

基于硅靶和碳化硅靶的碳化硅薄膜 磁控溅射工艺对比

杨梦熊, 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: **目的** 通过基于碳化硅陶瓷靶的直接溅射和基于硅靶与甲烷的反应溅射, 在 Si(100) 基底上沉积碳化硅薄膜, 对比两种工艺制备碳化硅薄膜的异同。 **方法** 采用直接磁控溅射与反应磁控溅射工艺制备碳化硅薄膜, 通过白光干涉仪、轮廓仪、X 光电子能谱仪 (XPS) 分析薄膜粗糙度、厚度、沉积速率、组分, 通过 X 射线衍射仪和扫描电子显微镜分析薄膜的物相结构和形貌。 **结果** 基于硅靶和甲烷的反应溅射工艺, 甲烷流量百分比为 20%~70% 时, 沉积速率从 11.3 nm/min 升高到 36.5 nm/min。甲烷流量百分比为 20%~60% 时, 表面粗糙度 R_q 值变化不大; 甲烷流量百分比为 70% 时, R_q 值有增大的趋势。对于甲烷反应溅射工艺, 硅碳元素比例可调, 但甲烷气体不易控制。基于碳化硅陶瓷靶工艺, 随沉积时间 (即膜层沉积厚度) 的增加, 表面粗糙度 R_q 变化不大, 硅碳原子比接近 1:1。两种工艺制备的薄膜均为晶态, 且为 8H-SiC。 **结论** 比较两种工艺, 相同靶功率下, 硅靶反应溅射的沉积速率明显快于碳化硅陶瓷靶。硅靶反应溅射的元素比例可调, 但甲烷气体不易控制; 碳化硅陶瓷靶的沉积过程稳定, 硅碳原子比接近 1:1。

关键词: 磁控溅射; 碳化硅; 沉积速率; 表面粗糙度; 反应气体

中图分类号: TG174.442 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2021)09-0134-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.09.013

Comparison of Magnetron Sputtering Process of Silicon Carbide Film Based on Silicon and Silicon Carbide Target

YANG Meng-xiong, HUI Ying-xue

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

ABSTRACT: Through direct magnetron sputtering based on silicon carbide ceramic target and reactive magnetron sputtering based on silicon target and methane, silicon carbide film is deposited on Si(100) substrate. This paper studies and compares the

收稿日期: 2020-10-05; 修订日期: 2021-03-09

Received: 2020-10-05; Revised: 2021-03-09

基金项目: 国家重点研发计划-政府间科技创新合作重点专项 (2018YFE0199200); 西安市科技创新引导项目 (201805031YD9CG15); 西安市科技计划项目 (201805031YD9cG15(6))

Fund: National Key R&D Program-Key Special Project of Inter-governmental S&T Innovation Cooperation (2018YFE0199200), Xi'an Science and Technology Innovation Guidance Project (201805031YD9CG15), Xi'an Science and Technology Project (201805031YD9cG15(6))

作者简介: 杨梦熊 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为薄膜技术。

Biography: YANG Meng-xiong (1995—), Male, Master's degree, Research focus: film processing technique.

通讯作者: 惠迎雪 (1974—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为光电功能薄膜及等离子体技术应用。

Corresponding author: XI Ying-xue (1974—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: optical and electronic functional thin film, applied plasma technology.

引文格式: 杨梦熊, 惠迎雪. 基于硅靶和碳化硅靶的碳化硅薄膜磁控溅射工艺对比[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 134-140.

YANG Meng-xiong, HUI Ying-xue. Comparison of Magnetron Sputtering Process of Silicon Carbide Film Based on Silicon and Silicon Carbide Target[J]. Surface technology, 2021, 50(9): 134-140.

similarities and differences of silicon carbide film prepared by the two processes. Silicon carbide film is produced through direct and reactive magnetron sputtering. The film roughness, thickness, deposition rate, composition are analyzed by white light interferometer, profiler, XPS (X-ray photoelectron spectroscopy), and the phase structure and morphology of the film are analyzed by X-ray diffractometer and scanning electron microscope. The experiment shows that based on the reactive sputtering process of silicon target and methane, the deposition rate increases from 11.3 nm/min to 36.5 nm/min between 20% and 70% methane percentage, and the surface roughness R_q value changes a little between 20% and 60% methane percentage, but there is a tendency to increase at 70%. In the methane reactive sputtering process, the ratio of silicon to carbon is adjustable, but the methane gas is not easy to control; in the silicon carbide ceramic target sputtering process, the surface roughness R_q does not change much with the deposition time or the thickness of the film. The ratio of silicon to carbon is close to 1:1. The films prepared by the two processes are all crystalline and 8H-SiC. Comparing the two processes, the deposition rate of reactive sputtering of silicon target is significantly faster than that of silicon carbide ceramic target under the same target power. For silicon target reactive sputtering, the element ratio is adjustable, but the methane gas is not easy to control. For the silicon carbide ceramic target, the deposition process is stable, and the silicon carbon element ratio is close to 1:1.

KEY WORDS: magnetron sputtering; silicon carbide; deposition rate; surface roughness; reactive gas

现代社会发展越来越快,科学技术也日新月异。自人类第一颗太空卫星成功发射以来,空间技术的进步一刻也没有停止过。在空间反射镜方面,碳化硅可以被制成一些轻型结构^[1],是一种常用的镜体材料。常用的碳化硅镜体有两种^[2]:一种是 RB-SiC (反应烧结碳化硅),另一种是 S-SiC (常压烧结碳化硅)。由于 RB-SiC 和 S-SiC 在制备工艺方面存在的问题,导致直接对其抛光后的光学性能难以满足空间光学系统的要求,所以必须对其进行表面改性^[3]。也可以优化碳化硅的制备工艺以达到使用要求^[4],但这在短期内很难取得实质性的突破。

国内外普遍的做法是在碳化硅基底上用 PVD 或 CVD 镀制 Si 改性层^[5-6],然后再对其进行进一步修形、抛光,以达到使用要求。然而,Si 改性层存在与 SiC 陶瓷基底热膨胀系数不匹配的问题,会影响碳化硅高反镜的稳定性。但是在 SiC 陶瓷基底上沉积 SiC 改性层,这样改性层材料与基底材料热膨胀系数的不一致性会大大降低,从而会大大降低碳化硅陶瓷改性层由于热膨胀系数不匹配而发生掉膜、皸裂的风险。

由上述可见,改性层的制备对于碳化硅反射镜非常重要,并且由于碳化硅拥有众多的优异性能^[7],如耐高温、禁带宽度宽^[8]、硬度高、耐磨性好、热导率高、抗热震性好等,使得碳化硅薄膜不仅仅应用于空间高反镜改性层,还应用于耐高温涂层、第三代半导体材料、耐磨涂层等。

目前制备碳化硅涂层的工艺主要是^[9]CVD (化学气相沉积),但是 CVD 工艺存在所需基底温度高、膜层易开裂等缺点。磁控溅射相比于 CVD 具有低温、快速^[10]等优点,且磁控溅射制备碳化硅涂层^[11-13]以直接溅射较为多见,反应溅射较为少见。本试验采用直接磁控溅射、反应磁控溅射制备碳化硅薄膜,探究两种工艺制备的薄膜性质,并对两种工艺的异同进行对比。

1 试验方法及表征

1.1 SiC 薄膜的制备

本试验采用射频磁控溅射法制备 SiC 薄膜。分别采用两种工艺,一种是基于 SiC 陶瓷靶的磁控溅射,另一种是基于 Si 靶、CH₄ 的反应磁控溅射。

在 MSP-400B 型多功能磁控溅射镀膜机上进行镀膜试验,其真空腔室尺寸为 580 mm×420 mm。镀膜前,将本底真空抽至 2×10^{-3} Pa 以下,再向腔室内部通入反应气体,开始镀膜。基底材料均采用晶向 <100> 的单面抛光硅片,其厚度为 0.5 mm。试验前,将裁好的硅片在丙酮和乙醇中超声清洗 15 min,用去离子水冲洗,最后以高纯氮吹干备用。

基于 SiC 陶瓷靶,采用纯度为 99.9% 的 SiC 靶,靶材直径为 60 mm,厚度为 5 mm。工作气体为 Ar,纯度为 99.99%。基于 Si 靶,采用纯度为 99.999% 的 Si 靶,靶材直径为 60 mm,厚度为 5 mm。工作气体为 Ar 和 CH₄,纯度均为 99.99%。

1.2 SiC 薄膜的表征

采用 Talysurf CCI 三维非接触式检测仪测量薄膜厚度。采用美国 J. A. Woollam 公司的 M-2000UI 型椭偏仪,在入射角为 70° 的条件下,测量薄膜样品的折射率。测量中,选用 Cauchy 模型进行拟合,拟合结果评价函数 (MSE) 值均小于 5,认为拟合结果准确。

采用美国 PE 公司的 PHI5400 型 X 光电子能谱仪 (X-ray Photo-electronic Spectroscopy, XPS) 对薄膜样品进行组分分析,扫描范围为 0~1200 eV, XPS 图谱的峰位校正以 C1s 峰为标准。根据公式 $X\% = \left(\frac{A_x}{S_x} \right) / \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{S_i}$ 计算元素的百分含量,其中 X 为元素,

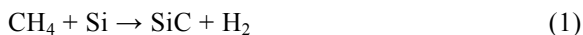
$\left(\frac{A_x}{S_x} \right) / \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{S_i}$ 计算元素的百分含量,其中 X 为元素,

A_x 为该元素的峰面积, S_x 为该元素的原子灵敏度因子。C、Si、O 的原子灵敏度因子分别为 0.205、0.17、0.63。在 XPS 检测时, 为避免表层污染对测量结果的影响, 对每个样品统一刻蚀 15~20 nm。

采用日本岛津 XRD-6000 型 X 射线衍射仪对薄膜进行物相分析。扫描范围为 $20^\circ \sim 100^\circ$, 扫描速度为 $2^\circ/\text{min}$, 扫描步长为 0.02° 。

1.3 试验方法

第一种工艺采用反应磁控溅射制备 SiC 薄膜, 反应气体为甲烷, 工作气体为氩气, 靶材为纯硅靶, 在等离子体条件下反应生成 SiC 薄膜。文献[14]表明, 等离子体增强磁控溅射沉积碳化硅薄膜的反应过程, 是硅元素逐步取代甲烷中的氢元素的过程。总的反应可表示为:



试验保持总气体流量为 50 mL/min, 探究在不同气体流量比下, 薄膜的沉积速率、粗糙度、表层成分的变化规律。表 1 为基于硅靶的相关试验参数。

表 1 基于硅靶的试验参数

Tab.1 Experimental parameters based on silicon targets

RF power/W	Working pressure/Pa	$Q(\text{Ar}) : Q(\text{CH}_4)$
100	0.6	4 : 1, 7 : 3, 3 : 2, 1 : 1, 2 : 3, 3 : 7

第二种工艺采用碳化硅陶瓷靶, 氩气为工作气体, 试验参数见表 2。在其他试验参数相同的情况下, 硅靶工艺 ($Q(\text{Ar}) : Q(\text{CH}_4) = 4 : 1$) 与碳化硅陶瓷靶工艺进行对比。

表 2 基于碳化硅靶的试验参数

Tab.2 Experimental parameters based on silicon carbide targets

RF power/W	Working pressure/Pa	Negative bias/V	Substrate temperature
100	0.6	0	Room temperature

2 结果及讨论

2.1 沉积速率

图 1 为氩气甲烷气体流量比与沉积速率的关系。由图 1 可见, 随着甲烷流量百分比的增大, 薄膜的沉积速率迅速增大, 故甲烷流量百分比对沉积速率有极显著的影响。分析产生此种现象的原因, 可能是由于反应气体 CH_4 的化学活性较强所致。在等离子体条件下, 甲烷分子非常容易被电离分解, 从而产生大量的碳元素沉积在基底上。

图 2 为基于 Si 靶和 SiC 靶, 在同功率、同气压 (基于 Si 靶选取 $Q(\text{Ar}) : Q(\text{CH}_4) = 4 : 1$)、同沉积时间 (30 min) 下薄膜沉积速率的对比。由图 2 可知, 随

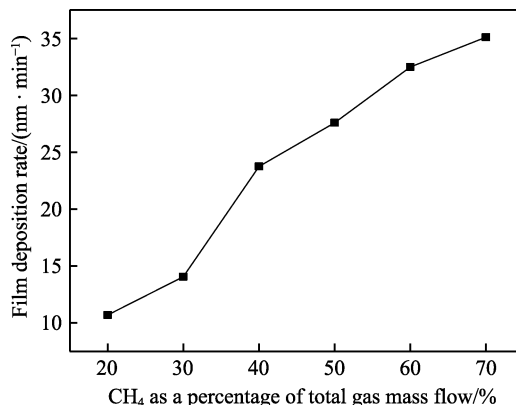


图 1 甲烷流量百分比与沉积速率的关系 (总气体流量 50 mL/min)

Fig.1 Relationship between percentage of CH_4 mass flow percentage and deposition rate (total gas flow is 50 mL/min)

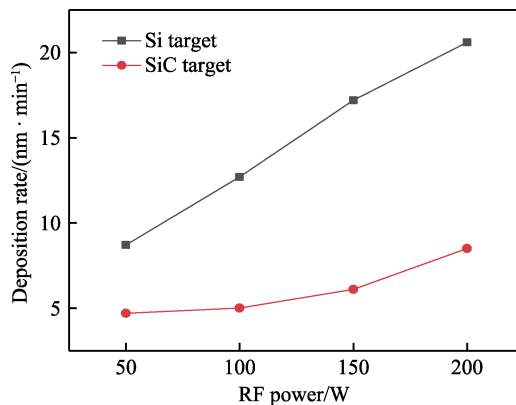


图 2 同功率下基于 Si 靶和 SiC 靶薄膜沉积速率对比
Fig.2 Comparison of thin film deposition rate based on Si target and SiC target at the same power

着射频功率由 50 W 增加到 200 W, 两种工艺的沉积速率都呈线性增大的趋势。对于沉积速率相对于射频功率的斜率, Si 靶大于 SiC 靶。这是由于真空腔室在充足的甲烷、氩气供应下, 提高射频功率会电离更多的甲烷和氩气, 从而加速薄膜的沉积速率。这可能是由于甲烷更容易被电离, 从而导致基于 Si 靶的斜率大于基于 SiC 靶的斜率。

2.2 表面粗糙度

保持其他镀膜参数不变, 分别在 5 组不同气体流量比的条件, 将薄膜沉积厚度控制在 100 nm 左右 (误差在 10 nm 以内), 以探究气体流量比与表面粗糙度之间的关系。

由图 3 可知, 甲烷流量百分比为 20%~60% 时, 薄膜的表面粗糙度基本上保持不变, 波动较小; 甲烷流量百分比为 70% 时, 表面粗糙度有稍微增大的趋势。在此种趋势下, 本应该继续探究更高甲烷流量百分比情况下的薄膜表面粗糙度, 但由于随着甲烷流量百分比的升高, 薄膜沉积速率变得越来越快, 这给膜厚控制带来了很大的困难, 并且甲烷流量百分比升高

后,会有大量的碳沉积在真空腔室内部,给真空室带来很大的污染。

分别基于碳化硅陶瓷靶和硅靶,制备同等厚度的碳化硅薄膜,对比两种工艺对薄膜表面粗糙度的影响。图 4 为相同膜厚下,两种工艺表面粗糙度的变化情况。由图 4 可见,两种工艺镀制的碳化硅薄膜的表面相比于单晶硅基底都发生了粗化现象。同膜厚下,碳化硅靶工艺的粗化现象弱于硅靶工艺。两种工艺制备的碳化硅膜随着膜厚的增加,也都有粗化的趋势,但是不太明显,这与硅基底非常好的表面质量有关。出现这些现象的原因是:薄膜生长时,随着厚度的增加,原子团或晶粒会经历融合、长大的过程,导致薄膜表面粗化。

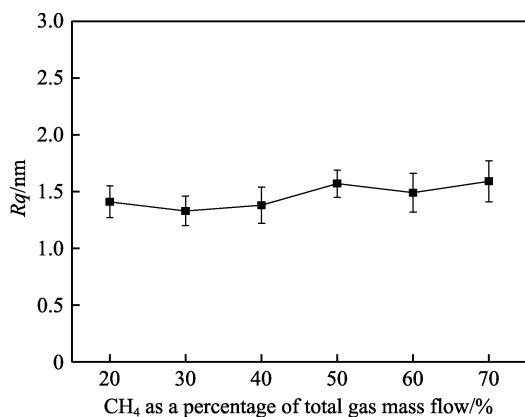


图 3 甲烷流量百分比与粗糙度 R_q 的关系(薄膜厚度一致为 100 nm)
Fig.3 The relationship between the percentage of methane and the roughness R_q (the film thickness is at 100 nm)

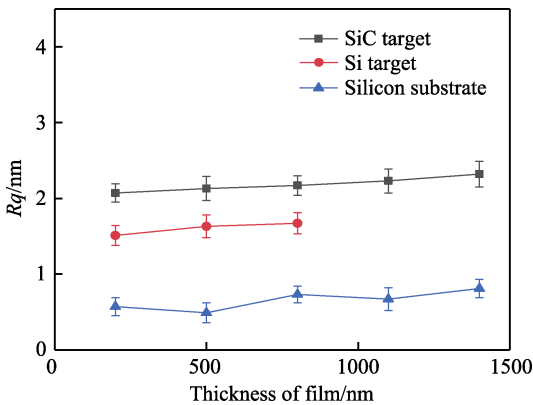


图 4 相同薄膜厚度下两种工艺的表面粗糙度对比
Fig.4 Comparison of surface roughness of the two processes under the same film thickness

2.3 薄膜组分

查阅相关文献与资料^[15],本试验中 Si2p 峰根据 Si-C、Si₂-O、Si₂-O₃ 来拟合,结合能分别为 100.4、100.8、102.6 eV。

2.3.1 基于 Si 靶

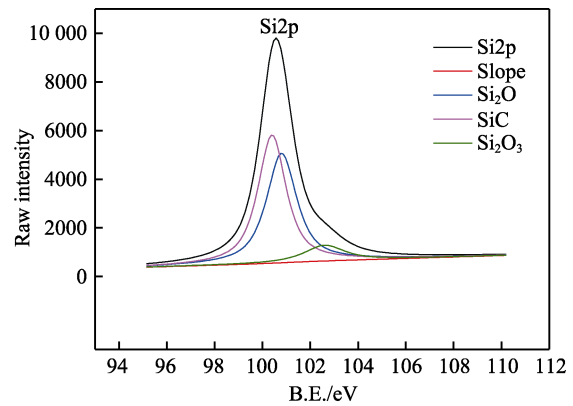
表 3 为不同甲烷流量百分比下所制得的薄膜各

元素的含量。可知,甲烷流量百分比 $\geq 10\%$ 时,薄膜中碳元素的含量很高,达到了 98%以上,没有检测到硅元素的存在,几乎就是一个全碳薄膜。甲烷流量百分比 $<10\%$ 时,薄膜中碳元素含量显著降低,硅元素含量明显增高。5 个样品中,每一个样品都检测到了氧元素的存在,这是由于样品在空气中氧化所致。前三个样品中的氧元素含量明显低于后两个样品中的氧元素含量,可能是由于后两个样品在空气中放置的时间较长所致,也可能是由于后两个样品在做 XPS 检测时的刻蚀深度比前三个样品浅所致。

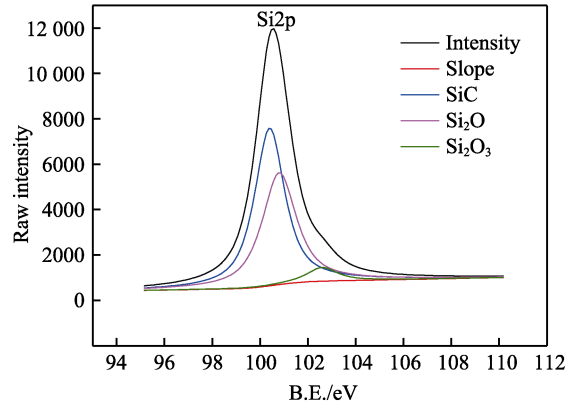
图 5 为甲烷流量百分比为 5%、2.5%时碳化硅薄膜样品 Si2p 峰的 XPS 拟合曲线。表 4 为甲烷流量百分比为 5%、2.5%时硅靶工艺下碳化硅薄膜内的主要成分,可知薄膜内部大量的硅元素与氧元素相结合,

表 3 不同甲烷流量百分比下碳化硅薄膜元素组成
Tab.3 Element composition ratio of silicon carbide thin film under different methane percentages

Methane percentage	at%				
	20%	15%	10%	5%	2.5%
Si	0	0	0	22.2	27.3
C	98.8	98.5	98.8	64.0	58.7
O	1.2	1.5	1.2	13.8	14.0



a 甲烷流量百分比5%



b 甲烷流量百分比2.5%

图 5 硅靶工艺下薄膜样品 Si2p 峰 XPS 拟合曲线
Fig.5 XPS fitted curve of Si2p peak of films samples under silicon target process: a) methane content 2.5%, b) methane content 2.5%

形成的 Si_2O 和 Si_2O_3 约占薄膜内成分的 50% 左右, 此结果可与表 3 中甲烷流量百分比为 5%、2.5% 时碳化硅薄膜中较高的氧元素含量相互佐证。相应地, SiC 成分也约占薄膜内成分的 50%, 可知碳化硅薄膜表面易吸附空气中的氧气。

表 4 硅靶工艺碳化硅薄膜内主要成分

Tab.4 Main component ratio of SiC thin films of silicon target process

Methane percentage	at%	
	5%	2.5%
SiC	47.9	52.9
Si_2O	43.8	42.5
Si_2O_3	8.3	4.6

2.3.2 基于 SiC 靶

选取沉积时间为 90 min 的样品, 进行 XPS 分析, 各元素含量见表 5。由表 5 可知, 膜层中的主要元素为 O、C、Si, 还有少量的 N 元素。出现少量的氮元素可能是因为, 制备薄膜前, 在其他试验中往真空腔室内部通入过氮气的缘故, 存在少量的氮元素污染。出现氧元素是由于表层氧化所致。膜层中的硅碳原子比接近 1:1, 这与文献[16]中得到的结果相近。膜层中的硅碳原子比与 SiC 靶材存在一定的偏差, 这是由于不同元素的溅射产额差异所致。

表 5 SiC 靶工艺下薄膜元素组成比例

Tab.5 Thin film element composition ratio under silicon carbide target process

at%			
O	C	Si	N
18.1	40.1	38.9	2.9

碳化硅靶工艺下, $\text{Si}2\text{p}$ 峰根据 Si-C 、 $\text{Si}_2\text{-O}$ 、 $\text{Si}_2\text{-O}_3$ 拟合, 图 6 为薄膜样品 $\text{Si}2\text{p}$ 峰的 XPS 拟合曲线。表 6 为碳化硅靶工艺下薄膜内主要成分。可知基于碳化

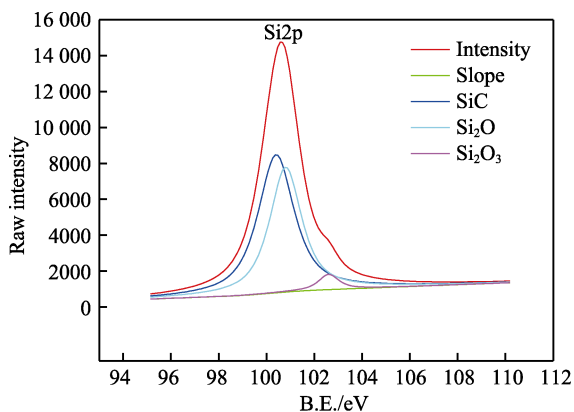


图 6 碳化硅靶工艺薄膜样品 $\text{Si}2\text{p}$ 峰 XPS 拟合曲线

Fig.6 XPS fitting curve of $\text{Si}2\text{p}$ peak of thin film sample under silicon carbide target process

硅靶的薄膜样品, 表层氧化比较严重, 薄膜中存在大量的硅氧化物。硅氧化物的化学性质稳定且耐高温、抗氧化, 可在某些场合下应用于保护涂层。

2.4 晶体结构

由 XPS 的检测结果可知, 甲烷流量百分比为 5%、2.5% 时, 薄膜中的硅碳原子比最接近 1:1, 故分析这两组试验的薄膜晶体结构。文献[17]中, 采用碳化硅陶瓷靶, 在室温下, 于 $\text{Si}(111)$ 衬底上沉积的碳化硅薄膜为非晶结构, 含有少量晶态成分。文献[18]中, 采用硅靶与甲烷反应磁控溅射, 得到的晶型为 8H- SiC 结构。

图 7、图 8 分别为本试验所制备薄膜的 SEM 形貌和 XRD 图谱。参考文献[19-20], 分析 XRD 图谱得出, 谱图中 33° 为硅基底的衍射峰, 61.5° 和 65.9° 分别为 8H- $\text{SiC}(10\bar{1}11)$ 和 $(10\bar{1}12)$ 。结合图 7、图 8 进行分析可知, 基于碳化硅陶瓷靶的直接溅射和基于硅靶的反应溅射所制备出的碳化硅薄膜均为晶态薄膜, 且为 8H- SiC 。

将图 8 基于碳化硅靶薄膜的 XRD 结果代入谢乐方程:

$$S = \frac{K\lambda}{FW(S) \cdot \cos(\theta)} \quad (2)$$

式中: S 表示晶粒尺寸 (nm); K 为常数, 一般取 $K=1$; λ 是 X 射线的波长 (nm); $FW(S)$ 是试样宽化 ($^\circ$); θ 则是衍射角 ($^\circ$)。运用 jade 软件算得晶粒尺寸约为 17 nm, 与 SEM 结果基本符合。

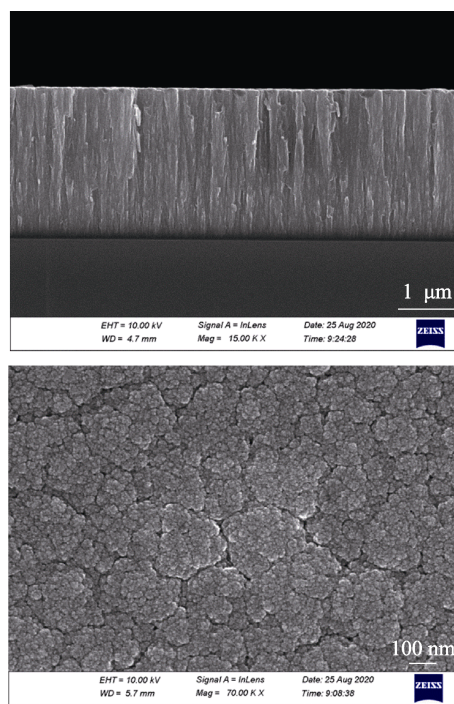


图 7 基于碳化硅靶薄膜的断面及表面 (沉积时间为 3 h)
Fig.7 Based on the cross section and surface of the film by silicon carbide target (the deposition time is 3 h)

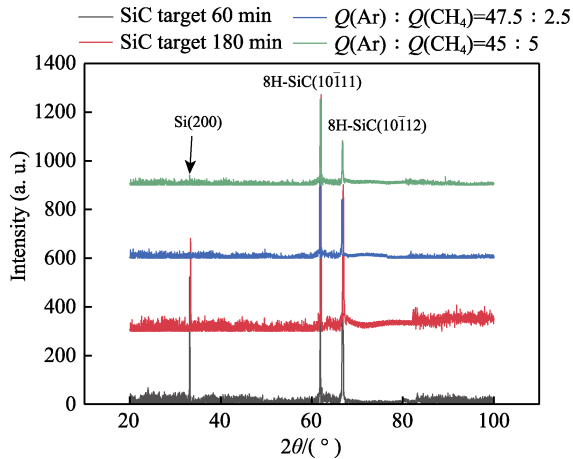


图 8 两种工艺薄膜 XRD 图谱

Fig.8 XRD patterns of thin films of two processes

2.5 两种工艺的对比分析

由以上分析可知,基于硅靶反应溅射与基于碳化硅陶瓷靶直接溅射相比,前者的沉积速率高于后者。此外,虽然前者膜层中的硅碳原子比可调,但是在试验中较难控制。可能是反应磁控溅射存在稳定性差的固有缺陷^[21-23]或者甲烷气体较活跃引起的,可用其他碳氢类气体再做尝试。基于碳化硅陶瓷靶膜层的硅碳原子比接近于 1:1,薄膜沉积过程较稳定,容易控制。

基于前期试验规律的基础上,在基于 Si 靶反应溅射、基于 SiC 陶瓷靶直接溅射工艺下,控制两种制备方法相应的工艺参数,都制备出厚度为(50±10) nm 的硅碳原子比接近 1:1 的碳化硅薄膜。使用椭圆偏振仪,选用 Cauchy 拟合模型、评价函数(MSE)值小于 5,分别测量两种工艺制备出的碳化硅薄膜的折射率。结果发现,基于 Si 靶的反应溅射制备的碳化硅薄膜折射率为 1.82,基于 SiC 陶瓷靶工艺制备的碳化硅薄膜折射率为 2.14,前者折射率小于后者,说明基于 SiC 靶工艺的碳化硅薄膜的致密度大于 Si 靶工艺薄膜。

3 结论

1) 基于硅靶和甲烷反应溅射工艺,在甲烷流量百分比从 20%增至 70%时,沉积速率不断升高,薄膜表面粗糙度 R_q 在甲烷流量百分比为 20%~60%时变化不大,但在 70%时有增大的趋势。

2) 基于碳化硅陶瓷靶直接溅射工艺,薄膜表面粗糙度 R_q 随沉积时间(对应膜厚 200、500、800、1100、1400 nm),变化不大,硅碳原子比接近 1:1。

3) 两种工艺相互比较,各有特点。基于硅靶反应溅射,薄膜元素比可调控,沉积速率快,但反应气体不容易控制;基于碳化硅陶瓷靶直接溅射,沉积过程稳定,但沉积速率较慢。两种工艺制备的薄膜均为晶态,且为 8H-SiC。基于碳化硅陶瓷靶的薄膜致密度大于基于硅靶的薄膜。

参考文献:

- [1] 张舸, 赵汝成, 赵文兴. 大尺寸轻型碳化硅质镜体的制造与材料性能测试[J]. 光学·精密工程, 2006, 14(5): 759-763.
ZHANG Ge, ZHAO Ru-cheng, ZHAO Wen-xing. Fabrication and test of large scale light-weight SiC mirror[J]. Optics and precision engineering, 2006, 14(5): 759-763.
- [2] 高劲松, 申振峰, 王笑夷, 等. 空间反射镜基底材料碳化硅表面改性研究[J]. 光学学报, 2009, 29(9): 2624-2629.
GAO Jin-song, SHEN Zhen-feng, WANG Xiao-yi, et al. Research on surface modification of space used SiC mirror[J]. Acta optica sinica, 2009, 29(9): 2624-2629.
- [3] 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]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(2): 71-78.
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 journal of optics and applied optics, 2009, 2(2): 71-78.
- [4] SUYAMA S, ITOH Y. NTSIC (new technology silicon carbide): Evaluation of microstructure of high-strength reaction-sintered silicon carbide for optical mirror[C] //Proc optical materials and structures technologies. San Diego: SPIE, 2007.
- [5] 刘桂玲, 黄政仁, 刘学建, 等. 碳化硅表面改性和光学镜面加工的研究现状[J]. 无机材料学报, 2007, 22(5): 769-774.
LIU Gui-ling, HUANG Zheng-ren, LIU Xue-jian, et al. Recent developments of surface coatings and optical fabrication of silicon carbide[J]. Journal of inorganic materials, 2007, 22(5): 769-774.
- [6] 刘震, 高劲松, 刘海, 等. 2 m 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.
LIU Zhen, GAO Jin-song, LIU Hai, et al. Surface modification of 2 m RB-SiC substrate by magnetron sputtering[J]. Optics and precision engineering, 2016, 24(7): 1557-1563.
- [7] 郝斌, 陈立君, 杨霞. 反应烧结制备 SiC 陶瓷的研究进展[J]. 陶瓷, 2008(9): 13-17.
HAO Bin, CHEN Li-jun, YANG Xia. Study on preparation of reaction-sintered silicon carbide ceramic[J]. Ceramics, 2008(9): 13-17.
- [8] 李玉国, 王强, 石礼伟, 等. 磁控溅射碳化硅膜的制备及其光致发光特性[J]. 半导体光电, 2004, 25(6): 474-476.
LI Yu-guo, WANG Qiang, SHI Li-wei, et al. Photoluminescence of SiC film formed by magnetron sputtering[J]. Semiconductor optoelectronics, 2004, 25(6): 474-476.
- [9] WEI Jia-shen, CHEN Bang-tao, POENAR D P, et al. Low-stress PECVD amorphous silicon carbide (α -SiC)

- layers for biomedical application[C]//Micro- and nanotechnology: Materials, processes, packaging, and systems. Melbourne: SPIE, 2008.
- [10] WANG M, DIAO X G, HUANG A P, et al. Influence of substrate bias on the composition of SiC thin films fabricated by PECVD and underlying mechanism[J]. Surface and coatings technology, 2007, 201(15): 6777-6780.
- [11] 安霞, 庄惠照, 薛成山, 等. 石英衬底上磁控溅射 SiC 膜退火形成 SiC 纳米线[J]. 微纳电子技术, 2002, 39(1): 37-39.
- AN Xia, ZHUANG Hui-zhao, XUE Cheng-shan, et al. Formation of SiC nanowires on SiO₂ substrate by magnetron sputtering and annealing[J]. Semiconductor information, 2002, 39(1): 37-39.
- [12] 安霞, 庄惠照, 杨利, 等. 在(111)Si 衬底上磁控溅射纳米 SiC 薄膜的退火效应[J]. 微纳电子技术, 2002, 39(5): 20-24.
- AN Xia, ZHUANG Hui-zhao, YANG Li, et al. Annealing effects of nano-SiC film grown on Si (111) by magnetron sputtering method[J]. Semiconductor information, 2002, 39(5): 20-24.
- [13] 周继承, 郑旭强. 磁控溅射 SiC 薄膜及其光电特性研究[J]. 功能材料, 2007, 38(2): 190-192.
- ZHOU Ji-cheng, ZHENG Xu-qiang. The optoelectronic properties of SiC films deposited by RF magnetron sputtering[J]. Journal of functional materials, 2007, 38(2): 190-192.
- [14] 孙文立, 徐军, 陆文琪. 等离子体增强磁控溅射沉积碳化硅薄膜的化学结构与成膜机理[J]. 物理化学学报, 2010, 26(8): 2311-2316.
- SUN Wen-li, XU Jun, LU Wen-qi. Chemical structure and growth mechanism of a-Si_xC_{1-x}: H films prepared by plasma enhanced magnetron sputtering[J]. Acta physico-chimica sinica, 2010, 26(8): 2311-2316.
- [15] CIUPINA V, LUNGU C P, VLADOIU R, et al. SiC multi-layer protective coating on carbon obtained by thermionic vacuum arc method[C]//Proc nanostructured thin films. San Diego: SPIE, 2013.
- [16] 王英华, 汤海鹏, 田民波, 等. RF 溅射碳化硅薄膜的结构研究[J]. 半导体学报, 1989, 10(7): 483-488.
- WANG Ying-hua, TANG Hai-peng, TIAN Min-bo. Structural research of RF-sputtered silicon carbide[J]. Chinese journal of semiconductors, 1989, 10(7): 483-488.
- [17] 安霞, 庄惠照, 杨莺歌, 等. 在 Si(111)上磁控溅射碳化硅薄膜的 H₂ 退火效应[J]. 半导体学报, 2002, 23(6): 593-598.
- AN Xia, ZHUANG Hui-zhao, YANG Ying-ge, et al. Effects of H₂ annealing on silicon carbide films grown on Si(111) by magnetron sputtering method[J]. Chinese journal of semiconductors, 2002, 23(6): 593-598.
- [18] QAMAR A, MAHMOOD A, SARWAR T, et al. Synthesis and characterization of porous crystalline SiC thin films prepared by radio frequency reactive magnetron sputtering technique[J]. Applied surface science, 2011, 257(15): 6923-6927.
- [19] 艾学正. 石墨衬底上制备 SiC 薄膜的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
- AI Xue-zheng. Study on SiC films prepared on graphite substrate[M]. Guiyang: Guizhou University, 2016.
- [20] 姚靖懿. 磁控溅射制备 SiC 薄膜及其电阻温度特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- YAO Jing-yi. Research on growth and resistance-temperature properties of SiC thin films deposited by RF magnetron sputtering[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [21] YIN Shi-zhuo, ZHOU Hao-nan, CHEN Chang-jiang, et al. Rapid silicon carbide micro-crystal growth by high power CO₂ laser[C]//Photonic fiber and crystal devices: Advances in materials and innovations in device applications. San Diego: SPIE, 2017.
- [22] 王博, 魏世丞, 王玉江, 等. 磁控溅射技术制备二氧化钛薄膜研究进展[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 257-264.
- WANG Bo, WEI Shi-cheng, WANG Yu-jiang, et al. Titanium-oxide thin films prepared by magnetron sputtering method[J]. Surface technology, 2018, 47(8): 257-264.
- [23] 茅昕辉, 陈国平, 蔡炳初. 反应磁控溅射的进展[J]. 真空, 2001, 38(4): 1-7.
- MAO Xin-hui, CHEN Guo-ping, CAI Bing-chu. Advance in reactive magnetron sputtering[J]. Vacuum, 2001, 38(4): 1-7.