

特征提取在硅内部微/纳米级体缺陷检测中的应用*

陈 军 尤 政 周兆英 刘兴占

(清华大学精密仪器与机械系, 北京, 100084)

摘要: 提出了一种利用特征提取来对硅中微/纳米级体缺陷的激光散射图样进行分析, 以获得缺陷大小信息的分析方法。给出了该方法中第一特征值和第二特征值的定义, 指出通过所提出的第一特征值及第二特征值即可迅速地判断出缺陷的大小量级所在。这种分析方法具有分析速度快, 在体缺陷小于 $1\mu\text{m}$ 时分辨率高, 且可使系统实现自动化等优点。

关键词: 特征提取 激光散射扫描层析技术 微/纳米级体缺陷 硅

Application of character recognition in LSST

Chen Jun, You Zheng, Zhou Zhaoying, Liu Xingzhan

(Department of Precision Instruments and Mechanics, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: In this paper, after putting forward the principle of LSST in detecting micro bulk defects in silicon and some simulating results of various size of defects scattering distributions, a novel analyzing way called character recognition is developed. This paper presents the first character defined according to wave number of the laser scattering distribution, and the second character defined according to the unsymmetry of scattering optical intensity. By using the character iv, the quantity scale of bulk defects can be obtained first, and then with character \oplus the detailed quantity scale less than $1\mu\text{m}$ can be gained if the character iv is 1. The method has the advantages of analyzing defects size quickly and making it possible to implement automation of detecting system, etc. It is worth being used in practice.

Key words: character recognition LSST micro/nano bulk defect silicon

引 言

半导体材料生产、加工工艺的不断完善, 使得半导体材料内部结构的一致性越来越好。以 5in 片为例, 目前单个硅片内部微体缺陷的大小已可控制在 $5\text{nm} \sim 5\mu\text{m}$, 密度低于 $10^{10}/\text{cm}^3$, 即缺陷间间隔超过 $100\mu\text{m}^{[1]}$ 。

然而, 随着半导体制造技术的迅速发展, 特别是传统的集成电路制造工艺及先进微加工技术被用于硅中三维微细结构的制作, 以生产出微传感器、微执行器乃至微型机电系统 (MEMS) 等^[2], 上述硅中微体缺陷的存在相比于加工出的微体器件来说就是不可忽视的, 它们会对微体器件的性能造成很大的影响, 为此, 对硅中微体缺陷进行检测, 以确定出它们的大小及位置就是必不可少的^[3]。

目前, 对硅中微/纳米级体缺陷的检测, 最有发展前途的方法是近红外激光散射扫描层析技术 (NILSST)^[4~6], 其基本原理在本文的第二部分中将会有简略说明; 而近红外激光扫描层析技术检测硅微/纳米级体缺陷中, 当前最常用的判断粒状微体缺陷大小的方法, 是将实测散射分布图样由人眼直接与理论分布图样比对。这种方法不仅费时费力, 而且由于引入了人为

* 国家自然科学基金和霍英东基金资助。

因素,不易实现系统的自动化。为此,在本文中,针对这一问题,我们提出了一种利用特征提取来迅速识别散射图样,以快速确定微体缺陷大小的分析方法。

一、激光散射扫描层析技术检测硅中微/纳米级体缺陷的理论依据

激光散射扫描层析技术检测硅中微/纳米级体缺陷的基本原理见图 1 所示。

近红外($\lambda = 1.3\mu\text{m}$) 半导体激光器发出的线偏振高斯光,经小孔空间滤波后,进入聚焦系统聚为焦点大小只有几十个微米的微光束;将此微光束打入硅样品内部,实现焦点对样品内部各层面的扫描(通过三维超精密工作台带动样品移动完成);将近红外线阵或面阵图像传感器放在垂直于 Y 的位置处,使 Y 轴通过线阵或面阵中心。那么,扫描过程中,若硅材料内部某一位置存在缺陷,就会以该缺陷为散射中心发出散射光进入图像传感器。

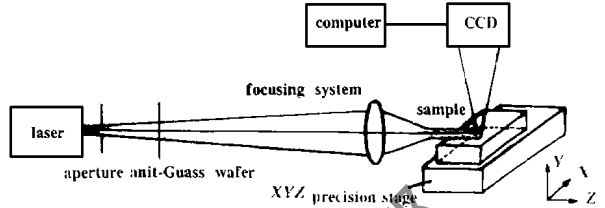


Fig. 1 The principle sketch of laser scanning system for detecting of micro bulk defect

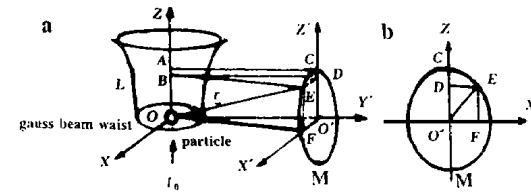


Fig. 2 Coordinate of a spherical particle scattered light

的复折射率为 $m = n - i\eta$; 线偏振的高斯光 I_0 在均匀媒质 L 中自 $-Z$ 向 $+Z$ 传播, 高斯光束束腰位于 XOY 平面内, 束腰中心于位 O 处, 束腰半径为 w_0 ; 入射光波长为 λ , 那么以微粒 O 为散射中心发出的散射光, 在空间任一点 $P(r, \theta, \varphi)$ 处的散射光强为:

$$I = I_0 / (K^2 r^2) (i_1 \sin^2 \varphi + i_2 \cos^2 \varphi) \tag{1}$$

式中, $K = 2\pi/\lambda$, i_1, i_2 为广义米强度系数, 且
$$\begin{cases} i_1 = S_1 \times S_1^* \\ i_2 = S_2 \times S_2^* \end{cases} \tag{2}$$

$\angle ZOE = \theta, \angle XOF = \varphi$

式中,
$$S_1 = [i \exp(-iKr) / (Kr)] \{ (2n+1) / [n(n+1)] \} g_n [a_n \pi_n(\cos\theta) + b_n \tau_n(\cos\theta)]$$
$$S_2 = [-i \exp(-iKr) / (Kr)] \{ (2n+1) / [n(n+1)] \} g_n [a_n \tau_n(\cos\theta) + b_n \pi_n(\cos\theta)] \tag{3}$$

又 $g_n = \exp[-[(n+1/2)/(2\pi w_0)]^2]$

$$a_n = [\Psi_n(q) \Psi_n'(mq) - m \Psi_n'(q) \Psi_n(mq)] / [\xi_n(q) \Psi_n'(mq) - m \xi_n'(q) \Psi_n(mq)]$$

$$b_n = [m \Psi_n(q) \Psi_n'(mq) - \Psi_n'(q) \Psi_n(mq)] / [m \xi_n(q) \Psi_n'(mq) - \xi_n'(q) \Psi_n(mq)]$$

$$\pi_n = dP_n(\cos\theta) / d\cos\theta \quad \tau_n = dP_n^{(1)}(\cos\theta) / d\theta$$

$$\Psi_n(z) = (z\pi/2)^{1/2} J_{n+1/2}(z) \quad \xi_n(z) = (z\pi/2)^{1/2} H_{n+1/2}^{(2)}(z)$$

$$q = 2\pi R / \lambda \tag{4}$$

式中, Ψ_n', ξ_n' 是 Ψ_n, ξ_n 对各自变量的微分, $J_{n+1/2}(z)$ 是半整数阶贝塞尔函数, $H_{n+1/2}^{(2)}(z)$ 是第二类汉克尔函数。

为此,在图 1 中若垂直于 Y 轴处放置了一面阵光探测器 M , 使 M 的中心与 Y 轴相交。

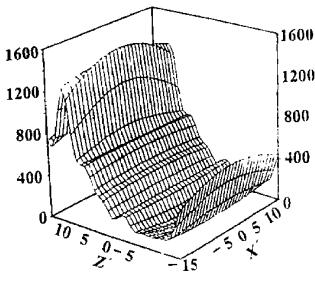


Fig. 3 Theoretical distribution of scattered light when $m = 0.4$ & $R = 10\mu\text{m}$

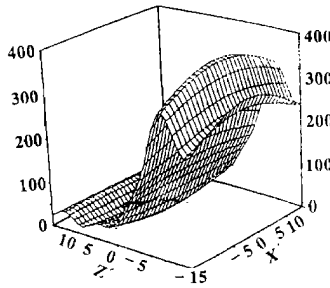


Fig. 4 Theoretical distribution of scattered light when $m = 0.4$ & $R = 5\mu\text{m}$

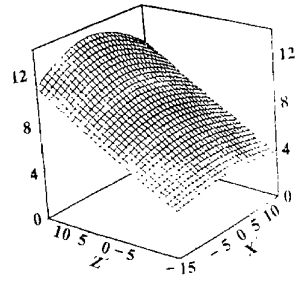


Fig. 5 Theoretical distribution of scattered light when $m = 0.4$ & $R = 1\mu\text{m}$

那么,由(2)~(4)式, O 点处有微粒存在时,就会在线偏振高斯光 I_0 的照射下有散射光产生进入 M , 且 M 上散射光的强弱及分布与微粒大小密切相关, 见图 3~7 所示。

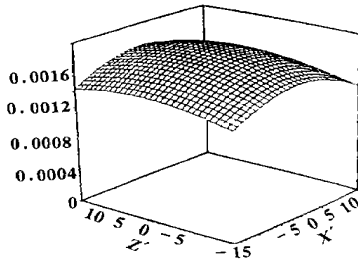


Fig. 6 Theoretical distribution of scattered light when $m = 0.4$ & $R = 100\text{nm}$

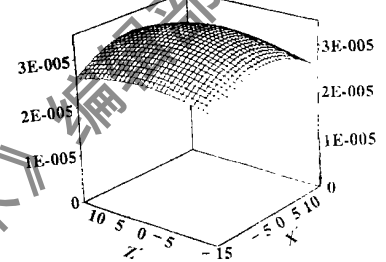


Fig. 7 Theoretical distribution of scattered light when $m = 0.4$ & $R = 50\text{nm}$

二、特征提取研究——激光散射扫描层析中粒状微体缺陷大小的确定

图 3~7 所示的不同微粒散射时, 计算机仿真 M 上接收到的散射光分布亦不同的结果为硅中微/纳米级体缺陷大小的确定提供了线索, 它表明以图 3~7 为基准来确定缺陷的大小是可行的, 这只要将实测散射分布图与理论图比对就可以获得缺陷大小的信息。然而, 这种方法由于受人为因素的影响, 不仅费时费力, 误差较大, 而且在测量中不易实现系统的自动化, 故有待于进一步的改进。为此, 在本文中, 针对这一问题, 我们提出了一种利用特征提取来确定微体缺陷大小的新分析方法。

首先, 分析 3~5 图可以发现, 对于同一折射率(图中 $m = 0.4$) 的粒状微体缺陷, R 从 $10\mu\text{m}$ 变化至 $1\mu\text{m}$ 或更小时, 在 $x' = 0$ 截面上散射光理论分布图样中的波纹数 V 即 $x' = 0$ 面上曲线的极大值个数有很大差异: 随着 R 从 $10\mu\text{m}$ 变化至 $1\mu\text{m}$ 或更小, 波纹数 V 亦从大变小直至 1。为此, 将不同大小的体缺陷散射时, 它们的散射光理论分布图样中各波纹数的数值作为第一特征分别提取出来, 作成数据文件以表格形式存入计算机, 那么, 在实际测量中, 用实测图中相应散射角范围内的曲线波纹数, 也即实测第一特征值与该表对比, 便可得到实测第一特征值与那一理论第一特征值相近, 故而可判断出对应缺陷是在几十或几个微米的量级。

其次, 仔细分析图 5~7 发现, 当微体缺陷的大小皆小于 $1\mu\text{m}$ 时, $x' = 0$ 截面上波纹数已全为 1, 故明显地, 此时再利用第一特征值判断缺陷大小会出现很大的误差。为此, 在 $V = 1$ 的情况下, 我们又提取出了第二特征值——不对称度, 即图 5~7 中 $x' = 0, z' = 15$ 点的散射光强与 $x' = 0, z' = -15$ 点的散射光强相对于 $x' = 0, z' = -1$ 点散射光强的不对称程度来判断

缺陷大小。

$$\text{character } \oplus = \{I/[I(x' = 0, z' = 15) - I(x' = 0, z' = -15)]/I(x' = 0, z' = -15) \quad (5)$$

此时, 同样的, 先在计算机内以数据表格形式存入当微体缺陷的大小在几百纳米、几十纳米乃至几纳米时, 它们的理论分布图样中各个第二特征值的数值, 然后在实测中, 用实测图中相应散射角范围内的实测第二特征值与该表对比, 即可得到实测第二特征值与那一理论第二特征值相近, 故而判断出对应缺陷是在几百或几十纳米的量级上。

附表给出了在微体缺陷相对折射率已知时 ($m = 0.4$, 相当于硅中存在着氧化物的体缺陷) 第一特征值与第二特征值随缺陷大小变化而变化的情况, 此时假设 $\lambda = 1.3\mu\text{m}$, $w_0 = 20\mu\text{m}$, $m = 0.4$, $\theta = 75^\circ \sim 105^\circ$, $\varphi = 90^\circ$, 它表明了利用特征提取来确定缺陷大小的可行性。

Table Varying state of character iv and \oplus when defect's size change

radius of the micro bulk granular defect		character iv	radius of the micro bulk granular defect		character \oplus
10 μm		5	500nm		1.37
8 μm		4	250nm		0.42
6 μm		3	100nm		0.05
4 μm		3	50nm		0.01
2 μm		2			
1 μm		1			

利用第一特征的提取是可以首先判断出缺陷大小所在的量级的。此时, 若 $V > 1$, 那么用 $V_{\text{实测}}$ 与 $V_{\text{理论}}$ 比对, 就能得出缺陷的大小是在几十或是几个微米量级上; 而若 $V = 1$ 时, 就必须进行第二特征的提取以判断出缺陷是在几百或是几十纳米量级上。用第二特征确定

缺陷大小在理论上分辨率可以达到很高, 这从图 5 与图 6 中 R 值仅相差 50nm, 散射光强分布的不对称度即发生了可以分辨的变化中可看出。它表明利用激光散射扫描层析技术检测硅中微/纳米级体缺陷, 当缺陷小至纳米级时分辨率在理论上可达 50nm。

三、结 论 与 展 望

提出了一种特征提取来对硅中微/纳米级体缺陷的激光散射图样进行分析, 以获得缺陷大小信息的分析方法; 指出通过所提出的第一特征值及第二特征值即可迅速地判断出缺陷的大小量级所在。这种分析方法具有分析速度快, 在体缺陷小于 1 μm 时分辨率高, 且可使系统实现自动化等优点, 符合半导体生产、加工工业的要求, 为此, 值得在激光散射扫描层析检测硅内部微/纳米体缺陷的技术中获得应用。

作者所提出的特征提取方法已被很好地用于激光散射扫描层析技术检测硅中微/纳米级体缺陷的模拟实验——玻璃内部微/纳米级体缺陷的检测中, 实验中其可行性获得了再一次的证明。

参 考 文 献

- 1 庄同曾. 集成电路制造技术——原理与实践. 北京: 电子工业出版社, 1992
- 2 李 勇, 周兆英. 仪器仪表学报, 1996; 17(1): 56~ 60
- 3 国家自然科学基金委员会工程与材料学部机械工程科学技术前沿编委会. 机械工程科学技术前沿. 北京: 机械工业出版社, 1996
- 4 Fillard J P. Materials Science & Engineering, 1993; B20: 165~ 171
- 5 Fillard J P, Montgomery P C, Gall P *et al.* J Crystal Growth, 1990; 103: 109~ 115
- 6 Kazuo Moriya Katsuyuki Hirai. J A P, 1989; 66(11): 5267~ 5273
- 7 赵凯华, 钟锡华. 光学. 北京: 北京大学出版社, 1984
- 8 Gouesbet G, Maheu B, Grehan G. J O S A, 1988; 5(9): 1427~ 1443

光斑模式对 PSD 定位的研究

吕爱民* 袁红星 贺安之

(* 88200 部队, 北京, 100012)

(南京理工大学应用物理系, 南京, 210094)

摘要: 以多光束模拟实际光束中的多模式及能量分布不均的现象, 建立了 PSD 定位与上述能量不均匀之间的关系, 从而从理论和实验上均验证了 PSD 定位只取决于光斑能量重心。

关键词: 光斑 模式 PSD

The research in the influence of beam spot on the precision of PSD

(Lü Aimin*, Yuan Hongxing, He Anzhi)

(* 88200 Army, Beijing, 100012)

(Department of Applied Physics Nanjing University of Sci. & Tech., Nanjing, 210094)

Abstract: By simulating multiple modes and uneven energy distribution of actual light beams, the relationship between PSD localization and above-mentioned uneven energy distribution is established in this paper, and thus, theoretically and experimentally justifies that PSD localization is solely subject to the balance center of light beam spots.

Key words: light beam spots mode PSD

引 言

光电位置敏感器件(PSD)是一种可直接对其光敏面上的光斑位置进行检测的光电器件^[1]。其理论基础是 1930 年 Schottky 发现的横向光电效应, PSD 到 80 年代才逐渐开始应用^[2]。可以广泛适用于各个技术领域中对物体动态位移的非接触高精度测量, 在光电检测中有着极其重要的作用。国内 PSD 本身发展及其应用方向的研究比较缓慢, 只是近年来才引起重视。90 年代有关 PSD 在应用方面的报道就比较多了, 但测试条件对 PSD 影响的研究很少见报道, 开展这方面的研究工作, 可有效地提高测量精度, 对实验可以起到指导性的作用。

文献[3]曾做利用多光束照射 PSD 位置影响实验研究: 三束相同光束分八种不同情况, 同一点照射 PSD, 从实验上研究了光斑分布对位置影响和非线性性; 文献[4]研究了有杂光干扰存在时 PSD 输出信号与杂光关系。我们进一步分析了探测光斑强度分布对定位的影响, 建立了光斑能量重心与 PSD 位置输出关系的模型, 并对能量对称光斑和非对称光斑作用于 PSD 时进行实验测试, 从理论与实验全面证明了光斑对 PSD 定位机理是基于光斑的能量重心。

*

*

*

作者简介: 陈 军, 女, 1970 年 9 月出生。现于清华大学精密仪器与机械学系攻读博士学位。