

# SiC 光学材料亚表面缺陷的光热辐射检测

刘远峰<sup>1)</sup> 李斌成<sup>1)†</sup> 赵斌兴<sup>1)</sup> 刘红<sup>2)</sup><sup>1)</sup> (电子科技大学光电科学与工程学院, 成都 610054)<sup>2)</sup> (中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2022 年 7 月 1 日收到; 2022 年 10 月 26 日收到修改稿)

SiC 以优异的物理性能和良好的工艺性能, 逐渐成为大型空间成像光学系统主镜的首选轻量化光学材料. SiC 镜坯制备及加工过程中引入的亚表面缺陷会严重影响最终的镜面质量以及光学系统的成像品质. 针对 SiC 材料亚表面缺陷的检测问题, 本文采用光热辐射技术进行分析: 分别建立均匀样品的单层理论模型和含空气层缺陷的三层理论模型, 用于计算无缺陷和存在缺陷区域的光热辐射信号. 通过对三层理论模型信号的相位仿真分析, 提出利用相位差-频率曲线的特征频率估算缺陷深度的经验公式; 利用光热辐射装置测量存在亚表面缺陷的 SiC 样品, 分析缺陷区域的光热辐射信号分布, 利用经验公式计算缺陷深度, 并与缺陷实际深度分布进行对比分析. 实验与计算结果显示, 光热辐射技术能有效探测 SiC 镜坯的亚表面缺陷及其形貌, 并且对于界面与样品相对平行且较为平缓的亚表面缺陷, 其缺陷深度可通过经验公式准确确定.

**关键词:** SiC, 亚表面缺陷, 光热辐射技术**PACS:** 42.70.-a, 81.70.Fy, 02.30.Zz**DOI:** 10.7498/aps.72.20221303

## 1 引言

自 20 世纪 70 年代, SiC 材料作为光学材料越来越受到重视<sup>[1,2]</sup>. 随着制造设备与工艺技术的发展, SiC 性能不断提高, 拓展了其在新型反射镜材料方面的应用前景. 由于密度小、硬度大、尺寸稳定性和热性能稳定性高以及各向同性的机械性能等特点, SiC 成为了制备大型光学主镜的首选轻量化材料<sup>[3,4]</sup>. 日本 2006 年发射升空的太阳同步轨道 AKARI 太空望远镜<sup>[5]</sup>, 其光学系统主镜是有效口径 0.67 m, 焦距 4.2 m 的 SiC 反射镜, 为首次在实际应用的太空望远镜上使用 SiC 为主镜材料; 欧洲航天局<sup>[6]</sup>于 2009 年利用 SiC 材料为主镜的赫歇尔太空望远镜发射成功, 作为迄今为止世界上口径最大的大型远红外太空望远镜, 其主镜口径达 3.5 m, 重量仅 300 kg, 约为传统材料相同口径主镜镜体

重量的 1/5. 此外, 2018 年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所<sup>[7]</sup>成功研制出口径达 4.03 m 的 SiC 单体反射镜, 是目前国际公布的口径最大的高精度单体 SiC 非球面反射主镜.

由于材料特性与制备工艺限制, SiC 在制备过程中会产生气泡等缺陷, 在后期加工过程中其高硬度低断裂韧性的特点也会导致出现断裂等损伤. 成型的 SiC 坯体中存在一定的孔洞缺陷, 当缺陷深度为几微米至几百微米、横向尺寸大于几微米时 (不同加工阶段 (粗磨、精磨、粗抛、精抛等) 对应缺陷深度不同), 不仅会影响光学加工质量, 最终还会影响镜面质量<sup>[8-11]</sup>, 因此对 SiC 表面及亚表面缺陷的检测尤为重要. 光学材料亚表面缺陷检测一直受到广泛关注和重视, 现已发展出多种检测技术, 主要分为有损检测和无损检测两类. 有损检测主要是通过物理手段或化学试剂将缺陷暴露

† 通信作者. E-mail: bcli@uestc.edu.cn

在表面, 再结合显微镜进行观察来获取缺陷信息, 常见的包括恒定化学刻蚀速率法<sup>[12]</sup>和角度抛光法等<sup>[13]</sup>. 无损检测避免了对待测样品的不可逆破坏, 主要包括全内反射检测技术, 白光干涉技术和荧光检测技术等. 其中, 全内反射检测技术精度低<sup>[14]</sup>, 难以满足光学元件亚表面缺陷微观尺寸的检测要求; 光学相干层析技术<sup>[15]</sup>很难实现光学元件亚表面缺陷的大面积检测; 共聚焦荧光扫描显微技术<sup>[16]</sup>速度非常慢, 受限于亚表面缺陷形状的复杂程度, 且这类光学检测技术均受限于光束的穿透深度, 仅能测量表面或浅近表面(深度 1 μm/10 μm 量级)的缺陷.

光热辐射 (photothermal radiometry, PTR) 技术从原理上具备检测材料亚表面(深度微米/亚毫米量级)缺陷的能力, 具有无损、无接触、灵敏度高、测量速度快等优点<sup>[17]</sup>, 自提出以来已成为材料热学参数测量和亚表面缺陷无损检测的有力手段. 日本学者 Nakamura 等<sup>[18]</sup>首先利用 PTR 技术得到了含缺陷材料的 PTR 表面形貌, 随后不断有学者对 PTR 技术检测材料亚表面缺陷开展了深入研究<sup>[19–21]</sup>. 而针对 PTR 技术检测材料内部缺陷的定量分析这一难点, 曹丹等<sup>[22]</sup>借助共轭梯度法计算了材料内部缺陷深度, Muramatsu 等<sup>[23]</sup>用传递矩阵法数值模拟了多层材料的温度场分布, 通过反演来定位碳纤维材料中缺陷的位置. 马晓波等<sup>[24]</sup>使用 Levenberg-Marquart 算法对缺陷深度进行了反演. 尹国应等<sup>[25]</sup>通过有限元分析模拟了含缺陷材料的稳态波动温度场, 提出了确定盲孔缺陷深度和边界的经验公式. 本文通过分析三层样品 PTR 信号的相位差-频率曲线提出采用特征频率对应的热扩散长度确定缺陷深度, 在 50—500 μm 内做出理论计算, 获得了与实际深度一致的结果, 为 PTR 技术检测 SiC 材料亚表面缺陷奠定了基础.

## 2 理论分析

### 2.1 温度理论模型

在 PTR 技术中, SiC 样品吸收照射在其表面的连续调制激光, 材料内部产生周期性变化的温度分布. 样品无缺陷区域可看成是均匀的, 采用单层模型描述. 当样品尺寸远大于照射激光光斑半径时, 如图 1(a) 所示, 产生的温度场符合下列热传导方程:

$$\nabla^2 T_1(r, z, t) - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial^2 T_1(r, z, t)}{\partial t^2} = -\frac{1}{k} Q(r, z, t), \quad (1)$$

其中  $k$ ,  $\alpha$  分别表示材料的热导率和热扩散率, 且  $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ ,  $\rho$  和  $c$  分别为材料密度和比热;  $Q$  为激光照射在内部形成的热源, 且  $Q(r, z, t) = \frac{BP}{\pi a^2} e^{-\frac{r^2}{a^2}} e^{-Bz} e^{j\omega t}$ . 其中光功率为  $P$ , 光吸收系数为  $B$ , 光斑半径为  $a$ , 调制频率为  $f$ , 角频率  $\omega = 2\pi f$ ; 同频于激励光场的温度场分布可以表示为  $T_1(r, z, t) = T_1(r, z, \omega) e^{j\omega t}$ . 不考虑上下表面与外界热交换热辐射以及损耗, 采用 Hankel 变换求解方程, 得到样品内部的温度分布为

$$T_1(r, z, \omega) = \int_0^\infty \beta T_1(\beta, z, \omega) J_0(\beta r) d\beta, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tilde{T}_1 = & \frac{B(e^{-BL} - e^{-\sigma L})}{2\sigma(\sigma^2 - B^2) \text{sh}(\sigma L)} \frac{BP}{2k\pi} e^{-\frac{a^2\beta^2}{4}} e^{\sigma z} \\ & + \frac{B(e^{-BL} - e^{-\sigma L})}{2\sigma(\sigma^2 - B^2) \text{sh}(\sigma L)} \frac{BP}{2k\pi} e^{-\frac{a^2\beta^2}{4}} e^{-\sigma z} \\ & + \frac{1}{\sigma^2 - B^2} \frac{BP}{2k\pi} e^{-\frac{a^2\beta^2}{4}} e^{-Bz}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $\sigma^2 = \xi^2 + \beta^2$ ,  $\xi = \sqrt{j\omega/\alpha}$  为复热波数, 单位为  $\text{m}^{-1}$ ,  $\beta$  为积分变量.

样品内部存在缺陷的区域理论上可以近似为三层结构<sup>[26]</sup>, 如图 1(b) 所示, 即中间层为缺陷层, 此时热传导方程为

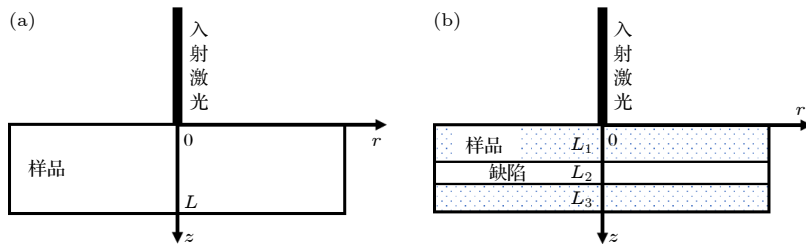


图 1 PTR 理论模型 (a) 单层模型; (b) 三层模型

Fig. 1. Configuration of PTR theoretical model: (a) One-layer model; (b) three-layer model.

$$\begin{cases} \nabla^2 T_2(r, z, t) - \frac{1}{\alpha_1} \frac{\partial T_2(r, z, t)}{\partial t} = -\frac{1}{k_1} Q(r, z), & 0 \leq z < l_1, \\ \nabla^2 T_2(r, z, t) - \frac{1}{\alpha_2} \frac{\partial T_2(r, z, t)}{\partial t} = 0, & l_1 \leq z \leq l_2, \\ \nabla^2 T_2(r, z, t) - \frac{1}{\alpha_1} \frac{\partial T_2(r, z, t)}{\partial t} = 0, & l_2 < z \leq l_3. \end{cases} \quad (4)$$

假设样品内缺陷界面热连续, 且样品上下边界绝热, 边界条件满足:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial T_2(r, z, \omega)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T_2(r, z, \omega)}{\partial z} \right|_{z=l_3} = 0, \\ k_1 \left. \frac{\partial T_2(r, z, \omega)}{\partial z} \right|_{z=l_1} = k_2 \left. \frac{\partial T_2(r, z, \omega)}{\partial z} \right|_{z=l_1}, \quad T_2(r, z, \omega)|_{z=l_1} = T_2(r, z, \omega)|_{z=l_1}, \\ k_2 \left. \frac{\partial T_2(r, z, \omega)}{\partial z} \right|_{z=l_2} = k_1 \left. \frac{\partial T_2(r, z, \omega)}{\partial z} \right|_{z=l_2}, \quad T_2(r, z, \omega)|_{z=l_2} = T_2(r, z, \omega)|_{z=l_2}. \end{cases} \quad (5)$$

类似地, 结合 (5) 式解方程 (4), 得到

$$\begin{cases} \tilde{T}_2 = C_1 e^{\sigma_1 z} + C_2 e^{-\sigma_1 z} + \frac{1}{\sigma^2 - B^2} \frac{BP}{2k_1 \pi} e^{-\frac{\alpha^2 \lambda^2}{4}} e^{-Bz}, & 0 \leq z < l_1, \\ \tilde{T}_2 = C_3 e^{\sigma_2 z} + C_4 e^{-\sigma_2 z}, & l_1 \leq z \leq l_2, \\ \tilde{T}_2 = C_5 e^{\sigma_1 z} + C_6 e^{-\sigma_1 z}, & l_2 \leq z \leq l_3, \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\sigma_i^2 = \frac{j\omega}{\alpha_i} + \beta^2$ ,  $i = 1, 2$ .

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & -\sigma_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_1 e^{\sigma_1 l_3} & \sigma_1 e^{-\sigma_1 l_3} \\ k_1 \sigma_1 e^{\sigma_1 l_1} & -k_1 \sigma_1 e^{-\sigma_1 l_1} & -k_2 \sigma_2 e^{\sigma_2 l_1} & k_2 \sigma_2 e^{-\sigma_2 l_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_2 \sigma_2 e^{\sigma_2 l_2} & -k_2 \sigma_2 e^{-\sigma_2 l_2} & -k_1 \sigma_1 e^{\sigma_1 l_2} & k_1 \sigma_1 e^{-\sigma_1 l_2} \\ e^{\sigma_1 l_1} & e^{-\sigma_1 l_1} & -e^{\sigma_2 l_1} & -e^{-\sigma_2 l_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{\sigma_2 l_2} & e^{-\sigma_2 l_2} & -e^{\sigma_1 l_2} & -e^{-\sigma_1 l_2} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma^2 - B^2} \frac{B^2 P}{2k_1 \pi} e^{-\frac{\alpha^2 \beta^2}{4}} \\ 0 \\ \frac{k}{\sigma^2 - B^2} \frac{B^2 P}{2\pi} e^{-\frac{\alpha^2 \beta^2}{4}} e^{-Bl_1} \\ 0 \\ -\frac{1}{\sigma^2 - B^2} \frac{BP}{2k_1 \pi} e^{-\frac{\alpha^2 \beta^2}{4}} e^{-Bl_1} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

对  $\tilde{T}_2$  做 Hankel 逆变换即得材料内部温度场分布  $T_2(r, z, \omega)$ .

## 2.2 PTR 信号

PTR 技术检测被测样品表面的红外辐射信号. 根据 Stefan-Boltzmann 定律, 待测样品表面的红外辐射能流密度为

$$E_b = \varepsilon \sigma_b T^4, \quad (8)$$

其中,  $\varepsilon$  是样品材料的光谱发射率, Stefan-Boltzmann 常数  $\sigma_b = 5.670 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ . 样品表面温度  $T = T_0 + \Delta T$ ,  $T_0$  是材料未受激光照射热时的初始温度,  $\Delta T$  是激光照射后的温升. 在激光照射产生的温升远小于初始温度、且仅考虑其交流分量时, 待测样品表面的交流 PTR 信号  $S(T)$  可表示为

$$S(T) = 2\pi C \int_0^{r_0} r dr \int_0^\infty \beta J_0(\beta r) \tilde{T}_{1,2}(\beta, 0, \omega) d\beta$$

$$= 2\pi C \int_0^\infty r_0 J_1(\beta r_0) \tilde{T}_{1,2}(\beta, 0, \omega) d\beta, \quad (9)$$

式中,  $C$  为常数,  $r_0$  为探测器光敏区半径,  $J_0$  为零阶 Bessel 函数.  $S(T)$  是复数形式, 其幅度和相位通过锁相放大器测量.

### 2.3 缺陷深度对 PTR 信号的影响

利用 (9) 式进行数值仿真, 分析亚表面缺陷对 PTR 信号的影响. SiC 样品参数通过无缺陷区域的实验测量结果获得, 并假设缺陷层为厚度  $L_2 - L_1 = 1 \mu\text{m}$  的空气, 三层模型数值仿真的主要参数如下:

$$\alpha_1 = 3.18 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s};$$

$$k_1 = 138 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m});$$

$$\alpha_2 = 2.22 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s};$$

$$k_2 = 2.56 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$$

$$B_1 = 6.42 \times 10^5 \text{ m}^{-1}.$$

考虑到 PTR 信号相位相比幅度具有不受样品表面状态影响、灵敏度高的特点 [26,27], 通常采用相位信息探测样品亚表面缺陷. 图 2 为不同缺陷深度时 PTR 信号相位差随调制频率的变化曲线, 相位差定义为存在缺陷区域与无缺陷区域 PTR 信号相位的差值, 其中缺陷深度定义为样品表面到缺陷上表面的厚度. 结果显示, 针对一定的缺陷深度, 随调制频率增加, 相位差绝对值首先逐渐增大, 在某个频率位置达到极值, 而后逐渐变小, 不同缺陷深度的曲线都存在一个极值点. 现定义其对应的频率  $f_0$  为特征频率, 仿真分析发现该特征频率与缺

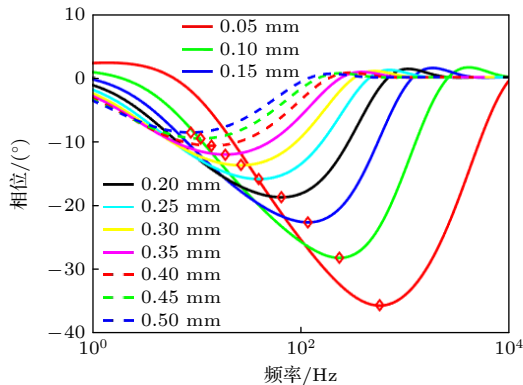


图 2 不同缺陷深度下的 PTR 相位差-频率曲线

Fig. 2. Phase difference-frequency curve of PTR signal in different defect depths.

陷深度存在关联. 这是因为热传导过程中, 热波抵达缺陷结构时受到一定程度的阻碍 [28], 导致 PTR 信号出现明显变化. 仿真分析发现特征频率  $f_0$  对应的热扩散长度  $\mu_0 = \sqrt{\alpha/(\pi f_0)}$  与缺陷深度  $L_1$  之间存在近似线性关系, 利用最小二乘法将理论深度  $L_1$  与对应的热扩散长度  $\mu_0$  按照  $L_1 = C\mu_0$  拟合, 得到系数  $C = 0.4787$ . 即得到下列经验公式:

$$L_1 = 0.4787\mu_0. \quad (10)$$

由 (10) 式计算得到的估算值与理论缺陷深度的比较如图 3 所示, 在计算缺陷深度范围内 (50—500  $\mu\text{m}$ ), 计算值与理论值差别很小, 相对误差小于 7.5%, 由特征频率确定的缺陷深度具有一定的准确性.

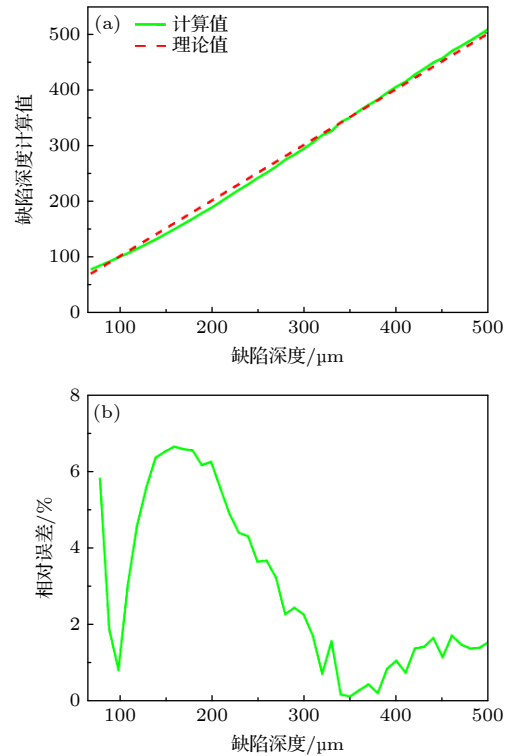


图 3 缺陷深度计算结果 (a) 计算值与实际值比较; (b) 相对误差随深度的变化

Fig. 3. Calculation results of depth of defect: (a) Comparison between calculated value and actual value; (b) relative error of different depths.

需要说明的是, 上述计算结果是在缺陷为空气、厚度为  $1 \mu\text{m}$  的假设下获得的. 进一步计算结果表明在缺陷为空气的条件下, 缺陷厚度的变化对 (10) 式的影响较小. 这是因为空气热导率远低于 SiC 热导率 (比率为  $1.86 \times 10^{-4}$ ), SiC 上层的热量通过缺陷空气层传导到下层非常少, 上层温度分布几乎不受空气层厚度的影响.



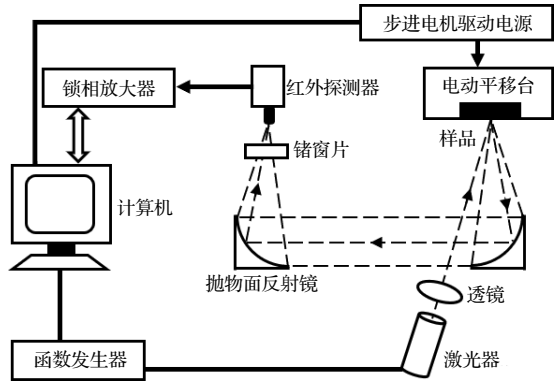


图 4 PTR 实验装置

Fig. 4. PTR experimental setup.

### 3 实验装置及样品

PTR 实验测量装置如图 4 所示. 由函数发生器对波长 980 nm 的半导体激光器进行方波强度调制, 激光束经透镜聚焦后照射在样品表面, 其功率为 1.22 W, 在样品表面的光斑半径为 208  $\mu\text{m}$ . 样品的红外辐射信号经离轴抛物面镜组收集并聚焦到碲镉汞红外探测器探测, 探测波段 2—12  $\mu\text{m}$ . 红外探测器前放置镀有增透膜的锗片以滤除照射激光束的影响. 探测器输出信号经锁相放大器解调分析, 得到 PTR 信号的幅度和相位.

实验中使用的 SiC 样品如图 5 所示, 其口径 100 mm, 厚度 7.7 mm. 光学图像 (图 5(a)) 显示其表面均匀, 无可视缺陷, 但线扫描红外辐射图像 (图 5(b) [29–31]) 显示样品在边缘存在一处亚表面缺陷, 缺陷横向尺寸约为 5.5 mm $\times$ 2.3 mm, 且形状不规则.

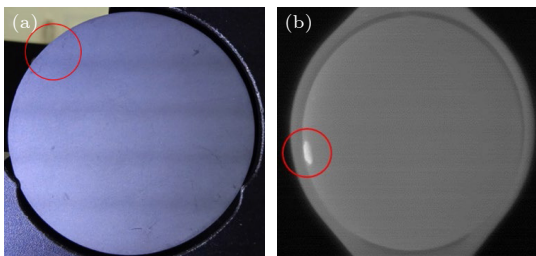


图 5 SiC 样品示意图 (a) 光学图像; (b) 线扫描红外辐射图像 [29–31]

Fig. 5. SiC sample under test: (a) Optical image; (b) line-scanned infrared emission image showing subsurface defect marked with a red circle [29–31].

通过 PTR 实验装置测量样品无缺陷区域 PTR 信号的频率扫描特性, 利用 (3) 式和 (9) 式对其进行最小二乘法拟合, 可反演出材料的热物理参数.

图 6 分别为样品幅值、相位频率特性的实验测量值及其拟合曲线, 经拟合得到: 热扩散系数  $\alpha = 3.18 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , 光吸收系数  $B = 6.42 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$ .

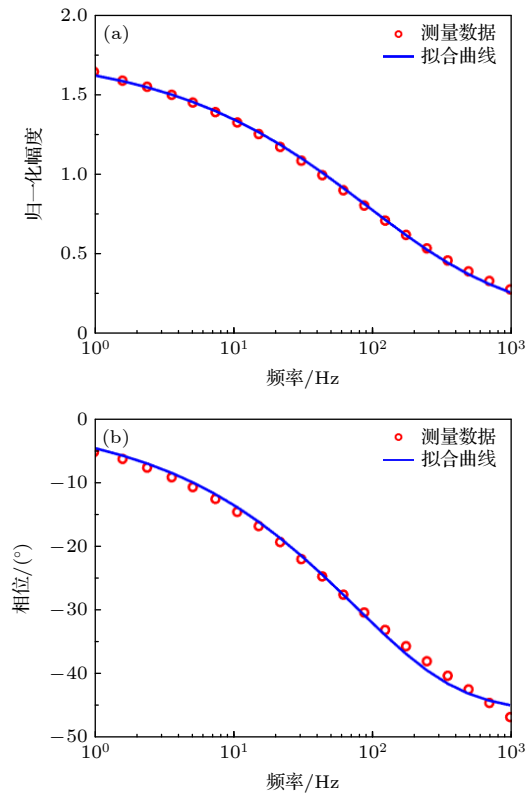


图 6 样品无缺陷区域 PTR 信号的实验结果及其最佳拟合曲线 (a) 幅度; (b) 相位

Fig. 6. Experimental frequency dependence of PTR signal and corresponding best-fit for the defect-free region of the SiC sample: (a) Amplitude; (b) phase.

为实现 SiC 样品亚表面缺陷的检测, 首先对样品全口径扫描测量, 确定存在亚表面缺陷区域的位置, 然后对缺陷区域实现不同调制频率和高空间分辨率的位置扫描测试. 在不同调制频率下, 控制电控扫描位移台以 0.1 mm 的步长对缺陷区域进行二维扫描, 获得样品缺陷区域 PTR 信号的二维分布, 然后利用 (10) 式, 获取测量点位置处缺陷的深度信息.

### 4 结果与讨论

图 7 是频率分别为 5, 37, 245 和 960 Hz 时缺陷区域的幅值比与相位差等高线分布图, 其中幅值比为缺陷区域与无缺陷区域光热信号幅值的比值, 相位差为对应的相位差值. 图 7 中白色虚线表示缺陷区域的轮廓, 幅值比分布的变化主要是随着频率

增大区域两端的“丘顶”逐渐降低至消失; 相位差分布在较低频率时呈现中间低四周高的“洼地”, 随着频率增大中间的“洼地”消失, 两端出现“洼地”, 这与缺陷形貌为中间深两端浅的特征符合. 相对于幅值, 相位整体变化更为明显清晰.

图 8(a) 为缺陷的实际深度分布, 通过有损方式将缺陷部位整体取出后, 采用光学轮廓仪测量其形貌, 获得缺陷的纵向深度分布. 因为实际样品的缺陷面积有限, 且界面形状不规则, 与仿真模型中缺陷截面为无限大平面的理想状态有较大差距,

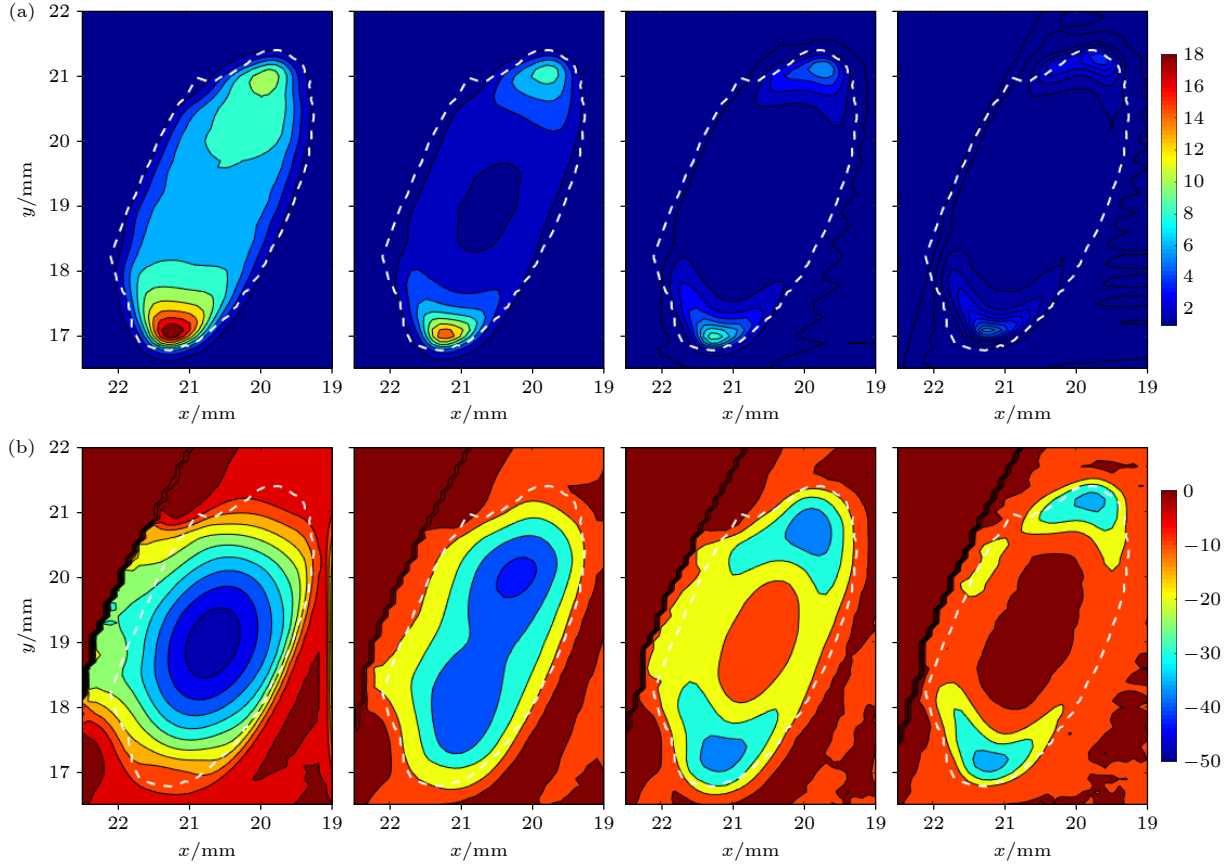


图 7 SiC 样品不同频率 (5, 37, 245 和 960 Hz) 时缺陷区域 PTR 信号的二维分布 (a) 幅度比; (b) 相位差

Fig. 7. Two-dimensional spatial distributions of PTR signals measured at different modulation frequencies (5, 37, 245, and 960 Hz, respectively) for the defect region of the SiC sample: (a) Amplitude ratio; (b) phase difference.

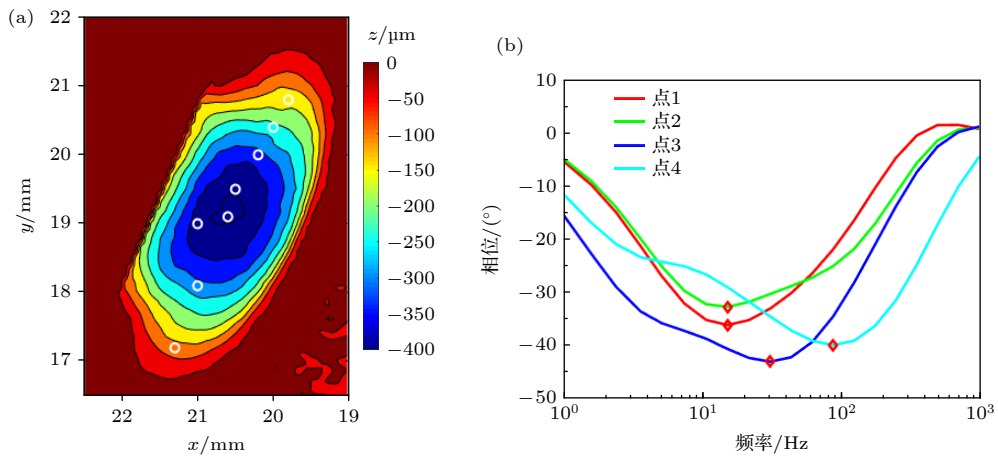


图 8 (a) 实际的缺陷深度分布; (b) 部分测量点的 PTR 信号相位差-频率曲线

Fig. 8. (a) Actual depth distribution of the defect region; (b) phase difference frequency curves of PTR signals at some measuring points.

表 1 测量点的缺陷深度估算结果  
Table 1. Estimated results of defect depth at measuring points.

点	坐标	缺陷深度/ $\mu\text{m}$		误差	
		实际值	测量值	绝对误差/ $\mu\text{m}$	相对误差/%
1	(21.0, 19.0)	371.6	392.0	20.4	5.5
2	(20.5, 19.5)	392.0	392.0	0	0
3	(20.2, 20.0)	291.0	276.0	15.0	5.2
4	(20.0, 20.4)	186.9	164.0	22.9	12.3
5	(21.3, 17.2)	80.9	58.5	21.7	27.7
6	(21.0, 18.1)	284.0	392.0	108.0	38.1
7	(20.6, 19.1)	413.9	560.0	146.0	35.5
8	(19.8, 20.8)	118.0	58.5	59.5	50.4

复杂的界面会使得热波分布不再均匀, 因此, PTR 信号的频率分布特性与理论模型的仿真结果存在一定差异. 相对而言, 靠近缺陷区域中心的位置, 在一定范围内其缺陷分界面较为平缓, 与理论仿真中的理想条件较符合, 因此这些位置的热波分布也与理论状态较为接近, 可用 (10) 式估算缺陷深度.

对缺陷区域内多个不同位置点进行 PTR 频率 (1—1000 Hz) 扫描测量, 得到各自的相位差-频率曲线 (其中 4 个测量点结果如图 8(b) 所示). 采用 (10) 式对这些测量点的缺陷深度进行估算, 结果见表 1. 其中, 靠近缺陷区域中间的测量点 1 和 2, 对其深度估算的误差分别为 0 和 5.5%, 相对较低. 而在边缘区域的测量点由于不规则形状影响较大, 深度估算误差较高. 总体而言, 深度测量结果与实际形貌基本一致.

上述实验结果表明 PTR 技术不仅可准确确定缺陷位置, 对于深度分布坡度较缓的缺陷, 还可利用本文提出的经验公式, 即 (10) 式确定缺陷深度. 但由于 SiC 材料高的热扩散率, 导致深度确定精度主要受缺陷形貌影响较大, 不规则的缺陷形貌将改变表面温度分布, 产生测量误差.

## 5 结 论

应用 PTR 技术检测 SiC 镜坯的亚表面缺陷, 通过数值仿真 PTR 信号相位差-频率特性发现与缺陷深度关联的特征频率, 该特征频率对应的热扩散长度与缺陷深度之间存在近似线性关系, 仿真结果显示由此确定的缺陷深度与真实值非常接近. 进一步对存在缺陷区域的 SiC 样品进行了实验测量,

得到了不同频率的幅度、相位信号的二维分布, 并通过计算相位差-频率曲线获得了缺陷区域内的缺陷深度, 与实际缺陷深度基本一致. 实验结果验证了 PTR 技术检测 SiC 亚表面缺陷的技术可行性, 为 SiC 光学材料的亚表面缺陷检测提供了一种新的技术途径. 值得一提的是, 本文主要针对的是 SiC 镜坯材料, 关注的缺陷位置较深. 而对于经过粗磨成形甚至精磨后的镜坯较浅缺陷 (低于 50  $\mu\text{m}$ ) 的无损检测, 可通过提高 PTR 测量调制频率并建立新的缺陷深度计算经验公式实现更高精度的缺陷深度测量, 这可望成为下一步研究的重点.

## 参考文献

- [1] Jiang F, Liu Y, Yang Y, Huang Z R, Li D, Liu G L, Liu X J 2012 *J. Nano Mater.* **2012** 7
- [2] Han Y Y, Zhang Y M, Han J C, Zhang J H, Yao W, Zhou Y F 2005 *J. Mater. Eng.* **06** 59 (in Chinese) [韩媛媛, 张宇民, 韩杰才, 张剑寒, 姚旺, 周玉峰 2005 *材料工程* **06** 59]
- [3] Sein E, Toulemont Y, Safa F, Duran M, Deny P, Chambure D, Passvogel T, Pilbratt G L 2003 *SPIE IR Space Telescopes and Instruments* **4850** 606
- [4] Rodolfo J P 2008 *SPIE Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation* **7018** 70180E
- [5] Kaneda H, Nakagawa T, Onaka T, Enya K, Kataza H, Makiuti S, Matsuhara H, Miyamoto M, Murakami H, Saruwatari H, Watarai H, Yui Y Y 2007 *SPIE Optical Materials and Structures Technologies III* **6666** 666607
- [6] Ebizuka N, Dai Y, Eto H, Lin W, Ebisuzaki T, Omori H, Handa T, Takami H, Takahashi Y 2003 *SPIE Specialized Optical Developments in Astronomy* **4842** 329
- [7] Zhou Y 2020 *M. S. Thesis* (Changchun: Changchun University of Technology) (in Chinese) [周岩 2020 硕士学位论文 (长春: 长春工业大学)]
- [8] Goela J S, Pickering M A, Tayler R L 1991 *SPIE Optical Surfaces Resistant to Severe Environments* **1330** 25
- [9] Zappellini G B, Martin H M, Miller S M, Smith B K, Cuerden B, Gasho V, Sosa R G, Montoya M, Riccardi A 2007 *SPIE Astronomical Adaptive Optics Systems and Applications*

III 6991 66910U

- [10] Xie J, Li Q, Sun J X, Li Y H 2015 *J. Mater. Process. Tech.* **222** 422
- [11] Yoo H K, Ko J H, Lim K Y, Kwon W T, Kim Y W 2015 *Ceram. Int.* **41** 3490
- [12] Li G L, Sun K Y, Feng R Y, Liu Y J, Chang L F 2008 *Coal Mine Machinery* **12** 99 (in Chinese) [李改灵, 孙开元, 冯仁余, 刘永军, 常林枫 2008 *煤矿机械* **12** 99]
- [13] Neauport J, Ambard C, Cormont P, Darbois N, Destribats J, Luitot C, Rondeau O 2009 *Opt. Express* **17** 20448
- [14] Fahnle O W, Wons T, Koch E, Debruyne S, Meeder M, Booijs S M, Braat J J M 2002 *Applied Optics* **41** 4036
- [15] Wuttig A, Steinert J, Duparre A, Truckenbrodt H 1999 *SPIE Optical Fabrication and Testing* **3739** 369
- [16] Liu H J, Wang F R, Geng F, Zhou X Y, Huang J, Ye X, Jiang X D, Wu W D, Yang L M 2020 *Optics Precis. Eng.* **28** 50 (in Chinese) [刘红婕, 王凤蕊, 耿峰, 周晓燕, 黄进, 叶鑫, 蒋晓东, 吴卫东, 杨李茗 2020 *光学精密工程* **28** 50]
- [17] Nordal P E, Kanstad S O 1979 *Phys. Scr.* **20** 659
- [18] Nakamura H, Tsubouchi K, Mikoshiba N 1985 *Jpn. J. Appl. Phys.* **24** 222
- [19] Li P Z 1989 *Infrared Technology* **11** 97 (in Chinese) [李佩赞 1989 *红外技术* **11** 97]
- [20] Fan C L, Sun F R, Yang L 2005 *Laser & Infrared* **35** 504 (in Chinese) [范春利, 孙丰瑞, 杨立 2005 *激光与红外* **35** 504]
- [21] 王心觉, 刘恒彪, 胡文祥 2017 *激光与光电子学进展* **54** 101201
- [22] Cao D, Qu H M 2013 *Laser & Infrared* **43** 513 (in Chinese) [曹丹, 屈惠明 2013 *激光与红外* **43** 513]
- [23] Muramatsu M, Nakasumi S, Harada Y 2016 *Adv. Compos. Mater.* **25** 541
- [24] Ma X B, Wang Q Q 2018 *Infrared Technology* **40** 85 (in Chinese) [马晓波, 王青青 2018 *红外技术* **40** 85]
- [25] Yin G Y, Li A Z 2020 *Optics & Optoelectronic Technology* **18** 18 (in Chinese) [尹国应, 李爱珠 2020 *光学与光电技术* **18** 18]
- [26] Li P Z, Wang Q H 1994 *Chin. J. Sci. Instrum.* **15** 265 (in Chinese) [李佩赞, 王钦华 1994 *仪器仪表学报* **15** 265]
- [27] Guan G X, Zheng X M, Li P Z 1988 *Chin. J. Infrared Res.* **7A** 201 (in Chinese) [管国兴, 郑小明, 李佩赞 1988 *红外研究* **7A** 201]
- [28] Li P Z, Wang Q H 1996 *Physics* **25** 426 (in Chinese) [李佩赞, 王钦华 1996 *物理* **25** 426]
- [29] Jiang H J, Chen L, Zhang S Y 2014 *Nondestructive Testing* **36** 20 (in Chinese) [江海军, 陈力, 张淑仪 2014 *无损检测* **36** 20]
- [30] Jiang H J, Chen L, Su Q F, Xing J X 2018 *Nondestructive Testing* **40** 15 (in Chinese) [江海军, 陈力, 苏清风, 邢建湘 2018 *无损检测* **40** 15]
- [31] Jiang H J, Chen L 2018 *Infrared Technology* **40** 946 (in Chinese) [江海军, 陈力 2018 *红外技术* **40** 946]



# Detection of subsurface defects in silicon carbide bulk materials with photothermal radiometry

Liu Yuan-Feng<sup>1)</sup> Li Bin-Cheng<sup>1)†</sup> Zhao Bin-Xing<sup>1)</sup> Liu Hong<sup>2)</sup>

1) (*School of Opto-electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

2) (*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

( Received 1 July 2022; revised manuscript received 26 October 2022 )

## Abstract

With excellent physical, mechanical and processing properties, silicon carbide (SiC) has gradually become a preferred lightweight optical material for primary mirrors of large space optical systems. The subsurface defects generated during the preparation and processing procedures of SiC will affect the optical quality of the primary mirrors and the imaging performance of the corresponding optical systems employing the SiC primary mirror as well. In this work, photothermal radiation (PTR), a powerful nondestructive testing technique for detecting sub-surface defects of solid materials, is employed to characterize the subsurface defects of bulk SiC material for primary mirrors.

Theoretically, three-dimensional one-layer and three-layer PTR theoretical models are developed to describe the defect-free and defect regions of an SiC bulk material. By analyzing the frequency dependence of PTR phase of the SiC bulk material with different defect depths, an empirical formula for estimating the defect depth via a characteristic frequency (appearing at the minimum of the PTR phase-frequency curve) defined thermal diffusion length is proposed, and simulation results show reasonably good agreement between the estimated and simulated defect depths in a depth range of 0.05–0.50 mm. Experimentally, an SiC bulk sample with a subsurface defect region is tested by the PTR via position scanning and modulation frequency scanning to obtain the position and frequency dependent PTR amplitude and phase. From the spatial distributions of PTR amplitude and phase measured at different frequencies and the phase difference frequency curves of measurement positions in the defect region, the depth and shape of the defect region are estimated and found to be in good agreement with the actual shape of the defect region, which is destructively measured via a depth profiler. The experimental and calculated results demonstrate that the PTR is capable of detecting non-destructively the subsurface defects of SiC bulk material. In addition, for subsurface defects with relatively flat interface, the defect depth can be determined accurately by the developed empirical formula.

**Keywords:** SiC, subsurface defects, photothermal radiometry

**PACS:** 42.70.-a, 81.70.Fy, 02.30.Zz

**DOI:** [10.7498/aps.72.20221303](https://doi.org/10.7498/aps.72.20221303)

---

† Corresponding author. E-mail: [bcli@uestc.edu.cn](mailto:bcli@uestc.edu.cn)



## SiC光学材料亚表面缺陷的光热辐射检测

刘远峰 李斌成 赵斌兴 刘红

### Detection of subsurface defects in silicon carbide bulk materials with photothermal radiometry

Liu Yuan-Feng Li Bin-Cheng Zhao Bin-Xing Liu Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 024208 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221303

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221303>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

二氧化钛亚表面电荷对其表面点缺陷和吸附原子分布的影响

Effects of subsurface charge on surface defect and adsorbate of rutile TiO<sub>2</sub> (110)

物理学报. 2020, 69(21): 210701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200773>

表面等离激元光热效应研究进展

Research progress of surface plasmons mediated photothermal effects

物理学报. 2019, 68(14): 144401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190476>

面向单晶SiC原子级表面制造的等离子体辅助抛光技术

Plasma-assisted polishing for atomic surface fabrication of single crystal SiC

物理学报. 2021, 70(6): 068102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202014>

纳米光学辐射传热: 从热辐射增强理论到辐射制冷应用

Radiative heat transfer in nanophotonics: From thermal radiation enhancement theory to radiative cooling applications

物理学报. 2020, 69(3): 036501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191906>

芯帽纳米颗粒的光热性质

Photothermal properties of core-capped gold nanoparticles

物理学报. 2018, 67(19): 195202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180909>

碳化硅中点缺陷对热传导性能影响的分子动力学研究

Molecular dynamics study of effects of point defects on thermal conductivity in cubic silicon carbide

物理学报. 2022, 71(3): 036501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211434>