

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

Effect of annealing temperature on properties
of $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ optical films prepared
by PECVD method

吴立宇¹, 李小强¹, 王 斌^{1,2}, 屈盛官¹

(1 华南理工大学 国家金属材料近净成形工程技术
研究中心, 广州 510640; 2 巴黎萨克雷大学 国家
科研中心联合实验室 8182, 法国 奥赛 91405)

WU Li-yu¹, LI Xiao-qiang¹, WANG Bin^{1,2}, QU Sheng-guan¹

(1 National Engineering Research Center of Near-Net-Shape
Forming for Metallic Materials, South China University of
Technology, Guangzhou 510640, China; 2 Associate Laboratory
of National Research Centre 8182, University of
Paris-Saclay, Orsay 91405, France)

摘要: 基于多层光学薄膜的基本原理及算法, 采用等离子体增强化学气相沉积方法在 GaAs 衬底上制备 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 双层减反射膜, 通过原子力显微镜 (AFM)、傅里叶变换红外光谱仪 (FT-IR)、椭圆偏振仪、X 射线衍射 (XRD)、X 射线光电子能谱分析 (XPS)、紫外-可见分光光度计对薄膜的形貌、结构及光学性能进行表征, 研究不同退火温度对薄膜性能的影响。结果表明: 退火前后薄膜均为结晶态; 随着退火温度升高, 薄膜反射率及粗糙度逐渐降低, 700 °C 时薄膜平均反射率及粗糙度最低, 分别为 12.65% 和 1.64 nm; 退火后光谱曲线往短波方向移动了 30 nm, 呈现典型的“蓝移”现象, 表明退火后薄膜光学厚度逐渐降低。

关键词: 减反射膜; GaAs 基太阳能电池; 等离子体增强化学气相沉积; 退火

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2019.000894

中图分类号: 0484.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2020)12-0075-07

Abstract: Based on the basic principle and algorithm of multi-layer optical thin films, $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ double-layer antireflection films for three-junction reverse GaAs solar cells were prepared on GaAs substrate by plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD). The relationships between post-annealing and the morphology, structure and optical properties of the multilayer films were characterized by atomic force microscope (AFM), Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR), elliptical polarizer, X-ray diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and UV-vis spectrophotometer. The results indicate that the films are crystalline state both before and after annealing. With the increase of annealing temperature, the roughness and average reflectance gradually decrease. $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ films annealed at 700 °C have the best performance with the lowest average reflectance of 12.65% and roughness of 1.64 nm. The spectral curve of the films move towards to short-wave direction about 30 nm, showing a typical “blue-shift” phenomenon, which indicates that the optical thickness of the films demonstrates a declining trend with the rising of annealing temperature.

Key words: antireflection film; GaAs-based solar cell; plasma enhanced chemical vapor deposition; annealing

GaAs 基多结太阳能电池因其对光吸收系数大, 抗辐射能力强、光电转化效率高等优点, 已逐渐替代

Si 系太阳能电池, 成为航空航天空间能源的重要组成部分, 其理论最高效率可达 49.7%, 目前国内外实验

室制备的三结太阳能电池能达到最高光电转换效率为 30.2%^[1-4]。为了减少多结太阳能电池的反射损耗,目前应用最为广泛的是在电池表面镀制一层或多层减反射膜来提高其对光的吸收率。目前能用于制备减反射膜的方法较多,如磁控溅射法^[5]、电子束蒸发沉积法^[6]、等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)^[7]、溶胶-凝胶法^[8]等,常用的低折射率膜料为 SiO₂,高折射率材料为 Si₃N₄, HfO₂, TiO₂, Si₃N₄, ZrO₂ 等,常用的膜系组合为 SiO₂/TiO₂, ZnS/MgF₂ 和 SiO₂/Ta₂O₅ 等^[9]。韩国首尔国立大学的 Jung 等^[10]利用射频-磁控溅射法在 GaAs 衬底上镀制了 ZnS/ZnS-MgF₂/MgF₂ 三层减反射膜,在 300~1600 nm 波长范围内平均减反射率可在 10% 以下。肖祥江等^[11]设计了应用于 GaAs 基太阳能电池表面的宽光谱(300~1800 nm) ZnS/Al₂O₃/MgF₂ 减反射膜,模拟结果表明,通过对三层膜系各层膜厚和折射率的调控可获得最佳减反射效果,其理论有效反射率为 2.31%。马新尖等^[12]采用 PECVD 工艺在单晶硅太阳能电池上制备了双层及三层 SiN_x 减反射膜,结果表明,三层 SiN_x 减反射膜在 600~1200 nm 波长范围内具有较好的减反射效果,其最低平均反射率可达 17.92%。李文英等^[13]报道了在室温下利用磁控溅射制备 ZnO/Cu/ZnO 薄膜,并研究了不同退火温度对薄膜性能、形貌及结构的影响,结果表明,随退火温度升高,薄膜的透光率先升高后降低,150℃ 时透光率最高,为 90.5%。目前鲜有文献报道对 GaAs 基太阳能电池减反射膜退火处理后光学性能的研究,因此,有必要研究退火温度对薄膜的影响,并总结薄膜表面形貌、结构与光学性能之间的关系,为后续研究提供一定的理论依据。

Park 等^[14]和 Pal 等^[15]的研究表明,在 GaAs 上沉积干燥的 SiO₂ 薄膜会产生元素 As,从而出现费米能级钉扎效应;而在 Bayraktaroglu 等^[16]的研究中发现, Si₃N₄ 被广泛用于钝化 GaAs 表面。因此,考虑材料的折射率、镀制工艺和基底表面钝化等特性,选定 SiO₂ 和 Si₃N₄ 为本次工艺的镀膜材料,二者界面结合能力较好,光学性质较为匹配,化学稳定性好,实际制备工艺参数较为接近,有利于膜系的连续镀制。本工作主要分析了梯度退火温度的变化对 SiO₂/Si₃N₄ 双层减反射膜性能的影响,通过对薄膜结构、形貌及光学性能的表征,研究使薄膜达到综合性能最佳的退火工艺参数。

1 模型方法与实验

1.1 膜系设计原理

根据等效界面^[17]的思想,对于双层减反射膜系,

无论是介质薄膜还是金属薄膜组合的任意光学薄膜,均可用虚拟的等效界面来代替,且等效界面的光学导纳 Y 为

$$Y = C/B \quad (1)$$

式中: B, C 分别为基底与薄膜的特征矩阵。在考虑垂直入射条件下,多层膜系的反射系数 r 及反射率 R 分别为

$$r = (\eta_0 - Y)(\eta_0 + Y) \quad (2)$$

$$R = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \quad (3)$$

式中: η_0 为入射介质的导纳;矩阵 $\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix}$ 定义为基底与薄膜组合的特征矩阵,为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^K \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{K+1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \theta_j \quad (5)$$

式中: δ_j 为薄膜的相位厚度; K 表示第 K 层界面, $K = 1, 2, n$; λ 为入射波长。

膜层的反射率 R 取决于膜层的参数变化。通常在设计膜系中,设计者可以通过选取不同折射率的材料以及膜系的层数,优化各个膜层的光学厚度,从而得到膜系的最小反射率。基于上述原理,本工作理论设计所用的简易模型图如图 1 所示。

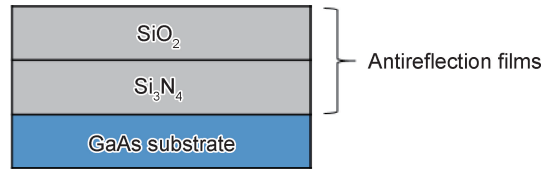
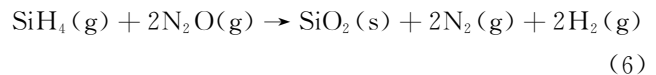


图 1 SiO₂/Si₃N₄ 双层减反射膜结构示意图

Fig. 1 Structural schematic of SiO₂/Si₃N₄ double-layer antireflection films

1.2 样品制备

实验中使用 plasmalab800Plus 型 PECVD 沉积系统进行 SiO₂/Si₃N₄ 薄膜的制备,采用 SiH₄ 和 N₂O/NH₃ 在 250℃ 下发生化学反应进而沉积 SiO₂/Si₃N₄ 薄膜,工艺参数如表 1 所示,反应方程式^[18-19]为:



由式(6),(7)可看出,沉积后除了所需薄膜外,其余产物均为气体,因此理论上 PECVD 法制备得到的薄膜均匀,且杂质较少。实验使用的 GaAs 衬底规格为 10 mm×10 mm, SiO₂/Si₃N₄ 物理厚度分别为

110 nm/90 nm。将 GaAs 衬底依次置于丙酮(AR)、异丙醇溶液(AR)中超声处理 300 s,超声处理后用去离子水清洗掉样品表面残留的液体并用氮气喷枪吹净,

置于 PECVD 腔体中反应制备薄膜,制得的样品分别在快速退火炉(RTP-CT150M 型)中在 400,500,600,700 $^{\circ}\text{C}$ 下通 N_2 退火 5 min,完成薄膜样品的制备。

表 1 PECVD 工艺参数
Table 1 Process parameters of PECVD

Sample	Flowing rate of $\text{N}_2\text{O}/$ ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	Flowing rate of (5% $\text{SiH}_4 + \text{N}_2$)/($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	Flowing rate of $\text{NH}_3/$ ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	Pressure/Pa	Temperature/ $^{\circ}\text{C}$
SiO_2	1000	400	—	113	250
Si_3N_4	—	300	12	113	250

1.3 样品表征

使用原子力显微镜(AFM, Dimension Edge)观察样品的表面形貌并测量反射膜表面粗糙度,为了减少测量误差,每个样品选取 2 个不同区域进行测量,计算平均值作为样品的最终表面粗糙度。以傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR, Thermo Nicolet IS10)、X 射线衍射仪(XRD, Smart Lab)、X 射线光电子能谱(XPS, Thermo Fisher Scientific K-Alpha)对薄膜的物相及结构进行分析。通过紫外-可见分光光度计(UV-vis, Lambda 900)测试薄膜样品的反射率(扫描波长范围为 300~1400 nm),采用 UVISEL-NIR-FGMS 光谱型椭圆偏振仪对薄膜的厚度进行拟合。

2 结果与讨论

2.1 薄膜质量分析

薄膜的表面形貌是光学薄膜的重要特性之一,图

2 为不同温度下退火的薄膜样品在原子力显微镜下的三维形貌,扫描范围为 $1\text{ }\mu\text{m} \times 1\text{ }\mu\text{m}$ 。如图 2 所示,沉积态薄膜表面出现连续分布的大尺寸颗粒,膜层表面较为平整。经 400,500,600,700 $^{\circ}\text{C}$ 退火后,表面形貌得到较大程度的改善,样品的表面颗粒尺寸逐渐减小,膜层变得更致密、平整,形貌区别于沉积态薄膜。薄膜表面粗糙程度取决于衬底温度、退火时间、晶粒分布、晶粒长大速率等^[20]。测试得到沉积态薄膜,400,500,600,700 $^{\circ}\text{C}$ 退火样品的均方根粗糙度(root mean square roughness, RMS) 分别为 1.845,1.815,1.78,1.73 nm 和 1.64 nm。经梯度温度退火处理后的薄膜样品粗糙度值呈下降的趋势,这是由于温度升高,原子迁移能力及速率增大,颗粒在薄膜表面的分布趋于均匀。随退火温度的升高,薄膜表面存在小部分柱状颗粒的聚集,推测是此时退火温度过高,薄膜表面出现部分晶粒异常柱状生长现象,使该部分晶粒与周围晶粒间的尺寸差距显著增大。

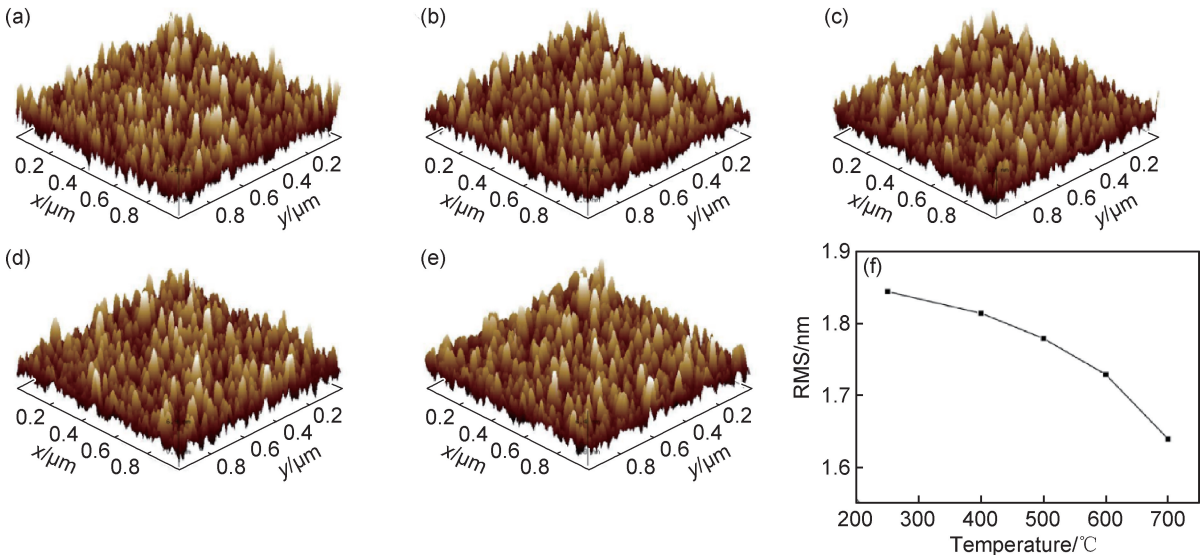


图 2 不同退火温度下 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 薄膜的 AFM 图像及表面粗糙度示意图
(a)沉积态;(b)400 $^{\circ}\text{C}$;(c)500 $^{\circ}\text{C}$;(d)600 $^{\circ}\text{C}$;(e)700 $^{\circ}\text{C}$;(f)均方根粗糙度对比图
Fig. 2 AFM images and surface roughness curve of $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ thin films annealed at different temperatures
(a)as-deposited;(b)400 $^{\circ}\text{C}$;(c)500 $^{\circ}\text{C}$;(d)600 $^{\circ}\text{C}$;(e)700 $^{\circ}\text{C}$;(f)comparison of root mean roughness

2.2 薄膜结构分析

不同退火温度下 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 薄膜 XRD 谱如图 3(a)所示。沉积态薄膜以及不同温度下退火的薄膜均出现了 GaAs, SiO_2 和 Si_3N_4 衍射峰,说明此时薄膜以结晶态的形式存在。随着温度升高, SiO_2 和 Si_3N_4 衍射峰发生宽化并朝小角度方向移动,这是由于随着退火温度的升高,原子的能量增加,表面迁移率增大,晶粒发生合并,其驱动力来源于总的界面能的降低^[17]。图 3(b)为沉积态及经退火处理后的薄膜表面成分结

构的 FT-IR 光谱图,波数在 472 cm^{-1} 处的吸收峰可归类于 Si—O—Si 基团的弯曲振动峰,波数为 532 cm^{-1} 的吸收峰是 N—Si—N 基团的伸缩振动峰,在 1016 cm^{-1} 和 1150 cm^{-1} 的吸收峰为 Si—O—Si 基团的伸缩振动峰,波数为 2117 cm^{-1} 的峰是 Si—H 的伸缩振动峰^[21]。经退火处理后 Si—H 吸收峰相对强度逐渐减少,这说明退火过程中发生了 SiH_4 向 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 的转变,与上述 XRD 测试结果相符。

XPS可以分析不同物质原子之间的结合能,为进

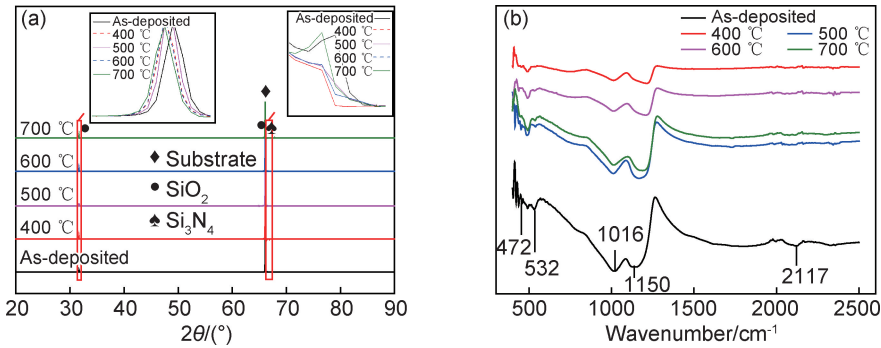


图 3 不同退火温度下 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 薄膜的 XRD 谱图(a)及 FT-IR 谱图(b)

Fig. 3 XRD patterns (a) and FT-IR patterns (b) of $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ thin films annealed at different temperatures

一步确定薄膜的化学成分,图 4 为沉积态 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 薄膜的 XPS 图谱。从全谱图 4(a)可知薄膜材料主要由 Si, O, N 3 种元素组成,其中 C 元素主要用于荷电校准。在精谱图中进一步分析薄膜材料的化学组成,

由图 4(b)可知, $\text{N}1s$ 的精谱分为两个主要的峰,结合能为 398.3 eV 对应 N—Si—N 键的峰,表明气相沉积反应生成了 SiN_x 薄膜^[22];图 4(c)为 $\text{O}1s$ 的精谱图,结合能为 532.4 eV 对应着 Si—O—Si 键的峰,表明气相

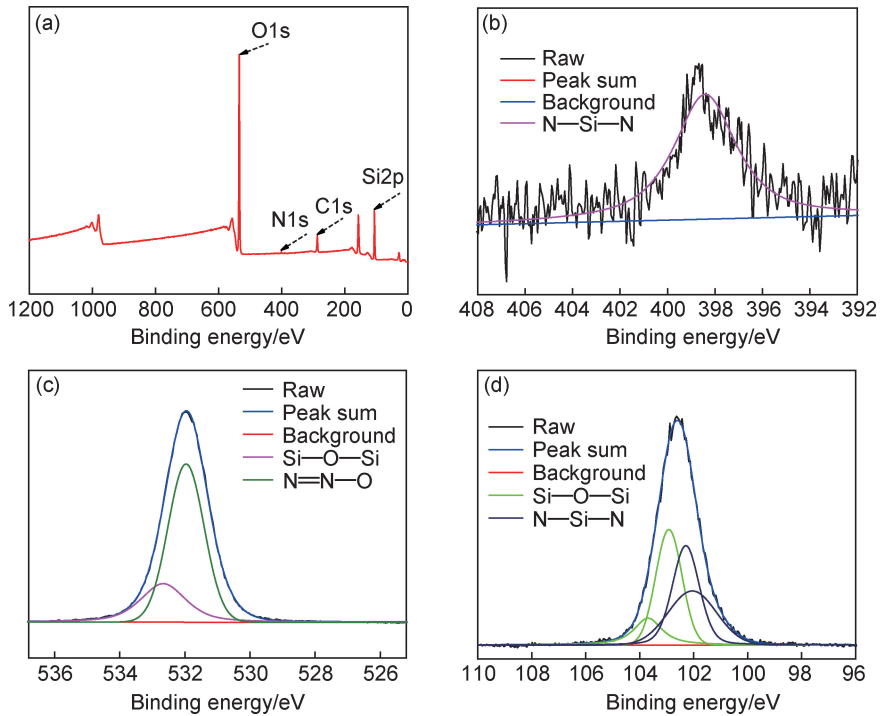


图 4 沉积态 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 薄膜的 XPS 图谱 (a)XPS 全谱图;(b) $\text{N}1s$ 精谱图;(c) $\text{O}1s$ 精谱图;(d) $\text{Si}2p$ 精谱图

Fig. 4 XPS spectra of deposited $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ films (a)XPS survey spectra;(b) $\text{N}1s$ spectrogram;(c) $\text{O}1s$ spectrogram;(d) $\text{Si}2p$ spectrogram

沉积反应生成了 SiO_y 薄膜^[23]；结合能为 531.7 eV 对应着 $\text{N}=\text{N}-\text{O}$ 的峰，与 XPS 标准图谱对比，其可能物质为 SiN_xO_y ，有研究者认为是较高的氧含量造成 $\alpha\text{-SiN}_x$ 键长、键角和配位数的变化^[24]。图 4(d) 为 $\text{Si}2\text{p}$ 的精谱图，结合能为 102.9 eV 及 103.7 eV 对应的是 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 键的峰，结合能为 102.0 eV 及 102.2 eV 对应的是 $\text{N}-\text{Si}-\text{N}$ 键的峰，表明气相沉积反应过程中生成了 SiN_x 和 SiO_y 薄膜^[22,25-26]。综合 XRD, FT-IR, XPS 3 种表征方法的结果可知，本次实验所制备得到的薄膜材料为 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 。

2.3 光学性能分析

图 5 为未镀膜衬底、沉积态及不同温度退火后 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 薄膜样品的反射率曲线。从图 5(a) 中可以看出，未镀膜的 GaAs 衬底平均反射率为 37.41%，镀膜后 GaAs 衬底反射率显著降低，沉积态薄膜的平均反射率为 14.19%。与沉积态薄膜相比，随着退火温度的升高，薄膜的反射率逐步降低，经 400, 500, 600,

700 °C 退火处理后的薄膜在波长为 500 nm 处取得反射率极小值，分别为 5.74%，5.62%，5.22%，5.09%，平均反射率分别为 14.15%，14.03%，13.58%，12.65%。反射率变化的原因是由于退火可以有效消除薄膜中存在的氧空位，使膜层的吸收率降低。另外，有报道^[27]指出，退火可提高薄膜晶化程度，减少晶格缺陷，使得薄膜反射率降低。由光学薄膜理论^[17]可知：薄膜表面的平整性和均匀性会直接影响薄膜表面的光学损耗，薄膜表面缺陷、孔洞和柱体结构的差异会导致薄膜表面对光吸收及散射的差别。总体而言，薄膜表面的平整性和均匀性越差（即 RMS 越大），则薄膜对光散射能力越强，光学损耗越大，最终导致薄膜光学性能下降。对比图 2(f) 和图 5(b) 可看出，薄膜的反射率和粗糙度值均随退火温度的升高而逐渐降低，二者呈现正相关的趋势，薄膜表面粗糙度值越低，则薄膜的光学性能越好。

在可见光波段， $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 双层减反射膜的实测

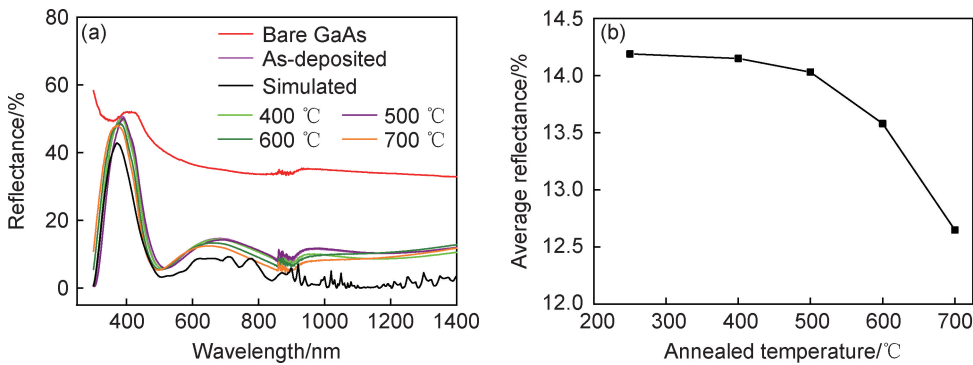


图 5 不同退火温度下 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 薄膜的反射谱图(a)及平均反射率对比图(b)

Fig. 5 Reflection spectral curves (a) and average reflectance comparison (b) of $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ thin films annealed at different temperatures

反射率曲线趋势与模拟数值基本吻合，而在近红外波段，二者存在一定的误差，其主要原因是：(1) 沉积过程中因膜层厚度偏差而导致的系统误差；(2) 折射率的误差，由于本次镀膜工艺采用的是化学气相沉积，可能存在膜层均匀性不够^[28]的问题，容易造成折射率不稳

定，与理论值存在一定的误差。另外，由于 850 ~ 900 nm 处仪器存在光栅切换的因素，因此曲线出现了一定的噪音峰。

图 6(a) 为沉积态及不同温度退火后 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 薄膜样品的折射率变化曲线，图 6(b) 为不同温度退火后

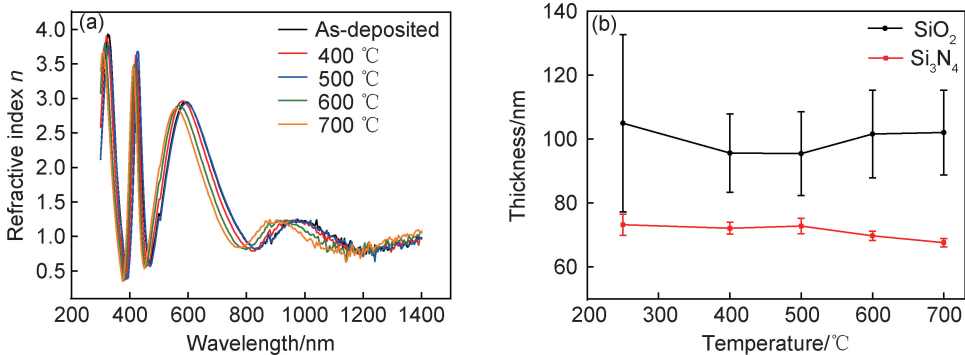


图 6 不同退火温度下 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 薄膜的折射率(a)及薄膜厚度(b)

Fig. 6 Refractive index (a) and film thickness (b) of $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ thin films annealed at different temperatures

$\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 薄膜的厚度。可以看出,折射率、薄膜的厚度随退火温度的升高而逐渐降低,退火后薄膜的聚集密度和折射率均发生了变化,反射率光谱整体向短波方向移动。当退火温度达到 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 时,反射率光谱往短波方向移动了 30 nm ,这是因为退火后 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 薄膜光学厚度发生了改变,光谱曲线向短波方向漂移说明膜层光学厚度小于沉积态薄膜,这与前面得出来的结果相符。

3 结论

(1) 基于 PECVD 法制备了应用于 GaAs 基太阳能电池的 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 双层减反射膜,沉积态与退火后薄膜呈结晶态。

(2) 随退火温度升高,薄膜的粗糙度逐渐降低, $700\text{ }^\circ\text{C}$ 退火处理后薄膜粗糙度最低,为 1.64 nm 。

(3) 沉积态薄膜在宽光谱范围($300\sim 1400\text{ nm}$)内的平均反射率为 14.19% 。随退火温度升高,薄膜平均反射率逐渐降低,经 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 退火处理后的薄膜平均反射率最低,为 12.65% 。经退火处理后薄膜的反射率光谱曲线往短波方向漂移了 30 nm ,波长出现典型的“蓝移”现象,对短波区域内如何增加减反射效果的研究有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 周勋,罗木昌,赵红,等. GaAs 基 III-V 族多结太阳能电池技术研究进展[J]. 半导体光电,2009,30(5):639-646.
ZHOU X, LUO M C, ZHAO H, et al. GaAs based III-V multi-junction solar cell technology research progress [J]. Semiconductor Optoelectronic, 2009, 30 (5): 639-646.
- [2] 洪瑞江,沈辉. 薄膜太阳能电池的研发现状和产业发展[J]. 中国材料进展,2009(10):35-44.
HONG R J, SHEN H. Progress in research and development of thin film solar cells [J]. Materials China, 2009(10): 35-44.
- [3] BAUHUIS G J, MULDER P, HAVERKAMP E J, et al. 26.1% thin-film GaAs solar cell using epitaxial lift-off [J]. Solar Energy Material and Solar Cells, 2009, 93(9): 1488-1491.
- [4] 邹永刚,李林,刘国军,等. GaAs 太阳能电池的研究进展[J]. 长春理工大学学报,2010,33(1):44-47.
ZOU Y G, LI L, LIU G J, et al. Research progress of GaAs solar cells [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2010, 33(1): 44-47.
- [5] 邱成军,曹茂盛,张辉军,等. 磁控溅射制备掺银 TiO_2 薄膜的光催化特性研究[J]. 材料工程, 2005(10): 35-37.
QIU C J, CAO M S, ZHANG H J, et al. Study on photocatalytic properties of Ag-doped TiO_2 thin film by AC magnetic control sputtering method [J]. Journal of Materials Engineering, 2005 (10): 35-37.
- [6] 程开富,刘心莲. 电子束蒸发技术[J]. 电子工业专用设备,1991

(1):36-39.

- CHENG K F, LIU X L. Electron beam evaporation technology [J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 1991(1): 36-39.
- [7] 井维科. PECVD 法制备多晶硅薄膜太阳能电池研究[D]. 金华:浙江师范大学,2013.
JING W K. Research on polycrystalline silicon thin film solar cell prepared by PECVD [D]. Jinhua; Zhejiang Normal University, 2013.
- [8] 任思雨,王英连,孙汪典,等. 溶胶-凝胶法与射频磁控溅射法制备 ZnO 薄膜及其表征对比[J]. 材料工程, 2004(11): 50-52.
REN S Y, WANG Y L, SUN W D, et al. Characteristic comparison of ZnO thin film prepared by sol-gel method and R. F. magnetron sputtering [J]. Journal of Materials Engineering, 2004(11): 50-52.
- [9] 邓婷,黄光周,刘雄英,等. 高反膜镀制工艺研究的新进展[J]. 真空电子技术,2009(3):30-36.
DENG T, HUANG G Z, LIU X Y, et al. New development of high reverse film plating process [J]. Vacuum Electronics, 2009(3): 30-36.
- [10] JUNG S M, KIM Y H, KIM S I, et al. Design and fabrication of multi-layer antireflection coating for III-V solar cell [J]. Current Applied Physics, 2011, 11(3): 538-541.
- [11] 肖祥江,涂洁磊,白红艳. GaAs 多结电池宽光谱 $\text{ZnS}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgF}_2$ 减反射膜的设计与分析[J]. 应用光学, 2014, 35(4): 670-674.
XIAO X J, TU J L, BAI H Y. Design and analysis of wide spectrum $\text{ZnS}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgF}_2$ antireflection film in GaAs multi-junction cells [J]. Applied Optics, 2014, 35(4): 670-674.
- [12] 马新尖,司志华,杨东,等. 三层氮化硅减反射膜在单晶硅太阳能电池中的应用[J]. 激光与光电子学进展. 2018, 629(6): 325-330.
MA X J, SI Z H, YANG D, et al. Application of three-layer silicon nitride anti-reflection film in mono-crystalline silicon solar cell [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 629(6): 325-330.
- [13] 李文英,钟建,张柯,等. 退火对 $\text{ZnO}/\text{Cu}/\text{ZnO}$ 透明导电薄膜性能的影响[J]. 材料工程, 2015, 43(1): 44-48.
LI W Y, ZHONG J, ZHANG K, et al. Effect of annealing on the properties of $\text{ZnO}/\text{Cu}/\text{ZnO}$ transparent conductive films [J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(1): 44-48.
- [14] PARK S W, JUNG S B, KANG M G, et al. Investigation on the interface formation of ambient-pressure-dried SiO_2 aerogel film deposited on GaAs [J]. Vacuum, 2002, 67(1): 155-159.
- [15] PAL S, BOSE D N. Fabrication and characterization of GaAs MIS devices with N-rich PECVD Si_xN_y dielectric [J]. Applied Surface Science, 2001, 181(3/4): 179-184.
- [16] BAYRAKTAROGU B, JOHNSON R L. Silicon-nitride-gallium-arsenide MIS structures produced by plasma enhanced deposition [J]. Journal of Applied Physics, 1981, 52(5): 3515-3519.
- [17] 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.
TANG J F, GU P F, LIU X, et al. Modern optical thin film technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.

- [18] 孙俊峰,石霞. PECVD SiO_2 薄膜内应力研究[J]. 半导体技术, 2008(5):397-400.
SUN J F,SHI X. Internal stress study of PECVD SiO_2 thin films [J]. Semiconductor Technology,2008(5):397-400.
- [19] 焦碧媛. 双层氮化硅膜多晶硅太阳能电池[D]. 沈阳:辽宁大学, 2012.
JIAO B Y. Silicon nitride membrane poly-silicon solar cell [D]. Shenyang:Liaoning University,2012.
- [20] 姚红,张占文,黄勇,等. 聚酰亚胺薄膜表面粗糙度的影响因素[J]. 强激光与粒子束,2011,23(7):1861-1866.
YAO H,ZHANG Z W,HUANG Y, et al. Factors influencing surface roughness of polyimide films [J]. High Power Laser and Particle Beams,2011,23(7):1861-1866.
- [21] 柯以侃. 分析化学手册[M]. 北京:化学工业出版社,1998.
KE Y K. Analytical chemistry manual [M]. Beijing:Chemical Industry Press,1998.
- [22] INGO G M,ZACCHETTI N,DELLA S D, et al. X-ray photoelectron spectroscopy investigation on the chemical structure of amorphous silicon nitride (a-SiN_x) [J]. Journal of Vacuum Science & Technology: A,1989,7(5):3048-3055.
- [23] ALEXANDER M R,SHORT R D,JONES F R, et al. An X-ray photoelectron spectroscopic investigation into the chemical structure of deposits formed from hexamethyldisiloxane oxygen plasmas [J]. Journal of Materials Science,1996,31(7):1879-1885.
- [24] BEHRENS K M,KLINKENBERG E D,FINSTER J, et al. Geometric structure of thin SiO_xN_y films on $\text{Si}(100)$ [J]. Surface Science,1998(402/404):729-733.
- [25] FINSTER J,HEEG J,KLINKENBERG E D. Chemical and structural order in silicon oxynitrides by methods of surface physics [J]. Progress in Surface Science,1990,35(1):179-184.
- [26] GROSS T, RAM M, SONNTAG H, et al. An XPS analysis of different SiO_2 modifications employing a C1s as well as an Au 4f7/2 static charge reference [J]. Surface & Interface Analysis, 2010,18(1):59-64.
- [27] KERMANI H, FALLAH H R, HAJIMAHMOODZADEH M. Design and fabrication of nanometric $\text{ZnS}/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ transparent conductive electrode and investigating the effect of annealing process on its characteristics [J]. Physical Review E,2013,47: 303-308.
- [28] 代同光,李拴,郭永刚,等. 管式 PECVD 设备镀膜均匀性研究[J]. 通信电源技术,2018,35(9):107-109.
DAI T G,LI S, GUO Y G, et al. Study on film uniformity of tubular PECVD equipment [J]. Communication of Power Technology,2008,35(9):107-109.

基金项目:GF 基础科研计划项目(JCKY2017210B028)

收稿日期:2019-09-27;修订日期:2020-04-07

通讯作者:李小强(1972—),男,教授,博士,主要从事粉末冶金、硬质合金、异种金属连接等方向的研究,联系地址:广东省广州市天河区五山路华南理工大学 38 号楼国家金属材料近净成形工程技术研究中心(510640),E-mail:lixq@scut.edu.cn

(本文责编:高磊)