

doi:10.3788/gzxb20184703.0324001

基于磁控溅射和 ICP 刻蚀的 RB-SiC 表面 平坦化工艺

赵杨勇, 刘卫国, 惠迎雪

(西安工业大学 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 西安 710021)

摘 要:采用射频磁控溅射技术在 RB-SiC 表面沉积 Si 平坦化层,通过正交试验研究了射频功率、Ar 流量和工作气压三个因素对薄膜表面质量和形貌的影响规律,以获取最佳的薄膜沉积参数.射频功率 120 W、工作气压 1.2 Pa 和 Ar 流量 40 sccm 条件下获得了最佳质量的平坦化样品,利用电感耦合等离子体对平坦化膜层进行刻蚀抛光,通过 Lambda950 分光光度计测试不同工艺阶段样品表面的反射率.结果表明,相比于未处理的 RB-SiC 初始样品,经过平坦化和等离子体刻蚀的样品表面粗糙度标准差值由 1.819 nm 减小至 0.919 nm,样品表面反射率相应地提高了 2%.由此说明射频磁控溅射平坦化沉积与电感耦合等离子体刻蚀的组合工艺可实现 RB-SiC 表面的高质量加工.

关键词:光学制造;超光滑表面;射频磁控溅射;RB-SiC;Si 平坦化层;正交试验;ICP 刻蚀;表面粗糙度

中图分类号:O484; TN304

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)03-0324001-7

Surface Planarization Process of RB-SiC Based on Magnetron Sputtering and ICP Etching

ZHAO Yang-yong, LIU Wei-guo, XI Ying-xue

(Shaanxi Province Thin Film Technology and Optical Test Open Key Laboratory,
Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Si thin film as planarizing layer were deposited on Reaction Bonded-SiC (RB-SiC) substrate by using RF magnetron sputtering technique. A set of orthogonal experiments were designed and performed to determine an optimized process condition by characterizing the evolution of the quality and surface morphology of the Si films deposited at various sputtering power, working pressure and Argon flow rate. The planarization was obtained at sputtering power of 120W, working pressure of 1.2 Pa and Argon flow rate of 40 sccm. Then smoothing of inductively coupled plasma (ICP) etching was performed and the surface reflectivity of samples processed under different treatment stages was investigated by using Lambda 950 spectrophotometer. The results show that the surface roughness Sq of RB-SiC sample under planarization and ICP etching process is reduced from 1.819 nm to 0.919 nm compared with untreated RB-SiC sample, and the surface reflectivity of the sample increased by 2%. Therefore the combinatorial optical polishing technology based planarization with RF magnetron sputtering and ICP etching process can enhance the performance of RB-SiC surface finishing.

Key words: Optical fabrication; Super smooth surface; RF Magnetron sputtering; RB-SiC; Si planarization layer; Orthogonal experiment; ICP etching; Surface roughness

OCIS Codes: 240.0310; 220.5450; 240.5450; 240.5770; 310.1860

基金项目:国防基础科研项目(No.JCKY2016208A002),陕西省科技厅重点实验室项目(No.2013SZS14-Z02)和陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(No.15JS032)资助

第一作者:赵杨勇(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为薄膜与等离子体技术. Email:zhaoyy_0011@163.com

导师(通讯作者):刘卫国(1964-),男,教授,博士,主要研究方向为光电子技术. Email:wgliu@163.com

收稿日期:2017-10-30;录用日期:2017-12-13

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

近年来,社会生产飞速进步,人类对太空领域的探索热情越来越强烈,航空航天技术为人类观测太空、研究地球及整个浩瀚的宇宙空间做出了重大贡献.空间望远镜、遥感侦察相机等大型系统为了满足使用要求,需要拥有足够高的分辨率及较大的口径,但口径的增大,会增加整个光学系统的重量,因此,设计中不但需要提高光学系统的成像质量,而且需要减轻其重量,并降低发射成本^[1].碳化硅(SiC)具有密度较低、强度及弹性模量较高、热膨胀系数较小、导热性能良好、化学稳定性高等一系列优点,成为理想的大口径、轻量化反射镜基底材料^[2-3].从20世纪70年代末开始,美国、德国、日本等发达国家对SiC材料应用于反射镜基底做了许多研究,积累了丰富的研究经验,我国在这方面起步相对较晚,但也取得了一定的研究成果.反应烧结法作为一种制备SiC反射镜的方法,其工艺简单、烧结温度低,是制备大口径、复杂形状反应烧结碳化硅(Reaction Bonded-SiC, RB-SiC)材料优先选用的方法^[4].

RB-SiC是由Si和SiC组成的具有两相结构的材料(Si含量约占14%),由于二者物理特性的差异,致使抛光过程中Si的去除速率要比SiC快一些,导致RB-SiC抛光后表面质量下降,粗糙度增大,反射率减小,散射现象严重,根本无法满足高质量光学系统的要求^[5-7].在光能输出过程中,光学元件的中高频表面误差和表面微缺陷是限制其输出能力的重要因素,为了改善其表面质量,提高反射率,需要对其表面进行平坦化处理.射频磁控溅射镀膜技术^[8]作为一种常用的物理气相沉积(Physical Vapor Deposition, PVD)技术,其镀制的膜层聚集度高、致密性能好、表面粗糙度良好,附着力强,同时在加工过程中温度低,无废气产生,成为RB-SiC材料表面平坦化的首选方法.

本文采用射频磁控溅射技术^[9-10]对不同表面质量的RB-SiC基底进行平坦化处理,通过沉积Si涂层来初步改善其表面质量,然后再利用非接触、无边缘效应、对材料无深度损伤、高稳定性的电感耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)刻蚀技术进一步刻蚀优化表面,并检测优化后的表面粗糙度及反射率,从而为RB-SiC表面平坦化工艺提供指导作用.

1 实验与分析

RB-SiC表面平坦化工艺研究包括平坦化层的沉积和刻蚀两部分,图1为工艺流程图.由于薄膜沉积过程中膜层几乎是等厚生长的,不同表面质量的基底在一定程度上会影响Si原子集团在基底表面的附着、凝聚、成核及其生长过程^[11],最终影响平坦化薄膜的沉积质量,所以在利用射频磁控溅射沉积Si平坦化层之前,需要选择合适表面质量的RB-SiC基底.

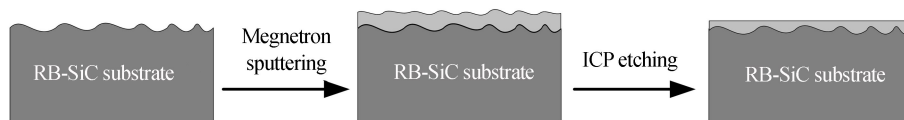


图1 RB-SiC表面平坦化工艺流程

Fig.1 Process of RB-SiC surface planarization

实验中采用的RB-SiC样品材料是潍坊兆泰工程陶瓷有限公司生产的,口径大小为 $\Phi 30$,厚度为10 mm,表面粗糙度3 nm左右.在其表面沉积Si平坦化层,并测量沉积膜层的厚度及表面粗糙度,然后利用电感耦合等离子体对Si平坦化层进行刻蚀,之后再次进行检测,评价其表面质量.

1.1 射频磁控溅射沉积Si平坦化层

磁控溅射镀膜技术是利用电子轰击靶材使其离解成原子,高能粒子撞击固体表面后将动量传递给靶材原子,使原子从靶材表面溅射出来,穿过真空沉积到基片表面.该工艺具有沉积速率高、基片温升小、膜层致密、均匀、附着力强、工艺可控性高、工作稳定等特点,成为材料表面改性常用的方法.实验采用北京创世威纳科技有限公司制造的MSP-400B型磁控溅射镀膜机在RB-SiC样品表面沉积Si平坦化层,靶材选用北京中金研新材料科技有限公司生产的硅靶,口径为 $\Phi 60$,厚度为5 mm,纯度99.999 9%,溅射气体为高纯Ar,纯度99.99%.

为了研究射频功率、工作气压及Ar流量三个工艺参数对Si薄膜沉积速率和表面粗糙度的影响程度,首

先进行三因素三水平的正交实验,利用极差分析法对三个影响因素的主次顺序作具体分析,根据 Si 平坦化层的厚度及表面粗糙度,从中选择合适的工艺参数进行 Si 平坦化层的沉积,便于后续 RB-SiC 表面的刻蚀优化。

1.1.1 正交试验

影响 Si 平坦化层沉积速率的因素较多,包括射频功率、靶材到基片的间距(靶基距)、气体流量、工作气压等.为了提高实验效率,确定合适的工艺参数,采用正交设计实验来重点研究射频功率(A)、Ar 流量(B)和工作气压(C)三个因素对平坦化层性能质量的影响程度。

实验前期,为了寻找满足膜层均匀性要求、沉积速率尽可能高的工艺条件,通过查阅相关文献^[7-11]及初步的探索实验,将本底真空设定为 2×10^{-3} Pa,靶基距为 4.4 cm,溅射时间 8 min,另外射频功率选取 80 W、100 W、120 W 三个水平,Ar 流量选取 40 sccm、50 sccm、60 sccm 三个水平,工作气压选取 0.8 Pa、1.0 Pa、1.2 Pa 三个水平,设计了表 1 所示的因素水平表,按照表 2 所示的具体正交方案表进行实验,通过 9 组实验并利用 Taly Surf CCI 非接触式检测仪测量薄膜厚度及表面粗糙度,测量结果如表 2。

表 1 因素水平表

Table 1 Factors and levels

Factor	A RF power/W	B Ar flow/sccm	C Pressure/Pa
Level 1	80	40	0.8
Level 2	100	50	1.0
Level 3	120	60	1.2

表 2 具体实验方案及数据

Table 2 Specific experimental programs and data

Experiment number	RF power/W	Ar flow/sccm	Pressure/Pa	Deposition rate/(nm · min ⁻¹)	Roughness S _q /nm
1#	80	40	0.8	14.925	3.278
2#	80	50	1.0	15.275	6.674
3#	80	60	1.2	15.802	5.673
4#	100	40	1.0	15.328	3.537
5#	100	50	1.2	16.121	2.829
6#	100	60	0.8	13.922	3.024
7#	120	40	1.2	18.357	2.235
8#	120	50	0.8	17.307	3.627
9#	120	60	1.0	16.752	2.237

为了确定三个影响因素的主次顺序,利用极差分析法对表 2 的实验数据作进一步处理,计算三种因素在三种不同水平下的两种评价指标所对应的平均值及极差值 R 的大小,结果如表 3。

表 3 正交实验极差分析表

Table 3 Range analysis of orthogonal experiment

Evaluation index	Parameters	RF power	Ar flow	Pressure
Deposition rate/ (nm · min ⁻¹)	K1	15.334	16.173	15.385
	K2	15.094	16.234	15.755
	K3	17.472	15.492	16.76
	Optimization level	A3(120)	B2(50)	C3(1.2)
	R	2.378	0.742	1.375
Roughness S _q /nm	Primary order	RF power > Pressure > Ar flow		
	K1	5.208	3.017	3.31
	K2	3.13	4.377	4.149
	K3	2.699	3.611	3.579
	Optimization level	A3(120)	B1(40)	C1(0.8)
R	2.509	1.36	0.839	
Primary order	RF power > Ar flow > Pressure			

从表 3 可以看出,三个影响因素对薄膜沉积速率影响程度大小依次是射频功率 > 工作气压 > Ar 流量,对表面粗糙度影响程度大小依次是射频功率 > Ar 流量 > 工作气压.分析可知:在一定的压强范围(0.8~

1.2 Pa)内,气体分子在固定的直径和温度条件下,随着工作压强增大,气体分子平均自由程随之减小,溅射出来的粒子与气体分子相互碰撞的次数将增加,二次电子发射也将增强,第三电离系数 γ 增大,导致阴极位降区的厚度 d 减小,电流密度 j 增大,放电增强,相应的溅射能力也就增强,沉积速率就会增大^[12-13];同时射频功率对两个评价指标的影响程度最大,下面重点研究射频功率对评价指标的影响程度。

1.1.2 单因素实验

为了最终达到平坦化的效果,减少 RB-SiC 基底表面的散射损耗,提高其表面光学质量,获得高的反射率,需要降低材料表面粗糙度,使表面达到超光滑水平,满足高质量光学系统的要求.结合前面正交实验并考虑薄膜表面粗糙度的大小,进行射频功率的单因素实验时,设定靶基距为 4.4 cm,Ar 流量为 40 sccm,工作气压为 1.2 Pa,溅射时间为 8 min,得到的数据曲线如图 2。

由图 2 中知,射频磁控溅射制备的 Si 薄膜其沉积速率和表面粗糙度都随着射频功率的增大而增大,沉积速率的大小取决于溅射产额,溅射产额和入射离子的能量有重要关系,当入射离子能量大于溅射阈值^[14],并在一定的范围内,溅射产额随着入射离子能量的增大呈平方关系增加,导致沉积速率逐渐增大.相比于基底表面的粗糙度,Si 平坦化层表面质量随着射频功率的增大而下降,原因在于沉积速率增大时,难以形成完整的晶格结构,膜层中会产生大量的空位、错位、晶粒尺寸大小不一等缺陷^[15]。

为了保证 Si 平坦化层的表面质量,在兼顾沉积速率的前提下,需要选择合适的射频功率进行工艺实验,为此选择 120 W 的射频功率作为后续镀制 Si 平坦化层的工艺参数,膜层厚度测试结果如图 3 所示,平均膜厚为 146.24 nm,计算沉积速率达到 $18.280 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$,表面粗糙度测试结果为 2.235 nm.相比射频功率 130 W 和 140 W 时沉积的 Si 平坦化层,110 W 和 120 W 时沉积的 Si 平坦化层表面粗糙度相对于基底表面粗糙度分别减小了 0.205 nm 和 0.393 nm,这对于 RB-SiC 表面平坦化处理是有利的^[16-18],下一步还需要对 Si 平坦化层进行 ICP 刻蚀抛光,改善其表面质量。

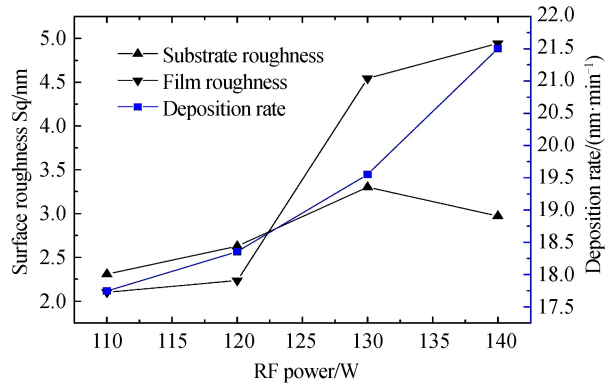


图 2 沉积速率及表面粗糙度随 RF 功率变化曲线
Fig.2 Variation of deposition rate and surface roughness with RF power

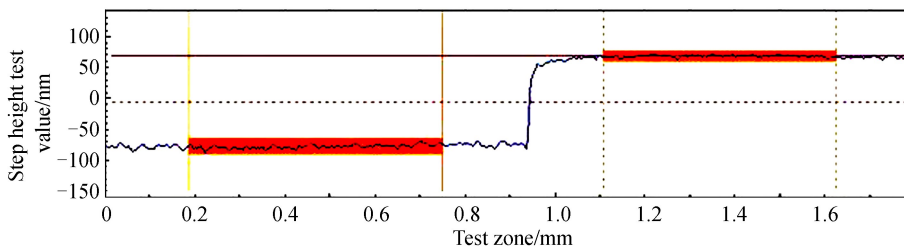


图 3 射频功率 120 W 时的薄膜厚度
Fig.3 Film thickness of RF power 120 W

1.2 ICP 刻蚀 Si 平坦化层

电感耦合等离子体(ICP)干法刻蚀作为一种加工 SiC 的方法,其设备具有选择性和各向异性、结构简单、操作简便等特点.实验中采用中科院微电子研究所的 ICP-98A 型高密度等离子体刻蚀机,它是一种刻蚀速率高、加工精度高、损伤程度小的新一代先进刻蚀机.通过对 RB-SiC 进行 ICP 刻蚀工艺研究,分析不同因素对刻蚀速率及表面粗糙度的影响程度,得到了理想的直接刻蚀工艺参数,即 RF 功率 150 W、偏压 50 W,工作气压 1 Pa、刻蚀气体流量比($\text{CF}_4 : \text{O}_2$)25 : 5 时,刻蚀抛光效果显著。

对射频功率 100 W,Ar 流量 50 sccm,工作气压 1.2 Pa 工艺条件下沉积厚度为 128.97 nm 的 Si 平坦化层进行 3 min 的刻蚀,效果如图 4.最左侧为沉积的 Si 平坦化层被掩膜覆盖的部分,右侧为平坦化层刻蚀后的 200 倍光学显微镜照片,从照片中发现刻蚀后中部颜色较深,表明沉积的 Si 平坦化层只有部分被刻蚀,刻蚀不够充分,即刻蚀气体通过电感耦合方式辉光放电产生的活性粒子扩散到基片表面,同刻蚀材料发生的化学反应不充分,另外离子对基片表面的轰击作用不够导致生成的非挥发性产物没来得及去除.对比平坦化层

刻蚀前后的表面粗糙度数据,如图 5,可以看出刻蚀后 Si 平坦化层表面粗糙度有所减小,即 ICP 刻蚀技术可用于表面平坦化刻蚀抛光工艺.

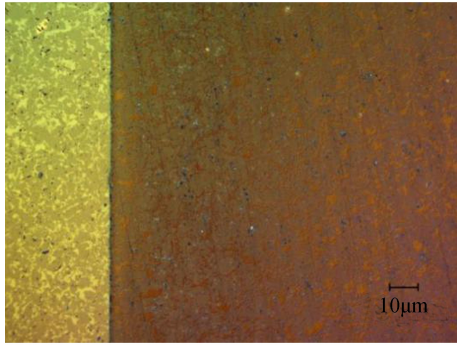


图 4 改性层刻蚀后的 200 倍光学显微镜照片
Fig.4 200×Photomicrograph of the modified layer after etching

为了验证实验的重复性效果,对厚度为 124.7 nm 的平坦化层以同样的工艺参数刻蚀 3 min,测量结果显示,平坦化层表面同样有少部分未被刻蚀,表面粗糙度由之前的 3.164 nm、3.192 nm、3.127 nm、3.209 nm 减小为 2.009 nm、2.697 nm、1.882 nm、1.709 nm,验证了前面实验结果的准确性.为了充分刻蚀,将刻蚀时间设定为 3 min 30 sec,在同样的工艺参数进行刻蚀,经过不同工艺处理的基底表面粗糙度测量结果如图 6.

其 1 000 倍光学显微镜下的照片分别如图 7 中 (a)、(b)、(c) 所示,图 (a) 原基底是经过传统机械抛光方法得到的,深色部分为 SiC 材料,浅色部分为反应过程中渗入到 SiC 当中的 Si 单质,黑色部分为 C 元素、少许孔洞和 Fe_2O_3 杂质;相比于原基底,图 (b) 沉积 Si 平坦化层以后,基底表面平坦化层择优生长,在两相组份上的生长状况截然不同,Si 平坦化层的分布复制了原基底的表面情况,由于成份一致,基底 Si 相上的 Si 膜生长趋势优于 SiC,导致两相分界处台阶明显^[16-17],表面凹凸不平粗糙度增大;图 (c) 是刻蚀平坦化层后的表面,表面黑色部分明显减少,部分孔洞被填补,表面质量有所改善,此时的表面粗糙度及形貌测试结果如图 8 所示,粗糙度 S_q 值为 0.919 83 nm,小于 1 nm.

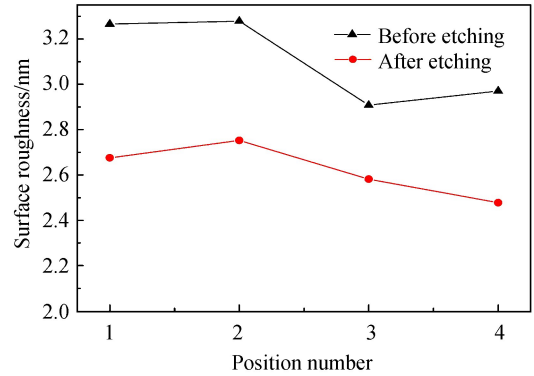


图 5 平坦化层刻蚀前后的表面粗糙度
Fig.5 Surface roughness of before and after etching

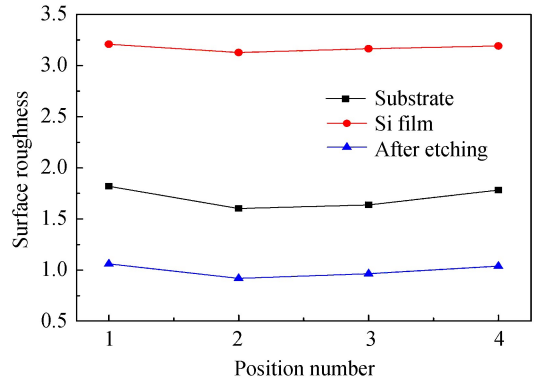


图 6 RB-SiC 基底、Si 薄膜及刻蚀后的表面粗糙度
Fig.6 RB-SiC surface roughness of substrate, Si film and after etching

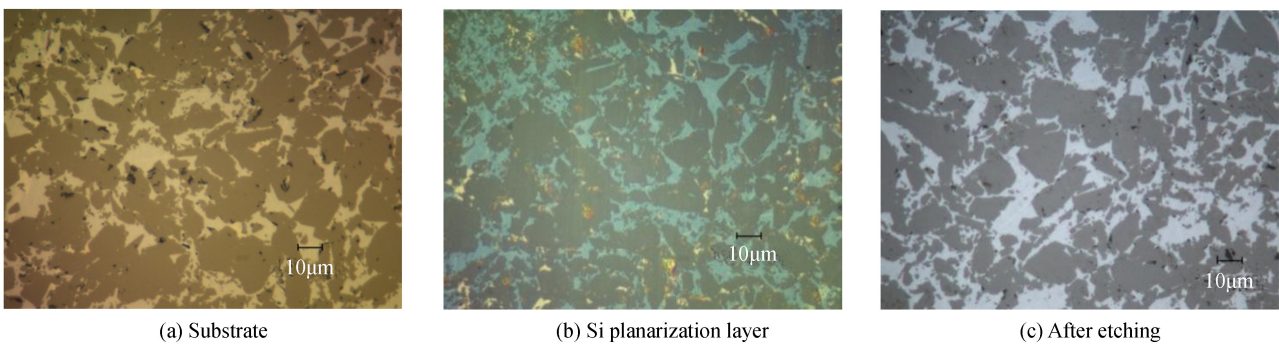


图 7 RB-SiC 1 000 倍的光学显微镜照片
Fig.7 1 000×Photomicrograph of RB-SiC

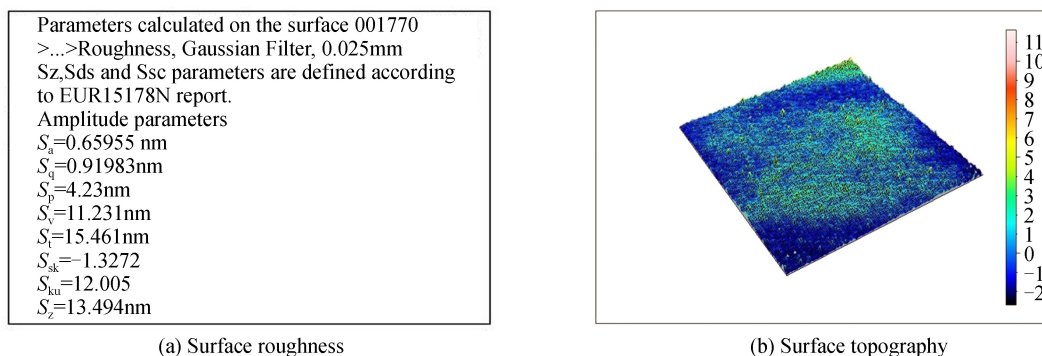


图8 平坦化层刻蚀后的表面粗糙度及形貌图

Fig.8 Surface roughness and topography of the flattening film after etching

对 RB-SiC 基底表面做不同工艺的处理, 采用美国 PerkinElmer 公司的 Lambda950 分光光度计分别测试基底、直接刻蚀基底、沉积 Si 平坦化层以及刻蚀后的 Si 平坦化层的反射率, 测试结果如图 9 所示. 可以看出在可见光范围内, RB-SiC 基底上沉积平坦化层再刻蚀以后的表面反射率高于原基底, 主要因为原基底是由 Si 和 SiC 两相组成, 存在结构不统一性, 当光线入射到基底表面时, 两相分界处、孔洞等不均匀性会导致基底表面对光的散射, 孔洞也会增加材料表面对光的吸收, 使得材料表面反射率较低. 相比于 RB-SiC 基底, Si 平坦化层在 625~825 nm 波段内的反射率稍高, 在 400~600 nm 波段内的反射率较低, 表明此波段对光线的吸收很强. 对比得出在 RB-SiC 基底表面沉积 Si 平坦化层再进行刻蚀, 可以改善基底表面质量并在一定波段内提高了表面反射率.

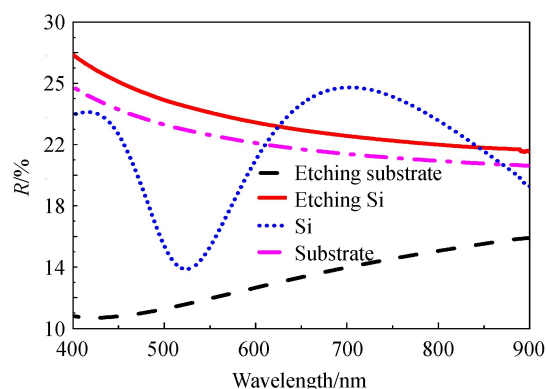


图9 RB-SiC 的反射率曲线

Fig.9 Reflectivity curve of RB-SiC

2 结论

本文利用射频磁控溅射技术在 RB-SiC 表面沉积 Si 平坦化层, 通过正交设计实验研究了射频功率、Ar 流量和工作气压三个影响因素对 Si 薄膜沉积速率和表面粗糙度的影响程度, 重点研究了射频功率该单因素对评价指标的影响程度, 得到理想的薄膜沉积工艺参数, 即射频功率 120 W、Ar 流量 40 sccm、工作气压 1.2 Pa. 同时利用 ICP 刻蚀技术对 Si 平坦化层进行刻蚀抛光, 测试结果显示, 通过控制刻蚀工艺参数可有效减小表面粗糙度, 改善 RB-SiC 表面质量; 经过不同工艺处理的表面, 沉积 Si 平坦化层后的表面在一定波段内表面反射率增大, 与原基底相比, 刻蚀平坦化层后的表面反射率有所提高. 表明射频磁控溅射技术结合 ICP 刻蚀抛光技术可以改善光学元件表面质量, 从而获取超光滑的 RB-SiC 表面.

参考文献

- [1] 康健. PVD 改性 RB-SiC 反射镜表面缺陷处理方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- [2] JOHNSON A S G. SiC coatings on RB SiC mirrors for ultra smooth surfaces[C]. SPIE, 1993, **2018**: 237-247.
- [3] LEE H B, SUK J Y, BAE J I. Trade study of all-SiC lightweight primary mirror and metering structures for spaceborne telescopes[C]. SPIE, 2015: 95740D.
- [4] GAO Jin-song, SHEN Zhen-feng, WANG Xiao-yi, *et al.* Research status quo of SiC space mirror material and its surface modification[J]. *Chinese Optics*, 2009, **2**(2): 71-78.
高劲松, 申振峰, 王笑夷, 等. SiC 空间反射镜材料及其表面改性技术现状分析[J]. *中国光学*, 2009, **2**(2): 71-78.
- [5] ZHOU H, ZHANG C, CAO Y, *et al.* Lightweight C/SiC mirrors for space application[C]. International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies. 2006: 61480L.
- [6] YUAN Yong-tao, LIU Hong, SHAO Chuan-bing, *et al.* Preparation and performance of Si coating on RB-SiC mirror for surface modification[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(5): 1281-1284.
苑永涛, 刘红, 邵传兵, 等. RB-SiC 表面改性 Si 涂层的制备与性能[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(5): 1281-1284.

- [7] ROBICHAUD J. Challenges in optical finishing of reaction bonded silicon carbide[C]. Optical Fabrication and Testing. Optical Society of America, 2008.
- [8] LIU Zhen, GAO Jin-song, LIU Hai, *et al.* Surface modification of 2m RB-SiC substrate by magnetron sputtering[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(7): 1557-1563.
刘震, 高劲松, 刘海, 等. 2m 大口径 RB-SiC 反射镜的磁控溅射改性[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(7): 1557-1563.
- [9] HUO Yan-li, LIU Hai-lin, HU Chuan-qi, *et al.* Research on surface modification of RB-SiC material[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, (s1): 778-781.
霍艳丽, 刘海林, 胡传奇, 等. RB-SiC 材料表面改性技术研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, (s1): 778-781.
- [10] SHEN Zhen-feng, GAO Jin-song, CHEN Hong, *et al.* Research of the surface modification for two kinds of silicon carbide mirror in common use[J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(1): 21-24.
申振峰, 高劲松, 陈红, 等. 两种常用碳化硅反射镜基底表面改性的研究[J]. 光学技术, 2009, **35**(1): 21-24.
- [11] XU Ling-di, ZHANG Xue-jun, WANG Xu. Surface coating technique of reaction bonded SiC mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(1): 120-124.
徐领娣, 张学军, 王旭. 反应烧结碳化硅反射镜表面改性技术[J]. 光电工程, 2009, **36**(1): 120-124.
- [12] MENG Xian-quan, REN Da-zhi, GUO Huai-xi, *et al.* Research on growth rate and thickness uniformity of film deposited by magnetron sputtering[J]. *Journal of Wuhan University*, 1995, **41**(3): 351-356.
孟宪权, 任大志, 郭怀喜, 等. 环形磁控溅射成膜生长速率及膜厚均匀性研究[J]. 武汉大学学报, 1995, **41**(3): 351-356.
- [13] KUWAHARA K, FUJIYAMA H. Application of the Child-Langmuir law to magnetron discharge plasmas[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1994, **22**(4): 442-448.
- [14] EKPE S D, BEZUIDENHOUT L W, Dew S K. Deposition rate model of magnetron sputtered particles[J]. *Thin Solid Films*, 2005, **474**(1): 330-336.
- [15] FENG Qiao-hua, SHI Yun-bo, YIN Jing-hua, *et al.* Study on the technics of depositing film by magnetron sputtering and the microstructure characteristics of the film[J]. *Science & Technology Informat*, 2007, **2**(2): 15-16.
冯侨华, 施云波, 殷景华, 等. 磁控技术成膜的工艺研究与微观表征分析[J]. 科技信息: 科学·教研, 2007, **2**(2): 15-16.
- [16] WANG Ke-jun, DONG Ji-hong. Structural design of $\Phi 2$ m-level large-diameter SiC reflector used in space remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(7): 0718005.
王克军, 董吉洪. 空间遥感器 $\Phi 2$ m 量级大口径 SiC 反射镜镜坯结构设计[J]. 红外与激光工程, 2017, **46**(7): 0718005.
- [17] LIU Dan-dan, LI Xue-liu, LI Lin, *et al.* Structural and optical properties of SnS films prepared by RF magnetron sputtering[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(9): 1114-1123.
刘丹丹, 李学留, 李琳, 等. 射频磁控溅射法制备 SnS 薄膜及其结构和光学特性[J]. 发光学报, 2016, **37**(9): 1114-1123.
- [18] SHEN Zhen-feng, GAO Jin-song, WANG Xiao-yi, *et al.* Improvement of technological process for surface modification of RB-SiC mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(5): 969-974.
申振峰, 高劲松, 王笑夷, 等. RB-SiC 基底反射镜表面改性工艺的改进[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(5): 969-974.