

蓝宝石晶片中微/纳米缺陷散射特性的仿真

程洁¹, 王湘宁¹, 肖永亮², 喻更生^{1*}

¹湘潭大学材料科学与工程学院, 湖南 湘潭 411105;

²湘潭大学物理与光电工程学院, 湖南 湘潭 411105

摘要 基于广义 Lorenz-Mie 理论,对蓝宝石晶片中微体缺陷的散射特性进行了仿真,分析了散射光接收位置、缺陷大小、入射光波长对散射光强的影响。结果表明:前向散射方向上的空间散射光强信息量最大,检测结果最准确;缺陷大小对散射光强分布具有显著影响,可以将散射光强分布曲线的特征作为判断缺陷大小的依据;入射光波长越小,测量越准确。

关键词 散射; Mie 理论; 蓝宝石晶片; 微体缺陷; 无损检测

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0404001

Simulation of Scattering Characteristics of Micro- and Nano-Scale Defects in Sapphire Wafer

Cheng Jie¹, Wang Xiangning¹, Xiao Yongliang², Yu Gengsheng^{1*}

¹School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China;

²School of Physics and Optoelectronics, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China

Abstract The scattering characteristics simulation of microsphere defects in sapphire wafers is implemented based on the generalized Lorenz-Mie theory, the influences of the receiving position of scattered light, defect size, the wavelength of incident light on the scattering light intensity are analyzed. The results show that the spatial scattering light intensity in the front scattering direction contains the largest amount of information, so the test results are the most accurate. The defect size has significant effect on the scattering light intensity distribution, therefore, it is possible that the characteristics of the scattering light intensity distribution curves can be used as the basis to estimate the defect size. The smaller the wavelength of the incident light, the more accurate the detection results.

Key words scattering; Mie theory; sapphire wafer; microsphere defect; nondestructive testing

OCIS codes 290.4020; 290.2558; 290.5850

1 引 言

蓝宝石($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)晶体具有硬度高(莫氏 9 级)、熔点高(2045 °C)、光透性好、热稳定性好、化学性质稳定等优良的性能,在国防、航空航天、工业、医疗卫生以及生活等领域得到了广泛应用^[1-2]。蓝宝石是一种硬而脆的陶瓷材料(其硬度仅次于金刚石),从单晶生长到晶片加工过程中会不可避免地产生微/纳米缺陷^[3-8]。这些缺陷不仅会影响蓝宝石的光学性能,还会导致其机械强度急剧下降,因而在服役过

程中存在断裂隐患。蓝宝石晶片中微/纳米级缺陷的检测已成为不可小觑的关键问题。现有的检测方法,如腐蚀法、光学显微镜法、人工检测法等^[9],均无法实现对蓝宝石晶片中微体缺陷的无损检测,所以,寻找一种无损伤、高精度、低成本的蓝宝石晶片检测方法具有重要的研究意义。

光学检测方法具有非接触、无损伤、速度快等优点,受到了研究人员的极大关注。其中的激光散射法是一种高灵敏度检测材料内部微体缺陷的方法^[10]。根据 Lorenz-Mie 理论可知,可以通过对固

收稿日期: 2018-08-28; 修回日期: 2018-11-27; 录用日期: 2018-12-26

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61805208)

* E-mail: yugs@xtu.edu.cn

定位置的散射光进行测量来获得散射光强值,但由此反演推导实际缺陷大小时会遇到一个问题,即反映缺陷信息的折射率与缺陷大小都是待定的参数。实际上,蓝宝石中微/纳米缺陷的结构和形状非常复杂,而且尺寸跨度也非常大,如果单纯通过实验测试来获得实际的缺陷情况,就需要将测量值进行多次分析与对比才能获得比较可靠的结果,并且获得的数据有限^[11]。尤政院士课题组对半导体材料微体缺陷进行研究后认为,散射光强分布与散射光接收位置、缺陷大小及入射光波长有关,在固定散射光接收位置及入射光波长的条件下,不同大小的微体缺陷对应的散射光分布的差异较大,因此,以散射光分布的理论值为基准确定微体缺陷的大小是可行的^[12]。目前,关于采用激光散射法对蓝宝石进行检测的研究还少有公开的报道,本课题组通过对蓝宝石晶片缺陷在激光照射条件下的空间散射光强进行仿真,并对数据进行收集与分析,得出了一定空间范围内散射光强与散射粒子粒径参数的关系,获得测量精度,并得到了缺陷大小与散射光强的关系^[12-13],以期对蓝宝石缺陷检测提供理论依据。

2 微体缺陷激光检测的理论依据

广义 Lorenz-Mie 理论是由麦克斯韦方程组推导得出的^[14-16]。建立如图 1 所示的空间直角坐标系^[12]:球形散射粒子位于坐标系的原点,作为入射光的高斯光束 I_0 沿 z 轴传播,散射粒子位于高斯光束束腰中心处。

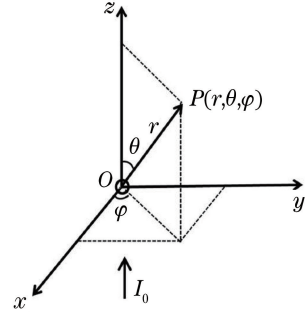


图 1 球形粒子散射坐标系

Fig. 1 Coordinate system of spherical particle scattering

根据广义 Lorenz-Mie 理论,距离散射粒子中心 r 处的点 $P(r, \theta, \varphi)$ 的散射光强为^[14-15]

$$I = \frac{\lambda^2 I_0}{4 \pi^2 r^2} (i_1 \sin^2 \varphi + i_2 \cos^2 \varphi) = \frac{\lambda^2 I_0}{4 \pi^2 r^2} \left| \sin \varphi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} g_n (a_n \pi_n \cos \theta + b_n \tau_n \cos \theta) \right|^2 + \frac{\lambda^2 I_0}{4 \pi^2 r^2} \left| \cos \varphi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} g_n (a_n \tau_n \cos \theta + b_n \pi_n \cos \theta) \right|^2, \quad (1)$$

式中: I_0 为入射光的强度; λ 为入射光的波长; i_1 、 i_2 为散射角、相对折射率以及粒径参数的函数; r 、 θ 、 φ 为散射光强的空间位置分布参数,其中 θ 为散射角; a_n 、 b_n 为 Mie 散射系数; π_n 、 τ_n 为散射角函数; g_n 为激光光束与散射粒子相对位置关系的参数。当散射粒子位于激光束束腰中心时, g_n 的表达式为^[15]

$$g_n = \exp\left(-\frac{\rho^2}{\omega}\right) = \exp\left[-\frac{\left(n + \frac{1}{2}\right)^2 \lambda^2}{4\pi^2 \omega^2}\right], \quad (2)$$

式中: ω 为激光束束腰的大小。

(2)式中 n 的取值与散射粒子的粒径参数有关,其值是由 Wiscombe 经验公式确定的^[17],即

$$\begin{cases} n = q + 4q^{\frac{1}{3}} + 1, & 0.02 \leq q < 8 \\ n = q + 4.05q^{\frac{1}{3}} + 1, & 8 \leq q < 4200 \\ n = q + 4q^{\frac{1}{3}} + 2, & 4200 \leq q \leq 20000 \end{cases}, \quad (3)$$

式中: q 为散射粒子的粒径参数, $q = 2\pi R/\lambda$,其中 R 为散射粒子的半径。

为了计算散射粒子在空间的散射光强,假设蓝宝石中缺陷的形状为球体,建立如图 2 所示的仿真模型^[18-21]: I_0 为入射激光光束, O 为蓝宝石材料内微体缺陷的中心点,面 M 为散射光接收面。令 $|AD| = |OO'| = a$, $|OA| = d$, $|OP| = r$, $|DP| = |O'F| = h$,则

$$|AP| = \sqrt{|AD|^2 + |DP|^2} = \sqrt{a^2 + h^2}, \quad (4)$$

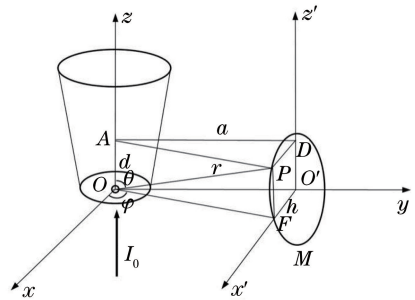


图 2 微体缺陷激光检测系统的仿真模型

Fig. 2 Simulation model of laser detection system for microsphere defect

$$r = \sqrt{|OA|^2 + |AP|^2} = \sqrt{a^2 + h^2 + d^2}, \quad (5)$$

$$\theta = \arctan \frac{|AP|}{|OA|} = \arctan \frac{\sqrt{a^2 + h^2}}{d}, \quad (6)$$

$$\varphi = \arctan \frac{|OO'|}{|O'F|} = \arctan \frac{a}{h}. \quad (7)$$

a 、 h 、 d 的值都可以通过测量获得,空间任意一点 $P(r, \theta, \varphi)$ 的位置参数均可以由 a 、 h 、 d 计算得到,令 $\omega = 35 \mu\text{m}$, $\varphi = 0^\circ$, 将 r 、 θ 、 φ 代入(1)式进行计算,便可以得出空间任意一点的散射光强。

3 数值计算结果与讨论

3.1 散射光信号接收位置的确定

由于蓝宝石缺陷的散射光在空间中的分布不均匀,而且信号微弱,因此,要实现对蓝宝石晶片中微体缺陷的检测,需要对多种不同位置的散射光信号进行测试,从中找到最佳的信号接收中心,为此需要对不同空间位置的散射光强度进行仿真。

在仿真计算中,取缺陷的相对折射率 $m = 0.83$ (相当于蓝宝石晶片中含有 SiO_2 微聚集体),激光束束腰 $\omega = 35 \mu\text{m}$,入射光波长 $\lambda = 700 \text{ nm}$, $q = 100$, 50 , 25 (相当于 $\lambda = 700 \text{ nm}$ 时,对应的缺陷半径分别为 $11.2, 5.6, 2.8 \mu\text{m}$)。为了在实际测量时更容易定

位电荷耦合器件(CCD)的位置,选取特殊角度进行仿真,分别取前向散射 $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$,垂直散射 $\theta = 90^\circ$ 和背向散射 $\theta = 120^\circ$ 作为接收中心, $[\theta - 15^\circ, \theta + 15^\circ]$ 为散射光接收范围,对不同大小的缺陷在空间中的散射光强进行模拟计算。

图 3 对比了不同尺寸的缺陷在 $\theta = 45^\circ$ (前向散射)、 $\theta = 90^\circ$ (垂直散射)、 $\theta = 120^\circ$ (后向散射)的散射光强分布,可以看出:在相同的接收位置处,散射光强分布随着缺陷尺寸的减小呈规律性变化,表现为缺陷尺寸减小,散射光分布曲线中波峰和波谷的个数也逐渐减少。在实际的缺陷检测中,可以将散射光强分布曲线的特征作为判断缺陷大小的依据。表 1 中的数据更清晰地表现出了这一特征。同时,对于大小相同的缺陷而言,通过对比不同接收位置的散射光强及其分布曲线中波峰和波谷的数量可以得出前向散射包含的信息量最大,其中 $\theta = 45^\circ$ 时表现得最明显,能更精确地反映缺陷信息;其次是垂直散射,背向散射包含的信息量最少,测量灵敏度较差,不适合作为散射光接收位置。接收到的信息量越大,采集到的信号越强,测量结果越准确,因此,在之后的仿真计算中取前向散射 $\theta = 45^\circ$ 作为散射光的接收位置。

表 1 不同 θ 下不同尺寸缺陷的散射光波纹数

Table 1 Ripple number of scattering light for defects with different sizes at different scattering angles θ

q	$\theta = 30^\circ$		$\theta = 45^\circ$		$\theta = 60^\circ$		$\theta = 90^\circ$		$\theta = 120^\circ$	
	Crest	Trough	Crest	Trough	Crest	Trough	Crest	Trough	Crest	Trough
100	12	11	13	14	12	13	10	10	7	7
50	4	5	6	6	6	6	5	5	4	3
25	3	3	3	3	2	3	2	3	2	1

3.2 散射光强随缺陷大小的变化

通过以上分析,选择将 $\theta = 45^\circ$ 作为接收散射光的中心位置,在 $\lambda = 700 \text{ nm}$, $\omega = 35 \mu\text{m}$ 时,对不同缺陷的散射光强分布进行仿真。分别对 $m = 0.82 + 2.0i$ (相当于蓝宝石晶片中含有 Al 微聚集体,这里 i 表示虚数单位), $m = 0.56$ (相当于蓝宝石晶片中含有气泡缺陷), $m = 1.4$ (相当于蓝宝石晶片中含有 TiO_2 缺陷)的不同大小的缺陷进行计算仿真,并取 $q = 75, 50, 25, 10, 5$ (相当于 $\lambda = 700 \text{ nm}$ 时,对应的缺陷半径分别为 $8.4, 5.6, 2.8, 1.1, 0.56 \mu\text{m}$)。

从图 4 可以看出,随着 Al 微体缺陷尺寸的减小,散射光强分布曲线中极值的个数相应减少,即散射光强分布曲线的波峰和波谷的数量减少,具体计算结果的数据对比如表 2 所示。分析后可以发现,在固定了散射光接收位置和确定入射光波

长的情况下,对于尺寸相同的缺陷而言,尽管折射率不同,但其散射光强分布曲线的波峰和波谷数基本相同;对于折射率相同的缺陷,随着粒径参数 q 的减小,散射光强分布曲线的波峰和波谷数逐渐减小至 1。严格来讲,只要缺陷存在,就可以检测到散射光强度的变化,以及波峰波谷数的变化,但是当缺陷减小到一定程度后,便无法检测到这种微弱的变化,所以对任何缺陷的检测都有一个极限,而一般情况下可以根据散射光强分布曲线的波峰和波谷数判定缺陷的大小。在实际检测中,将实测图的波峰和波谷数与散射光分布的理论值进行对比便可以确定缺陷大小的量级。利用这种方法检测蓝宝石晶片中的微体缺陷,其分辨率为 $1 \mu\text{m}$,而对于更小尺寸缺陷的检测还需要进一步研究。

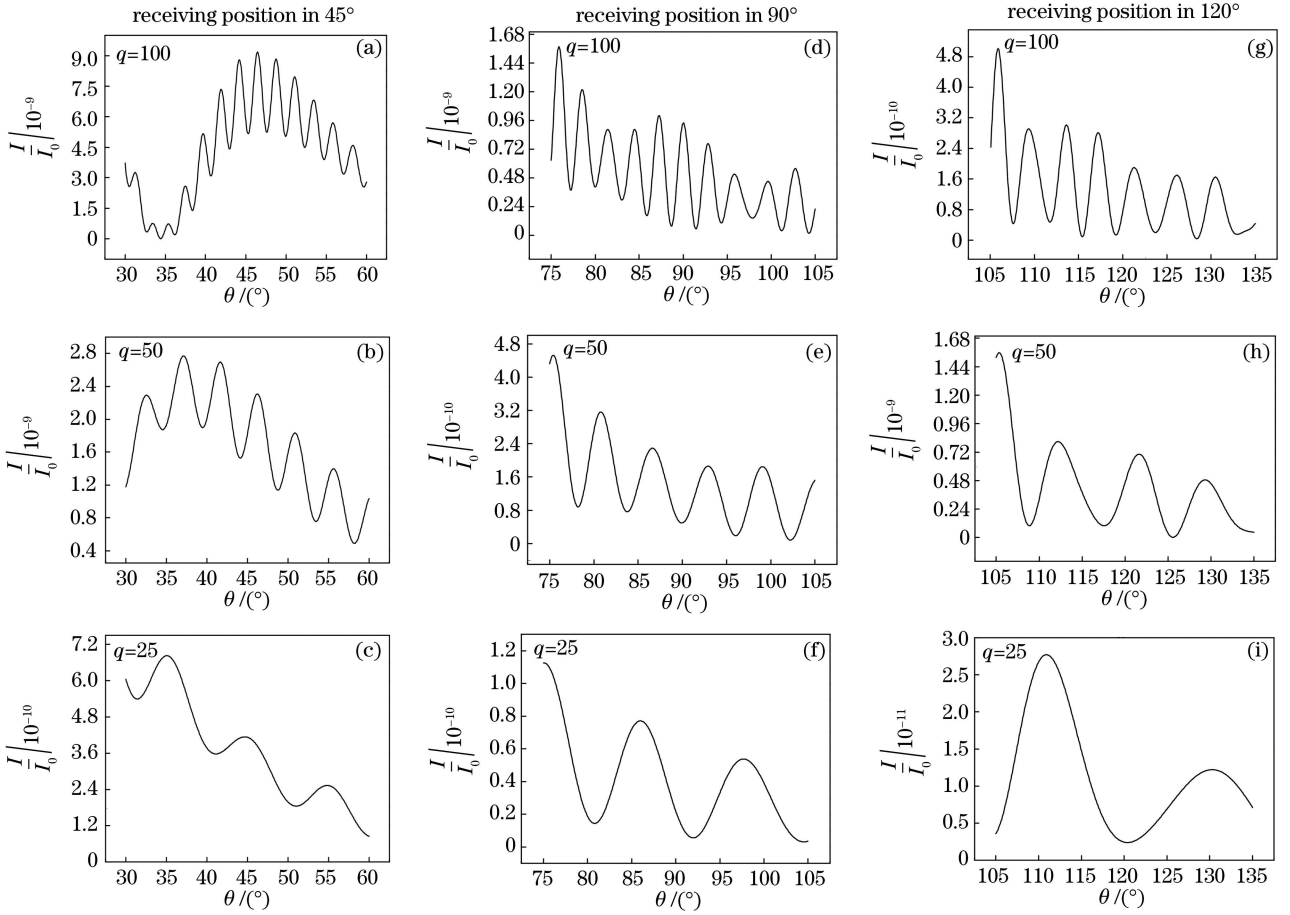


图 3 不同尺寸的 SiO₂ 微体缺陷在不同接收位置处的散射光强分布

Fig. 3 Scattering light intensity distributions of SiO₂ microsphere defect with different sizes at different receiving positions

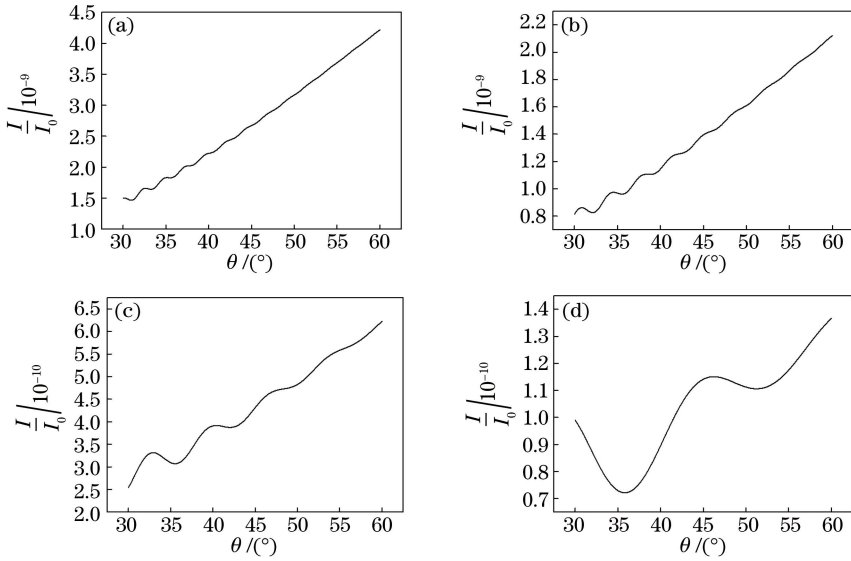


图 4 不同尺寸的 Al 微体缺陷的空间散射光强分布。(a) $q = 75$; (b) $q = 50$; (c) $q = 25$; (d) $q = 10$

Fig. 4 Spatial scattering light intensity distributions of Al microsphere defect with different sizes.

(a) $q = 75$; (b) $q = 50$; (c) $q = 25$; (d) $q = 10$

表 2 $\theta=45^\circ$ 时不同缺陷的散射光波纹数

Table 2 Ripple number of scattered light for defects with different sizes when θ is 45°

q	$m=0.56$		$m=0.83$		$m=0.82+2.0i$		$m=1.4$	
	Crest	Trough	Crest	Trough	Crest	Trough	Crest	Trough
75	10	9	10	9	11	10	11	11
50	6	6	6	6	7	6	7	8
25	3	3	3	3	4	3	3	4
10	1	1	1	1	1	2	2	1
5	1	1	0	1	1	1	1	1

3.3 散射光强与入射光波长的关系

根据以上的仿真结果可知,采用波长为 700 nm 的红光作为光源时,在缺陷半径约为 $1 \mu\text{m}$ 时便达到了测量极限。为了进一步提高测量精度,现考虑入射光波长 λ 对散射光强分布的影响,进行如下计算仿真。

图 5 是半径为 $1 \mu\text{m}$ 的 SiO_2 微体缺陷在不同入射光波长($\lambda=700, 500, 350 \text{ nm}$)下散射光强的分布曲线,可以看出:入射光波长越小,散射光强的振荡频率越高,所包含的信息量越大,并且在不同的入射光波长下,散射光强相差不大,且散射光能量均主要集中在前向散射上。在实际测量中,通过 CCD 接收前向散射光,在较小的入射光波长照射下能够检测到更小的缺陷,且检测精度更高。

为了验证上述结论,在其他条件不变的情况下仅改变入射光波长,对 SiO_2 微体缺陷进行模拟计算。图 6 为入射光波长 $\lambda=350 \text{ nm}$ 时 SiO_2 微体缺陷的模拟结果,取 $q=20, 10$ (相当于 $\lambda=350 \text{ nm}$ 时,对应的缺陷半径分别为 $1.11, 0.56 \mu\text{m}$),与入射光波长 $\lambda=700 \text{ nm}$ 时的结果对比后发现:采用波长为 350 nm 的入射光可以检测到更小的缺陷,且检测精度相对较高,可以检测到半径约为 500 nm 的缺陷。因此,可以采用较小波长的可见光作为光源对蓝宝石晶片中的微体缺陷进行检测。

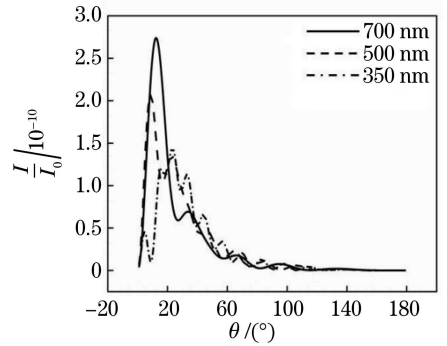


图 5 不同入射光波长下 SiO_2 微体缺陷的空间散射光强分布
Fig. 5 Spatial scattering light intensity distributions of SiO_2 microsphere defect at different incident wavelengths

4 结 论

以广义 Lorenz-Mie 理论为基础,通过 Mathematica 数值计算软件对蓝宝石晶片中微体缺陷的散射特性进行计算仿真,得出了散射光接收位置对散射光强的影响,并分析了散射光强分布与缺陷大小、入射光波长的关系。结果表明,在固定的空间范围内,缺陷大小对散射光强的分布具有显著影响。提出了将散射光强分布曲线的特征作为判断缺陷大小的依据,并认为采用较小波长的可见光作为入射光能够检测到更小的缺陷,且检测精度更高。另外,采用该方法对蓝宝石晶片中的微体缺陷进行

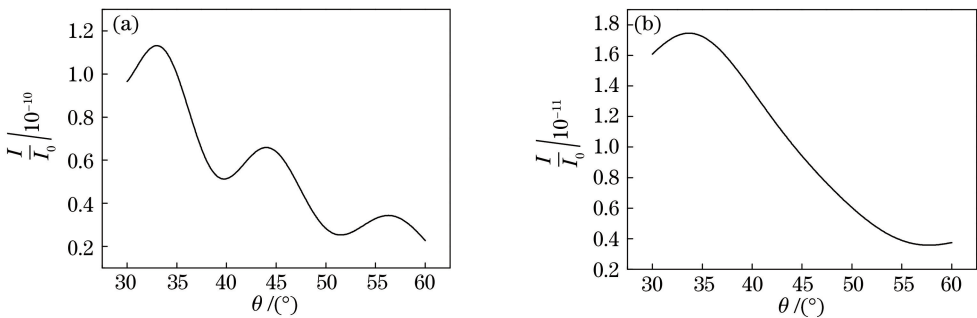


图 6 $\lambda=350 \text{ nm}$ 时不同尺寸 SiO_2 微体缺陷的空间散射光强分布。(a) $q=20, R=1.11 \text{ mm}$; (b) $q=10, R=0.56 \text{ mm}$
Fig. 6 Spatial scattering light intensity distributions of SiO_2 microsphere defect with different sizes when λ is 350 nm .

(a) $q=20, R=1.11 \text{ mm}$; (b) $q=10, R=0.56 \text{ mm}$

检测,是通过分析散射光强的分布曲线来判断缺陷大小的,而不是直接分析散射光强,因而可以忽略检测过程中的一些不稳定因素,使检测结果更加准确。

参 考 文 献

- [1] Wang C, Tang A J, He Y Q, *et al.* Overview of sapphire's growth methods and its applications [J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(22): 76-78.
王嫦, 唐安江, 何元琴, 等. 蓝宝石生长方法及其应用概述[J]. 广东化工, 2014, 41(22): 76-78.
- [2] Liu Y, Xu W D, Zhao C Q, *et al.* A detecting system of sapphire internal defects based on laser light scattering tomography [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 0902007.
刘洋, 徐文东, 赵成强, 等. 基于激光光散射层貌术的蓝宝石内部缺陷检测系统[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0902007.
- [3] Haney E J, Subhash G. Analysis of interacting cracks due to sequential indentations on sapphire[J]. Acta Materialia, 2011, 59(9): 3528-3536.
- [4] Xie X Z, Huang X D, Chen W F, *et al.* Study on scribing of sapphire substrate by pulsed green laser irradiation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(12): 1203010.
谢小柱, 黄显东, 陈蔚芳, 等. 脉冲绿激光划切蓝宝石基片过程研究[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1203010.
- [5] Harris D C. A peek into the history of sapphire crystal growth [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5078: 1-11.
- [6] Khattak C P, Guggenheim P J, Schmid F. Growth of 15-inch diameter sapphire boules[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5078: 47-54.
- [7] Li Z C, Pei Z J, Funkenbusch P D. Machining processes for sapphire wafers: a literature review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(7): 975-989.
- [8] Guo H X, Zhang M F, Nie Y, *et al.* Study on defects in large-flat sapphire crystal grown by horizontal directional solidification [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2013, 42(7): 1267-1271.
郭怀新, 张明福, 聂颖, 等. 水平定向结晶法生长大尺寸板状蓝宝石缺陷研究[J]. 人工晶体学报, 2013, 42(7): 1267-1271.
- [9] Wang J C, Deng Q F, Zhou Z Z, *et al.* Review of the methods of surface damage inspection for grinded sapphire substrate [J]. Superhard Material Engineering, 2011, 23(5): 51-55.
王吉翠, 邓乾发, 周兆忠, 等. 蓝宝石晶片加工表面质量检测方法综述[J]. 超硬材料工程, 2011, 23(5): 51-55.
- [10] Galas J, Daszkiewicz M, Kozlowski T, *et al.* Laser scanning tomograph as the tool for investigation of semiconductor materials [C]. Solid State Crystals in Optoelectronics and Semiconductor Technology, International Society for Optics and Photonics, 1997: 162-167.
- [11] Sun G Z, Sun Q, Ren Z B. Analysis of the radius of microsphere particles based on Mie scattering theory [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(4): 495-498.
孙国正, 孙强, 任智斌. 基于 Mie 散射理论的微球体颗粒半径分析[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 495-498.
- [12] Li Y P, You Z, Li B. Study on micro bulk defects detection in MEMS components [J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(4): 351-355.
李颖鹏, 尤政, 李滨. MEMS 器件中的微体缺陷检测研究[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(4): 351-355.
- [13] You Z, Chen J, Yang R. Theoretical and experimental study of detecting in material micro bulk defects by a laser scattering technique based on Mie theory [J]. Chinese Journal of Lasers, 1997, 24(6): 508-512.
尤政, 陈军, 杨韧. 基于 Mie 理论的微体缺陷激光测试技术的理论与实验研究[J]. 中国激光, 1997, 24(6): 508-512.
- [14] Ma Y, Wang L J, Yu J, *et al.* Aerosol concentration measurement based on near-forward light scattering method [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 092901.
马英, 王龙江, 俞杰, 等. 基于近前向光散射法的气溶胶浓度测量[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 092901.
- [15] Xiao Y L, Zhao X J, Zhou X, *et al.* Investigation of 1064 nm laser scattering characteristic in atmosphere by means of improved Mie algorithm [J]. Laser Technology, 2009, 33(2): 217-220.
肖永亮, 赵晓军, 周昕, 等. 改进算法研究 1064 nm 激光大气 Mie 散射特性[J]. 激光技术, 2009, 33(2): 217-220.
- [16] Yang Y, Zhang Z X, Jiang D Z. Numerical calculation of Mie scattering [J]. Journal of Applied Optics, 1997(4): 17-19.
杨晔, 张镇西, 蒋大宗. Mie 散射物理量的数值计算 [J]. 应用光学, 1997(4): 17-19.
- [17] Wang X D, Wu J, Qiu R, *et al.* Improved algorithm for Mie scattering coefficient [J]. Opto-Electronic

- Engineering, 2006, 33(3): 24-27.
- 王小东, 吴健, 邱荣, 等. Mie 散射系数的改进算法 [J]. 光电工程, 2006, 33(3): 24-27.
- [18] Wu W, Qin S Q, Huang Z Q. A fast inversion method for water droplet size determination in scattering light measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0712008.
- 吴伟, 秦石乔, 黄竹青. 水滴粒径散射测量中的快速反演方法研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0712008.
- [19] You Z, Li Y P, Li B. Application of the characteristic extraction for the detection of the internal micro bulk defects in semiconducting materials by near infrared laser scattering light distribution analyze technology [J]. Infrared Technology, 2002, 24(3): 23-26.
- 尤政, 李颖鹏, 李滨. 特征提取在近红外激光检测半导体内微缺陷中的应用 [J]. 红外技术, 2002, 24(3): 23-26.
- [20] Wang X D, Cui Z X, Zhang H J, *et al.* A new proof of Mie effect in light scattering[J]. Optik, 2013, 124(23): 6194-6196.
- [21] Chen J, You Z, Zhou Z Y, *et al.* Theoretical and experimental study of laser detecting technique for micro bulk defects in silicon[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1997, 16(3): 174-178.
- 陈军, 尤政, 周兆英, 等. 硅中微体缺陷激光测试技术的理论与实验研究 [J]. 红外与毫米波学报, 1997, 16(3): 174-178.