

# 真空环境中脉冲激光烧蚀制备纳米银晶 薄膜的生长特性

邓泽超, 刘建东, 王旭, 孟旭东, 丁学成, 褚立志, 王英龙\*

河北大学物理科学与技术学院, 河北省光电子信息材料重点实验室,  
新能源光电器件国家地方联合工程实验室, 河北 保定 071002

**摘要** 采用 XeCl 准分子脉冲激光, 在室温、真空环境下烧蚀银靶, 通过改变激光能量密度和靶衬间距, 在与靶面平行放置的 Si(111) 衬底上沉积了一系列纳米银晶薄膜。利用扫描电镜以及 X 射线衍射仪、选区电子衍射技术对薄膜进行表征, 结果表明: 薄膜由不同尺寸的银纳米晶粒组成; 在固定激光能量密度的条件下, 随着靶衬间距增加, 薄膜的厚度和晶粒尺寸逐渐减小, 晶粒间的聚合程度减弱, 薄膜(111)晶面的 XRD 特征谱线强度减弱, (200)晶面的特征谱线强度增强; 在固定靶衬间距的条件下, 随着激光能量密度的增大, 薄膜的厚度和晶粒尺寸逐渐增大, 晶粒间的聚合程度增强, 薄膜(111)晶面的特征谱线强度增强, (200)晶面的特征谱线强度略有减弱。结合晶粒成核和传输特性、烧蚀粒子迁移率, 以及薄膜沿不同晶面生长所需表面能存在差异的情况, 对实验结果进行了分析。

**关键词** 激光技术; 脉冲激光烧蚀; 成核; 薄膜生长; 表面能

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0903003

## Growth Characteristics of Ag Nanocrystalline Thin Films Prepared by Pulsed Laser Ablation in Vacuum

Deng Zechao, Liu Jiandong, Wang Xu, Meng Xudong, Ding Xuecheng,  
Chu Lizhi, Wang Yinglong\*

*College of Physics Science and Technology, Hebei University, Key Laboratory of Photo-Electronics Information Materials of Hebei Province, National-Local Joint Engineering Laboratory of New Energy Photoelectric Devices, Baoding, Hebei 071002, China*

**Abstract** A silver (Ag) target was ablated using the XeCl excimer laser at room temperature in vacuum. Films were deposited on the Si(111) substrates parallel to the target surface. The scanning electron microscopy, X-ray diffraction (XRD), and selected area electron diffraction analysis results denote that the deposited films comprise Ag nanoparticles with different sizes. The fixed laser fluence increases the distance from the target to the substrate, decreases the nanoparticle size and depth of the film, and weakens the combinative extent of the nanoparticles. Further, the XRD spectrum intensity of the crystallographic face of (111) decreases, whereas that of the crystallographic face of (200) increases. When the distance from the target to the substrate is fixed, the nanoparticle size and depth of the film increases with the increasing laser fluence, and the combinative extent of the nanoparticles increases. The XRD spectrum intensity of the crystallographic face of (111) increases, whereas that of the crystallographic face of (200) barely decreases. Furthermore, the experimental results are analyzed on the basis of the nucleation and transition of the nanoparticles, mobility of the ablated particles, and surface energy required in film growth along different crystallographic faces.

**Key words** laser technique; pulsed laser ablation; nucleation; film growth; surface energy

**OCIS codes** 310.6870; 240.0310

收稿日期: 2019-03-18; 修回日期: 2019-05-15; 录用日期: 2019-05-22

基金项目: 河北省自然科学基金(A2018201249)、河北省研究生创新资助项目(CXZZBS2017024)

\* E-mail: hdwangyl@hbu.cn

# 1 引言

银纳米材料具有特殊的物理和化学性能,在基于表面增强拉曼散射的单分子探测、用于非线性光学器件的合成复合物、化学催化剂以及医学杀菌除菌等领域具有广阔的应用前景,尤其是在杀菌除菌方面,仅次于有毒性的汞,在所有金属中位居第二。研究表明,尺寸小于 10 nm、沿(111)晶面生长的纳米材料,结构更稳定,抗菌活性更强。而且,银纳米材料的表面等离子共振和表面增强拉曼光谱等特性也都与晶粒尺寸、薄膜厚度、晶粒密度有关<sup>[1-3]</sup>。

目前,银纳米材料的制备方法有很多,如溶液法<sup>[4-5]</sup>、光化学法<sup>[6]</sup>、电解法<sup>[7]</sup>、化学气相沉积法<sup>[8]</sup>、直流溅射法<sup>[9]</sup>、粒子束轰击法<sup>[10]</sup>和脉冲激光烧蚀法(PLA)<sup>[11-14]</sup>等,依据原理大致可将这些方法归为化学方法和物理方法。在化学方法中,银纳米晶粒多存在于溶液或胶体环境中。为了阻止晶粒的团聚,增加其稳定性,往往需要加入分散剂、钝化剂、稳定剂等化学试剂,而这些试剂不仅会导致纳米晶粒的纯度下降,性能降低,还会造成一定程度的环境污染;同时,在银纳米薄膜的形成过程中,薄膜的厚度和均匀性很难把控。采用 PLA 技术,在真空、稀有气体或纯净水环境中制备银纳米材料属于物理方法,可以有效避免上述问题。相对于物理方法中的直流溅射和粒子束轰击,PLA 技术由于激光能量高而具有加热速度快和效率高的优势,可用于金属、陶瓷等难熔物质的制备。此外,基于 PLA 技术,可以通过改变激光波长、脉冲宽度和频率、激光能量、环境气体种类及压强、靶衬间距、环境温度等实验条件,从不同角度研究纳米晶粒(薄膜)形貌、结构及其生长动力学过程。

Alonso 等<sup>[15]</sup>在室温、真空环境下采用纳秒脉冲激光烧蚀银靶制备了银纳米晶粒,他们发现:随着激光脉冲数量增加,晶粒尺寸逐渐增大,并由球形结构转变为具有各向异性的豆荚状结构;薄膜由不连续性结构转变为浸润性结构,且厚度增加,与表面等离子激元吸收谱的变化规律一致。Dikovska 等<sup>[12]</sup>采用不同波长的纳秒脉冲激光,在室温、真空环境中烧蚀银靶后发现:当波长在紫外范围内时,晶粒近似为球状,所形成的薄膜沿(111)晶面择优生长;当波长在红外范围内时,晶粒尺寸为椭球状或豆荚状,所形成的薄膜呈现出多晶特性,但作者未对多晶特性的成因进行分析。Boutinguiza 等<sup>[16]</sup>在大气环境中利用高频纳秒脉冲激光烧蚀银靶,在玻璃衬底上制备了纳米银晶薄膜,他们发现,薄膜的表面等离子共振

光吸收谱线强度和展宽受薄膜中晶粒尺寸、晶粒表面氧化情况和晶粒密度的影响。Perito 等<sup>[4]</sup>在纯净水和 LiCl 溶液中采用皮秒和纳秒脉冲激光烧蚀银靶,得到了尺寸在 10 nm 以下的银纳米晶粒,并发现含银纳米晶粒的乳液,相比没有银纳米晶粒的乳液,其抑菌浓度和杀菌效果更优。Kamakshi 等<sup>[17]</sup>采用纳秒准分子脉冲激光在真空环境中烧蚀银靶,通过改变衬底温度,在 Si(100)衬底上沉积了纳米银晶薄膜,他们发现,随着衬底温度升高,薄膜的生长择优取向由沿(111)晶面逐渐转变为沿(200)晶面,在衬底温度为 600 °C 时,(111)晶面消失。他们从银薄膜晶面的织构系数、表面能和应变能在不同温度下的变化以及衬底晶面取向角度等方面对实验结果进行了分析。同时,以不同温度下制备的薄膜作为检测芯片,利用表面增强拉曼散射和表面等离子共振特性对人体血液中葡萄糖含量进行检测,结果表明,芯片的检测敏感性和时间效率显著增强,为医学诊断生物传感器的研制提供了参考。

尺寸分布均匀、沿固定晶面生长的银纳米晶粒(薄膜),会大大提升其在应用领域的性能和效率,因此,通过改变实验条件,研究影响银纳米晶粒(薄膜)沿不同晶面生长的因素就显得尤为重要。本文在室温、真空环境中,采用 XeCl 准分子脉冲激光烧蚀银靶,结合烧蚀粒子迁移率的变化以及薄膜生长过程中不同晶面对应的表面能存在差异的特点,探讨了靶衬间距和激光能量密度对薄膜沿不同晶面择优生长的影响。

## 2 实验装置

光源采用波长为 308 nm、脉冲宽度为 15 ns 的 XeCl 准分子激光。为减少大碎片的产生,将纯度为 99.99% 的银靶安装在转速为 8 r/min 的步进电机上,以便均匀烧蚀。Si(111)衬底的尺寸为 5 mm × 5 mm,它平行于靶面并正对烧蚀点放置,距靶面的垂直距离为 3~7 cm 不等,激光能量密度的变化范围为 3.1~4.7 J/cm<sup>2</sup>,实验装置与文献[18-20]实验类似。实验过程中,衬底保持室温,反应室的真空度保持在 10<sup>-4</sup> Pa;激光脉冲频率为 5 Hz,经透镜聚焦后与靶材表面成 45°,焦点面积为 1 mm<sup>2</sup>,烧蚀时间为 30 min。

## 3 实验结果

### 3.1 靶衬间距的影响

固定激光能量密度为 4 J/cm<sup>2</sup>,靶衬间距分别为 3, 4, 5, 6, 7 cm。通过 Nova nanoSEM 450 场发

射扫描电子显微镜(SEM)对沉积薄膜的形貌进行表征,管电压为 15 kV。结果表明:薄膜由不同尺寸的纳米颗粒组成,靶衬间距较小时,颗粒间的团簇现

象比较明显;随着靶衬间距增大,颗粒尺寸逐渐减小,团簇现象减弱,颗粒均匀性提高,薄膜的厚度为 252~45 nm,如图 1 所示。

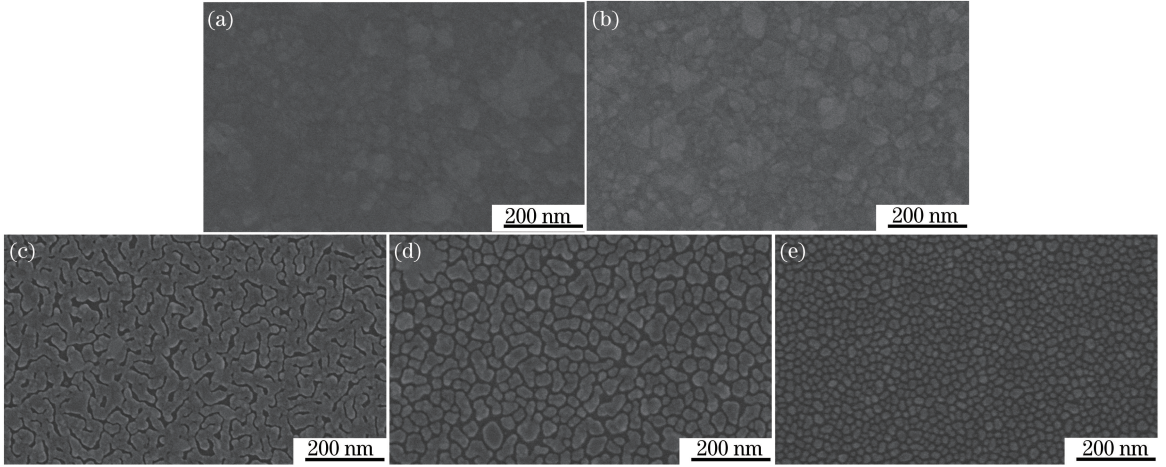


图 1 激光能量密度为  $4 \text{ J/cm}^2$  时,不同靶衬间距下沉积的薄膜的 SEM 形貌。

(a) 3 cm; (b) 4 cm; (c) 5 cm; (d) 6 cm; (e) 7 cm

Fig. 1 SEM graphs of samples deposited under different distances from target to substrate when laser fluence is  $4 \text{ J/cm}^2$ . (a) 3 cm; (b) 4 cm; (c) 5 cm; (d) 6 cm; (e) 7 cm

利用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪(XRD)对沉积薄膜通过小角度掠射进行成分特性表征,薄膜的特征谱线强度及其分布特点如图 2 所示,图中  $\theta$  为掠射角。以靶衬间距 5 cm 为例,  $2\theta$  在  $37.7^\circ$  和  $43.8^\circ$  左右,有两个明显的特征峰,分别对应 Ag(111)和 Ag(200)晶面特征峰,且相对于银的单晶特征峰,均存在展宽现象,表明薄膜中的银纳米颗粒具有晶态特性结构。同时,谱线中还存在其他晶面特征峰,但强度很弱,且变化不明显,这里不进行分析。在距靶不同位置的衬底上沉积薄膜,表征结果中有两个晶面的特征谱线强度呈相反的变化规律,即随着靶衬间距增加,(111)晶面特征谱线强度减弱,而(200)晶面特征谱线强度增强。

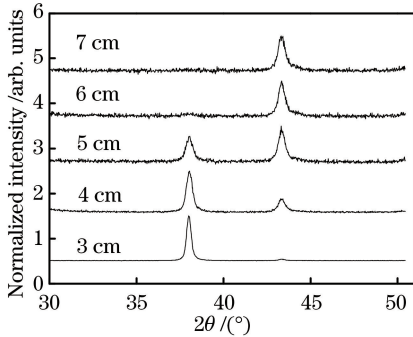


图 2 激光能量密度为  $4 \text{ J/cm}^2$  时,不同靶衬间距下沉积的薄膜的 XRD 特征谱线

Fig. 2 XRD spectra of samples under different distances from target to substrate when laser fluence is  $4 \text{ J/cm}^2$

采用选区电子衍射(SAED)技术对同一薄膜样品进行表征,结果表明,电子衍射环以(111)和(200)晶面为主,但同时也存在其他晶面衍射环,如图 3 所示,这与 XRD 表征的结果一致,均表明薄膜为多晶态。为验证晶粒尺寸变化和薄膜生长过程中的择优取向与激光能量密度、靶衬间距的相关性,下文在固定靶衬间距的情况下,通过改变激光能量密度,对实验结果进行了分析。

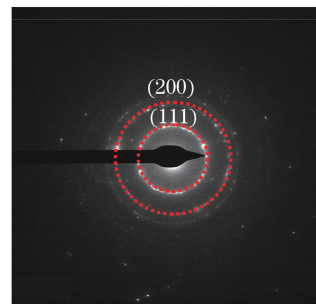


图 3  $4 \text{ J/cm}^2$  激光能量密度及 5 cm 靶衬间距下沉积的薄膜的选区电子衍射图

Fig. 3 SAED graph of sample when distance from target to substrate is 5 cm and laser fluence is  $4 \text{ J/cm}^2$

### 3.2 激光能量密度的影响

为便于比较,靶衬间距选定为 5 cm,激光能量密度分别为 3.1,3.5,3.9,4.3,4.7  $\text{J/cm}^2$ 。薄膜形貌的表征结果如图 4 所示,可见:激光能量密度较小时,纳米晶粒尺寸较小,晶粒间的聚合程度低;随着能量密度增加,晶粒尺寸变大,聚合程度加强,薄膜

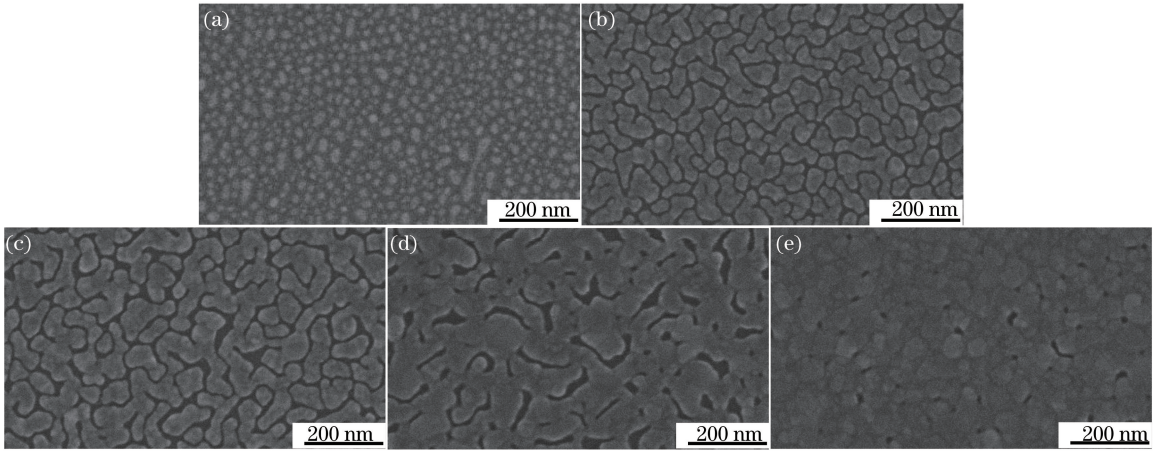


图 4 靶衬间距为 5 cm 时,不同激光能量密度下沉积的薄膜的 SEM 形貌。

(a) 3.1 J/cm<sup>2</sup>; (b) 3.5 J/cm<sup>2</sup>; (c) 3.9 J/cm<sup>2</sup>; (d) 4.3 J/cm<sup>2</sup>; (e) 4.7 J/cm<sup>2</sup>

Fig. 4 SEM graphs of samples under different fluences when distance from target to substrate is 5 cm.

(a) 3.1 J/cm<sup>2</sup>; (b) 3.5 J/cm<sup>2</sup>; (c) 3.9 J/cm<sup>2</sup>; (d) 4.3 J/cm<sup>2</sup>; (e) 4.7 J/cm<sup>2</sup>

厚度为 64~295 nm;在激光能量密度为 4.7 J/cm<sup>2</sup> 时,形成了比较致密的薄膜。

相应薄膜样品的小角度 XRD 表征结果如图 5 所示,可知:当激光能量密度较小时,(111)晶面特征谱线强度非常弱,(200)晶面特征谱线强度较大;随着激光能量密度增大,(111)晶面特征谱线强度逐渐增加,(200)晶面特征谱线强度略有减弱,但变化不明显。

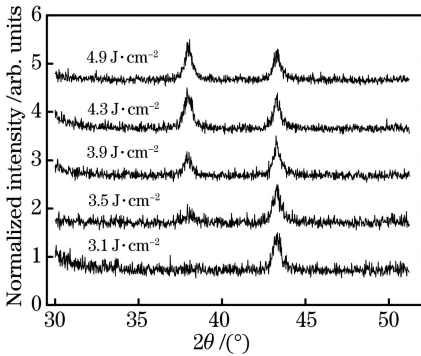


图 5 靶衬间距为 5 cm 时,不同激光能量密度下沉积的薄膜的 XRD 特征谱线

Fig. 5 XRD spectra of samples under different fluences when distance from target to substrate is 5 cm

同一薄膜样品的 SAED 结果表明,电子衍射环同样以(111)和(200)晶面为主,与图 3 结果类似,表明薄膜为多晶态。

## 4 讨 论

利用现有的或创新的理论模型,对不同激光能量密度和靶衬间距下脉冲激光烧蚀制备银纳米晶薄膜实验所得的晶粒尺寸,尤其是其生长晶向特性进

行定量研究,是一项具有重要意义的工作。然而,脉冲激光烧蚀、纳米晶粒成核生长尤其是晶向生长,均是十分复杂的过程,往往涉及到非线性、非静态的平衡过程,需要从能量角度、动力学角度进行综合考量。无论是从宏观、介观角度,还是从微观角度,目前尚未建立一个效果理想的理论模型。建立一个计算模型,使理论结果与实验数据定量相符,是笔者下一步的工作。因此,本文针对实验所得结果,进行定性分析。

采用脉冲激光烧蚀银靶,烧蚀产物包括原子、离子(电子忽略不计)以及靶材碎片,通过匀速转动靶材,可以有效减少靶材碎片的产生,因此分析过程中不考虑碎片的影响,下文中的烧蚀粒子统指原子和离子。在烧蚀过程中,由于热传导的原因,靶材存在表面高、内部低的温度梯度<sup>[21-22]</sup>,同时,银优异的导热性能使得烧蚀区的高温层较薄而低温层较厚<sup>[23-25]</sup>。

文献[26,18]认为,气化状态的粒子,只有当温度和密度同时满足条件时,成核才能发生。文献[13,15]采用纳秒脉冲激光在真空中烧蚀银靶,得出了纳米晶粒产生于烧蚀羽辉形成初期的结论,表明在真空环境中烧蚀银靶,由于绝热膨胀和快速扩散、降温等原因<sup>[27]</sup>,烧蚀粒子的温度和密度只有在烧蚀羽辉形成初期才能满足成核条件。

如上所述,靶材表面的高温层较薄,因此产生的烧蚀粒子数量相对较少<sup>[21]</sup>,在满足成核条件时,由于烧蚀粒子数量少,碰撞概率小,晶粒的生长速率小,所形成的晶粒尺寸小<sup>[28]</sup>;而靶材内部的低温层较厚,产生的烧蚀粒子数量多<sup>[21]</sup>,碰撞概率大,晶粒

的生长速率大,形成的晶粒尺寸大<sup>[28]</sup>。设  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为烧蚀粒子的热运动温度,  $m_{Ag}$  和  $m_{nc}$  分别表示银原子(离子)和银纳米晶粒的质量,  $C$  为凝聚成核的烧蚀粒子与所形成的纳米晶粒之间的能量转换系数(为常数),  $v_{Ag}$  和  $v_{nc}$  分别为烧蚀粒子成核时的速度和纳米晶粒形成时的速度。利用热动力学方程  $k_B T = m_{Ag} v_{Ag}^2 / 2 = m_{nc} v_{nc}^2 / (2C^2)$  对实验过程进行定性分析。由方程可知,靶材表层高温烧蚀粒子形成的小尺寸晶粒速度大,靶材内部低温烧蚀粒子形成的大尺寸晶粒速度小。脉冲激光烧蚀靶材后,产生的烧蚀粒子以烧蚀羽辉轴线为中心沿不同角度分布,但主要集中在羽辉轴线方向上,并随着同羽辉轴线夹角的增大而逐渐减少<sup>[27,29]</sup>,因此,大多数烧蚀粒子的传输方向为水平方向,本研究分析烧蚀粒子和成核晶粒的传输方向时,也以水平方向为例。烧蚀粒子和晶粒在传输过程中没有环境介质的阻力,只受重力作用,因此以平抛运动方式传输至衬底。结合热动力学方程可知,表面高温层烧蚀粒子及其形成的具有较大速度的小尺寸晶粒,在水平方向上传输的距离,要大于速度相对较小的、由靶材内部低温层烧蚀粒子及其形成的大尺寸晶粒,这一结论,笔者已通过水平放置衬底,结合衬底表面银纳米晶粒尺寸变化的规律加以证实<sup>[30]</sup>。

表面高温层产生的烧蚀粒子及其形成的小尺寸晶粒会先传输到衬底,由于其速度大、温度高,在衬底表面具有较强的迁移能力<sup>[9]</sup>,同时因为其数量较少,加之受扩散、降温效应的影响,这些烧蚀粒子和小尺寸晶粒在衬底表面迁移过程中相互碰撞的概率较小,所形成的薄膜是随机性生长的<sup>[31]</sup>,整体处于一种能量较高的非平衡状态。靶材内部低温层形成的烧蚀粒子和大尺寸晶粒到达衬底时,虽然速度较小,温度较低,迁移能力相对较弱,但由于数量多,相互之间的碰撞概率大大增加,使得薄膜在生长过程中,其能量可以通过有效碰撞而趋于平衡,此时薄膜会沿能量最低的晶面择优生长<sup>[20,32]</sup>。

银晶体为面心立方结构,不同晶面对应的表面能不同,其中(111)晶面对应的表面能最小,(200)晶面对应的表面能较高<sup>[32-33]</sup>。系统能量最低时,薄膜沿(111)晶面择优生长,与Kamakshi等<sup>[17]</sup>采用纳秒准分子脉冲激光在真空环境中烧蚀银靶,衬底温度为室温时所得结果一致,也与Jung<sup>[9]</sup>得到的烧蚀粒子在衬底表面迁移率的提高有助于薄膜沿表面能最低的(111)晶面择优生长的理论一致。

固定激光能量密度为  $4 \text{ J/cm}^2$  时,单个脉冲产

生的烧蚀粒子及其形成的纳米晶粒总量基本不变,靶衬间距较小时,到达衬底的烧蚀粒子和晶粒数量多、温度高,依据前面所述,此时的薄膜生长主要沿表面能最低的(111)晶面择优生长;随着靶衬间距增加,以及受扩散、降温效应的影响,能够到达衬底的烧蚀粒子和晶粒数量减少、温度下降,薄膜主要沿表面能较高的(200)晶面随机生长。

固定靶衬间距为  $5 \text{ cm}$ ,激光能量密度较小时,产生的烧蚀粒子及其形成的纳米晶粒数量少<sup>[13,21]</sup>、速度小,由于传输过程中存在扩散、降温效应,能够到达衬底的烧蚀粒子和晶粒数量更少,所形成的薄膜主要沿(200)晶面随机生长。增加激光能量密度后,产生的烧蚀粒子数量增加,相应地,无论是小尺寸晶粒还是大尺寸晶粒,数量和速度都会相应增加,使得更多的烧蚀粒子和晶粒能够传输到衬底形成薄膜。由于靶衬间距较大,最先到达衬底的烧蚀粒子和小尺寸晶粒形成的薄膜,会被后续较大尺寸晶粒形成的薄膜所覆盖,激光能量密度越大,这种覆盖程度越大。在XRD表征结果中,表现为(111)晶面特征谱线强度逐渐增大,而(200)晶面特征谱线强度变化不大,并且会随着被覆盖程度增加而略有减小。

文中对高温层和低温层的划分只是一种理想状况,在实际的烧蚀过程中,高温层和低温层之间存在着过渡层<sup>[21]</sup>。不同温度的烧蚀粒子相互作用,使得纳米晶粒成核生长过程及尺寸分布比较复杂。另外,一部分烧蚀粒子的速度并非沿水平方向,而是以烧蚀羽辉轴线为中心沿不同角度分布<sup>[27]</sup>,这就使得所形成的不同尺寸的纳米晶粒也以轴线为中心,向空间不同方向传输,同样增加了薄膜生长过程的复杂性。

## 5 结 论

采用XeCl准分子脉冲激光,在室温、真空环境下烧蚀银靶,探讨了晶粒尺寸、薄膜沿不同晶面生长择优性与靶衬间距、激光能量密度之间的关系。结果表明:在固定激光能量密度的条件下,晶粒尺寸随着靶衬间距的增加而逐渐减小,晶粒间的聚合程度减弱,薄膜厚度变小;当靶衬间距较小时,薄膜以沿表面能最低的(111)晶面择优生长为主,当靶衬间距较大时,则以沿表面能较高的(200)晶面随机生长为主。在固定靶衬间距的条件下,晶粒尺寸随着激光能量密度的增加逐渐增大,晶粒间的聚合程度增大,薄膜厚度增大;当能量密度较小时,薄膜以沿(200)晶面随机生长为主,而当能量密度较大时,以沿

(111)晶面择优生长为主,并会对前期沿(200)晶面生长的薄膜有一定的覆盖效应,能量密度越大,覆盖效应越明显,导致(200)晶面特征谱线的表征强度略有减弱。

## 参 考 文 献

- [1] Langley D, Giusti G, Mayousse C, *et al.* Flexible transparent conductive materials based on silver nanowire networks: a review [J]. *Nanotechnology*, 2013, 24(45): 452001.
- [2] Morones J R, Elechiguerra J L, Camacho A, *et al.* The bactericidal effect of silver nanoparticles [J]. *Nanotechnology*, 2005, 16(10): 2346-2353.
- [3] Lu Z, Rong K F, Li J, *et al.* Size-dependent antibacterial activities of silver nanoparticles against oral anaerobic pathogenic bacteria [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2013, 24(6): 1465-1471.
- [4] Perito B, Giorgetti E, Marsili P, *et al.* Antibacterial activity of silver nanoparticles obtained by pulsed laser ablation in pure water and in chloride solution [J]. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2016, 7: 465-473.
- [5] Mahmoodi A, Shoorshinie S Z, Dorrnian D. Synthesis and characterization of AgCl nanoparticles produced by laser ablation of Ag in NaCl solution [J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(4): 452-460.
- [6] Wang W, Asher S A. Photochemical incorporation of silver quantum dots in monodisperse silica colloids for photonic crystal applications [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2001, 123(50): 12528-12535.
- [7] Strehle S, Menzel S, Bartha J W, *et al.* Electroplating of Cu(Ag) thin films for interconnect applications [J]. *Microelectronic Engineering*, 2010, 87(2): 180-186.
- [8] Liu Y, Plate P, Hinrichs V, *et al.* Size- and density-controlled deposition of Ag nanoparticle films by a novel low-temperature spray chemical vapour deposition method: research into mechanism, particle growth and optical simulation [J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2017, 19(4): 141-146.
- [9] Jung Y S. Study on texture evolution and properties of silver thin films prepared by sputtering deposition [J]. *Applied Surface Science*, 2004, 221: 281-287.
- [10] Feng T, Jiang B Y, Zhuo S, *et al.* Study on the orientation of silver films by ion-beam assisted deposition [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(6): 1565-1568.
- [11] Oh Y, Lee M. Single-pulse transformation of Ag thin film into nanoparticles via laser-induced dewetting [J]. *Applied Surface Science*, 2017, 399: 555-564.
- [12] Dikovska A O, Alexandrov M T, Atanasova G B, *et al.* Silver nanoparticles produced by PLD in vacuum: role of the laser wavelength used [J]. *Applied Physics A*, 2013, 113(1): 83-88.
- [13] Toftmann B, Doggett B, Budtz-Jørgensen C, *et al.* Femtosecond ultraviolet laser ablation of silver and comparison with nanosecond ablation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(8): 083304.
- [14] Ganeev R A, Chakravarty U, Naik P A, *et al.* Pulsed laser deposition of metal films and nanoparticles in vacuum using subnanosecond laser pulses [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(8): 1205-1210.
- [15] Alonso J C, Diamant R, Castillo P, *et al.* Thin films of silver nanoparticles deposited in vacuum by pulsed laser ablation using a YAG: Nd laser [J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(9): 4933-4937.
- [16] Boutinguiza M, Comesaña R, Lusquiños F, *et al.* Production of silver nanoparticles by laser ablation in open air [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 336: 108-111.
- [17] Kamakshi K, Silva J P B, Sekhar K C, *et al.* Substrate temperature effect on microstructure, optical, and glucose sensing characteristics of pulsed laser deposited silver nanoparticles [J]. *Plasmonics*, 2018, 13(4): 1235-1241.
- [18] Fu G S, Wang Y L, Chu L Z, *et al.* The size distribution of Si nanoparticles prepared by pulsed-laser ablation in pure He, Ar or Ne gas [J]. *Europhysics Letters*, 2005, 69(5): 758-762.
- [19] Yoshida T, Takeyama S, Yamada Y, *et al.* Nanometer-sized silicon crystallites prepared by excimer laser ablation in constant pressure inert gas [J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 68(13): 1772-1774.
- [20] Deng Z C, Luo Q S, Ding X C, *et al.* Pressure threshold and dynamics of nucleation for Si nanocrystal grains prepared by pulsed laser ablation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(12): 126801.  
邓泽超, 罗青山, 丁学成, 等. 脉冲激光烧蚀制备纳米 Si 晶粒成核气压阈值及动力学研究 [J]. *物理学报*, 2011, 60(12): 126801.
- [21] Colina M, Molpeceres C, Morales M, *et al.* Laser ablation modelling of aluminium, silver and crystalline silicon for applications in photovoltaic technologies [J]. *Surface Engineering*, 2011, 27(6): 414-423.
- [22] Aghaei M, Mehrabian S, Tavassoli S H. Simulation of nanosecond pulsed laser ablation of copper samples: a focus on laser induced plasma radiation

- [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104 (5): 053303.
- [23] Bulgakova N M, Bulgakov A V. Pulsed laser ablation of solids: transition from normal vaporization to phase explosion [J]. Applied Physics A, 2001, 73 (2): 199-208.
- [24] Amoroso S, Ausanio G, Bruzzese R, *et al.* Characterization of laser ablation of solid targets with near-infrared laser pulses of 100 fs and 1 ps duration [J]. Applied Surface Science, 2006, 252(13): 4863-4870.
- [25] Chan W L, Averback R S, Cahill D G, *et al.* Dynamics of femtosecond laser-induced melting of silver [J]. Physical Review B, 2008, 78 (21): 214107.
- [26] Morales A M, Lieber C M. A laser ablation method for the synthesis of crystalline semiconductor nanowires[J]. Science, 1998, 279(5348): 208-211.
- [27] Doggett B, Lunney J G. Expansion dynamics of laser produced plasma [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(9): 093304.
- [28] Wang Y L, Chen C, Ding X C, *et al.* Nucleation and growth of nanoparticles during pulsed laser deposition in an ambient gas [J]. Laser and Particle Beams, 2011, 29(1): 105-111.
- [29] Toftmann B, Schou J, Canulescu S. Energy distribution of ions produced by laser ablation of silver in vacuum[J]. Applied Surface Science, 2013, 278: 273-277.
- [30] Deng Z C, Wang X, Liu J D, *et al.* Distribution characteristic of Ag nanoparticles on the horizontal substrates during pulsed laser ablation process in vacuum[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2019, 48 (1): 18-23.
- 邓泽超, 王旭, 刘建东, 等. 真空中脉冲激光烧蚀制备银纳米晶粒在水平衬底上的分布特性[J]. 人工晶体学报, 2019, 48(1): 18-23.
- [31] Das D, Samanta S. Controlling the opto-electronic properties of nc-SiO<sub>x</sub>:H films by promotion of <220> orientation in the growth of ultra-nanocrystallites at the grain boundary [J]. Applied Surface Science, 2018, 428: 757-766.
- [32] Zhang J M, Xu K W. Investigation of abnormal grain growth and texture change in Ag and Cu films [J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(1): 145-149.
- 张建民, 徐可为. 银和铜膜中异常晶粒生长和织构变化的实验研究 [J]. 物理学报, 2003, 52(1): 145-149.
- [33] Kim H C, Theodore N D, Alford T L. Comparison of texture evolution in Ag and Ag (Al) alloy thin films on amorphous SiO<sub>2</sub> [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95(9): 5180-5188.