

飞秒激光制备高红外吸收 SiC 表面

郭明瑞¹, 赵智炎¹, 李健², 王燕², 李爱武¹, 徐颖¹, 于颜豪¹

(1. 吉林大学 电子科学与工程学院集成光电子学国家重点实验室, 长春 130012;

2. 长春工业大学 材料科学与工程学院先进结构材料教育部重点实验室, 长春 130012)

摘要: 通过飞秒激光加工技术提高 SiC 在红外波段(尤其在 10.3~12.6 μm 内)的光吸收率, 以解决传统加工技术难以精细加工且吸收率低的问题。采用飞秒激光直写技术, 通过改变激光加工的关键参数, 在 SiC 表面生成特定微纳结构, 并用扫描电子显微镜和 Raman 光谱仪对加工后的样品表面形貌和光学特性进行分析。结果表明: 通过飞秒激光加工可有效调制 SiC 的表面形态, 其红外吸收率显著提高, 吸收效率最高可达 92%; 微纳结构可降低材料的反射率, 并增强表面声子极化激元的激发, 从而增强材料的红外光吸收能力。

关键词: 超快激光; 减反射; 剩余射线带; Raman 光谱

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5489(2025)06-1767-08

High Infrared Absorption SiC Surface Prepared by Femtosecond Laser

GUO Mingrui¹, ZHAO Zhiyan¹, LI Jian², WANG Yan²,

LI Aiwu¹, XU Ying¹, YU Yanhao¹

(1. State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,
Jilin University, Changchun 130012, China;

2. Key Laboratory of Advanced Structural Materials of Ministry of Education,
College of Material Science and Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: We used femtosecond laser processing technology to improve the optical absorption rate of SiC in the infrared band (especially within the 10.3 — 12.6 μm range), in order to solve the problem of traditional processing techniques being difficult to finely process and having low absorption rates. We used femtosecond laser direct writing technology to generate specific micro/nanostructures on the surface of SiC by adjusting key parameters of laser processing, and analyzed the surface morphology and optical properties of the processed samples by using scanning electron microscopy and Raman spectrum. The results show that the surface morphology of SiC can be effectively modulated through femtosecond laser processing, and its infrared absorption rate is significantly improved, with a maximum absorption rate of 92%. The nanostructures can reduce the reflectance of materials and enhance the excitation of surface phonon polaritons, thereby enhancing the infrared light absorption capacity of materials.

Keywords: ultrafast laser; antireflection; Reststrahlen band; Raman spectrum

收稿日期: 2024-03-04.

第一作者简介: 郭明瑞(1999—), 男, 汉族, 硕士, 从事飞秒激光微纳加工的研究, E-mail: guomr21@mails.jlu.edu.cn. **通信作者简介:** 于颜豪(1986—), 男, 汉族, 博士, 工程师, 从事激光微纳加工的研究, E-mail: yanhao_yu@jlu.edu.cn.

基金项目: 吉林省科技厅科技发展计划项目(批准号: 20220101088JC)和吉林省教育厅科技计划项目(批准号: JJKH20200664KJ).

碳化硅(SiC)具有宽带隙、高载流子饱和速度以及高热稳定性和良好的化学腐蚀性等优点^[1-2],是一种有广泛应用前景的第三代半导体材料^[3-5],可作为高温、高压和腐蚀等恶劣环境下工作的电子器件和微机电器件的理想材料^[6-8].对于极性晶体材料,在纵向光学(LO)声子和横向光学(TO)声子频率间的光谱区域存在表面声子极化激元,该区间称为剩余射线带(Reststrahlen band)^[9-13].SiC作为极性晶体材料,在10.3~12.6 μm的剩余射线带内介电常数为负值,在该波段内, SiC具有高反射率^[14].在该波段对 SiC的性质进行研究,对其在土壤探测^[15]、生物传感器^[16]和新兴的被动辐射冷却装置^[17]等领域具有极高的应用价值.由于 SiC在该波段的高反射率限制了其在该波段的应用,因此实现 SiC的减反射具有重要意义^[18].

SiC的高硬度和脆性使其不易被精细加工,为降低其在该波段的反射率,通常采用在 SiC上构建异质材料的方法,Cui等^[19]通过光刻的方式在 SiC表面上构建锗(Ge)光栅构筑出表面声子极化腔,调控了光栅的深度和周期,降低了全反射带的反射率.Dunkelberger等^[20]用掩膜和电子束在 SiC表面光刻制造出600 nm柱体,将纵向光学声子-等离子体耦合效应应用于改变介电常数和调谐表面声子极化共振,实现了 SiC全反射带内的减反射.但该方式的工艺流程复杂且仅能在特定波长的窄带内实现减反射.

近年来,飞秒激光加工技术已成为 SiC表面图案化处理和钻孔的优异方法之一^[21-24],与传统加工方式相比,飞秒激光加工不需掩膜流程和其他光刻前处理^[25].此外,它不依赖于晶体取向,可加工具有高纵横比的复杂结构^[26].飞秒激光加工与薄膜镀层、光刻制造的光栅结构以及化学蚀刻技术等传统减反射技术相比,在降低 SiC表面反射率方面具有独特优势^[27-28].首先,飞秒激光加工可在微纳米尺度上精确制造复杂的几何结构,这些结构的尺寸和形状可精确调整.其次,与化学刻蚀等技术相比,飞秒激光加工不依赖化学试剂,避免了潜在的化学污染.同时,飞秒激光可用于多种材料,包括硬脆材料和生物材料,具有较好的材料适用性^[29-30].并且飞秒激光加工通常是一步完成的过程,无需后续的化学或热处理步骤,极大简化了生产流程^[31].这些优势说明飞秒激光加工技术不仅提供了一种高效的减反射解决方案,而且为高性能光电器件的开发开辟了新的可能性^[32].本文用飞秒激光直写技术实现 SiC表面的结构化,通过改变激光加工的参数,调控 SiC的表面形貌.基于此实现了在 SiC整个全反射带上的宽带吸收,并将反射率降低到6.99%,这些结构只依赖于一种吸收介质,无需加入其他类型的金属或吸收材料,防止了因加入其他类型金属和吸收材料导致的寄生吸收等问题.在新型红外传感器和红外光电子器件等方面具有潜在的应用前景.

1 工艺流程和原理

实验采用山西烁科晶体有限公司生产的高纯半绝缘4H-SiC双面抛光片,其厚度为500 μm,硅面表面粗糙度 $Ra \leq 0.2$ nm,碳面粗糙度 $Ra \leq 0.2$ nm.先用金刚石玻璃刀将晶圆切割为5 cm×5 cm的小片,再依次用丙酮、乙醇和水将小片超声5 min,以清洁材料表面.图1为实验装置示意图,其中飞秒激光器产生波长为515 nm,脉冲持续时间为130 fs的激光,激光通过扩束系统后经振镜聚焦到位移平台样品表面.通过改变激光器的功率和重复频率、加工过程中的单点曝光时间和加工周期等参数对样品表面区域(2 cm×2 cm)进行网状扫描,以得到不同表面形貌的 SiC样品.通过软件直接调节上述参数,功率调节为1 000~4 500 mW,重复频率调节为1~200 kHz,加工网格的周期为5~20 μm,单点曝光时间为100~2 000 μs.

采用场发射扫描电子显微镜(FESEM, JSM-7500F型,工作电压为15 kV)观察 SiC的表面形貌;采用 OLS4000型激光共聚焦显微镜测量 SiC表面结构的尺寸;采用 UV3600型紫外-可见光谱仪测量

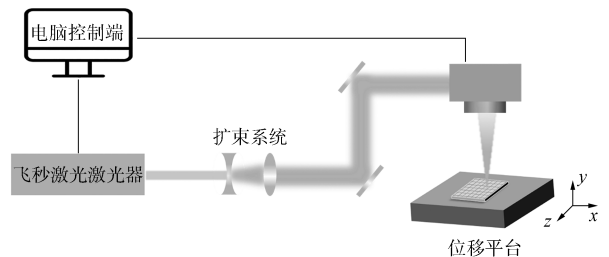


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

不同样品的反射光谱和透射光谱; 采用 RENISHAW INVIA 型 Raman 光谱仪采集不同样品的 Raman 散射光谱(用 755 nm 波长的激发光), 利用 Raman 峰的位移和强度等数据分析 SiC 的表面缺陷。

飞秒激光加工通过短脉冲和高能量的激光直接作用于 SiC 材料表面, 利用非线性光学效应和快速局部化加热与冷却过程, 精确改变表面材料的微观结构。这种处理方式不仅形成了具有特定高度、周期和形状的微纳米结构, 增加了表面的粗糙度, 还改变了光的散射和折射特性, 有效减少了光的反射率。此外, 飞秒激光的高能量密度还可使 SiC 发生相变, 如从结晶相到非晶态的转变, 这种相变改变了材料的折射率并引入缺陷, 这些缺陷可散射入射光, 进一步降低反射率。同时, 通过特定尺寸的纳米结构, 可在 SiC 表面诱导表面声子极化激元共振, 增强材料对光的吸收, 从而在 SiC 上实现高效的减反射。

2 分析与讨论

2.1 SiC 的表面形貌表征

为研究飞秒激光不同加工参数对 SiC 表面形貌的影响, 对不同样品进行表征, 得到不同样品的扫描电子显微镜(SEM)照片, 结果如图 2 所示, 其中图 2(A)~(E)为在激光功率为 1 500 mW、重复频率为 100 kHz、扫描线周期为 5 μm , 单点曝光时间分别为 100, 200, 500, 1 000, 2 000 μs 时, 飞秒激光烧蚀作用后 SiC 表面的形貌照片。

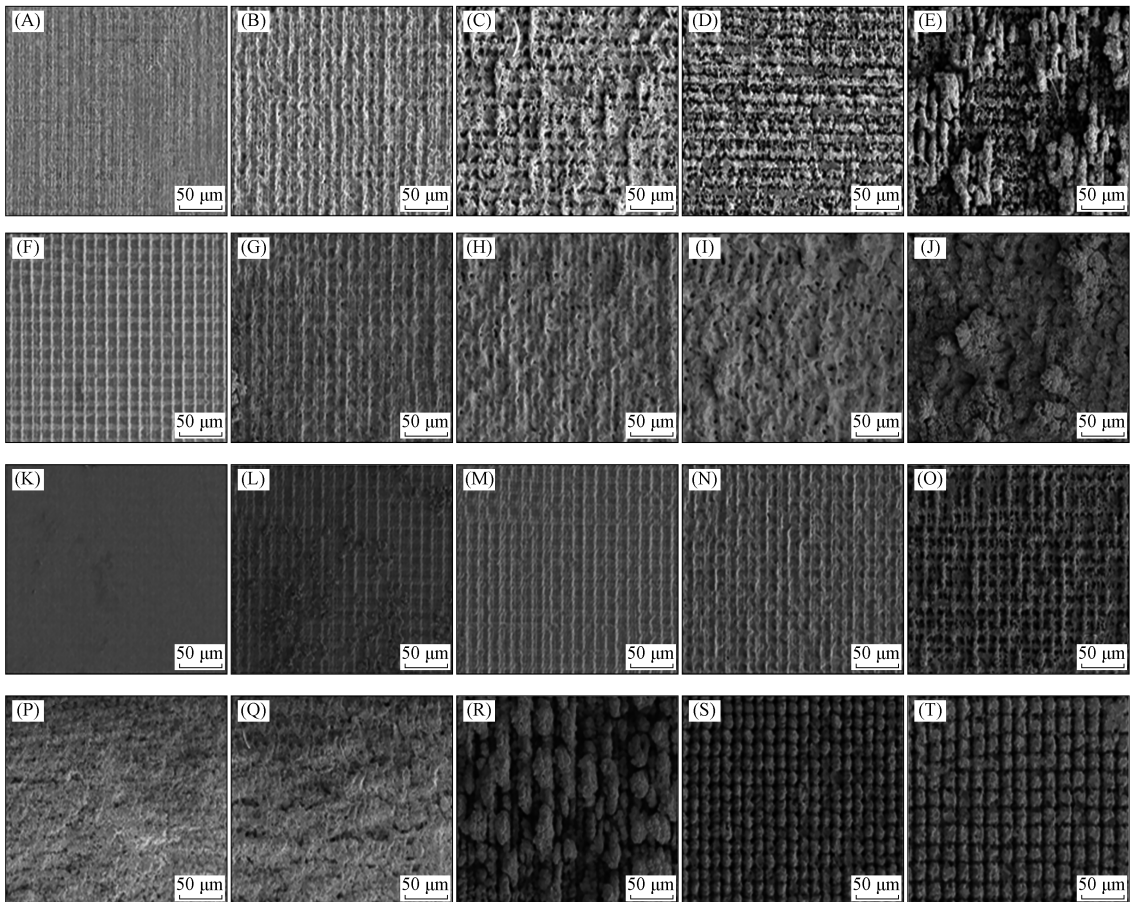


图 2 不同参数下飞秒激光处理 SiC 的 SEM 照片

Fig. 2 SEM images of SiC processed by femtosecond laser with different parameters

由图 2(A)~(E)可见: 在其他参数不变的条件下, 当单点曝光时间较短时, SiC 表面呈平坦的网状结构; 当单点曝光时间为 100~200 μs 时, 随着时间的延长, 网状结构越来越明显; 当单点曝光时间为 500 μs 时, 网状结构逐渐被破坏, 并出现更大的结构起伏; 当单点曝光时间为 2 000 μs 时, SiC 表面形貌已明显不规则。100, 200, 500, 1 000, 2 000 μs 的粗糙度 S_a 均值分别为 0.23, 0.62, 1.07, 2.08,

3.77 μm . 随着单点曝光时间的增加,整体的表面形貌逐渐变粗糙.这是由于随着单点曝光时间增加,激光作用处的材料表面接收了更多光子能量,激光对材料表面的烧蚀影响逐步增大,热效应导致材料产生熔化-再结晶的过程,再结晶的结构使材料表面的网状结构变得不规则所致.图 2(F)~(J)为激光重复频率为 100 kHz,单点曝光时间为 500 μs ,扫描周期为 5 μm ,功率分别为 1 000,1 500,2 000,2 500,4 500 mW 时,飞秒激光烧蚀作用后 SiC 表面形貌的照片.由图 2(F)~(J)可见,当改变功率时,SiC 表面形貌的变化规律与改变单点曝光时间对 SiC 表面形貌的影响类似.图 2(K)~(O)为激光功率为 3 000 mW,单点曝光时间为 500 μs ,扫描线周期为 5 μm ,重复频率分别为 1,20,25,50,100 kHz 时,飞秒激光烧蚀作用后 SiC 表面形貌的照片.由图 2(K)~(O)可见,当重复频率为 1 kHz 时,表面非常平坦,随着重复频率的增加,SiC 表面的网状结构更明显,整体的粗糙程度增加,粗糙度 Sa 均值从 1.73 μm 增加到 3.69 μm .这是由于重复频率直接决定了作用于 SiC 表面的激光脉冲数,当重复频率较低时,SiC 表面接收的激光能量很低,不足以使 SiC 的形貌变化,随着重复频率的增加,积累在 SiC 表面的能量增加,激光的作用效果越来越明显.图 2(P)~(T)为激光功率为 3 000 mW,单点曝光时间为 500 μs ,重复频率为 200 kHz,加工线周期分别为 5,7,10,15,20 μm 时,飞秒激光烧蚀作用后 SiC 表面形貌的照片.当加工线周期为 5,7 μm 时,SiC 表面非常致密,基本无法观测到网状结构.当加工线周期为 10 μm 时,可观察到 SiC 表面的网状结构.随着加工线周期的增加,SiC 表面的网状结构越来越清晰,粗糙度 Sa 均值从 2.68 μm 降至 1.84 μm .

不同参数下飞秒激光处理 SiC 的高倍 SEM 照片如图 3 所示,所有参数与图 2 相同.

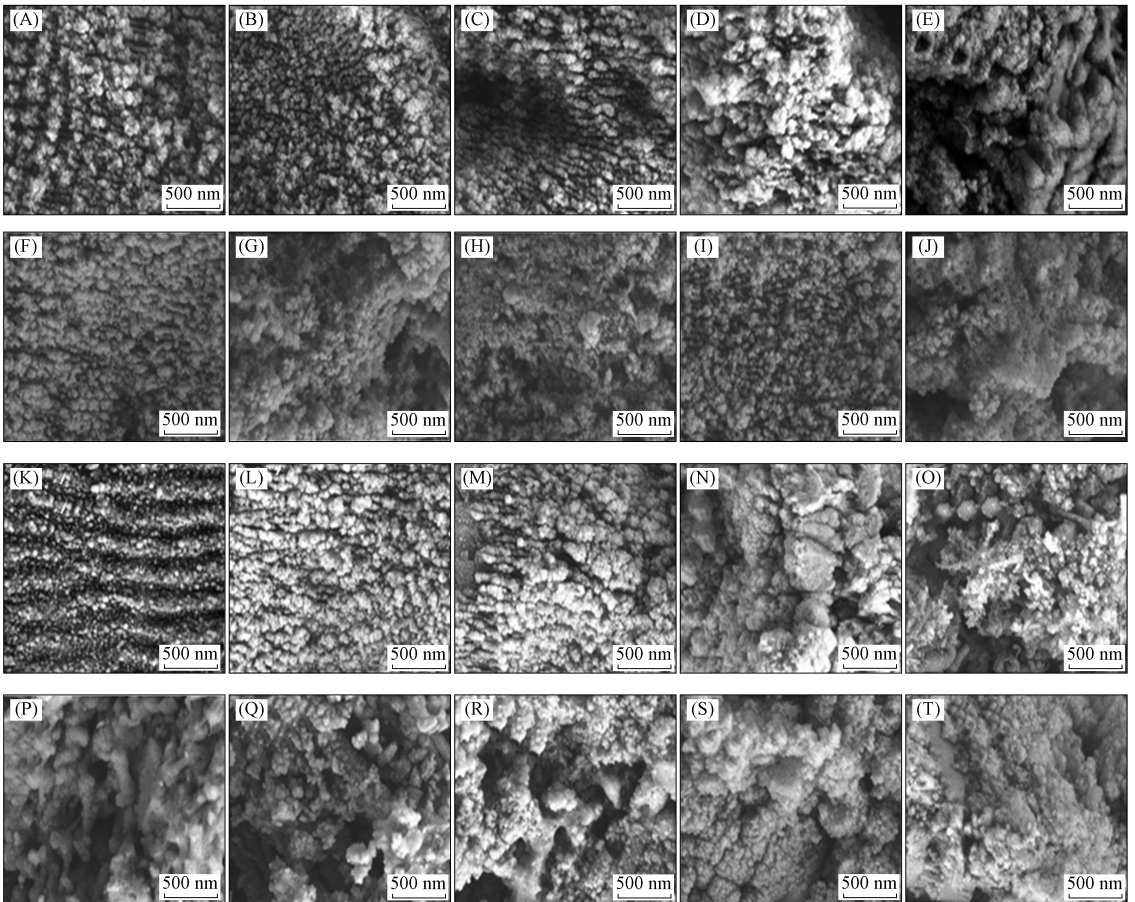


图 3 不同参数下飞秒激光处理 SiC 的高倍 SEM 照片

Fig. 3 High magnification SEM images of SiC processed by femtosecond laser with different parameters

由图 3 更高倍率的 SEM 照片可见,随着单位面积内材料表面积累能量的增加,微观结构从平坦致密的纳米颗粒逐渐演化为复杂疏松、起伏明显的颗粒.由图 3(A)和(E)的对比可见,微观尺度上的 SiC 表面微结构具有更深更多样的微观结构,这有利于吸收电磁波能量.与图 3(C),(H),(M),(R)和

图 3(E),(J),(O),(T)比较, 图 3(A),(F),(K),(P)的微结构并不明显, 对电磁波的吸收能力较弱.

不同参数下飞秒激光处理 SiC 的粗糙度数值如图 4 所示. 由图 4(A),(B),(C)可见, 随着单点曝光时间、激光功率和重复频率的增加, SiC 表面的粗糙度呈递增趋势. 由图 4(D)可见, 粗糙度随激光路径扫描间距的减小逐渐增加. 这是由于随着单点曝光时间、激光功率和重复频率的递增以及扫描间距的减小, 单位面积的能量积累增加, SiC 表面结构的改变程度加剧, 粗糙度随之增加.

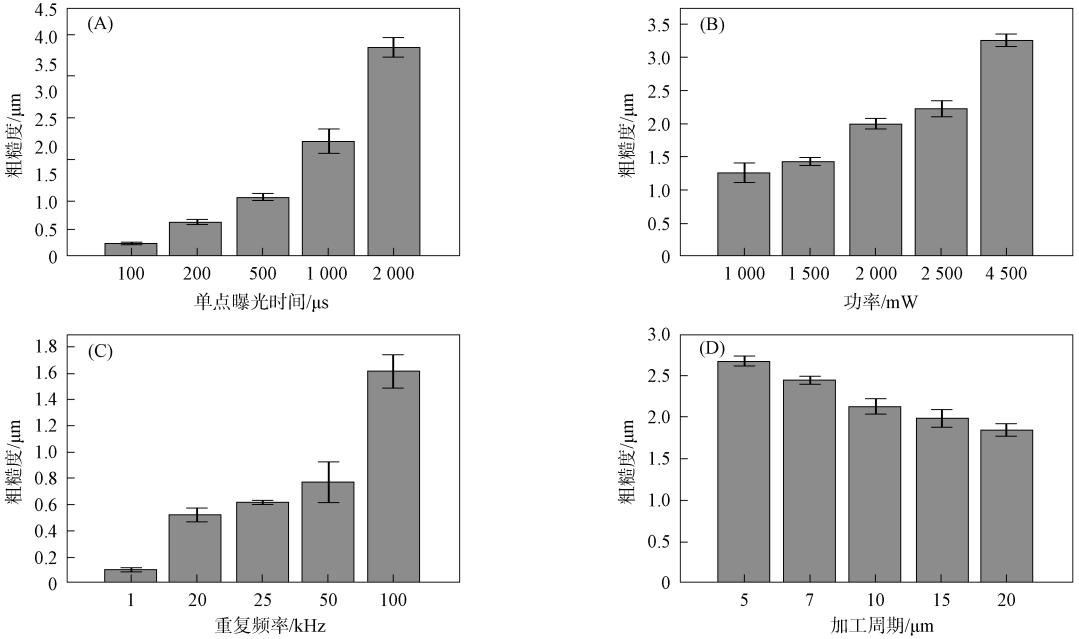


图 4 不同参数下飞秒激光处理 SiC 的粗糙度数值

Fig. 4 Roughness values of SiC processed by femtosecond laser with different parameters

2.2 SiC 的反射率、透射率和吸收率变化规律及原理

选取单点曝光时间分别为 200, 500, 1 000, 2 000 μs 测试其反射率、透射率和吸收率, 结果如图 5 所示. 由图 5 可见: 当单点曝光时间为 200 μs 时, 在 10~12 μm 处出现吸收峰, 反射率降低, 但其透射率未发生变化, 其最高吸收率为 60%; 当单点曝光时间为 500 μs 时, 吸收峰展宽成为一条吸收带, 吸收率为 88%, 1 000 μs 时吸收率为 90%, 2 000 μs 时吸收率为 92%. 通过飞秒激光加工 SiC 表面, 反射率显著降低, 吸收率显著提高. 该现象主要归因于飞秒激光加工在材料表面形成的微纳米结构, 这些结构通过改变光的散射和吸收路径影响光的传播特性. 飞秒激光加工导致的粗糙表面及其微纳结构可有效增加光传播路径长度, 增强光与材料的相互作用, 从而提高吸收率. 根据米氏散射理论, 入射光在这些粗糙表面的凹坑或斜坡中发生多次散射, 极大增强了散射效果, 当结构尺寸接近或小于入射光的波长时, 可有效减少表面的反射率. 此外, 通过精确控制加工参数, 如激光功率、扫描速度、重复频率和脉冲持续时间, 可调整表面结构的具体形状和大小, 实现对反射特性的优化. 通过等效介质理论, 可将飞秒激光加工后的表面视为具有梯度折射率的介质. 这些微结构形成了从空气到 SiC 基体

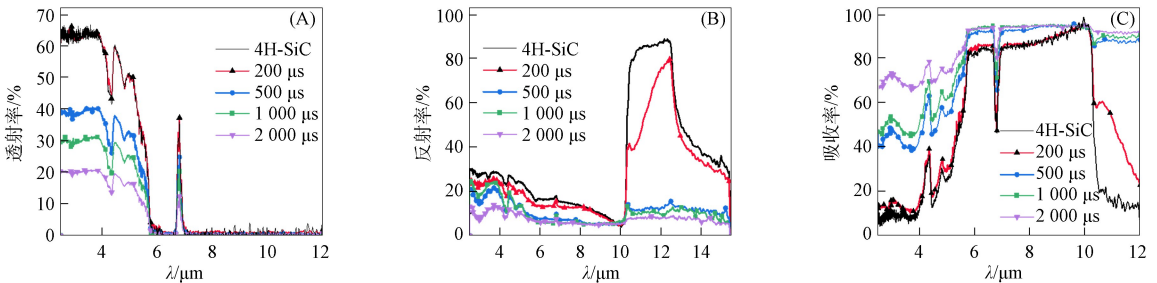


图 5 不同单点曝光时间的 SiC 透射率(A)、反射率(B)和吸收率(C)

Fig. 5 Transmittivity (A), reflectivity (B) and absorptivity (C) of SiC at different single point exposure time

的渐变折射率层,从而最小化界面处的光反射,反射率从 88.6%减小为 6.99%.

SiC 是一种极性半导体材料,其在特定的红外波长 10.3~12.6 μm 内表现为显著的高反射率,该区间称为剩余射线带.这个区域的出现主要源于 SiC 中光学声子的行为:在 LO 声子和 TO 声子的振动频率之间,材料的介电常数经历了从正值到负值变化.这种负介电常数使材料在该频率范围内对电磁波表现出类似金属的反射性质,导致形成剩余射线带.将极性晶体表面的电磁场和光学声子(晶格振动)之间的耦合称为表面声子极化激元(SPhP),SiC 与真空界面处的表面声子极化激元的色散关系为

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon + 1}}, \quad (1)$$

其中 k 为波数, ϵ 为 SiC 介电常数, c 为光速, ω 为频率.在 10.3~12.6 μm 波长内,入射光波与表面电磁波的波矢量存在不匹配问题,入射光无法直接在材料表面激发表面声子极化激元,两者不发生耦合.飞秒激光加工引入周期性微纳结构可改变表面的色散关系,其表达式为

$$k_{\text{SPhP}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon + 1}} + \frac{2m\pi}{\Lambda m}, \quad m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \quad (2)$$

其中 m 为衍射级数, Λ 为周期.在加工过程中,通过不同加工参数改变结构的周期,调整入射光的波矢与表面激元的波矢相匹配.在合适的结构周期下,表面电磁波会与入射电磁波波矢匹配,表面声子极化激元即可被激发.当 SPhP 被成功激发时,表面附近的电磁场强度会显著增强,这种局部增强的电磁场使表面层的分子或原子与电磁波的相互作用变得更强烈.同时,这种增强的电磁场不仅局限于材料表面,而且可深入到材料内部,与材料中的电子和晶格振动相互作用,增强了光的吸收和能量转换效率.因此,通过 SPhP 的激发, SiC 的红外吸收能力得到了显著提升.

2.3 Raman 光谱分析

不同激光单点曝光时间下 Raman 光谱如图 6 所示.由图 6 可见,未被激光辐照过的 4H-SiC 的 Raman 光谱特征峰位于 780, 970 cm^{-1} 处,其中 780 cm^{-1} 处峰由 Si—C 键的横向光学振动模式产生, 970 cm^{-1} 处峰由 Si—C 键的纵向光学振动模式产生.飞秒激光加工后的 Raman 光谱出现了除本体 4H-SiC 外的特征峰,在 230, 520 cm^{-1} 处的峰分别为非晶硅(a-Si)和晶体硅(c-Si)的特征峰.高能量的飞秒激光脉冲可局部加热 SiC 至超过其熔点,迅速冷却后可能形成非晶态或其他亚稳态材料,这些新相具有不同的光学特性,相变发生后改变了材料的光学折射率和吸收特性,进一步影响反射率和吸收率.随着单点曝光时间的增加,非晶硅(a-Si)和晶体硅(c-Si)的峰值均增加.晶体 SiC 先转化成非晶 SiC,非晶 SiC 为亚稳态,再进一步分解为非晶硅(a-Si)和晶体硅(c-Si),从而证明了在激光加工样品时, Si—C 键发生扭曲,导致 SiC 相变,使物质发生变化.当飞秒激光的单点曝光时间增加到 2 000, 5 000 μs 时,在 1 350 cm^{-1} 和 1 590 cm^{-1} 处可明显观察到碳的 D 带和 G 带峰,碳的非晶态混合相和 sp^2/sp^3 键振动峰也开始出现,表明 Si—C 断裂以及 Si—Si 键和 C—C 键形成.碳的非晶态形成对吸收红外波段的光具有积极影响,随着激光改性 SiC 表面碳含量的增加,碳也会吸收更多的红外光,成为提高红外光吸收率的关键因素.同时,在 780, 970 cm^{-1} 处峰代表 Si—C 键的峰强度与新峰的峰强度比也随单点曝光时间的增加而降低.因此随着单点曝光时间的增加, SiC 的改性变化更明显,有助于对红外光的吸收.

综上,本文利用飞秒激光技术对 SiC 表面进行微纳结构加工,通过调整激光加工参数,如单点曝光时间、功率、重复频率和加工周期,成功制备了各种可显著降低反射率和增加红外吸收率的表面结构.这些结构通过增强表面声子极化激元的激发和提高光路径的复杂度,有效增强了材料的光吸收能

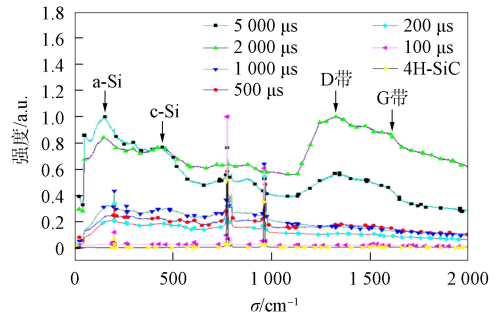


图 6 不同激光单点曝光时间下的 Raman 光谱

Fig. 6 Raman spectra at different laser single point exposure time

力. 此外, 飞秒激光加工导致 Si—C 断裂以及 Si—Si 键和 C—C 键形成, 碳非晶态的形成对吸收红外波段的光具有积极影响. 结果表明, SiC 在 10.3~12.6 μm 波段的红外吸收率最高达 92%. 该研究结果为 SiC 在红外光电领域的应用提供了新的技术路径, 使其在红外传感器、光电子器件以及辐射制冷技术等领域具有广阔的应用前景.

参 考 文 献

- [1] CHENG Z, LIANG J B, KAWAMURA K, et al. High Thermal Conductivity in Wafer-Scale Cubic Silicon Carbide Crystals [J]. *Nature Communication*, 2022, 13(1): 7201-1-7201-9.
- [2] SARKER B K, CAZALAS E, CHUNG T F, et al. Position-Dependent and Millimetre-Range Photodetection in Phototransistors with Micrometre-Scale Graphene on SiC [J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12(7): 668-674.
- [3] 黄火林, 张峰, 吴正云, 等. 4H-SiC 基底 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 双层减反射膜的设计和制备 [J]. *光学学报*, 2008, 28(12): 2431-2435. (HUANG H L, ZHANG F, WU Z Y, et al. Design and Fabrication of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ Double-Layer Antireflection Coatings on 4H-SiC Substrate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(12): 2431-2435.)
- [4] TONG Z, LIU L H, LI L S, et al. Temperature-Dependent Infrared Optical Properties of 3C-, 4H- and 6H-SiC [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2018, 537: 194-201.
- [5] JANIPOUR M, SENDUR K. Broadband Infrared Reflective Surfaces Using Doped and Stacked Polar Dielectric Layers [J]. *AIP Advances*, 2018, 8(2): 025213-1-025213-8.
- [6] 杨光, 刘晓双, 李佳君, 等. 4H 碳化硅单晶中的位错 [J]. *人工晶体学报*, 2022, 51(9): 1673-1690. (YANG G, LIU X S, LI J J, et al. Dislocations in 4H Silicon Carbide Single Crystals [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2022, 51(9): 1673-1690.)
- [7] 柏松, 李士颜, 杨晓磊, 等. 高压大功率碳化硅电力电子器件研制进展 [J]. *科技导报*, 2021, 39(14): 56-62. (BO S, LI S Y, YANG X L, et al. Progress in Developing High-Voltage SiC Power Devices [J]. *Science & Technology Review*, 2021, 39(14): 56-62.)
- [8] KEY P H, SANDS D, SCHLAF M, et al. Infra-red Reflectivity of Ion-Implanted and Pulsed Excimer Laser Irradiated 4H-SiC [J]. *Thin Solid Films*, 2000, 364(1/2): 200-203.
- [9] SCHUBERT M, MOCK A, KORLACKI R, et al. Phonon Order and Reststrahlen Bands of Polar Vibrations in Crystals with Monoclinic Symmetry [J]. *Physical Review B*, 2019, 99(4): 041201-1-041201-9.
- [10] RYLAND E S, RATCHFORD D C, BRESLIN V M, et al. Charge Carrier Spatial Distribution Effects in Photomodulated Reflectivity of 4H-SiC and GaN [J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(10): 103102-1-103102-8.
- [11] ENGELBRECHT J A A, VAN ROOYEN I J, HENRY A, et al. The Origin of a Peak in the Reststrahlen Region of SiC [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2012, 407(10): 1525-1528.
- [12] CHEN D X, DONG J J, YANG J J, et al. Realization of Near-Perfect Absorption in the Whole Reststrahlen Band of SiC [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(20): 9450-9454.
- [13] CALDWELL J D, LINDSAY L, GIANNINI V, et al. Low-Loss, Infrared and Terahertz Nanophotonics Using Surface Phonon Polaritons [J]. *Nanophotonics*, 2015, 4(1): 44-68.
- [14] ZENG C H, LIN W K, SUN Y H, et al. Silicon Carbide and Graphene Based UV-IR Dual-Color Detector [J]. *Optoelectronics Letters*, 2019, 15(3): 170-173.
- [15] 梁红伟, 廖传武, 夏晓川, 等. 第三代半导体辐射探测器研究进展 [J]. *科技导报*, 2021, 39(14): 69-82. (LIANG H W, LIAO C W, XIA X C, et al. Research Progress of the Third Generation Semiconductor Radiation Detector [J]. *Science & Technology Review*, 2021, 39(14): 69-82.)
- [16] OLIVEROS A, GUISEPPI-ELIE A, SADDOW S E. Silicon Carbide: A Versatile Material for Biosensor Applications [J]. *Biomedical Microdevices*, 2013, 15(2): 353-368.
- [17] BAO H, YAN C, WANG B X, et al. Double-Layer Nanoparticle-Based Coatings for Efficient Terrestrial Radiative Cooling [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 168: 78-84.
- [18] XIAO X J, ZHU H M, LIU Z M, et al. Multilayer Antireflection Coatings Design for SiO_2 -Passivated Silicon

- Solar Cells [J]. *Materials Science & Engineering Technology*, 2022, 53(1): 80-88.
- [19] CUI F P, ZHENG G G. Photonic-Grating-Enabled Selective Manipulation of Surface Waves within the Reststrahlen Band [J]. *Optical Materials*, 2021, 122: 111814-1-111814-6.
- [20] DUNKELBERGER A D, ELLIS C T, RATCHFORD D C, et al. Active Tuning of Surface Phonon Polariton Resonances via Carrier Photoinjection [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(1): 50-57.
- [21] LIU X Q, ZHANG Y L, LI Q K, et al. Biomimetic Sapphire Windows Enabled by Inside-Out Femtosecond Laser Deep-Scribing [J]. *Photonix*, 2022, 3(1): 1-13.
- [22] KHUAT V, MA Y C, SI J H, et al. Fabrication of through Holes in Silicon Carbide Using Femtosecond Laser Irradiation and Acid Etching [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 289: 529-532.
- [23] FENG S C, ZHANG R, HUANG C Z, et al. An Investigation of Recast Behavior in Laser Ablation of 4H-Silicon Carbide Wafer [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2020, 105: 104701-1-104701-12.
- [24] SHI Y, XU B, WU D, et al. Research Progress on Fabrication of Functional Microfluidic Chips Using Femtosecond Laser Direct Writing Technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 9-28.
- [25] ZHENG J X, TIAN K S, QI J Y, et al. Advances in Fabrication of Micro-optical Components by Femtosecond Laser with Etching Technology [J]. *Optics and Laser Technology*, 2023, 167: 109793-1-109793-5.
- [26] AHN S, CHOI J, NOH J, et al. High Aspect Ratio Nanoholes in Glass Generated by Femtosecond Laser Pulses with Picosecond Intervals [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 101: 85-88.
- [27] 王锁成, 董世运, 闫世兴, 等. 飞秒激光制备金属表面微纳结构及其技术应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(17): 55-70. (WANG S C, DONG S Y, YAN S X, et al. Femtosecond Laser Preparation of Metal Surface Micro/Nano Structures and Their Technical Applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(17): 55-70.)
- [28] XIE X, ZHOU C, WEI X, et al. Laser Machining of Transparent Brittle Materials: From Machining Strategies to Applications [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2019, 2(1): 14-26.
- [29] AN Q, CHEN J, MING W, et al. Machining of SiC Ceramic Matrix Composites: A Review [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(4): 540-547.
- [30] ELISEEV K A, PERLIN E Y. Absorption of Femtosecond Light Pulses Due to Indirect Interband Transitions in Crystals [J]. *Optics and Spectroscopy*, 2015, 119(6): 911-917.
- [31] SIMA F, SUGIOKA K, VÁZQUEZ R M, et al. Three-Dimensional Femtosecond Laser Processing for Lab-on-a-Chip Applications [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(3): 613-634.
- [32] SUGIOKA K. Hybrid Femtosecond Laser Three-Dimensional Micro-and Nanoprocessing: A Review [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2019, 1(1): 57-68.

(责任编辑: 王 健)