

# 非晶硅银薄膜的飞秒激光辐照研究

李东阳<sup>1,2</sup>, Ilyas Nasir<sup>1</sup>, 宋宇浩<sup>1</sup>, 袁余涵<sup>1</sup>, 李伟<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 610054;

<sup>2</sup>西南民族大学信息材料四川省重点实验室, 四川 成都 610041;

<sup>3</sup>电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054

**摘要** 采用磁控共溅射方法制备非晶硅银(a-Si:Ag)薄膜,并对其进行飞秒激光辐照;采用扫描电子显微镜、拉曼光谱仪、积分球、半导体性能测试仪等,对辐照前后薄膜的表面形貌、微观结构以及光电性能等进行表征。结果表明:当辐照能量为 300 mJ/cm<sup>2</sup>时,a-Si:Ag 薄膜表面无明显的刻蚀痕迹,薄膜中有纳米晶硅颗粒生成,薄膜中的 Ag 纳米晶长大;当辐照能量为 600 mJ/cm<sup>2</sup>时,薄膜表面出现明显的刻蚀痕迹,Ag 纳米晶进一步长大,然而,产生的纳米晶硅颗粒的尺寸却没有变化;被飞秒激光辐照后,a-Si:Ag 薄膜比辐照前的电阻率更小,同时,薄膜对可见-近红外波段的人射光产生了反射减弱现象。研究结果对基于 a-Si:Ag 薄膜的忆阻神经突触器件性能的改善具有积极意义。

**关键词** 薄膜;微结构;飞秒激光;光电性能

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1103002

## Femtosecond Laser Irradiation on Amorphous Silicon Silver Thin Films

Li Dongyang<sup>1,2</sup>, Ilyas Nasir<sup>1</sup>, Song Yuhao<sup>1</sup>, Yuan Yuhan<sup>1</sup>, Li Wei<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Information Materials of Sichuan Province, Southwest Minzu University, Chengdu, Sichuan 610041, China;

<sup>3</sup>State Key Lab of Electronic Thin Films & Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

**Abstract** Herein, amorphous silicon silver (a-Si:Ag) thin films are prepared via magnetron co-sputtering and subjected to femtosecond laser irradiation. The scanning electron microscopy, Raman spectroscopy, integrating sphere, and semiconductor performance tester are used to characterize the surface morphology, microstructure, and photoelectric properties of thin films before and after irradiation. Results show that for an irradiation energy of 300 mJ/cm<sup>2</sup>, no obvious etching trace is observed on the surface of the a-Si:Ag thin film, nanocrystalline Si particles are formed in the thin film, and the size of the Ag nanocrystals in the thin film increases. For an irradiation energy of 600 mJ/cm<sup>2</sup>, obvious etching marks appear on the surface of the thin film, and the size of the Ag nanocrystal increases; however, the nanocrystalline Si particles do not change in size. The a-Si:Ag thin film irradiated by the femtosecond laser has low resistivity, and the irradiated film can diminish a reflection of the incident light in the visible-near-infrared band. The obtained results positively affect the performance of artificial synaptic devices based on a-Si:Ag thin films.

**Key words** thin film; microstructure; femtosecond laser; photoelectric properties

**OCIS codes** 240.0310; 320.709; 0310.6860; 310.6870

收稿日期: 2019-04-19; 修回日期: 2019-06-20; 录用日期: 2019-07-03

基金项目: 国防科技创新特区项目、国家自然科学基金(61421002)

\* E-mail: wli@uestc.edu.cn

# 1 引言

近年来,以非晶硅(a-Si)为电介质薄膜、以金属银为导电传质构建的“上电极/a-Si:Ag/下电极”离子迁移型忆阻器,作为下一代“非冯”神经形态芯片中的突触单元器件,受到了国内外研究人员的极大关注<sup>[1-6]</sup>。这一新型器件结构充分利用了a-Si薄膜的高阻、介孔等特性,使Ag<sup>+</sup>或纳米Ag颗粒能够在电场驱动下,在上下电极之间以一种“银丝filament”的形式在a-Si空洞中高速移动,使a-Si薄膜的电阻在高阻和低阻之间连续可调,从而实现神经突触器件“权重”的连续改变<sup>[1]</sup>。由于银以单质纳米颗粒的形式存在于a-Si非晶网络中,因而作为母相结构的a-Si网络,在某种程度上将决定“上电极/a-Si:Ag/下电极”忆阻器的最终性能。但是,a-Si薄膜存在着严重的光致衰退(S-W)效应<sup>[7-8]</sup>,使得其应用于器件时性能会随着时间延长而逐渐变差。国内外的研究表明,a-Si薄膜的微晶化或纳米晶化,是降低S-W效应、提高薄膜质量的有效途径。目前,对a-Si薄膜进行晶化处理的方法很多,如高温退火<sup>[9]</sup>、金属诱导晶化<sup>[10]</sup>和激光诱导晶化<sup>[11-12]</sup>等,其中飞秒激光诱导晶化a-Si薄膜具有良好的空间选择性和极小的热扩散率,受到了光电子器件领域研究人员的关注<sup>[13-16]</sup>。有关飞秒激光诱导a-Si晶化的研究尽管已有一些报道<sup>[17-18]</sup>,但目前鲜有关于用飞秒激光对掺银非晶硅(a-Si:Ag)薄膜进行辐照改性的公开报道。

采用飞秒激光对a-Si:Ag薄膜进行一定程度的激光诱导晶化,目的是能够在a-Si网络中引入部分纳米硅晶粒,在稳定、改善非晶网络结构的同时,与银颗粒一道参与忆阻突触器件“权重”的连续可调。笔者课题组早些时候采用飞秒激光对a-Si:Ag薄膜进行了诱导晶化研究,发现薄膜中的银会抑制a-Si薄膜的晶化<sup>[19]</sup>。为了进一步研究飞秒激光处理对a-Si:银薄膜的辐照效应,本文重点考察激光能量密度对a-Si:Ag薄膜表面形貌、微观结构和透射反射光谱性能的影响。

# 2 实验

采用射频磁控溅射方法在K9基片上制备厚度为300 nm左右的a-Si:Ag薄膜。所用靶材为镶嵌有银颗粒的SiAg复合靶,靶材中银的质量分数为2.1%。制备前,溅射腔内的真空度为 $7 \times 10^{-4}$  Pa。在制备过程中,射频功率为200 W,氩气流量保持在

200 mL/min,工作压强为0.5 Pa,基片温度为200 °C。采用美国光谱物理公司Solstice锁模钛蓝宝石飞秒脉冲激光器对a-Si:Ag薄膜进行辐照处理。将a-Si:Ag薄膜样品垂直放置于通入氮气、气压为0.6 Pa的样品室内,样品室窗口采用石英玻璃。从飞秒激光器水平射出的激光束首先穿过一个偏振片,之后经过焦距为10 cm的透镜,聚焦到样品室内垂直放置的薄膜样品表面。激光器的出射频率设置为100 Hz,光束波长为800 nm,光束脉宽为80 fs。笔者课题组的前期研究结果表明,a-Si:Ag薄膜飞秒激光诱导晶化可以通过低于薄膜刻蚀阈值的激光能量来实现,也可以用高于薄膜刻蚀阈值的激光能量来实现,相比之下,后者涉及到更为丰富而独特的晶化成核过程<sup>[18]</sup>。因此,本实验选用较大的飞秒激光能量300 mJ/cm<sup>2</sup>和600 mJ/cm<sup>2</sup>(大于a-Si薄膜的刻蚀阈值)开展研究。

采用MV5000金相显微镜(OM)观察a-Si:Ag薄膜被飞秒脉冲激光光斑辐照后的表面形貌;采用JSM-7500F扫描电子显微镜(SEM)观察激光辐照处理后薄膜表面的刻蚀与加工形貌;采用波长为514 nm的RENISHAWinVia拉曼光谱仪对a-Si:Ag薄膜进行拉曼光谱分析,分析过程中将激光功率设定为2 mW;采用型号为X'pert的X射线衍射仪(XRD)对薄膜的结晶情况进行分析,X射线波长为0.15418 nm,工作功率为3 kW,掠入射角度为1°;采用上海复享公司的G2000-Pro光谱仪和NIR2500近红外光谱仪及其配套的基于光纤的积分球测试系统,对薄膜进行可见-近红外波段透射和反射光谱测量;使用Keithley 4200半导体性能测试仪对薄膜的电学性质进行测量。

# 3 分析与讨论

## 3.1 表面形貌

从图1(a)~(c)中可以看到,随着激光能量密度增大,薄膜表面飞秒激光的作用光斑痕迹越来越明显,光斑中心区域比边缘区域的颜色更深(吸光更强),这是由于飞秒激光扫描脉冲光束的能量呈高斯型分布<sup>[20]</sup>。在较高的放大倍数下可以看到激光辐照前的薄膜表面上分布有大量均匀的纳米银颗粒,并以白色团簇聚集颗粒的形式存在,尺寸约为几十个纳米,如图1(d)所示。当a-Si:Ag薄膜被300 mJ/cm<sup>2</sup>的飞秒激光辐照后,薄膜表面的微观结构发生了明显变化,出现了一些尺寸更大的微纳米结构,如图1(e)所示,这些微纳米结构是薄膜中已

有的银纳米颗粒与激光晶化产生的晶体硅颗粒的混合聚集物,可认为是金属银诱导晶化和激光诱导晶化共同作用的结果,此时薄膜表面没有出现明显的刻蚀,薄膜材料表面以及内部微纳米颗粒的分布仍然具有一定的均匀性。但是,当激光能

量密度增大到  $600 \text{ mJ/cm}^2$  时,可以明显看到薄膜表面出现了激光刻蚀的痕迹,表面的微纳米颗粒已经不易聚集或被刻蚀脱离,但薄膜的亚表层及更深区域仍然能发现微纳米颗粒聚集物,整体上颗粒没有明显长大。

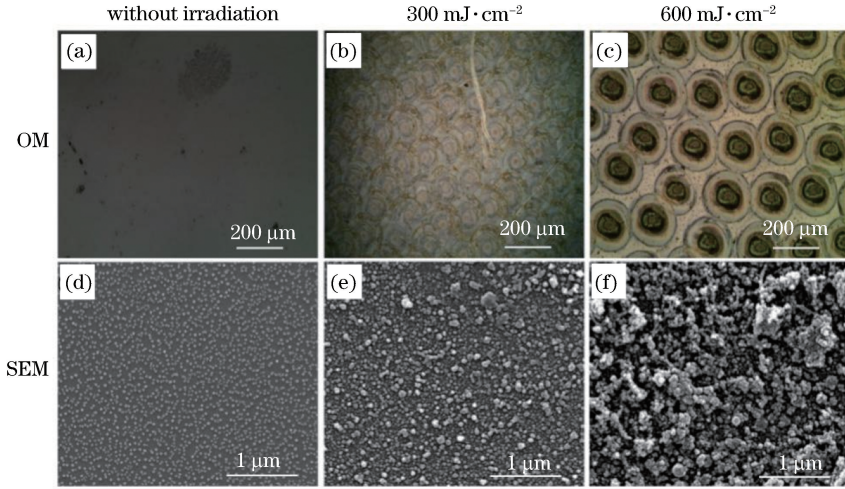


图 1 飞秒激光能量辐照前后 a-Si:Ag 薄膜的表面形貌

Fig. 1 Surface morphologies of a-Si:Ag thin film before and after femtosecond laser energy irradiation

### 3.2 微结构

采用激光拉曼光谱和 X 射线衍射仪研究了 a-Si:Ag 薄膜受飞秒激光辐照后的微结构。图 2(a) 给出了 a-Si:Ag 薄膜在激光辐照前后的拉曼光谱图,从图中可以看出:制备态 a-Si:Ag 薄膜呈现出典型的非晶硅微结构特征,薄膜中很难发现晶体硅的存在,银的金属诱导晶化作用十分有限;当薄膜被  $300 \text{ mJ/cm}^2$  的飞秒激光作用后,a-Si:Ag 薄膜微结构发生了明显的非晶硅的晶化,且晶化率达到了约  $31.4\%$ <sup>[21]</sup>;当飞秒激光能量增大到  $600 \text{ mJ/cm}^2$  时,位于  $516 \text{ cm}^{-1}$  处的拉曼峰强度急剧增大,非晶硅的晶化十分明显,此时硅晶体的晶化率升高到  $63.4\%$ 。笔者注意到,在  $300 \text{ mJ/cm}^2$  和  $600 \text{ mJ/cm}^2$  飞秒激光能量辐照作用下,a-Si:Ag 薄膜出现明显非晶硅晶化的拉曼峰都位于  $516 \text{ cm}^{-1}$  附近,这表明激光能量密度的大小不会明显影响辐照后 a-Si:Ag 薄膜中晶体硅颗粒的尺寸。根据文献[22]提供的方法可估算出晶硅颗粒的直径约为  $9.2 \text{ nm}$ 。这一结果对于 a-Si:Ag 薄膜的器件化应用具有积极意义。笔者在构建和优化“上电极/a-Si:Ag/下电极”忆阻器结构时,为了有效调控作为导电传质的纳米金属银颗粒和纳米硅颗粒,不希望忆阻薄膜材料内部的纳米结构随着飞秒激光能量的变化,出现空间几何尺寸(也就是晶粒尺寸)的明显变化,只期待纳米硅颗粒的数量(类似于硅晶体形核率)在飞秒激光辐照中,能够

原位、就近发生明显的增加和减少,而不发生在激光作用下产生的热流明显向激光斑点四周扩散的现象。这也正是本文选用飞秒激光而不是连续光激光对 a-Si:Ag 薄膜进行辐照改性的原因所在。

图 2(b) 给出了 a-Si:Ag 薄膜在激光辐照后的 XRD 谱,从图中不难发现,未受飞秒激光辐照作用的 a-Si:Ag 薄膜中没有明显的 Si 晶体衍射峰存在,这与拉曼光谱的结果一致。当受到  $300 \text{ mJ/cm}^2$  飞秒激光作用后,薄膜的 XRD 谱图中出现了硅晶体的 X 射线衍射峰;当飞秒激光能量密度进一步增大到  $600 \text{ mJ/cm}^2$  时,衍射峰中 Si(111) 的强度有所变弱,说明此时薄膜中这个晶面族参与 X 射线衍射的 Si 晶粒数量有所减少。值得一提的是,在对样品进行拉曼测试时,能够选择未发生明显刻蚀的平整区域进行测试,然而,对于 XRD 测试,很难做到不对刻蚀区域进行采样,从而导致了 XRD 衍射峰强度随激光能量增大而减弱。结合前面对拉曼光谱和薄膜表面形貌的分析可知, $300 \text{ mJ/cm}^2$  的激光能量密度足以使 a-Si:Ag 薄膜发生明显的非晶硅晶化,继续用  $600 \text{ mJ/cm}^2$  的激光作用于 a-Si:Ag 薄膜,虽然能够进一步使 a-Si:Ag 薄膜中非晶硅的晶化率上升,整体上硅晶粒的数量增多,但硅晶粒尺寸没有明显增大。可见,激光能量密度的继续增大,对于非晶硅的晶化作用已经显得过量,更多的是对薄膜表面及亚表面产生了刻蚀作用。

采用谢乐公式计算了 a-Si:Ag 薄膜经 300 mJ/cm<sup>2</sup> 和 600 mJ/cm<sup>2</sup> 激光作用后游离金属 Ag 颗粒的直径,分别为 3 nm 和 3.73 nm,比无激光辐照时薄膜中的 Ag 颗粒直径 2.8 nm 有所长大。这是由于在飞秒激光作用下,激光脉冲光斑作用处

的薄膜快速溶解和急速冷凝,其中的金属银发生溶解和再结晶,依附于光斑附近未受激光能量作用的纳米 Ag 颗粒,最终使薄膜中的纳米银颗粒尺寸有所增大。飞秒激光辐照能量越高,纳米银颗粒再结晶依附长大的作用就越明显。

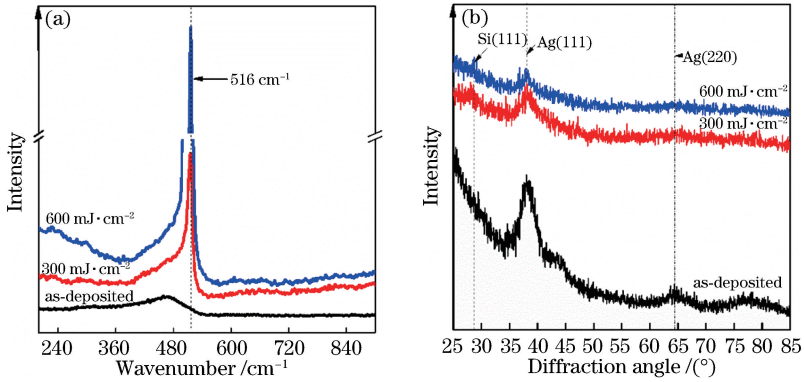


图 2 飞秒激光辐照前后 a-Si:Ag 薄膜的拉曼光谱和 XRD 谱。(a)拉曼光谱;(b) XRD 谱

Fig. 2 Raman and XRD spectra of a-Si:Ag thin film before and after femtosecond laser irradiation.

(a) Raman spectra; (b) XRD spectra

### 3.3 透射、反射光谱和导电性能

图 3 给出了 a-Si:Ag 薄膜在激光辐照前后的透射光谱和反射光谱,为了对比,这里同时给出了相同厚度 a-Si 薄膜在 300~1900 nm 光谱范围内的透射光谱和反射光谱。制备态 a-Si:Ag 薄膜中已经引入了一定量的游离金属 Ag 纳米颗粒,且均匀地分布在非晶硅网络结构中。当入射光作用于 a-Si:Ag 薄膜时,由于局域表面等离子共振效应,纳米 Ag 颗粒对入射光的散射吸收作用十分显著,这使得薄膜的整体透过率比 a-Si 薄膜明显低得多,如图 3(a)所示。当 a-Si:Ag 薄膜被 300 mJ/cm<sup>2</sup> 和 600 mJ/cm<sup>2</sup> 飞秒激光辐照后,从以上对表面形貌的研究可知,薄膜已经不同程度地受到高能飞秒激光的刻蚀作用,薄膜表面粗糙,甚至厚度减薄,致使在透射光谱测试

中光透射有增大的趋势。相对而言,在 300~1100 nm 的光谱范围内,由于 600 mJ/cm<sup>2</sup> 飞秒激光辐照后薄膜的厚度减薄得更明显,因而光谱透射的增大趋势更明显一些。在 1000~1900 nm 的近红外光谱范围内,激光辐照对光谱透过率的影响没有规律可言,这可能是因为金属银纳米颗粒在非晶硅网络中均匀分布,已在一定程度上起到了能带改性的作用,使间接带隙薄膜已经具备了准直接带隙的某些特质。这里,a-Si:Ag 薄膜的载流子散射效应与其局域表面等离子共振效应交互作用,使得激光辐照对光谱透过率的影响变得较为复杂,需要在下一步的研究中重点关注。

与透射光谱不同的是,相同厚度的 a-Si 薄膜在 300~1900 nm 光谱范围内表现出了反射光之间的

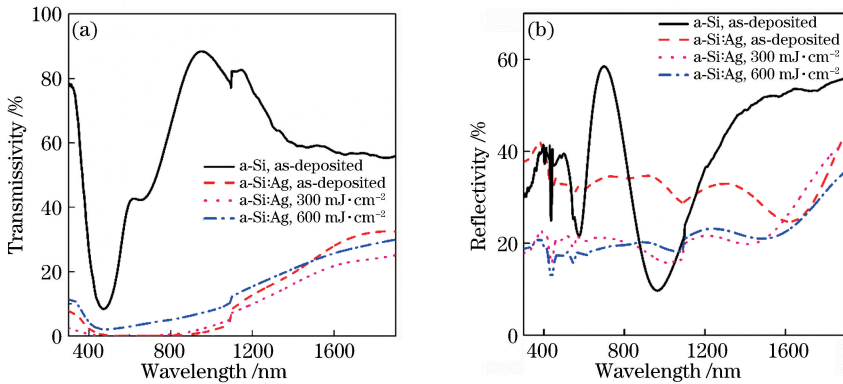


图 3 飞秒激光辐照前后 a-Si:Ag 薄膜的光学性能。(a)透射光谱;(b)反射光谱

Fig. 3 Optical properties of a-Si:Ag thin film before and after femtosecond laser irradiation.

(a) Transmission spectra; (b) reflection spectra

干涉现象。相反,制备态 a-Si:Ag 薄膜反射光谱的干涉现象不是很明显,这是由于薄膜中的银纳米颗粒对入射光有很强的吸收作用,在一定程度上抑制了反射光之间的干涉。当 a-Si:Ag 薄膜被飞秒激光辐照后,薄膜表面逐渐粗化,甚至减薄,薄膜对入射光的减反作用逐渐增强,而 300 mJ/cm<sup>2</sup> 和 600 mJ/cm<sup>2</sup> 两个激光能量之间的影响差异并不明显,相对而言,能量越高,刻蚀作用越强,对入射光的减反作用就越大。

图 4 给出了 a-Si:Ag 薄膜在不同能量密度的飞秒激光作用下的电阻率变化情况,可以看到:未被飞秒激光作用时,a-Si:Ag 薄膜的平均电阻率为 700 Ω·cm,比本征 a-Si 薄膜的电阻率 1×10<sup>9</sup>~1×10<sup>11</sup> Ω·cm 低至少 7 个数量级,具备作为忆阻介电薄膜材料的特质<sup>[23]</sup>;当引入飞秒激光能量辐照处理后,a-Si:Ag 薄膜的电阻率从 700 Ω·cm 降低到 40 Ω·cm 左右,降低了 1 个数量级,表明引入一定数量的纳米晶硅颗粒,可以对 a-Si:Ag 薄膜的电导率进行有效的调控。这一结果对于 a-Si:Ag 薄膜的器件化应用同样具有积极意义。如前所述,为了有效调控作为导电传质的纳米金属银颗粒和纳米硅颗粒,使 a-Si:Ag 薄膜在高阻和低阻之间进行快速切换,笔者期待除了金属银颗粒外,薄膜中的纳米硅颗粒的数量在飞秒激光辐照中能够原位、就近连续可调,以方便调控薄膜整体的导电性。

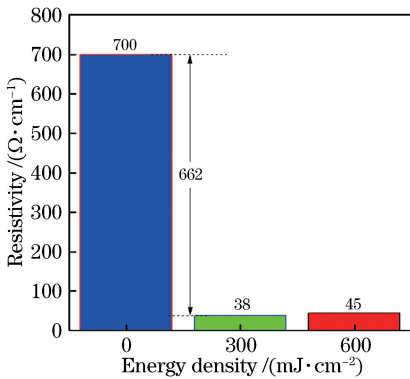


图 4 飞秒激光辐照前后 a-Si:Ag 薄膜电阻率

Fig. 4 Resistivity of a-Si:Ag thin film before and after femtosecond laser irradiation

## 4 结 论

研究了飞秒激光能量密度对 a-Si:Ag 薄膜表面形貌、微观结构和透射反射光谱性能的影响。结果表明:当 a-Si:Ag 薄膜被 300 mJ/cm<sup>2</sup> 飞秒激光辐照后,薄膜表面的微观结构发生了明显变化,出现了薄

膜中已有的银纳米颗粒与激光晶化产生的晶体硅颗粒的混合聚集物,银纳米颗粒的尺寸变大,但薄膜表面无明显刻蚀痕迹,薄膜材料表面以及内部的微纳米颗粒分布仍然具有一定的均匀性;当 a-Si:Ag 薄膜被 600 mJ/cm<sup>2</sup> 的飞秒激光辐照后,薄膜表面出现了明显的激光刻蚀痕迹,但薄膜的亚表层及更深区域仍然能够发现纳米银颗粒和纳米晶硅颗粒的聚集物。与 300 mJ/cm<sup>2</sup> 激光辐照的薄膜相比,在 600 mJ/cm<sup>2</sup> 激光辐照之后,a-Si:Ag 薄膜中出现了尺寸更大的银颗粒,但激光晶化产生的纳米晶硅颗粒的尺寸却没有增大。与未经飞秒激光辐照的 a-Si:Ag 薄膜相比,辐照后的薄膜具有更小的电阻率,在可见-近红外波段出现了反射减弱的现象。根据以上结果可以进一步推知,a-Si:Ag 薄膜在飞秒激光诱导下生成了纳米晶硅结构,这将会减弱薄膜中的 S-W 效应,从而改善薄膜质量。同时,纳米晶硅的生成也起着调控薄膜电导率的作用。更为重要的是,在一定的能量范围内,被辐照的 a-Si:Ag 薄膜并没有发生明显的刻蚀现象,晶化作用较为均匀,薄膜表面仍然具有一定的平整性。这些结论对制备高性能的基于 a-Si:Ag 薄膜的忆阻神经突触器件具有重要参考意义。

## 参 考 文 献

- [1] Jo S H, Chang T, Ebong I, *et al.* Nanoscale memristor device as synapse in neuromorphic systems [J]. Nano Letters, 2010, 10(4): 1297-1301.
- [2] Yang J J, Strukov D B, Stewart D R. Memristive devices for computing [J]. Nature Nanotechnology, 2013, 8(1): 13-24.
- [3] Serafino N, Zaghoul M. Review of nanoscale memristor devices as synapses in neuromorphic systems[C] // 2013 IEEE 56th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), August 4-7, 2013, Columbus, OH, USA. New York: IEEE, 2013: 602-603.
- [4] Indiveri G, Linares-Barranco B, Legenstein R, *et al.* Integration of nanoscale memristor synapses in neuromorphic computing architectures [J]. Nanotechnology, 2013, 24(38): 384010.
- [5] Hu M, Li H, Chen Y R, *et al.* Memristor crossbar-based neuromorphic computing system: a case study [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2014, 25(10): 1864-1878.
- [6] Liu C C, Liu F Q, Li H. Brain-inspired computing accelerated by memristor technology [C] // Proceedings of the 4th ACM International Conference

- on Nanoscale Computing and Communication-NanoCom '17, September 27-29, 2017, Washington, D.C. New York: ACM, 2017: 17.
- [7] Aida M S, Youla F, Touafek N, *et al.* Light induced defects in sputtered amorphous silicon thin films[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2002, 74(3): 251-257.
- [8] Uesugi T, Ihara H, Matsumura H. The Staebler-Wronski effect in hydro-fluorinated amorphous silicon prepared using the intermediate species SiF<sub>2</sub> [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1985, 24(8): 909-911.
- [9] Wakagi M, Fujiwara H, Collins R W. Real time spectroscopic ellipsometry for characterization of the crystallization of amorphous silicon by thermal annealing [J]. *Thin Solid Films*, 1998, 313/314: 464-468.
- [10] Lee S W, Joo S K. Low temperature poly-Si thin-film transistor fabrication by metal-induced lateral crystallization [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1996, 17(4): 160-162.
- [11] Andrä G, Bergmann J, Falk F, *et al.* Laser induced crystallization of amorphous silicon films on glass for thin film solar cells [J]. *Physica Status Solidi (a)*, 1998, 166(2): 629-634.
- [12] Nebel C E, Schöniger S, Dahlheimer B, *et al.* Laser induced melting and crystallization of boron doped amorphous silicon [J]. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 1997, 467: 421.
- [13] Choi T Y, Hwang D J, Grigoropoulos C P. Ultrafast laser-induced crystallization of amorphous silicon films [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(11): 3383-3388.
- [14] Cao X W, Zhang L, Yu Y S, *et al.* Application of micro-optical components fabricated with femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102004.  
曹小文, 张雷, 于永森, 等. 飞秒激光制备微光学元件及其应用 [J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102004.
- [15] Gao B P, Lin Y Z, Chen Y, *et al.* Substrateless terahertz band-pass filters fabricated by femtosecond laser micro-machining [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021415.  
高炳攀, 林炎章, 陈盈, 等. 飞秒激光微加工制备无衬底太赫兹带通滤波器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021415.
- [16] Liao C R, He J, Wang Y P. Study on high temperature sensors based on fiber Bragg gratings fabricated by femtosecond laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328009.  
廖常锐, 何俊, 王义平. 飞秒激光制备光纤布拉格光栅高温传感器研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328009.
- [17] Shieh J M, Chen Z H, Dai B T, *et al.* Near-infrared femtosecond laser-induced crystallization of amorphous silicon [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(7): 1232-1234.
- [18] Li D Y, Ilyas N, Song Y H, *et al.* Inhomogeneous crystallization of a-Si thin films irradiated by femtosecond laser [J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2019, 50(6): 793-801.
- [19] Song Y H, Nasir I, Zhong H, *et al.* Uneven crystallization of a-Si and a-Si:Ag thin films irradiated by femtosecond laser [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 452: 022148.
- [20] Mercier B, Rousseau J P, Jullien A, *et al.* Nonlinear beam shaper for femtosecond laser pulses, from Gaussian to flat-top profile [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(14): 2900-2907.
- [21] Houben L, Luysberg M, Hapke P, *et al.* Structural properties of microcrystalline silicon in the transition from highly crystalline to amorphous growth [J]. *Philosophical Magazine A*, 1998, 77(6): 1447-1460.
- [22] Cheng G X, Xia H, Chen K J, *et al.* Raman measurement of the grain size for silicon crystallites [J]. *Physica Status Solidi (a)*, 1990, 118(1): K51-K54.
- [23] Guo A R, Li D Y, Li W, *et al.* The relation of structure and dispersion to amorphous silicon silver thin films [J]. *Materials Letters*, 2016, 185: 5-8.