物镜 NA = 0.75,光源波长 λ = 1064 nm, 根据式(12)仿真得到会聚镜 PL 焦距 f_0 不同时,针 孔的实际离焦量 M_{0P} 与轴向灵敏度 Δu 的关系,如 图 8 所示。由图可知,离焦量 M_{0P} 与轴向定焦分 辨力 Δu 呈负相关, M_{0P} 越大分辨力越高,变化趋 势为先快后慢;会聚镜 PL 焦距 f_0 越大,轴向分辨 力 Δu 随离焦量 M_{0P} 的变化幅度越不灵敏,针孔装 调精度要求降低。然而,较大的焦距 f_0 会延长整 体测量光路,增大传感器体积,难以满足小型化



Fig. 8 Relationship between M_{OP} and Δu with different f_0

的同时还会引入不必要的误差源。因此,综合考虑对应1064 nm 波段硅片等样品,选择焦距 f_0 = 200 mm 的会聚镜,结合633 nm 波段SiC等样品的仿真结果,同样选择 f_0 = 200 mm 的会聚镜焦距。为了减小传感器体积,综合光斑尺寸,测量光路中棱镜及透镜尺寸均小于等于10 mm。3.2.3 针孔的物理半径

针孔作为共焦系统的关键部件,其物理参数 会对系统的信号强度、信噪比以及轴向分辨力产 生影响。设r_a为圆形针孔的半径,由式(2)其归 一化半径为v_a,由于在实际光路中不存在理想点 探测,有限尺寸的探测器可以得到激光共焦光强 响应:

$$I(v, u) = \int_{0}^{v_{d}} \left| 2 \int_{0}^{1} P_{\rm C}(\rho) P_{\rm O}(\rho) \exp(i(u)\rho^{2}) J_{0}(v\rho) \rho d\rho \right|^{2} v dv.$$
(13)

通常情况下,系统轴向响应曲线的半高宽可 用于评估系统的空间分辨能力。va取不同值时 的轴向响应曲线如图9所示。共焦系统的轴向响 应曲线中半高宽和峰值强度均随着针孔归一化 半径va的增加而增加,且变化趋势也不相同。在 此基础上,仿真得到归一化半径尺寸va不同时曲 线参数变化,如图10所示。

由图 10 可知, v_d < 2 时, 轴向响应曲线的半 高宽较低, 峰值强度迅速增加; 当 v_d ≥ 2 时, 峰值 强度趋向稳定, 而半高宽开始增加。为了使传感 器性能达到最佳状态, 需要取较大的峰值强度和 较小的半高宽, 故针孔归一化半径 v_d = 2, 带入











式(14)可得出针孔的实际物理半径:

$$r_{\rm d} = \frac{2v_{\rm d}\lambda f_0}{\pi D_{\rm L}}.$$
 (14)

r_{d(1064}) ≈ 50 μm, r_{d(633)} ≈ 35 μm, 结合具体产 品型号, 对应1064 nm 和633 nm 波段分别选用 NewPort 直径为100 μm 和75 μm 的针孔。

4 误差分析

针对激光共焦半导体晶圆厚度测量系统,分 析可能的误差来源并进行误差计算,以保证激光 共焦晶圆厚度检测技术的可靠性。

4.1 共焦光路定焦误差

激光共焦方法本身存在定焦误差,受光路多 个参数的影响。针对硅片等样品激光器光源波 长选用1064 nm,测量物镜的数值孔径NA= 0.75,针对碳化硅等样品选用波长633 nm, NA=0.55,轴向归一化离焦量 u_M =2.5时,响 应曲线的最大斜率 S_{max} =0.27,系统信噪比 SNR=300:1,此时1064 nm波段共焦定焦误 差为:

$$\delta_1 = \frac{0.64\lambda}{SNR \cdot S_{\text{max}} \cdot (2 \cdot \text{NA})^2} \approx 3.74 \text{ nm.} \quad (15)$$

同理计算出 633 nm 波段的定焦误差约为 4.13 nm。

4.2 音圈纳米位移台定位误差

传感器由音圈纳米位移台进行轴向运动控制,后者直接影响测量精度,通过测量不确定度为±0.5×10⁻⁶(*k*=2)的Renishaw XL-80激光干涉仪进行标定。标定后定位误差为:

$$\delta_2 = 15 \text{ nm.} \tag{16}$$

4.3 随机误差

晶圆厚度测量过程中环境噪声、气流扰动、 光源波动和操作人员等因素均会引入测量误差,主要表现为随机误差。将上述随机因素考 虑在内,使用相同工作状态下的检测重复性来 表示:

$$\delta_{3} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\epsilon_{i} - \bar{\epsilon})^{2}}{N-1}}.$$
 (17)

待系统调整完成状态稳定后,取N=10,进行重复实验测试,测得系统 $\delta_3 = 23$ nm。

4.4 晶圆内部折射率误差

光线追迹公式(7)是以晶圆内部材料折射率 均匀分布为前提的,受制备工艺和测量方式的限制,晶圆内部会存在折射率分布误差 Δn 。以硅 样品为例,根据式(8)分析得出,当分布误差 $\Delta n = 10^{-4}, \bar{n}_{si} = 3.42 \text{时,该误差对物理厚度计算$ 的影响:

$$\delta_{3(Si)} = 17 \text{ nm.}$$
 (18)

分別取 $\Delta n = 10^{-4}$, $\bar{n}_{(GaAs)} = 3.42$, $\bar{n}_{(GaN)} = 2.33$, $\bar{n}_{(Al_zO_3)} = 1.77$, $\bar{n}_{(SiC)} = \bar{n}_{(HR-SiC)} = 2.78$, 计算 得到 $\delta_{3(GaAs)} = 26$ nm, $\delta_{3(GaN)} = 19$ nm, $\delta_{3(Al_zO_3)} = 40$ nm, $\delta_{3(SiC)} = \delta_{3(HR-SiC)} = 13$ nm。

4.5 误差合成

上述各个误差源相互独立,计算得所研制的

传感器系统的测量误差为:

$$\delta_{\rm Si} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_{3(\rm Si)}^2 + \delta_4^2} \approx 33 \,\mathrm{nm}.$$
 (19)

同理计算出其余 5 种晶圆的合成误差分别为: $\delta_{GaAs} \approx 38 \text{ nm}, \delta_{CaN} \approx 34 \text{ nm}, \delta_{Al_2O_3} \approx 49 \text{ nm}, \delta_{SiC} \approx \delta_{HR-SiC} \approx 29 \text{ nm}$ 。

5 特性测试及实验验证

5.1 光学分辨力测试

以共焦光强响应曲线可区分的最小步距来 评价传感器的轴向定焦分辨力。将平面镜放置 在测量物镜焦点附近,此时光强响应信号最强, 由音圈纳米位移台驱动物镜进行轴向小步距运 动,同时,记录光栅尺位置信号和24位NI系列 数据采集卡获取的光强响应信号,实验结果如 图11所示。音圈位移台每进行5nm的轴向位 移运动,传感器的响应光强也按规律呈现步进 状态,因此,传感器可分辨出5nm的位移 变化。



5.2 轴向量程测试

为验证传感器的轴向行程范围,利用光栅尺 监测音圈位移台的位移,光栅尺得到的最大位置 信息与最小位置信息的差值即为传感器的最大 移动范围。由于在光栅尺装调时已将其零刻线 位置对准音圈位移台最上端,并将此位置设为初 始零位,因此,测量时将位移台"回零"后开始驱 动显微物镜使之移动最大距离。光栅尺重复测 量5次,测试结果如表1所示。

表 1 轴向量程测试结果

Tab. 1 Results of system axial measurement range testing

| Number of | Minimum | Maximum | Deneralium |
|--------------|-------------------|-------------------------------|------------|
| measurements | position/ μ m | $\text{position}/\mu\text{m}$ | Range/μm |
| 1 | -0.012 | 5 739.460 | 5 739.472 |
| 2 | 0.236 | 5 739.380 | 5 739. 144 |
| 3 | 0.116 | 5 739. 372 | 5 739. 256 |
| 4 | 0.136 | 5 739. 324 | 5 739. 188 |
| 5 | -0.016 | 5 739. 284 | 5 739. 300 |

从测试结果可知,利用光栅尺配合音圈位移 台,整个系统可以实现5.7 mm行程内样品的定 焦测量。

5.3 重复性测试

为了评估传感器的稳定性,待系统调整完成 并处于稳定工作状态下,控制音圈位移台驱动物 镜使其焦点多次经过反射镜表面,完成沿光轴方 向的多次扫描。由于激光共焦测量方案为峰值 点触发,所以重点测试响应曲线峰值点的重复 性。对同等条件下多条共焦曲线的测量结果进 行数据处理,得到如表2所示的峰值点坐标,10 次测量的重复性标准差为23 nm。从结果可以看 出,该传感器具有良好的重复性。

| peak point | |
|------------------------|------------------------------------|
| Number of measurements | Coordinates of peak point/ μ m |
| 1 | 162.8527 |
| 2 | 162.8171 |
| 3 | 162.8354 |
| 4 | 162.7891 |
| 5 | 162.8743 |
| 6 | 162.8351 |
| 7 | 162.8343 |
| 8 | 162.8571 |
| 9 | 162.8281 |
| 10 | 162.8103 |
| Repeatability | 0.023 25 |

表2 激光共焦传感器峰值点重复性测试结果

Tab. 2 Repeatability test results of laser confocal sensor

6 对晶圆样品的测试与分析

测试样品如图 12 所示,分别选用用于集成电路制造的一代半导体(Si)、服务光通信产业的二 代半导体(GaAs),以及拥有更广阔前景的三代 半导体(GaAs),以及拥有更广阔前景的三代 半导体(GaN, Al₂O₃, SiC, HR-SiC(High Resistance SiC))进行测量。为避免托盘表面的反射 光进入光路影响测量信号,将晶圆定焦测量位置 处悬空处理。通过程序计时得到单次厚度测量



Fig. 12 Samples of different semiconductor wafers

测量开始前,首先进行轴向寻焦定位,调整 传感器位置使待测晶圆移动至测量物镜的工作 距内,由上位机软件控制音圈位移台驱动物镜在 量程内做大范围轴向运动,待探测电路检测到外 表面光强时,获取当前光学位置信息,程序控制 物镜移动至当前采样点上约100 µm 处,设置采 样率、运动速度、加速度减速度后,开始单次检 测。图13为激光共焦传感器对上述6种晶圆样 品进行扫描测量得到的单次信号曲线。光线在 晶圆内部传播时受到吸收衰减,探测电路采集到 的下表面反射回来的光强弱于上表面,因此,随 着轴向位置的变化,信号峰值强度呈现先强后弱 的变化趋势。



图 13 激光共焦传感器的轴向响应曲线 Fig. 13 Axial response curve of laser confocal sensor

对每种晶圆进行 10次重复测量,通过光栅尺 返回得到晶圆上下表面的光学位置坐标,经光线 追迹换算出晶圆物理厚度,如图 14 所示。表 3 给 出了每种晶圆样品的实际厚度平均值和测量重 复性,可以看出,不同样品的厚度测量重复性均 保持在 100 nm 以内,实现了高精度检测。

7 结 论

本文提出了一种基于激光共焦原理的晶圆

参考文献:

[1] YAN X Y, CHENG J, BIAN D, *et al.* Surface profile measurement of doped silicon using near-in-



图 14 小时相因时侧重珀不面线

Fig. 14 Curves of measurement results for different wafers

表3 晶圆厚度测量结果

| Tab. 3 Results of wafer thickness measureme | n | t |
|---|---|---|
|---|---|---|

| Wafer sample | Measurement result/μm | Measurement repeatability/μm |
|--------------|--------------------------|---------------------------------|
| Si | 525.1562 \pm 0.033 | 0.0711 |
| GaAs | $653.0090\!\pm\!0.038$ | 0.0667 |
| GaN | 373.7031 ± 0.034 | 0.0837 |
| Sapphire | $655.7196\!\pm\!0.049$ | 0.0850 |
| SiC | 358.1024 \pm 0.029 | 0.0904 |
| HR-SiC | 533.0982 \pm 0.029 | 0.0988 |

厚度高精度测量方法并完成了测量传感器构建, 利用精密音圈纳米位移台实现共焦曲线峰值点 的精确定位与轴向大范围扫描,测量范围达 5.7 mm。实验结果表明,该技术的轴向分辨力 优于5 nm。结合光线追迹方法实现晶圆内部物 理坐标计算,对于不同种类的半导体晶圆,厚度 测量重复性优于100 nm,检测时间优于400 ms。 与现有的晶圆测厚方法相比,该方法在保证精度 的情况下解决了晶圆检测中的高精度、无损直接 测量等难题,实现了轴向高精度瞄准触发测量。 激光共焦方法为半导体晶圆高精度检测设备的 发展提供了一种新的技术途径。

frared low-coherence light [J]. Applied Optics, 2019, 58(27): 7436-7442.

[2] PARK Y S, JONGHAN. A novel method for simultaneous measurement of thickness, refractive index, bow, and warp of a large silicon wafer using a spectral-domain interferometer [J]. *Metrologia*: *In-ternational Journal of Scientific Metrology*, 2020, 57(6). DOI:10.1088/1681-7575/aba16b.

- [3] KIM Y, SUGITA N, MITSUISHI M. Measurement of surface profile and thickness of multilayer wafer using wavelength-tuning fringe analysis [J]. *Precision Engineering*, 2018, 52: 130-137.
- [4] ZENG Y H , FU Y X , TANG D M , et al. Standard measuring device for thickness of silicon wafer based on laser compensation system [C]. 2017 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI). IEEE, 2018.
- [5] AKIKO H, YOUICHI B, JAESEOK B, et al. Precise measurement of the thickness of silicon wafers by double-sided interferometer and bilateral comparison[J]. *Metrologia*, 2021, 58(5): 054002.
- [6] 张志荣,洪汉玉,章秀华.基于光谱共焦的电路板 微型元器件三维高精度检测[J]. 计算机与数字工 程,2022,50(9):2102-2108.
 ZHANG ZH R, HONG H Y, ZHANG X H. Highprecision 3D inspection of circuit board micro components based on spectral confocal sensor[J]. Computer & Digital Engineering, 2022, 50 (9): 2102-2108. (in Chinese)
- [7] PHOULADY A, MAY N, CHOI H, et al. A novel material detection method using femtosecond laser, confocal imaging and image processing enabling endpointing in fast inspection of microelectronics
 [J]. Microelectronics Reliability, 2021, 126: 114287.
- [8] CASTILLO-BADILLO J A, CABRERA-WROOMAN A, GARCÍA-SÁINZ J A. Visualizing G protein-

作者简介:



李兆 年(1999-),男,河北邯郸人,硕 士研究生,2021年于河北大学获得学 士学位,主要从事精密光学检测方面 的研究。E-mail: lizhaoyu565@163. com coupled receptors in action through confocal microscopy techniques[J]. *Arch Med Res*, 2014, 45(4): 283-293.

- [9] LEE Y C. Low-frequency membrane tension measurement of framed membranes in semiconductor manufacturing [J]. Sensors and Actuators, A Physical, 2023, 355:114312.
- [10] 邱丽荣,崔晗,王允,等.激光差动共焦拉曼光谱 高分辨图谱成像技术进展[J].光学学报,2023, 43(15):3788/AOS230753.
 QIULR,CUIH,WANGY, et al. Research progress on high resolution laser differential confocal Raman spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2023,43(15):3788/AOS230753. (in Chinese)
- [11] 邵谭彬,杨克成,夏珉,等.光谱共焦显微成像技术与应用[J].激光与光电子学进展,2023,60 (12):3788/LOP222655.
 SHAOTB,YANGKCH,XIAM, et al. Techniques and applications of chromatic confocal microscopy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023,60(12):3788/LOP222655. (in Chinese)
- [12] 顾敏. 共焦显微术的三维成像原理[M]. 北京: 新时代出版社, 2000.
 GU M. Principles of Three-dimensional Imaging in Confocal Microscopes [M]. Beijing: New Times Press, 2000. (in Chinese)
- [13] 李春艳,李庚鹏,刘继红,等.光谱共焦法偏心下 径向梯度折射率透镜的厚度测量[J].光学精密 工程,2022,30(17):2067-2076.
 LICY,LIGP,LIUJH, et al. Thickness measurement of radial gradient index lens under eccentricity by spectral confocal method [J]. Opt. Precision Eng., 2022, 30(17): 2067-2076. (in Chinese)

通讯作者:



杨 帅(1994-),男,内蒙古满洲里 人,博士,2015年、2021年于北京理工 大学分别获得学士和博士学位,主要 从事激光差动共焦-干涉精密检测方 面的研究。E-mail: yangshuai_bit@ 163.com