

基于 Mie 理论的微体缺陷激光测试技术的理论与实验研究*

尤 政 陈 军 杨 韧

(清华大学精密仪器与机械学系 北京 100084)

提要 提出了一种基于瑞利散射定律及米氏理论(Rayleigh & Mie theory)的、在垂直于入射光方向接收散射光以极大提高衬度来检测材料内部微/纳米级体缺陷的无损检测新途径,叙述了有关的理论基础,进行了系统的计算机仿真与实验研究,验证了理论的正确性及方案的可行性,说明利用光散射测量微/纳米级体缺陷是可行的,进而为下一步的激光扫描层析技术(LST)打下了基础。

关键词 米氏理论, 散射, 微/纳米级体缺陷, 无损检测

1 引 言

微细加工技术的日臻成熟,特别是高深宽比三维微结构加工方法的不断涌现,对被加工材料的内部性能提出了越来越高的要求。此时材料内部结构的一致性已是微器件功能能否实现的重要因素之一。鉴此,近年来对材料内部微/纳米级体缺陷的测试,日益受到了国内外专家的重视^[1]。

当前,对材料内部微体缺陷的测试,发展出的途径主要是:透射电镜(TEM)法、超声显微法、声发射法及 X 射线法等。透射电镜法一般适用于缺陷密度较高的样板的检测,且需要进行耗时很多、难度很大的样品的减薄制备(一般采用离子溅射减薄方法,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式,但它们获取信息速度慢,实时性差;且由于超声波波长较长,分辨率皆不高于微米级^[2]。X 射线法,特别是软 X 射线法是近年来发展很快的一种测试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]。

数字化成像技术的发展,使得用光学显微镜的像来给出纳米级尺度缺陷的信息成为可能,这比衍射极限要小二至三个数量级。为此,本文针对微型机电系统(MEMS)技术急需的对硅微结构内部体缺陷(亚微米乃至纳米级)进行检测,作者提出了一种基于瑞利散射定律及米氏理论的、在垂直于入射光方向接收散射光以极大提高衬度来检测材料内部微/纳米级体缺陷的无损检测新途径。

* 国家自然科学基金和霍英东基金资助项目。

2 微体缺陷激光测试新途径的提出与计算机仿真研究

2.1 微体缺陷激光测试新途径的提出及其理论依据

瑞利散射定律及米氏理论指出^[4,5], 平面线偏振光在均匀介质中传播时, 若其中含有一任意直径及任意成份的微粒, 就会以该微粒 O 为散射中心发出散射光, 如图 1 所示, 且散射光强是散射角 θ 、粒子直径 R 及粒子折射率 m 的函数

$$I(\theta) = \frac{1}{2K^2 r^2} (i_1 + i_2) I_0 \quad (1)$$

其中 $K = 2\pi/\lambda$, i_1, i_2 称为米强度系数, 它们是散射角 θ , 折射率 m 和粒径参数 $q = 2\pi R/\lambda$ 的函数。

于是, 在图 1 中, 若垂直于 Y 轴放置一面阵光探测器 M , 使 Y 轴穿过该面阵的中心, 则由上所述, O 点处有粒子存在时, 就会在入射线偏振光 I 的照射下有散射光信号进入光探测器 M , 光探测器 M 上接收信号的强弱及分布随着微粒大小及折射率的不同而变化; 相反地, O 点无粒子时, 探测器就会由于无散射光射入而不产生输出。

为此, 根据以上分析, 我们提出了如图 2 所示的材料内部微/纳米级体缺陷无损检测的新途径。

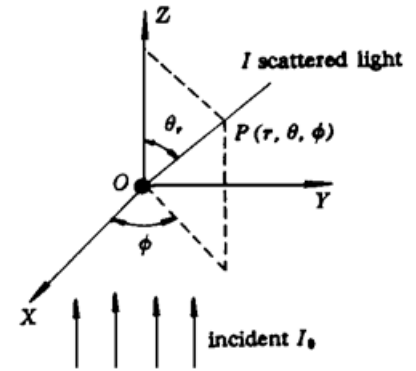


图 1 球形粒子光散射图

Fig. 1 Coordinate of a spherical particle scattered light

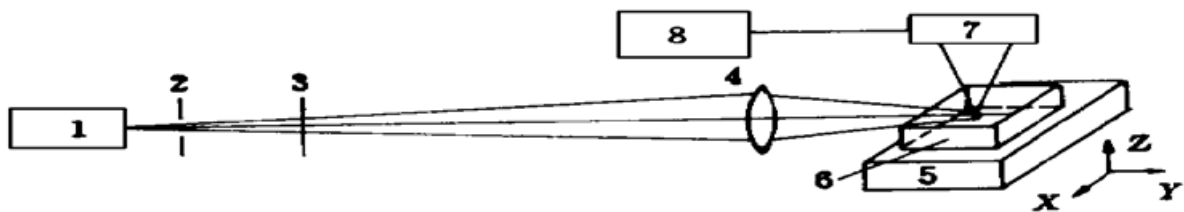


图 2 微体缺陷激光测试系统原理图

1: 激光器; 2: 小孔; 3: 反高斯膜; 4: 聚焦系统; 5: XYZ 精密工作台; 6: 样品; 7: CCD; 8: 计算机

Fig. 2 Principle sketch of the micro-bulk defect detection system

1: laser; 2: aperture; 3: anti-Gauss wafer; 4: focusing system; 5: XYZ precision stage; 6: sample; 7: CCD; 8: computer

激光器发出平面线偏振光, 经小孔空间滤波及反高斯膜均匀化后, 进入聚焦系统聚为焦点大小只有十几个 μm 的微光束。将此光束打入样品内部, 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)。将面阵光电电荷耦合器件 CCD 放在垂直于 Z 轴的位置处, 使 Z 轴通过 CCD 面阵中心。则扫描过程中, 若样品内某一位置存在缺陷, 如前所述, 就会以该缺陷为散射中心发出散射光进入 CCD, 且 CCD 上散射光的强度及分布与缺陷大小、折射率一一对应, 由散射图样就可以分辨出缺陷的大小量级所在。

2.2 微体缺陷激光测试技术的计算机仿真研究

为验证文中提出理论的正确性及方案的可行性, 进行了系统的计算机仿真实验, 如图 3 所示。此时, 空气设定为待测材料, O 点处散射体为材料内部微体缺陷, 面 M 为散射光接收面。

在 $\triangle OAE$ 中, $OA = r' \cos\varphi$, $OE = \sqrt{a^2 + r'^2}$, $AE = \sqrt{a^2 + r'^2 \sin^2\varphi}$, 由余弦定理 $\cos\varphi = [r'(\cos^2\varphi - \sin^2\varphi + r') / 2 \sqrt{a^2 + r'^2} \cos\varphi = y \quad (2)$

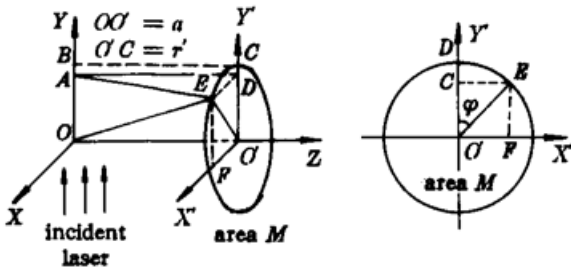


图3 微体缺陷激光测试系统的计算机仿真几何图
Fig. 3 Computer simulation of micro-defect detection

$$\text{故 } \theta = \begin{cases} \arccos y & 0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \\ 180^\circ - \arccos y & 90^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \end{cases} \quad (3)$$

可见, a, φ 及 r' 即确定了面 M 内任一点相应的散射角 θ 。将 θ 代入米氏理论进行数值计算, 获得了 $m = 1.5, q = 200, 20, 2, 0.2$ 及 0.4 ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 时, 分别对应微粒粒径 $R = 20, 2, 0.2, 0.02$ 及 $0.04 \mu\text{m}$) 时面 M 内的散射场理论分布, 如图 4 ~ 8 所示, 此时, 设定 $r_0 = 45, x, y$ 单位与 r_0 相同。

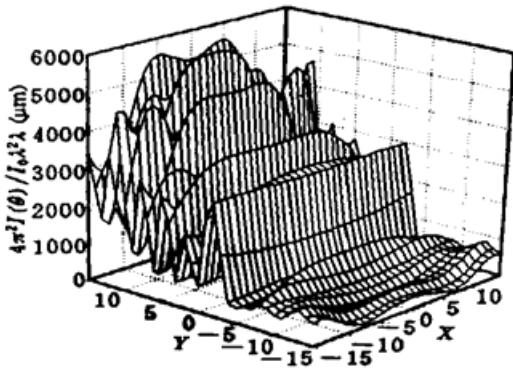


图4 $m = 1.5, R = 20 \mu\text{m}$ 时散射光理论分布
Fig. 4 Theoretical distribution of scattered light when $m = 1.5$ and $R = 20 \mu\text{m}$

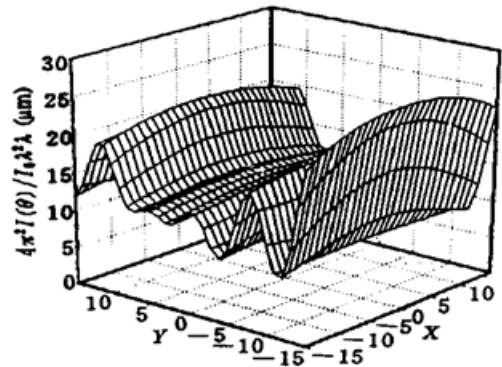


图5 $m = 1.5, R = 2 \mu\text{m}$ 时散射光理论分布
Fig. 5 Theoretical distribution of scattered light when $m = 1.5$ and $R = 2 \mu\text{m}$

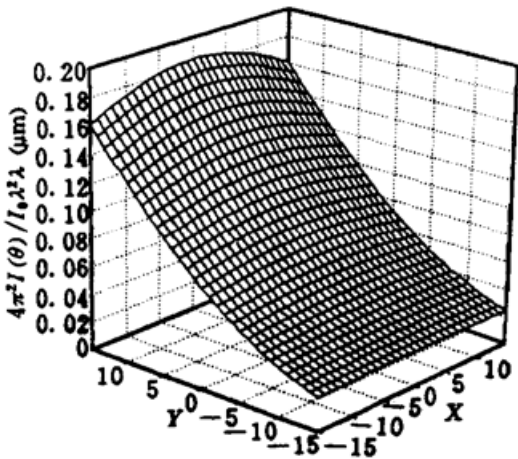


图6 $m = 1.5, R = 200 \text{ nm}$ 时散射光理论分布
Fig. 6 Theoretical distribution of scattered light when $m = 1.5$ and $R = 200 \text{ nm}$

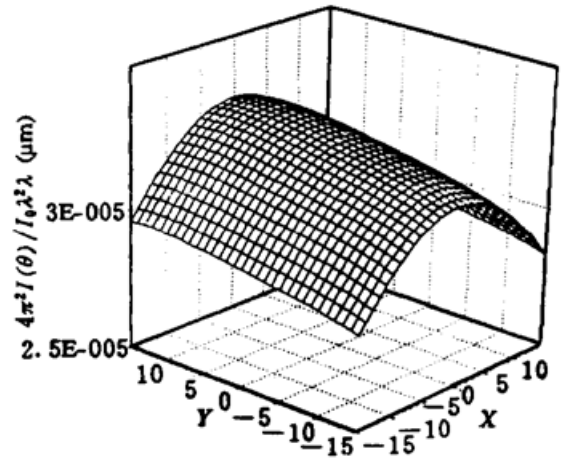


图7 $m = 1.5, R = 20 \text{ nm}$ 时散射光理论分布
Fig. 7 Theoretical distribution of scattered light when $m = 1.5$ and $R = 20 \text{ nm}$

分析图 4~ 8 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, 其散射光的理论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微/纳米级缺陷提供了可靠的依据。

进一步仔细分析图 7 与图 8 发现, 粒径尺度从 20 nm 变化到 40 nm 时, 散射光强的理论分布亦发生了可以分辨的差异。事实上, 对粒径从 20 μm 直至 20 nm 的微粒, 这种差异在微粒粒

径变化不小于 20 nm 时都十分明显, 表明利用垂直于入射光方向接收散射光以检测材料内部微体缺陷在理论上分辨率可达 20 nm。

另一组数值计算在 q 取相同值而 m 取不同值时进行(图略)。结果发现, 此时尽管散射场强度的绝对值发生了变化, 但散射场分布的图样是基本不受影响的, 说明 q 值是影响散射场分布的决定性因素。

3 模拟实验研究

图 9 为基于 Mie 理论的微体缺陷激光测试系统的模拟实验原理图。

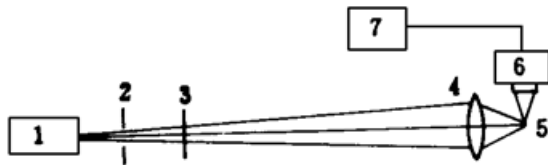


图 9 微体缺陷激光测试系统的模拟实验
1: 激光器; 2: 小孔; 3: 反高斯膜; 4: 聚焦系统;
5: 金刚石粉末; 6: CCD; 7: 计算机

Fig. 9 Simulation of the micro bulk defect detection system

1: laser; 2: aperture; 3: anti-Gauss wafer; 4: focusing system; 5: micro C partical; 6: CCD; 7: computer

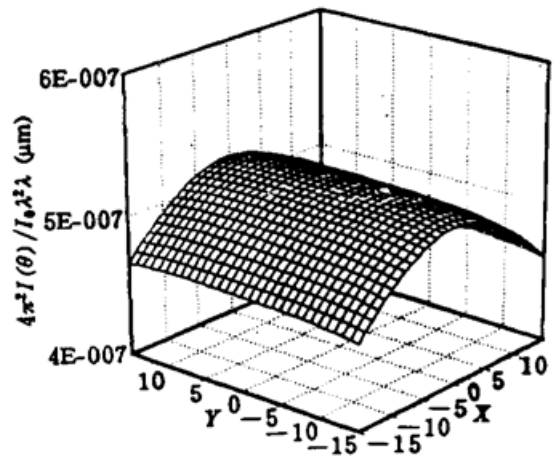


图 8 $m = 1.5, R = 40 \text{ nm}$ 时散射光理论分布
Fig. 8 Theoretical distribution of scattered light when $m = 1.5$ and $R = 40 \text{ nm}$

He-Ne 激光器发出波长为 632.8 nm 的高斯光, 经反高斯膜均匀化后, 进入聚焦系统会聚成焦点大小只有 20 μm 的微光束。将由超声波分散开的金刚石微粒放于光束焦点处模拟材料内部存在的微体缺陷, 此时空气即模拟为待测材料。将 512 × 512 面阵 CCD 放于图 3 所示的面 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 10 为 CCD 接收到的散射光场的灰度分布, 其接收范围为图 3 中 $\theta = 0^\circ \sim 180^\circ$ 。将它与图 4~ 7 比较, 发现图 10 与图 5 是相似的, 故估计微粒粒径在几微米量级。实际上, 微粒粒径标定值为

5 μm。可见此实验验证了激光垂直散射法确定材料内部微体缺陷的大小是可行的。

上述模拟实验中, 在确定粒子大小上, 使用了将实测分布与理论分布直接比对的方式。这种方式精度不高。然而, 如果进一步将各量级微粒散射图样的特征值提取出来, 用它确定粒径, 那么在理论上本文所提出的检测方案精度可达 ± 20 nm。

4 结论与展望

材料内部微/纳米级体缺陷的无损检测, 是目前国内外微/纳米技术研究中的热点之一。本文所提出的基于 Mie 理论的、在垂直于入射光方向接收散射光以判断出缺陷大小的微体缺陷检测技术是实现材料内部微/纳米级体缺陷无损检测的一种新途径, 它克服了透射分析电镜样品制备困难、无法进行无损检测的缺陷。在本文所提出的途径中, 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

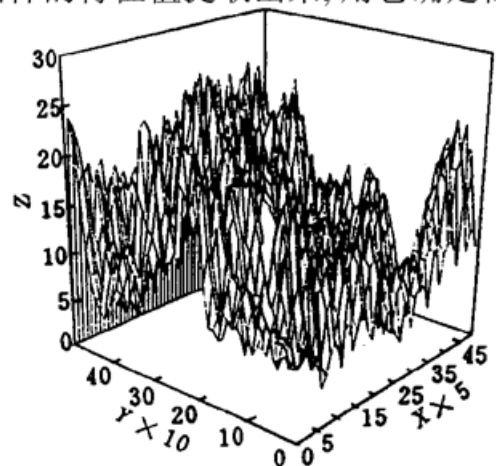


图 10 CCD 接收到的散射光灰度分布
Fig. 10 Grey level distribution of scattered light recieved by CCD

强度进行分析,因而具有检测系统对入射光强稳定性无严格要求的优点。另外,该方案中,由于在垂直于入射光方向接收了散射光,因而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,故对尺度小至几十纳米的体缺陷仍可检测。本文的理论研究及计算机的仿真、系统模拟实验,证明了所提出的基于 Mie 理论检测材料内部微体缺陷的技术方案的可行性,从而为材料内部微体缺陷的激光扫描层析技术实现打下了基础。此技术的进一步研究,将有利于实现微机电系统(MEMS)中微型零件内部微体缺陷的无损检测。

参 考 文 献

- 1 周兆英,白春礼,尤 政 等. 微米/纳米技术. 机械工程学科前沿,北京:机械工业出版社,1995,1~ 15
- 2 Frank J. Sattler. Nondestructive testing via optical and acoustical method. *Chemical Engineering*, 1989, (11): 191~ 197
- 3 E. Brinksmeier. State-of-the-art of nondestructive measurement of sub-surface material properties and damages. *Precision Engineering*, 1989, 11(4): 211~ 223
- 4 赵凯华,钟锡华. 光学(下册),北京:北京大学出版社,1984, 251~ 254
- 5 G. Mie. Beitrage zur optik truber medien speziell kolloedaler metallosungen. *Annalen der Physik*, 1908, 4(25): 377

Theoretical and Experimental Study of Detecting In-material Micro-bulk Defects by a Laser Scattering Technique Based on Mie Theory

You Zheng Chen Jun Yang Ren

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

Abstract Demands for ultra-high precision non-destructive detection of micro bulk defects in materials have manifested as microelectronics and micro-electro-mechanical system (MEMS) rapidly develops. But at the same time, although many high precision non-destructive defects detection methods exist now, they still can't meet the requirements at all. In this paper, after having established a mathematical modeling of detecting micro-bulk defects by Rayleigh & Mie theory, a novel way, which collects scattered light in the direction vertical to the incident laser and can detect micro-bulk defects in materials, is proposed. In order to prove the rightness of the modeling and technique, simulation experiments on microsize diamond particles are implemented and the scattered graph collected in the direction vertical to the incident light is processed. Satisfactory result is achieved which demonstrates that the scattering modeling and technique are correct and that the LST non-destructive detection of micro-bulk defects is feasible.

Key words Rayleigh & Mie theory, scatter, micro/nano-bulk defect, non-destructive detection