

①

硅中微体缺陷激光测试技术的 理论与实验研究*

陈军 尤政[√] 周兆英 刘兴占
(清华大学精密仪器与机械学系, 北京, 100084)

TN304.12
TN304.07

A 摘要 提出了一种基于广义洛伦兹-米氏理论(Generalized Lorenz & Mie Theory)的硅中 $\mu\text{m}/\text{nm}$ 级体缺陷的激光无损检测新途径. 叙述了有关的理论基础, 进行了系统的计算机仿真与特征提取的研究, 实现了系统的模拟实验, 验证了理论的正确性及方案的可行性.

关键词 广义洛伦兹-米氏散射理论, 硅, 激光, 无损检测.

微体缺陷

引言

L-M 散射理论

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三维微细结构的制作, 已生产出微传感器、微执行器乃至微型机电系统(MEMS)等, 硅中微细结构的一致性已成为决定加工出的微器件功能能否实现的重要因素之一. 近年来, 对硅的 $\mu\text{m}/\text{nm}$ 级体缺陷的测试日益受到了国内外专家的重视^[1].

当前, 对硅中 $\mu\text{m}/\text{nm}$ 级体缺陷的测试, 已发展的途径主要是: 透射电镜(TEM)法、超声显微法、声发射法及 X 射线法等. 透射电镜法一般仅适用于缺陷密度较高的样板检测, 需要进行耗时多, 难度大的样品减薄制备(一般采用离子测射减薄方法, 将具有超晶格或多层膜的区域减薄到电子可以透射的程度), 不仅测量复杂, 而且对样品具有破坏性. 超声显微与声发射法属于无损检测方法, 但它们获取信息速度慢, 实时性差; 且由于超声波波长较长, 分辨率皆不高于 μm 级^[2]. X 射线法, 特别是软 X 射线法是近年来发展很快的一种检测材料内部微体缺陷的途径, 但由于其聚焦困难, 目前分辨率仍不高于 $1\mu\text{m}$ ^[3].

数字化成像技术、特别是激光技术的迅速发展, 使得用光散射来给出 nm 级尺度缺陷的信息成为可能, 这比衍射极限要小 2~3 个数量级. 为此, 在本文中, 针对目前微型机电系统(MEMS)技术急需的要对硅微结构中微体缺陷(亚 μm 乃至 nm 级)进行检测, 我们提出了一种基于广义洛伦兹-米氏理论(Generalized Lorenz & Mie theory)的激光无损检测新途径.

1 硅中 $\mu\text{m}/\text{nm}$ 级体缺陷激光测试新途径的提出及理论依据

由广义洛伦兹-米氏理论可知^[4], 在图 1 所示的空间直角坐标系中, 球形粒子位于坐标原点 O , 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

* 国家自然科学基金(编号 59575078)和霍英东基金资助项目
本文 1996 年 10 月 18 日收到, 修改稿 1997 年 1 月 9 日收到

内,束腰中心位于 O 处,粒子半径为 R ,粒子相对于媒质 L 的复折射率 $m=n-iq$,入射光波长为 λ ,束腰半径为 ω_0 ,以微粒 O 为散射中心发出的散射光在空间任意一点 $P(r, \theta, \varphi)$ 处的光强为:

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

式(1)中, i_1, i_2 为广义米强度系数,它是散射角 θ 和 m, ω_0, λ 及 $q=2\pi R/\lambda$ 的函数; $K=2\pi/\lambda$.

在图 1 中,若垂直于 y 轴放置一线阵或面阵光探测器 M ,使 y 轴穿过该线阵或面阵的中心,由上所述, O 点处有粒子存在时,就会在线偏振高斯光 I_0 的照射下有散射光进入光探测器 M ,且 M 上接收到的信号强弱及分布在 O 点的微粒性质在已定的情况下只随着微粒大小的变化而变化;相反, O 点无粒子时,探测器会由于无散射光射入而不产生输出.

根据以上分析,我们提出了如图 2 所示的硅中 $\mu\text{m}/\text{nm}$ 级体缺陷的激光无损检测新途径.

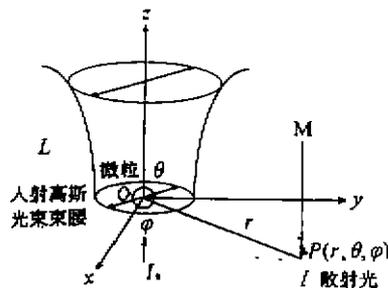


图 1 球形粒子光散射图

Fig. 1 Light scattered by a spherical particle

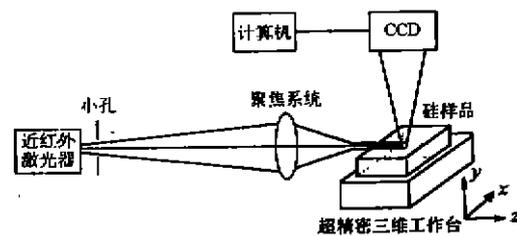


图 2 硅中 $\mu\text{m}/\text{nm}$ 级体缺陷激光测试系统原理图

Fig. 2 Sketch of principle of a laser system for detecting bulk defects of $\mu\text{m}/\text{nm}$ orders in Si

近红外($\lambda=1.3\mu\text{m}$)半导体激光器发出线偏振的高斯光,小孔空间滤波后,进入聚焦系统聚为焦点大小只有几十个 μm 的微光束.将此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.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,且图像传感器上散射光的强度及分布与缺陷大小密切相关,由散射图样就可以分辨出缺陷的大小.

2 微体缺陷激光测试技术的计算机仿真与特征提取研究

2.1 微体缺陷激光测试技术的计算机仿真研究

为验证上述提出方案的可行性,进行了系统的计算机仿真实验(见图 3).此时,设定媒质 L 为待测材料, O 点处散射体为材料 L 内部微体缺陷,面 M 为散射光接收面.

图 3 中, a, φ 及 r' 确定了面 M 内任意一点相应的散射角 θ 及 φ ; 将 θ, φ 代入广义洛伦兹-米氏理论式(1)中进行数值计算,我们获得了 $\lambda=1.3\mu\text{m}, m=0.4$ (相当于硅中存在着氧化物类型的体缺陷),微粒粒径 $R=20, 4, 0.4, 0.04$ 及 $0.08\mu\text{m}$ 时面 M 内散射光的理论分布(见图 4). 图 4 中, $I(x', z')$ 表示 (x', z') 坐标处的散射光强. $a=OO'$, 假定 $r_0=45, x', z'$ 单位与 r_0 相同, $\omega_0=20\mu\text{m}$.

分析图 4 发现:对于不同粒径微粒,在垂直于入射光方向接收散射光时,其散射光强度分布

有着明显的差异. 这一差异使利用垂直于入射光方向接收散射光分布来确定粒径大小成为可能, 为垂直于入射光方向接收散射光以确定粒径大小即材料内部 $\mu\text{m}/\text{nm}$ 级缺陷提供了可靠的理论依据.

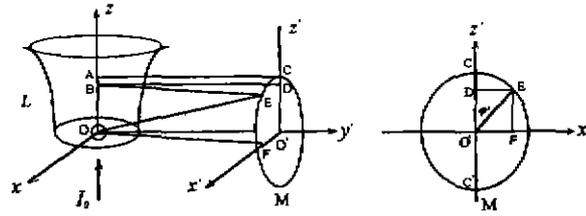


图3 微体缺陷激光测试系统的计算机仿真几何图

Fig. 3 Computer simulation figure of the laser detection system for micro bulk defects

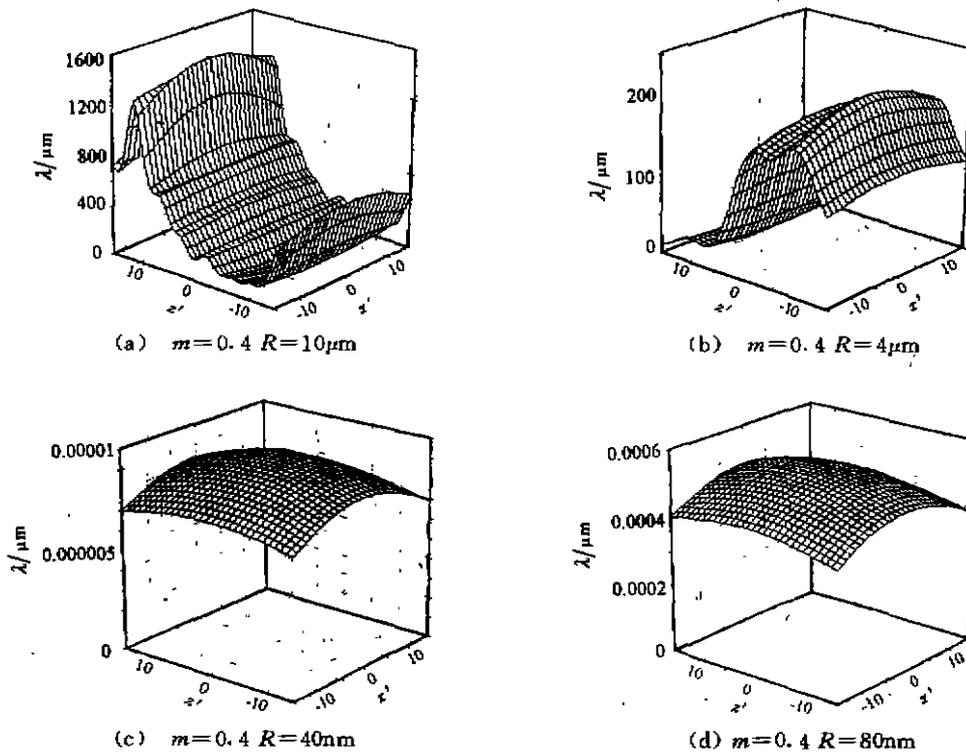


图4 不同粒径大小时面M内散射光强理论分布图

Fig. 4 Theoretical distribution of scattered light in plane M when the particle diameter varies

2.2 特征提取与 $\mu\text{m}/\text{nm}$ 级体缺陷大小的确定

以图4为基准来确定缺陷的大小是可行的, 这只要将实测图与理论图对比就可以获得对应缺陷大小的信息(当然这需要先已知缺陷相对于媒质的折射率 m). 然而这种方法由于

受人为因素的影响,误差较大,且在测量中不易实现系统的自动化,根据图 4,我们提出了一种利用特征来判断缺陷大小的特征提取法。

首先,分析图 4 可以发现,对于同一折射率(图中 $m=0.4$)的粒子, R 从 $20\mu\text{m}$ 变化至 $1\mu\text{m}$ 或更小时,在 $x'=0$ 截面上散射光强理论分布的波纹数 V 即 $x'=0$ 面上曲线的极大值个数有很大差异,随着 R 从 $20\mu\text{m}$ 变化至 $1\mu\text{m}$ 或更小,波纹数 V 亦从大变小至 1. 为此将此波纹数作为第一特征提取出来,用它与实测图中相应位置的曲线波纹数对比,就可判断出对应缺陷是在几十或是几个 μm 的量级上。

其次,进一步地,分析图 4(c)~(d)发现,此时 $x'=0$ 截面上波纹数已全为 1,故这时再利用第一特征判断缺陷大小明显地会出现很大误差,为此,在 $V=1$ 情况下,我们又提取出了第二特征,利用不对称度即图 4(c)~(d)中 $x'=0, z'=15$ 点光强与 $x'=0, z'=-15$ 点光强相对于 $x'=0, z'=0$ 点光强的不对称程度来判断缺陷的大小,以确定缺陷是在几百或是几十 nm 的量级上。

利用第一特征的提取可先判断出缺陷大小所在的量级. 在此基础上,若 $V>1$,用 $V_{\text{实测}}$ 与 $V_{\text{理论}}$ 对比,就能得出缺陷大小的信息,此时分辨率在 $1\mu\text{m}$; 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 μm 级或是几百、几十 nm . 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 4(c), (d)中 R 值仅相差 40nm 而散射光强分布的不对称程度即发生了可以分辨的变化中看出. 它表明利用垂直于入射方向接收散射光以检测硅中微体缺陷在理论上分辨率可达 40nm .

3 模拟实验研究

为进一步验证上述所提方案的正确性与可行性,进行了玻璃体中微体缺陷的激光测试模拟实验(见图 2). 此时激光器为 He-Ne 激光器,它发出 $0.6328\mu\text{m}$ 的线偏振高斯光;该光束经小孔空间滤波后,进入聚焦系统会聚成焦点大小只有 $40\mu\text{m}$ 的微光束;将此微光束打入玻璃样品内部,通过三维超精密工作台带动样品移动实现光束焦点对样品内部各层面的扫描;将一具有 512 像素的线阵 CCD 放于图 3 中所示的 M 处以接收散射光,由计算机控制散射图样的采集与显示。

图 5 为 CCD 接收到的扫描过程中玻璃体内某一点处散射光灰度分布,横坐标为像素(个),用 n 表示,纵坐标为灰度值(级),用 I 表示;其接收范围为图 3 中 $\phi=0\sim 180^\circ$ 的 CC' 线上. 将它与图 4 比较,发现图 5 与图 4(a)是相似的,估计该玻璃样品中此处存在粒径在 $10\sim 20\mu\text{m}$ 的缺陷. 实际上,在显微镜下,可观察到此处正有一大小约 $15\mu\text{m}$ 的气泡存在. 可见,此实验初步验证了利用激光垂直散射法来确定材料内部微体缺陷的大小是可行的。

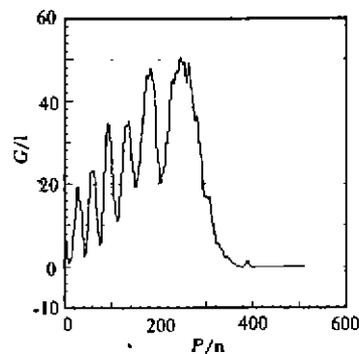


图 5 由 CCD 接收到的散射光灰度分布
Fig 5. Gray level distribution of scattered light received by CCD

4 结语

无损检测硅材料内部 $\mu\text{m}/\text{nm}$ 级体缺陷,是目前国内外 $\mu\text{m}/\text{nm}$ 技术研究中的热点之一.本文所提出的基于 GLMT 的微体缺陷激光检测技术是实现硅中 $\mu\text{m}/\text{nm}$ 级体缺陷无损检测的一种新途径,它适用于硅基材料亚表面以下微体缺陷的检测.该途径中,由于是通过散射光的分布图样进行了分析,而不是对散射光的强度进行分析,因而具有检测系统对入射激光光强稳定性无严格要求的优点,另外,该方案中,由于是在垂直于入射光方向接收了散射光,而不是在平行于入射光方向接收散射光,故极大地降低了检测过程中成像背景的噪声,提高了图样的信噪比和衬度,因而在理论上,当入射激光光强足够强时(例如 100mW),对尺度小至亚 μm 乃至几十 nm 的体缺陷仍可检测.本文的理论和计算机仿真研究及系统的模拟实验,证明了所提出的基于 GLM 理论检测硅材料内部微体缺陷技术方案的可行性,从而为硅中微体缺陷激光扫描层析技术(LST)的实现打下了基础,此技术的进一步研究,将有利于实现机电系统(MEMS)中微型零件内部微体缺陷的无损检测.

参考文献

- 1 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,1996,196~205
- 2 Frank J, Sattler M. *Chemical Engineering*, 1989, 11: 191~197
- 3 Brinksmeier E. *Precision Engineering*, 1989, 11(4): 211~223
- 4 Gouesbet G, Maheu B, Grehan G. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1988, 5(9): 1427~1443
- 5 《数学手册》编写组,《数学手册》,北京:高等教育出版社,1979,46

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF LASER DETECTING TECHNIQUE FOR MICRO BULK DEFECTS IN SILICON*

Chen Jun You Zheng Zhou Zhaoying Liu Xingzhan

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A novel way of laser detection based on generalized Lorenz and Mie scattering theory was developed, which can detect micro bulk defects in Si material. Its principle was analyzed and a method of characteristics-extracting was put forward. Simulating experiments on computer and glass samples were implemented and scattered graph collected in the direction perpendicular to the incident light was processed. Quite satisfactory result was achieved, which demonstrates that the scattering modeling and technique are correct and feasible.

Key words generalized Lorenz & Mie scattering theory, Si, laser, non-destructive detection.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China and Hao Yingdong Foundation