

文章编号: 1672-8785(2024)06-0016-10

基于 PECVD 的 SiO_2 薄膜 制备研究进展

李沐泽 郝永芹*

(长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130000)

摘 要: 二氧化硅(SiO_2)薄膜因其卓越的光学性能, 在半导体器件、集成电路、光学涂层等领域具有巨大的应用潜力。然而, SiO_2 薄膜制备过程中面临表面粗糙度、杂质控制和致密性等问题。为解决这些问题, 研究者们通过工艺改进和表面修饰等手段来提高 SiO_2 薄膜的性能。在众多 SiO_2 薄膜制备技术中, 等离子体增强化学气相沉积(Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)技术由于沉积 SiO_2 薄膜所需温度低、原位生长等优势, 成为制备 SiO_2 薄膜最常用的方法。综述了用 PECVD 技术制备 SiO_2 薄膜的发展历程, 并探讨了关键工艺参数和后处理工艺对薄膜质量的影响。对 PECVD 技术的深入研究, 有助于实现对 SiO_2 薄膜生长的更精准控制, 进一步拓展其广泛的应用前景。

关键词: PECVD; SiO_2 ; 致密性; 折射率; 粗糙度

中图分类号: O472 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.06.002

Research Progress on the Preparation of SiO_2 Thin Films Based on PECVD

LI Mu-ze, Hao Yong-qin*

(National Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of
Science and Technology, Changchun 130000, China)

Abstract: Silica (SiO_2) thin films have enormous potential for applications in semiconductor devices, integrated circuits, optical coatings, and other fields due to their excellent optical properties. However, the preparation process of SiO_2 thin films faces some issues such as surface roughness, impurity control, and compactness. To address these issues, researchers have improved the performance of SiO_2 thin films through process improvements and surface modifications. Among the many techniques for preparing SiO_2 thin films, plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) has become the most commonly used method for preparing SiO_2 thin films due to its advantages such as low temperature required for deposition and in-situ growth. This article reviews the development of preparing SiO_2 thin films using PECVD technology, and explores the influence of key process parameters and post-treatment processes on the quality of the films. The in-depth study of

收稿日期: 2024-01-17

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20200401073GX)

作者简介: 李沐泽(1998-), 男, 吉林大安人, 硕士研究生, 主要研究方向为垂直腔面发射激光器。

*通讯作者: E-mail: hyq72081220@aliyun.com

PECVD technology helps to achieve more precise control of SiO_2 film growth and further expand its broad application prospects.

Key words: PECVD; SiO_2 ; compactness; refractive index; roughness

0 引言

SiO_2 薄膜具有光电性能优异、硬度高、耐磨性良好、阻隔性卓越、抗侵蚀能力强以及介电性能稳定等特点, 已成为现代光学仪器和微电子设备中使用最频繁的一种光学薄膜^[1-3]。在半导体激光器的制备过程中, SiO_2 薄膜不仅被用作光刻过程中的硬掩模, 而且还能用于半导体激光器件的腔面膜^[4]。

常见的 SiO_2 薄膜制备方法有物理气相沉积(Physical Vapor Deposition, PVD)、化学气相沉积(Cheical Vapor Deposition, CVD)、氧化法、溶胶凝胶法和液相沉积法等。根据光电子设备领域的应用需求选择合适的制备方法^[5]。用磁控溅射法制备 SiO_2 薄膜属于 PVD, 制备出的 SiO_2 薄膜结构的空隙较多, 导致 SiO_2 薄膜表面的粗糙度和内部结构的致密性变差。原子层沉积(Atomic Layer Deposition, ALD)是一种衍生自 CVD 的精密薄膜沉积技术, 是将物质材料以单原子膜的形式沉积在衬底表面的技术。尽管它的精确度非常高, 但是生长一定厚度的 SiO_2 薄膜需要较长的时间^[6]。而用氧化法制备 SiO_2 薄膜所需要的高温对衬底的影响较大。用 PECVD 方法制备 SiO_2 薄膜具有沉积温度低、生长速率快、薄膜致密性高等优势^[7], 特别是沉积过程对衬底结构的影响小, 可规避由高温成膜引起的不良影响(薄膜晶粒过大, 薄膜与衬底之间的应力增大等)。近年来, PECVD 已成为在光电子器件领域生产 SiO_2 薄膜的首选技术^[8]。

本文在分析 PECVD 法制备 SiO_2 薄膜的基础上, 综述了近年来国内外研究人员为提高薄膜质量开展的相关研究工作, 总结分析了沉积温度、腔内压强、气体流量比等与薄膜的粗糙度、致密度、生长速度、折射率之间的关系, 并探讨了后处理对薄膜质量的影响。

1 PECVD 制备 SiO_2 薄膜的机理

典型的 PECVD 工作原理如图 1 所示。PECVD 与 CVD 制备 SiO_2 薄膜的区别在于 PECVD 腔室内等离子体中充斥着大量的高能电子。这些电子能够提供制备 SiO_2 薄膜过程中所需的激活能, 可以显著降低沉积 SiO_2 薄膜所需的温度, 使原来需在高温下才能进行的 CVD 过程能够在较低温度下实现。

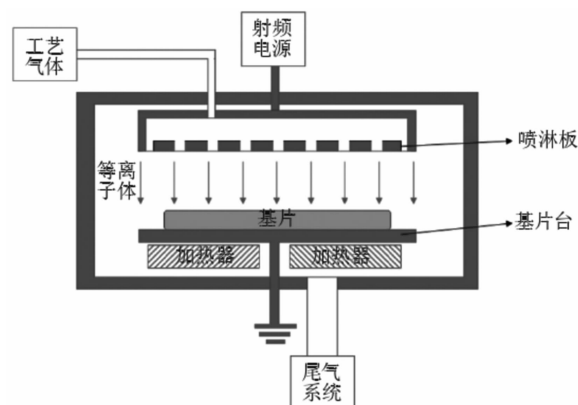
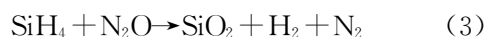
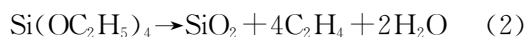
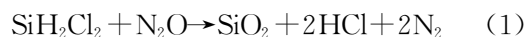


图 1 PECVD 系统的原理图^[9]

就 PECVD 系统而言, 制备 SiO_2 薄膜可采用的气体源也有很多。通常采用的气体源主要有 $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ 及 $\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$, 发生的反应分别为



采用 $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{N}_2\text{O}$ 气体制备 SiO_2 薄膜时, $\text{SiH}_2\text{Cl}_2\text{-N}_2\text{O}$ 系统有 Cl 污染隐患, 可能会导致器件可靠性降低^[10]。而 $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ 具有一定的毒性。目前最常用的是 $\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ 气体: SiH_4 的平均动能为 8.13 eV, 与 O 离子平均动能 8.11 eV 基本相当; 氮离子的平均动能为 7.62 eV。在同一反应进程内, SiH_4 与 O 离子的动能基本保持一致, N 离子的动能均比 O 离子和 SiH_4 衰减快, 维持时间短。另一个原

因是大量 N 离子已经在 N_2O 开始电离产生 O 离子时与其重新结合生成 NO 挥发气体而被排除, 因此 N 离子再与 SiH_4 发生碰撞反应的概率较低。在反应腔室内, 首先 N_2O 在等离子体中被分解, 产生 O 原子或 O 自由基, 被激活的 O 与 SiH_4 反应, 生成 $(SiH_3)_2O$; 该反应物被吸附在衬底表面, 与 O 原子反应生成接近化学计量比的 SiO_2 ^[11]。

2 薄膜质量的影响因素分析

由于具有高致密性和合适的折射率, SiO_2 薄膜是保护膜、光学薄膜和阻挡层的理想选择。 SiO_2 薄膜性质和光电性能受到 PECVD 系统中衬底温度、腔室压强、气体流量比、射频源和后处理的影响。

2.1 衬底温度对薄膜质量的影响

衬底温度变化会影响沉积到衬底表面原子的扩散能力^[12], 扩散能力则会影响薄膜的内部结构和表面分子的排列。衬底温度在薄膜沉积过程中的影响主要表现在薄膜的致密性、沉积速率和粗糙度^[13]。

2016 年, 肖和平等针对 SiO_2 薄膜致密性的问题, 探究 SiO_2 薄膜折射率及其沉积速度与衬底温度之间的关系。通过薄膜测厚仪确定了 SiO_2 薄膜的折射率和沉积速率, 发现升高衬底温度可以提高折射率和沉积速率, 但是过高的温度会降低折射率和沉积速率, 如图 2 所示^[14]。

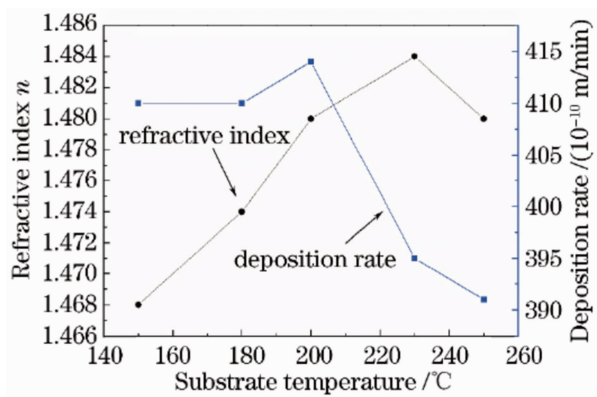


图 2 SiO_2 薄膜致密性及沉积速率随衬底温度的变化^[14]

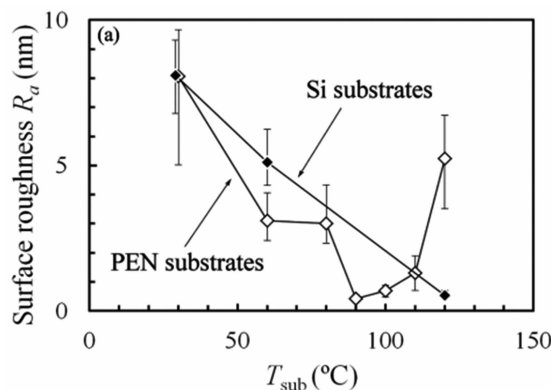


图 3 不同衬底的薄膜粗糙度随衬底温度的变化^[15]

2019 年, Kakiuchi H 等针对衬底温度对 SiO_2 薄膜粗糙度影响的问题, 采用两种材料作为衬底, 研究了不同衬底温度对 SiO_2 薄膜质量的影响。通过原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) 测量确定了在不同衬底温度下沉积的 SiO_2 薄膜的粗糙度, 发现随着衬底温度的升高, SiO_2 薄膜的粗糙度会下降, 如图 3 所示^[15]。

随着科技的发展和工艺水平的提高, 肖和平和 Kakiuchi H 等对衬底温度与薄膜品质之间的关系进行了深入研究, 发现调整衬底温度可以影响成膜气体分子或原子在衬底表面的吸附和扩散作用, 从而影响 SiO_2 薄膜的质量和性能。该结果为薄膜与衬底表面的吸附以及薄膜品质的改善提供了理论基础。

2.2 压强对薄膜质量的影响

影响薄膜质量的因素主要有反应离子密度和离子扩散系数。反应腔室内的压强会对反应中的离子密度和离子扩散系数产生影响。当压强减小时, 分子的平均自由程增大, 扩散系数也会增大, 意味着反应物输运快。因此反应气体之间能充分反应, 薄膜的厚度更加均匀, 可改善杂质分布^[16]。

2011 年, 张霄将 SiO_2 薄膜制成光学薄膜, 并对压强与 SiO_2 薄膜折射率及沉积速度之间的关系进行了研究。他发现适当增大压强时, 虽然可以提高沉积速率, 但薄膜结构也随之松散, 折射率下降; 进一步增大压强, 使气体反应更加充分并趋于饱和, 薄膜结构也更加稳

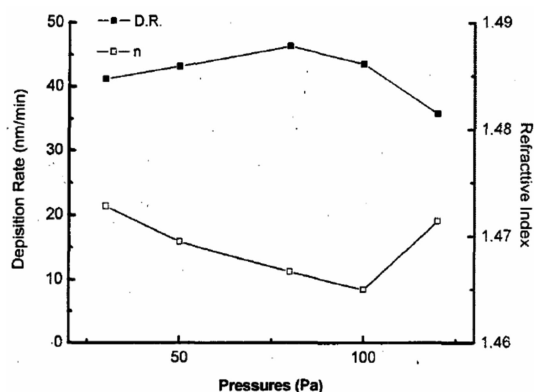


图 4 SiO_2 薄膜沉积速率、折射率随工作压强的变化^[17]

定, 折射率升高, 如图 4 所示^[17]。

2015 年, 朱恒伟等将 SiO_2 薄膜作为阻隔图层, 针对 SiO_2 薄膜结构致密性不足的问题, 研究了腔室压强对 SiO_2 薄膜致密性的影响。他们发现, 随着工作压强增大, SiO_2 颗粒的尺寸增大; 过大的颗粒导致薄膜致密性下降, 进而影响阻隔效果(见图 5)^[18]。

2015 年, 冯兴联等对 PECVD 制备 SiO_2 薄膜的工艺展开了研究。他们发现薄膜沉积速率与腔室压强呈先增大后减小的趋势, 而折射

率则呈相反变化, 如图 6 和图 7 所示。随着压强增大, 反应气体源的化学键变短, 增强了化学键的强度, 增加了薄膜的致密性。这表明调整腔室压强可以改善 SiO_2 薄膜的致密性^[5]。

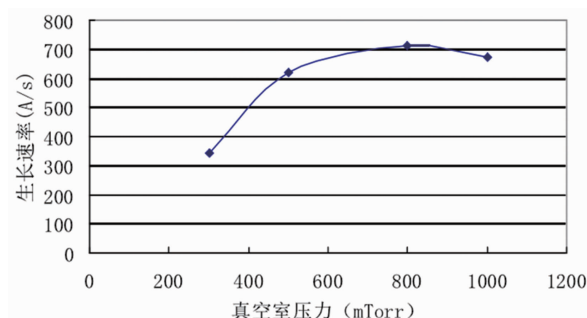


图 6 薄膜沉积速率随压强的变化^[5]

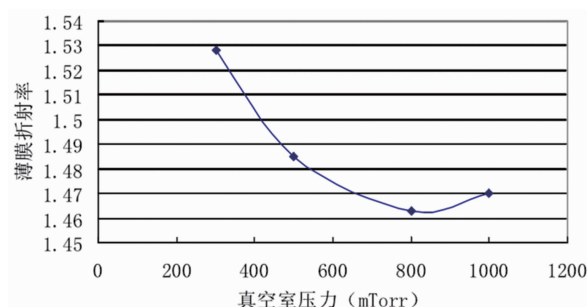


图 7 薄膜折射率随压强的变化^[5]

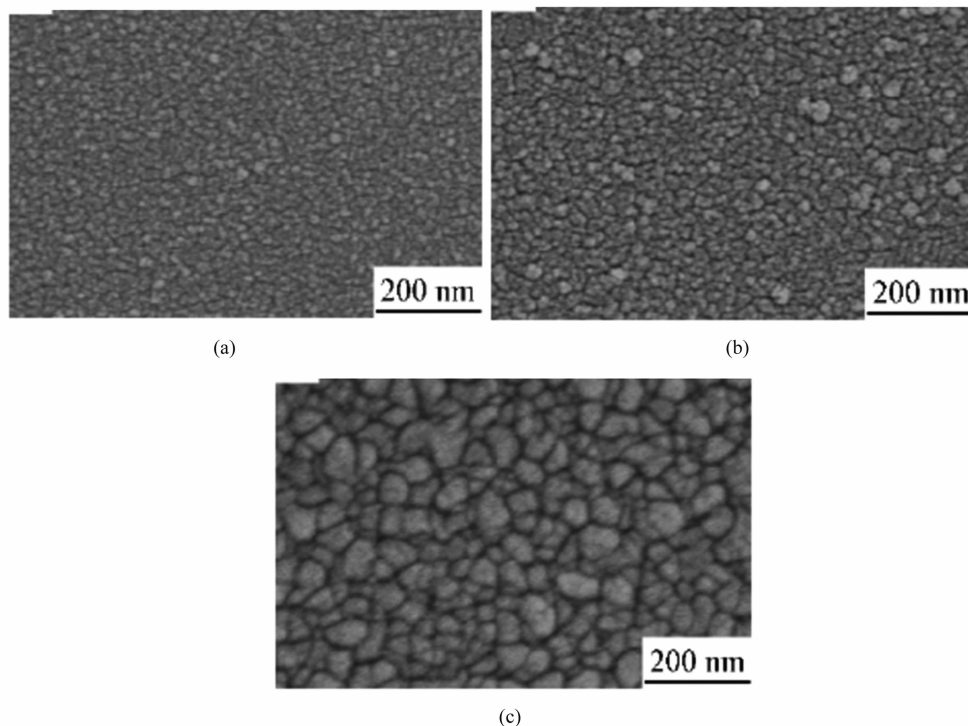


图 5 不同压强下沉积的 SiO_2 薄膜的扫描电镜图^[18]: (a) 50 Pa; (b) 70 Pa; (c) 90 Pa

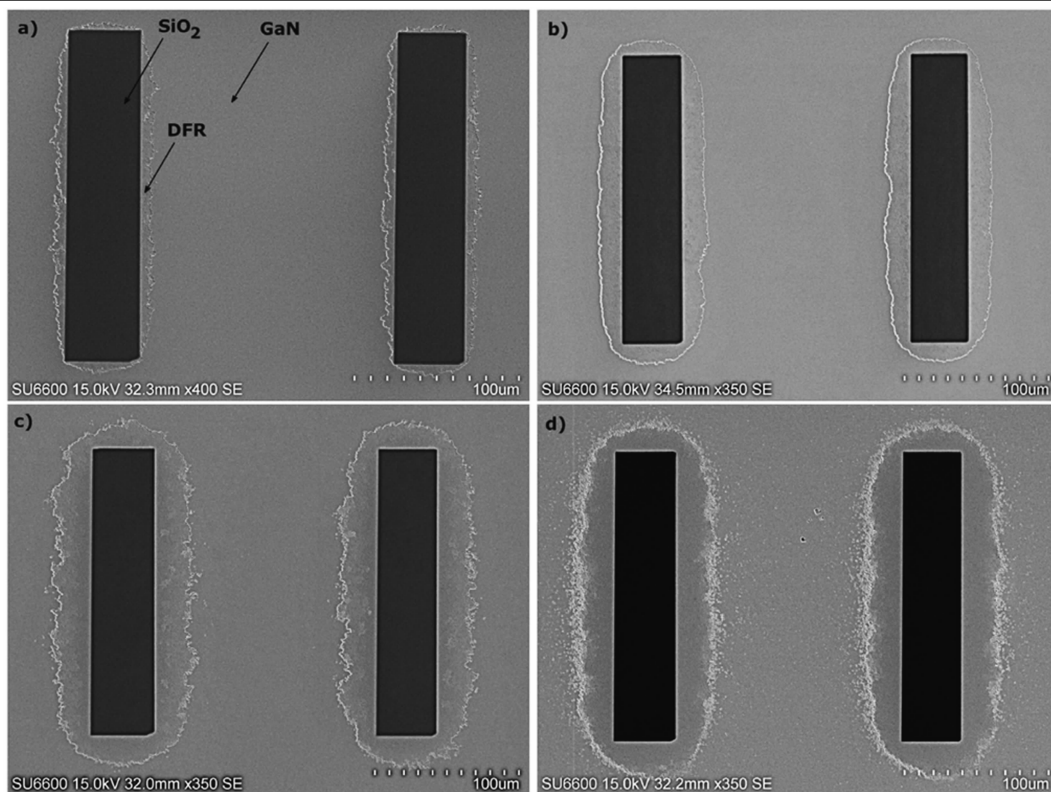


图 8 不同压强条件下 SiO_2 薄膜的 SEM 图^[19]: (a) 250 hPa; (b) 350 hPa; (C) 500 hPa; (d) 800 hPa

2023 年, Stepniak M 等人发现制备 SiO_2 掩膜时掩膜四周出现了“寄生条纹”现象。在后续的刻蚀过程中, 这些寄生掩蔽条纹会转移到下方的基片上, 导致刻蚀图层失真。通过分析 SiO_2 薄膜沉积原理, 发现腔室压强减小后, 寄生掩蔽的条纹会逐渐减小, 如图 8 所示^[19]。

随着应用研究的深入, 人们对 SiO_2 薄膜的沉积速率和致密性提出了进一步的要求。张霄、朱恒伟、冯兴联以及 Stepniak M 等研究人员对腔室压强与 SiO_2 薄膜品质之间的关系进行了深入探讨。他们揭示了腔室压强与气体分子之间的平均自由程的关系, 进而影响 SiO_2 薄膜的沉积速率、致密性和折射率。适当的压强可以改善薄膜的质量。这些研究为提升 SiO_2 薄膜的质量和性能打下了坚实的基础。

2.3 气体流量比对薄膜质量的影响

气体流量比影响的是薄膜元素比例, 元素比例的不同也会影响薄膜的光学性质。

2010 年, 杭凌侠等针对气体组分影响薄膜光学性质的问题, 采用不同比例的 $\text{N}_2\text{O}/$

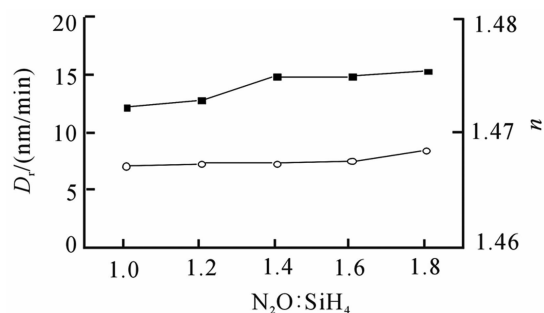
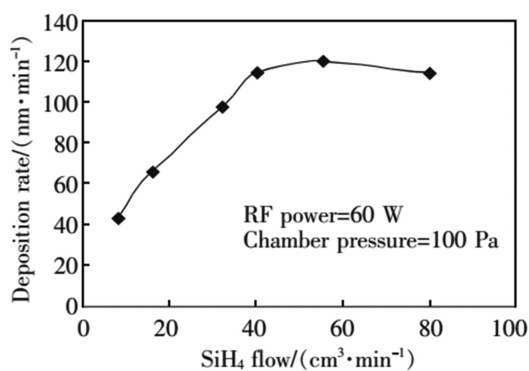
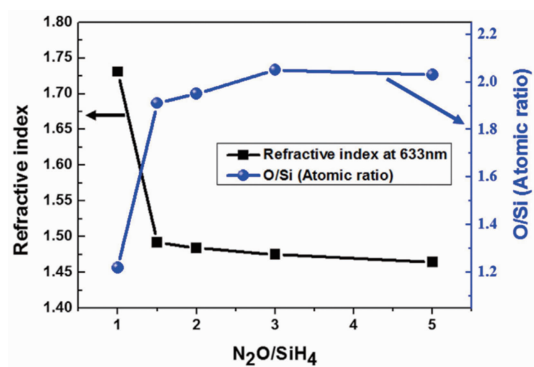


图 9 沉积速率、折射率随 $\text{N}_2\text{O}/\text{SiH}_4$ 气流比的变化^[20]

SiH_4 , 研究其对 SiO_2 薄膜的沉积速率和折射率的影响。结果表明, 增大气体流量比会提高沉积速率以及折射率(见图 9)^[20]。

2013 年, 李东玲等针对金属层间介质以及微机电系统等对 SiO_2 薄膜的需求, 研究了用 PECVD 技术制备 SiO_2 薄膜时所能达到的最高沉积速率。通过调整 SiH_4 流量发现, 增加 SiH_4 可提高沉积速率(见图 10)。然而, 一旦达到饱和后, 沉积速率便不再发生变化^[21]。

2018 年, Cho S K 等将高质量的 SiO_2 薄膜作为研究对象, 探究了 $\text{N}_2\text{O}/\text{SiH}_4$ 气体流量

图 10 SiO₂ 膜沉积速率随 SiH₄ 流量的变化^[21]图 11 SiO₂ 薄膜的折射率和 O/Si 原子比随 N₂O/SiH₄ 气体流量比的变化^[22]

比对 SiO₂ 薄膜折射率和薄膜成分的影响。他们发现增加 N₂O/SiH₄ 的比例能够提高薄膜的致密性, 同时也可以获得最佳化学计量比, 如图 11 所示^[22]。

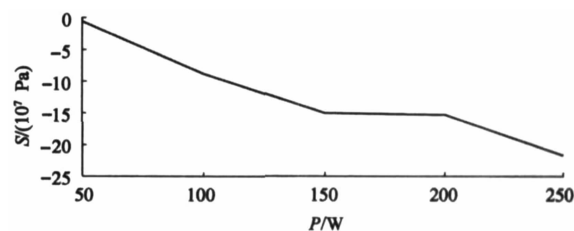
在科技迅速发展的当今时代, 一系列创新性的研究为我们深入理解和改善薄膜的光学性质提供了新的视角。杭凌侠、李东玲以及 Cho S K 等对气体流量比与 SiO₂ 薄膜光学性质之间的关系进行了深入研究。通过调整气体流量比, 可以有效控制 SiO₂ 薄膜的光学性质, 从而满足不同领域对薄膜性能的需求, 为拓宽 SiO₂ 薄膜的应用领域提供了可能。

2.4 射频源对薄膜质量的影响

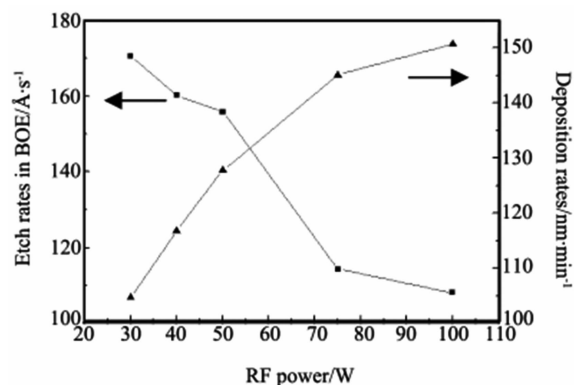
在 PECVD 工艺中, 射频源和等离子体的特性密切相关^[23]。研究指出, 随着射频功率变化, 气体分子的耗散能量增加, 进而引发更强烈的分子解离^[24], 产生更多离子和反应性物质, 提高了薄膜的沉积速率。然而, 尽管高的射频功率可以改善薄膜质量, 但由于更高能

量的离子轰击, 也可能引入应力和缺陷。

2008 年, 孙俊峰等针对薄膜与衬底之间的结构差异以及制造过程中产生的应力问题, 分析了 PECVD 制备 SiO₂ 薄膜的机理, 找到了应力与射频功率之间的关系: 减小射频功率, 增大了活性粒子整齐排列概率, 减小了膜层之间的应力, 如图 12 所示^[25]。

图 12 SiO₂ 薄膜应力随射频功率的变化^[25]

2013 年, 郭文涛等针对 SiO₂ 薄膜结构的松散导致的抗腐蚀能力差的问题, 分析了制备 SiO₂ 薄膜的反应机理。他们发现 H 离子能够以 Si-H、Si-OH 和 H-O-H 的形式存在, H 离子的存在会使薄膜变得疏松。通过调整射频功率, 降低 H 离子的含量, 进而影响沉积速度; 与此同时, H 离子含量更低, 薄膜的致密性更好, 如图 13 所示^[26]。

图 13 刻蚀速率和沉积速率随射频功率的变化^[26]

2020 年, Chaiwong C 等针对连续的射频源导致的亚氧化物含量高、等离子体稳定性差的问题, 探究了在不同频率脉冲射频源下制备的 SiO₂ 薄膜之间的差异。通过调节射频源的频率, 发现较高的射频频率可以提高 SiO₂ 薄膜的沉积速率, 但是过高的频率会导致 SiO₂ 薄膜表面粗糙度的升高, 如图 14 所示^[27]。

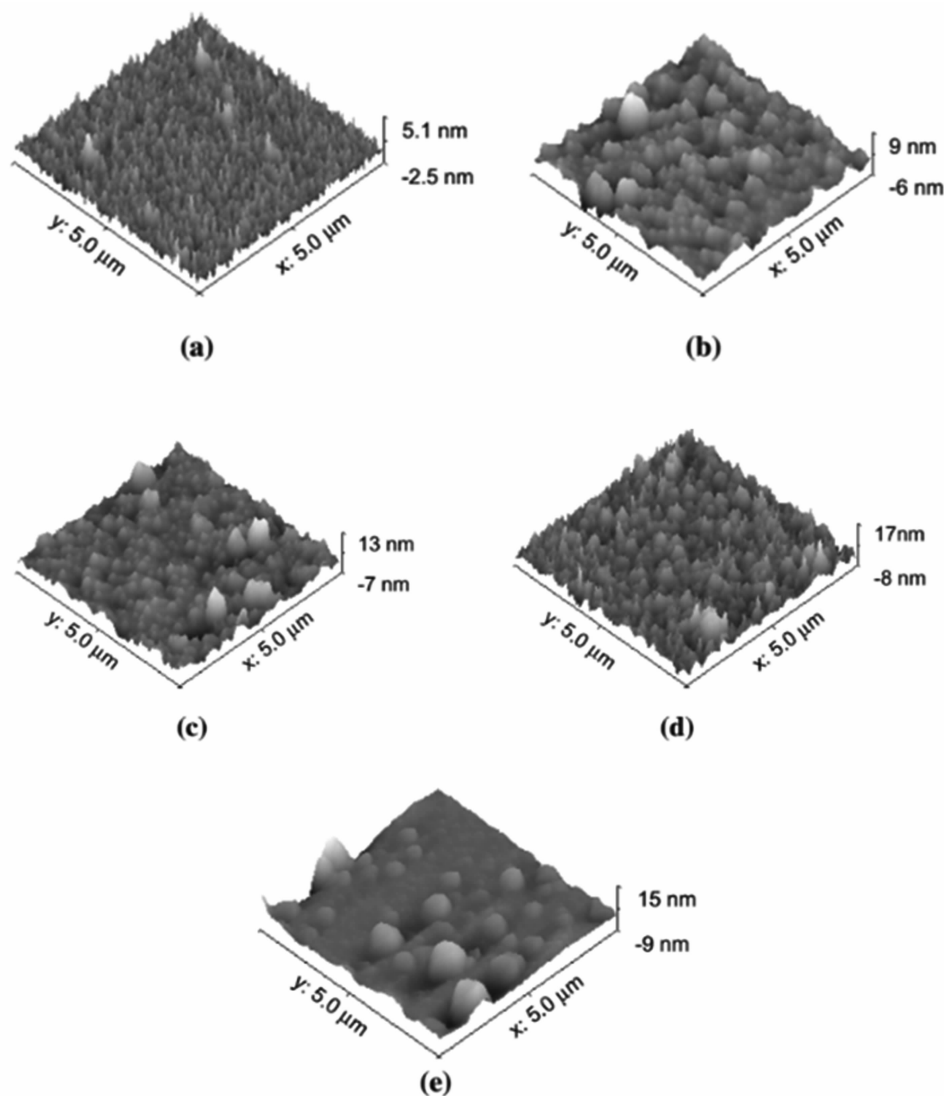


图 14 不同频率的脉冲射频源下沉积的 SiO_2 薄膜的 AFM 图^[27]: (a) 100 Hz; (b) 200 Hz; (c) 300 Hz; (d) 400 Hz; (e) 500 Hz

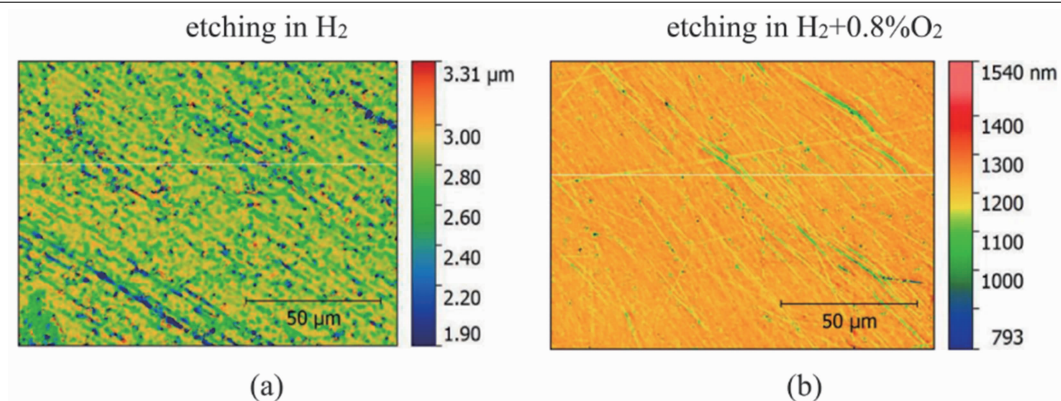
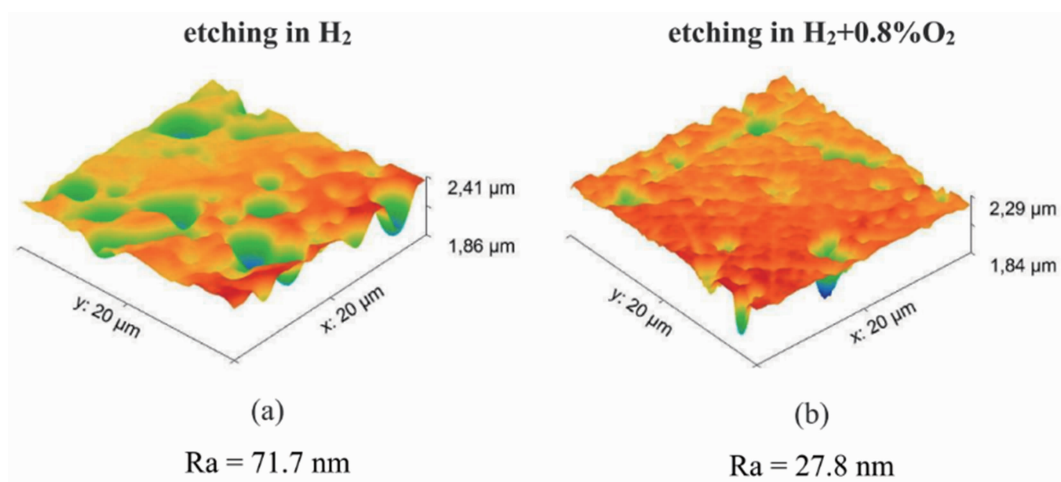
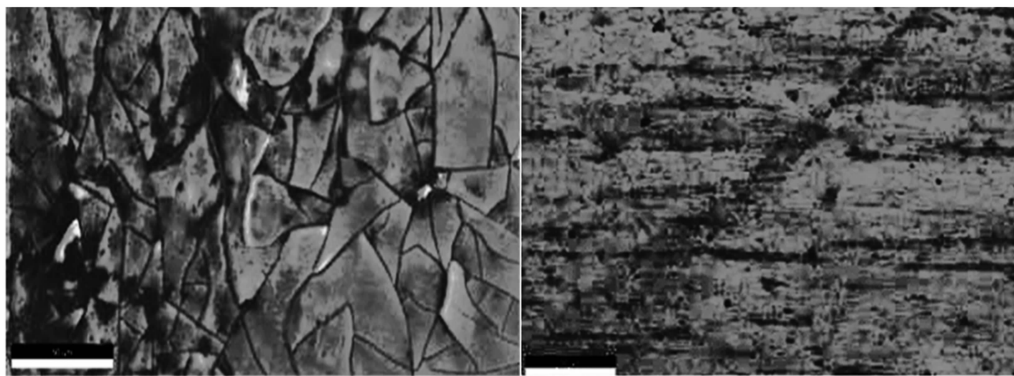
薄膜材料的发展和应用已成为推动行业进步的重要力量,尤其是在高性能 SiO_2 薄膜的制备过程中,射频源的作用和影响受到了广泛关注。孙俊峰、郭文涛以及 Chaiwong C 等对射频源及其对 SiO_2 薄膜特性的影响进行了深入探究。结果表明,通过调整射频功率和频率,可以在提高沉积速率和改善薄膜质量之间找到平衡,从而优化 SiO_2 薄膜的光学性质和结构特性。这些发现不仅丰富了我们对于 PECVD 工艺的理解,也为改进薄膜材料的制备工艺提供了重要指导。

2.5 后处理技术对薄膜质量的改善

通过对光学薄膜进行离子轰击,可以在一

定程度上减小薄膜的缺陷密度。这有助于降低薄膜对激光能量的吸收率,对延长器件寿命起到重要作用^[28]。

2022 年, Yurov V Y 等针对改善 SiO_2 薄膜粗糙度的问题,分别进行了 H 等离子体处理以及在 H 中加入微量 O 等离子体后, SiO_2 薄膜粗糙度的对比如图 15 和图 16 所示。通过分析等离子体处理如何降低 SiO_2 薄膜粗糙度的原理,发现 O 等离子体的加入使 H 等离子体对 SiO_2 薄膜的刻蚀速率减小,而且 SiO_2 薄膜表面的粗糙度下降,改善了 SiO_2 薄膜表面粗糙的问题^[29]。

图 15 O_2 对表面粗糙程度的优化^[29]图 16 SiO_2 薄膜表面粗糙度的 AFM 测试图^[29]图 17 O 等离子体粗糙度处理前后的对比图^[30]

2023 年, Yasmin A E 等用 O 等离子体对 SiO_2 薄膜的不规则缺陷进行了表面粗糙度处理。前后效果如图 17 所示^[30]。可以看到, 经过 O 等离子体处理后, SiO_2 变得更加平整。

退火处理可以改善薄膜的内部结构, 增加薄膜的致密性。理想的退火温度能够改善薄膜的激光损伤阈值; 过高的退火温度可能会导致

薄膜材料的晶粒尺寸变大、应力增加, 进而产生裂纹。

2021 年, 张晓英等研究了退火工艺对 SiO_2 薄膜的后处理, 并分析了不同退火温度下 SiO_2 薄膜的致密性。结构致密的 SiO_2 薄膜会使腐蚀液的腐蚀速率下降。腐蚀速率随退火温度的升高而降低。结果表明, 适当的退火温度

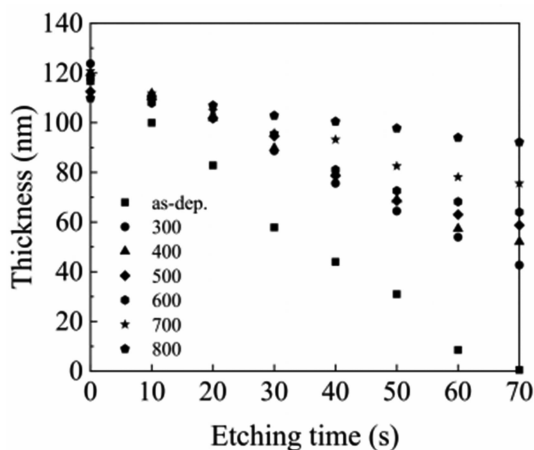


图 18 腐蚀速率随退火温度的变化^[31]

可以改善 SiO_2 薄膜的致密性, 如图 18 所示^[31]。

2022 年, 吴立宇等分析了不同退火温度对 SiO_2 薄膜性能的影响, 探究了退火温度与 SiO_2 薄膜粗糙度之间的变化趋势。随着退火温度升高, 薄膜的粗糙度逐渐降低(见图 19)^[32]。

在当代光学材料领域, 对光学薄膜进行精细的后处理已成为提升其性能的关键环节。Yurov V Y、Yasmin A E、张晓英和吴立宇等研究人员揭示了薄膜后处理技术如何影响 SiO_2 薄膜的特性。这些研究成果为优化 SiO_2 薄膜的光学性能和结构稳定性提供了宝贵的理论和实践依据, 对于光电器件和纳米材料的发展具有重要的指导意义。

3 结束语

近年来, 蓬勃发展的半导体激光器行业使全球对制造高质量 SiO_2 薄膜极其关注。围绕解决 SiO_2 薄膜的致密性、应力、粗糙度等问题, 开展了大量的研究工作, 并已取得颇多成果。制备工艺参数对 SiO_2 薄膜的质量有很大的影响。PECVD 技术因其独特的沉积薄膜方式, 在制备 SiO_2 薄膜时具有巨大的优势。本文总结了利用 PECVD 制备 SiO_2 薄膜过程中衬底温度、腔室压强、气体流量比和射频源等对 SiO_2 薄膜生长的影响。除此之外, 分析了薄膜的后处理工艺(如退火和等离子体)对 SiO_2 薄膜质量的改善效果。但对于制备过程中存在的薄膜均匀性不佳、薄膜与衬底之间存在的界面问题的研究较少。随着应用领域对 SiO_2 薄膜质量的要求不断提高, 优化 PECVD 工艺, 使其能满足行业对高质量、可靠的 SiO_2 薄膜日益增长的需求。这不仅要完善现有方法, 还要探索未知领域, 从而进一步推动 SiO_2 薄膜技术的发展。

参考文献

- [1] 田民波, 刘德令. 薄膜与科学技术手册(下册)
[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.

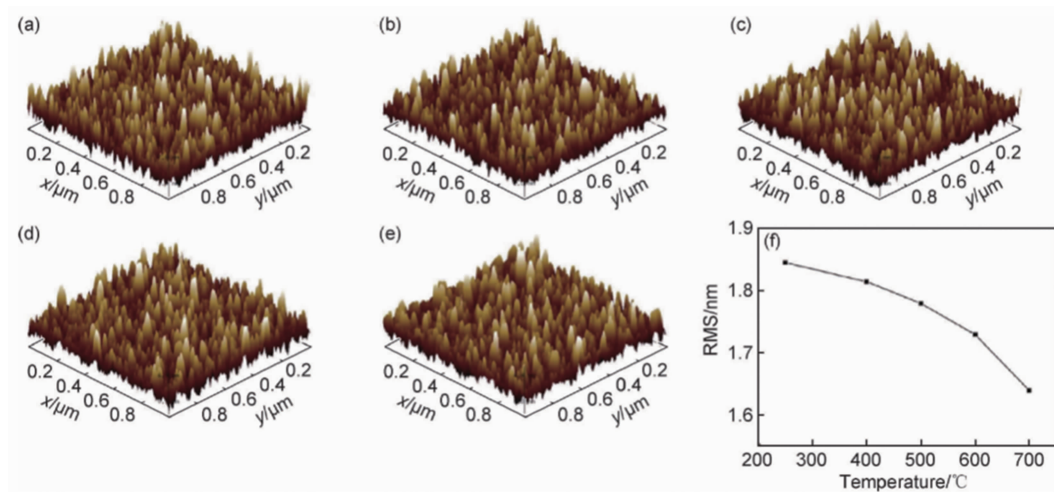


图 19 不同退火温度下 SiO_2 薄膜的 AFM 图像以及表面粗糙度随退火温度的变化^[32]: (a) 0°C; (b) 400°C; (c) 500°C; (d) 600°C; (e) 700°C; (f) 均方根粗糙度

- [2] 张檀威. SiO₂ 薄膜的 PECVD 沉积及在半导体光电子器件中的应用研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.
- [3] 宋继鑫. 国外光学薄膜的应用和真空镀膜工艺 [J]. *光学技术*, 1994, **19**(1): 6–8.
- [4] 贺德衍. 用微波等离子体化学气相沉积法低温生长织构多晶硅薄膜 [J]. *半导体学报*, 1998, **19**(9): 22–27.
- [5] 冯兴联. SiO₂ 薄膜的 PECVD 生长研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [6] Arl D, Roge V, Adjero N. SiO₂ Thin Film Growth Through a Pure Atomic Layer Deposition Technique at Room Temperature [J]. *RSC Advances*, 2020, **10**(31): 18073–18081.
- [7] 陈永生, 杨仕娥, 卢景霄. 等离子体增强 CVD 法沉积的微晶硅薄膜的微结构研究 [J]. *人工晶体学报*, 2005, **34**(4): 753–759.
- [8] 李树锋, 王丽, 高东文. 基片温度对脉冲激光沉积 ZnS:Co 薄膜微结构及光学性质的影响研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2023, **43**(9): 738–744.
- [9] 龙长林, 吴限, 陈国钦. PECVD 法制备 SiO₂ 膜均匀性研究 [J]. *激光与红外*, 2021, **51**(10): 1348–1351.
- [10] 孙钰林. PECVD 制备玻璃态 SiO₂ 薄膜技术研究 [D]. 吉林: 长春理工大学, 2009.
- [11] 陈心园, 黄建, 邓伟. 模拟分析 SiH₄ 和 N₂O 产生等离子体加强化学沉积制备 SiO₂ 薄膜 [J]. *贵州师范学院学报*, 2014, **30**(9): 75–79.
- [12] 杨西, 杨玉华. 化学气相沉积技术的研究与应用进展 [J]. *甘肃水利水电技术*, 2008, **53**(3): 211–213.
- [13] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- [14] 肖和平, 孙如剑, 马祥柱. PECVD 法制备 SiO₂ 薄膜致密性的特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, **53**(12): 275–280.
- [15] Kakiuchi H, Ohmi H, Yasutake K. Highly Efficient Formation Process for Functional Silicon Oxide Layers at Low Temperatures (≤ 120 °C) Using Very High-frequency Plasma Under Atmospheric Pressure [J]. *Precision Engineering*, 2019, **41**(60): 265–273.
- [16] 杨邦朝, 王文生. 薄膜物理与技术 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1994.
- [17] 张霄. PECVD 技术制作减反膜研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2010.
- [18] 朱恒伟, 李文杰, 张金云. PECVD 法玻璃容器内壁沉积 SiO₂ 薄膜的 SEM 表征 [J]. *材料科学与工程学报*, 2015, **33**(5): 666–670.
- [19] Stepniak M, Wosko M, Stafiniak A. Parasitic Masking Effect in GaN SA-MOVPE Using SiO₂ Masks Deposited by the PECVD Technique [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2023, **26**(160): 107394.
- [20] 杭凌侠, 张霄, 周顺. PECVD 工艺参数对 SiO₂ 薄膜光学性能的影响 [J]. *西安工业大学学报*, 2010, **30**(2): 117–120.
- [21] 李东玲, 尚正国, 温志渝, 等. PECVD 法低温制备二氧化硅薄膜 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2013, **11**(02): 185–190.
- [22] Cho S K, Cho T, Lee W J. Gas Barrier and Mechanical Properties of a Single-layer Silicon Oxide Film Prepared by Roll-to-roll PECVD System [J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2019, **16**(4): 1800170.
- [23] Lin K X, Lin X Y, Yun Y P, et al. Measurements in Silane Radio Frequency Glow Discharges Using a Tuned and Heated Langmuir Probe [J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, **74**(8): 4899–4903.
- [24] Bauer M, Schwarz S T, Jacob W. Growth Precursors for a-C:H Film Deposition in Pulsed Inductively Coupled Methane Plasmas [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, **98**(7): 073302.
- [25] 孙俊峰, 石霞. PECVD SiO₂ 薄膜内应力研究 [J]. *半导体技术*, 2008, **33**(5): 397–400.
- [26] 郭文涛, 谭满清, 焦健. PECVD 提高 SiO₂ 薄膜致密性的研究 [J]. *人工晶体学报*, 2013, **42**(4): 577–581.
- [27] Chaiwong C, Boonrang A. SiO₂-like Film Deposited by Plasma Polymerization of HMDSO+O₂ Using Repetitive High Voltage Pulses [J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2020, **17**(6): 1497–1503.

(下转第 56 页)

(2): 291–296.

- [12] 马毅飞, 赵文平. 窗口辐射对红外成像探测影响的研究 [J]. *系统工程与电子技术*, 2005, **27**(3): 427–430.
- [13] 李群章. 美国战区高空区域防御系统拦截导弹红外寻的技术分析 [J]. *红外与激光工程*, 1998, **27**(2): 25–28.
- [14] 董维中. 热化学非平衡效应对高超声速流动影响的数值计算与分析 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 1996.
- [15] 董维中, 丁明松, 高铁锁, 等. 热化学非平衡模型和表面温度对气动热计算影响分析 [J]. *空气动力学学报*, 2013, **31**(6): 692–698.
- [16] Kristie C, Gary P. On-Line Self-Calibrating Single Crystal Sapphire Optical Sensor Instrumentation for Accurate and Reliable Coal Gasifier Temperature Measurement [R]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute & State University, 2003.
- (上接第 25 页)
- [28] 毛思达. 后处理工艺对光学薄膜特性影响的研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- [29] Yurov V Y, Bolshakov A P, Fedorova I A. Control of Silicon Dioxide Etching Rate in Hydrogen Microwave Plasma by Addition of Oxygen [J]. *Applied Surface Science*, 2023, **39**(6): 155834.
- [30] Yasmin A E, Mohamed W A, Rifai M M. Fabrication, Characterization, and Corrosion Protection of Siloxane Coating on an Oxygen Plasma Pre-treated Silver-Copper Alloy [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023, **32**(3): 8818–8830.
- [31] Zhang X Y, Yang Y. Deposition and Characterization of RP-ALD SiO_2 Thin Films with Different Oxygen Plasma Powers [J]. *Nanomaterials*, 2021, **11**(5): 1173.
- [32] 吴立宇, 李小强, 王斌, 等. 退火温度对 PECVD 法制备 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 光学薄膜性能的影响 [J]. *材料工程*, 2020, **48**(12): 75–81.