

doi: 10.3788/gzxb20144301.0116003

# 低能离子束诱导 Ag 表面纳米金字塔微结构

陈智利<sup>1,2</sup>, 刘卫国<sup>1,2</sup>, 张锦<sup>2</sup>, 王蒙皎<sup>2</sup>

(1 西安电子科技大学 微电子学院, 西安 710064)

(2 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710032)

**摘 要:**利用离子束溅射诱导实验方法,在单晶 Si(100)基底上辅助沉积银膜,研究了低能 Ar<sup>+</sup> 离子束 30° 入射时,不同离子束能量和束流密度以及基底温度对 Ag 纳米结构的影响.结果表明:在较低基底温度下(32~100℃)辅助沉积银膜,膜层表面会呈现排列紧密、晶粒尺寸一致的金字塔状纳米结构.当温度升高时(32~200℃),纳米微结构横向尺寸  $\lambda_c$  迅速增加,而粗糙度先减小(32~100℃)后迅速增大(100~200℃);当离子束能量 1 400 eV、束流密度 15~45  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  时,在相同温度下,随着离子束束流密度的增大,纳米晶粒横向尺寸基本不变,粗糙度略有增加;当离子束流密度为 15  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、能量 1 000~1 800 eV 时,在相同温度下,随着离子束能量的增加,银纳米结构尺寸增加,而表面粗糙度先增加,然后缓慢减小.自组织纳米结构的转变是溅射粗糙化和表面弛豫机制相互作用的结果.

**关键词:**微纳米制造技术;低能离子束刻蚀;自组装纳米结构;离子束辅助;银金字塔微结构

中图分类号:O484

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)01-0116003-5

## Nano Pyramid Microstructures on Ag Film Induced by Low Energy Ion Beams

CHEN Zhi-li<sup>1,2</sup>, LIU Wei-guo<sup>1,2</sup>, ZHANG Jin<sup>2</sup>, WANG Meng-jiao<sup>2</sup>

(1 Institute of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710064, China)

(2 Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

**Abstract:** Ion beam sputtering induced experimental method was used to assist the silver film deposition on monocrystalline silicon(100) and the induced deposition effects of low energy Ar<sup>+</sup> ion beams was discussed with different ion energies, fluxes and substrate temperatures at the ion incidence angle of 30°. The experiment indicated that temperature change had significant influence on the nano microstructure size and roughness. When the substrate temperature was between 32°C and 100°C, the closely packed nano pyramid microstructures were obtained with grains consistent in size; when the substrate temperature rose between 32°C and 200°C, the microstructures transverse size ( $\lambda_c$ ) of samples increased rapidly, but the roughness decreased at first (32~100°C), and then increased rapidly (100~200°C). When ion flux density was within 15~45  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  with an ion beam energy of 1 400 eV, the increase of ion beam flux densities at the same deposition temperature could achieve the nano crystal grains with unchanged lateral sizes and more compact arrangement, and slightly increased roughness; when ion beam energy was within 1 000~1 800 eV with an ion beam flux of 15  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , the increase of ion beam energies could lead silver nano microstructure sizes to increase, and the surface roughness of samples to increase first and then decrease slowly. The pattern transformation of self-organizing nano-structure results from the interaction of sputtering roughening and relaxation mechanism.

**Key words:** Micro and nano-fabrication technology; Low energy ion beam erosion; Self-organized nanostructure; Ion beam assisted deposition; Ag pyramid microstructure

**OCIS Codes:** 160.4236, 220.0220; 220.4241; 220.4610; 240.0310

基金项目:欧盟第七科技框架玛丽居里计划项目(No. 247644)、国防基础科研计划(No. A0920110016)、陕西省教育厅科学研究项目(No. 12JK0469)和西安工业大学校长基金(No. XAGDXJ1002)资助

第一作者:陈智利(1973-),男,副教授,博士研究生,主要研究方向为微纳米制造技术. Email:medichen@163.com

导师:刘卫国(1964-),男,教授,博士,主要研究方向为光电子技术、电子材料. Email: wgliu@163.com

收稿日期:2013-07-05;录用日期:2013-10-09

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

Ag 是可见和近红外光区的重要光学材料. 特别是用 Ag 和不同金属、半导体、绝缘体复合, 可研制和开发具有独特性能的光电功能薄膜.

由于表面等离子体共振(入射光与 Ag 纳米结构表面自由电子团发生共振), Ag 纳米粒子在可见光区域具有一个强共振吸收或散射峰. 在表面等离子体共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)模式下, 光场的能量强烈地局限在金属结构的表面, 尺度在亚波长范围<sup>[1]</sup>. Ag 金属纳米结构的表面等离子体光学在光催化、光学传感<sup>[2-3]</sup>、生物标记<sup>[4]</sup>、医学成像<sup>[5]</sup>、太阳能电池<sup>[6]</sup>, 以及表面增强喇曼光谱<sup>[7]</sup>等领域有着广泛的应用前景; 利用 Ag 纳米表面等离子体结构还可以做成光学天线, 其功能类似于传统的电磁波天线, 可帮助天线附近的光学信号更好地辐射到远场区域, 反之也可使入射光信号更好地聚集到特定的近场区域<sup>[8]</sup>. 另外, 表面等离子体光学结构和器件为在纳米尺度上操纵和控制光子, 实现全光集成, 发展更小、更快和更高效的纳米光子学器件提供了一条有效的途径<sup>[9]</sup>.

制造 Ag 纳米结构的方法很多, 可以通过溅射获得 Ag 膜, 然后进行聚焦离子束刻蚀或电子束曝光获得各种规则纳米结构. 如 LEE K C 由射频磁控溅射后经快速退火形成 Ag 纳米粒子并研究了不同尺度下纳米粒子的表面等离子体共振的光学性能<sup>[10]</sup>. 而通过低能离子束溅射诱导产生 Ag 纳米结构国内研究较少. 低能离子束轰击或刻蚀固体表面, 是形成自组织纳米结构非常好的方法, 它为大面积纳米表面的制造提供了一种简单、经济的方法, 可在金属、Si、Ge、GaSb、InP、InAs 等材料表面形成高度有序的纳米自组装结构<sup>[11-14]</sup>. 在用离子束辅助蒸发银膜时发现, 在较低离子束能量、或者在薄膜沉积结束之前关闭离子源、或者在沉积过程中使用较高的沉积温度, 可获得光滑的银膜; 而在较低基底温度下, 选择合适的离子束流密度和能量辅助沉积银膜, 膜层表面会呈现排列紧密、晶粒尺寸一致的金字塔状纳米结构, 并表现出很强的紫外散射特性. 本文通过控制离子束能量和束流密度、沉积温度, 研究了离子束溅射因素和表面扩散因素对于获得不同表面微结构的影响规律.

## 1 实验条件

为了研究低能离子束在 Ag 膜热蒸发过程中的溅射刻蚀作用, 本文在南光 ZZS500-2/G 箱式镀膜机上进行了实验. 采用宽束冷阴极离子源产生等离子体.

图 1 给出了冷阴极离子源的工作原理. 该离子源由两个对装的阴极与圆筒状阳极组成离子源的放电室. 外加磁场的方向与阳极圆筒的轴线平行, 阴极栅和引出栅共同组成离子束引出系统. 从阴极发射的电子,

在阳极电压加速下穿过阳极圆筒而加速, 在轴向磁场作用下, 电子做螺旋线运动, 在两极间来回振荡, 大大延长了电子运动的路程, 提高了气体被电离的几率, 在低气压下形成辉光放电, 气体放电使整个放电室内产生等离子体. 引出系统从等离子体中引出离子束. 这种冷阴极离子源主要靠离子轰击阴极表面产生的二次电子维持放电. 图中  $U_a$  为引出电源,  $U_d$  为放电电压.

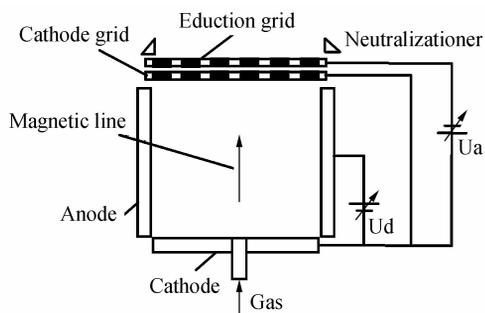


图 1 宽束冷阴极离子源工作原理

Fig. 1 Schematic diagram of the broad beam cool cathode ion source

在实验中, 基片选用单面抛光 Si(100), 粗糙度(Root Mean Square, RMS)为 0.2 nm. 本底真空  $3.6 \times 10^{-3}$  Pa, 工作真空为  $1.0 \times 10^{-2}$  Pa. 冷阴极离子源放电气体选用  $Ar_2$  气, 纯度为 99.999%, 充气流量由气体流量计进行控制, 离子束入射角度固定, 与样品表面法线成  $30^\circ$ . 使用阻蒸沉积银膜, 膜层厚度为 200 nm. 样片使用德国蔡司公司 Supra55 扫描电镜进行表面形貌表征, 英国 Taylor Hobson 公司的非接触白光干涉仪 CCI2000 进行粗糙度测量.

## 2 实验及测量结果

### 2.1 温度对微结构的影响

改变基底温度, 在离子束能量为 1 400 eV、束流密度为  $30 \mu A/cm^2$  下, 温度选择  $32^\circ C$ 、 $100^\circ C$  和  $200^\circ C$  进行离子束辅助沉积银膜, SEM 扫描结果如图 2.

由图 2(a)中可以看出, 在未使用离子束辅助时, 银膜表面光滑, RMS 为 0.42 nm. 而在离子束溅射诱导作用下, 温度较低时 ( $32 \sim 100^\circ C$ ), 银膜表面呈现金字塔状纳米微结构, 其晶粒尺寸大小一致, 排列紧密, SEM 结果如图 2 (b)和(c). 离子束溅射是诱导产生金字塔微结构的主要因素, 在能量传递的影响下, 离子束除了溅射去除作用之外, 样品表面原子还会发生迁移和扩散现象. 由于局部曲面的不同, 溅射产额产生了不稳定性, 从而形成了周期性的纳米结构. 银纳米结构表面巨大, 具有很大的表面能, 在离子束辅助作用下, 银纳米晶体处于热力学非稳态或亚稳态, 由于不同晶面具有不同的表面能, 而银晶体粒子通常形成楞面, 所以在弛豫作用下, 银纳米粒子发生了由表面能自发减少而驱动的晶粒生长, 自组装成金字塔状微结构.

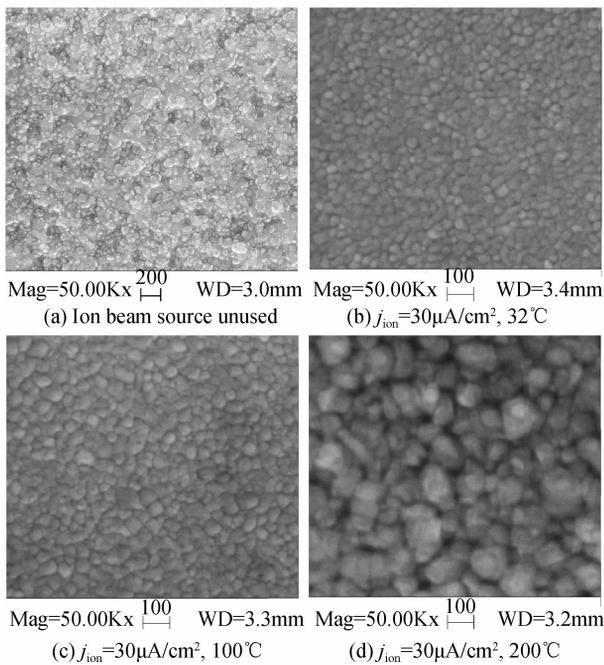


图2 离子束辅助沉积银膜表面微结构

Fig. 2 Surface microstructures of Ag films assisted deposition by ion beam

在图2中,当温度升高时(32~200℃),纳米点状结构横向尺寸迅速增加. SEM结果显示,在沉积温度为32℃时(图2(b)),银膜表面晶粒尺寸比较小,平均横向尺寸约为52 nm,排列均匀且紧密;提高基底温度,晶粒尺寸增大,温度升高到100℃时(图2(c)),纳米点状尺寸 $\lambda_c$ 约为67 nm. 在较低基底温度下(32~100℃)离子束诱导溅射沉积银膜,膜层表面会呈现排列紧密、晶粒尺寸一致的金字塔状纳米结构. 而随着沉积温度的继续升高,晶粒开始团簇,大粒子吞噬小粒子,团簇使晶粒尺寸 $\lambda_c$ 变得很大,晶粒间隙减小,晶粒粗大且大小不一,当沉积温度为200℃时(图2(d)),平均晶粒尺寸约为87 nm.

从热力学条件来看,在一定体积的金属中,晶粒愈粗,则其总的晶界表面积就愈小,总的表面能也就愈低. 由于晶粒粗化可以减少表面能,使金属处于自由能较低的稳定状态,因此,晶粒长大是一种自发的变化趋势. 晶粒长大主要是通过晶界迁移的方式进行的,要实现这种变化过程,需要原子有强大的扩散能力,而升高温度增加了银膜的表面扩散,随着基底温度的不断升高,晶粒不断长大.

## 2.2 离子束流密度对银膜微结构影响

选择离子束能量为1400 eV,束流密度15~45  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,在32℃、100℃和200℃下对银膜进行了离子束辅助镀制.

分析SEM的测量结果,得到离子束溅射后银膜微结构横向尺寸与束流密度的关系,如图3. 从图3中可以看出,在基底温度32℃、100℃和200℃时,随着离子

束流密度的增加,Ag膜表面的纳米点状结构横向尺寸变化规律一致,即随着离子束流密度的增加,Ag膜表面的纳米点状结构横向尺寸基本保持不变. 而当温度升高时,纳米点状结构横向尺寸迅速增加. 在基底温度32℃时,随着离子束流密度增大,Ag纳米微结构横向尺寸 $\lambda_c$ 保持在51~53 nm范围内;基底温度100℃时, $\lambda_c$ :67~68.5 nm;基底温度200℃, $\lambda_c$ :86.2~89 nm.

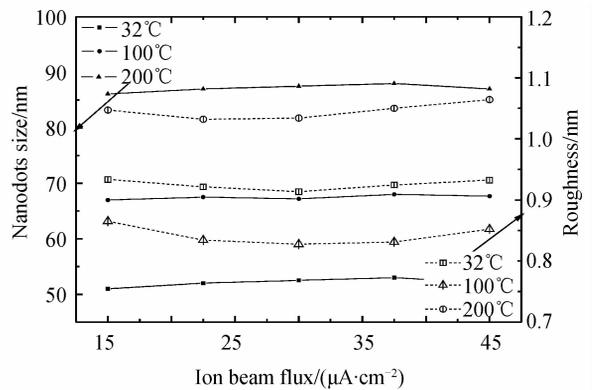


图3 离子束流与刻蚀后银膜的纳米尺度及粗糙度的关系

Fig. 3 Relationship between nanodots size, roughness of etched samples and ion beam flux

图3还给出了离子束溅射后银膜表面粗糙度与束流密度的关系. 图中可以看出,在相同温度下,随着离子束束流密度的增大,银膜表面粗糙度变化很小,随着离子束流密度增加粗糙度略有增加,离子束流密度的增大对银膜的扩散影响较小. 在升高基底温度时,粗糙度先减小(32~100℃)后迅速增大(100~200℃). 在15  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 时,基底温度32℃样品粗糙度0.93 nm,升高基底温度到100℃样品表面粗糙度降低到0.82 nm,继续提高基底温度,样品表面粗糙度开始增加,到200℃,粗糙度达到1.05 nm. 增加基底温度增加了银膜的扩散,晶粒尺寸变大,粗糙度降低,原子的扩散作用加强,刻蚀后的样品表面空间频率中频和低频都有改善,随着温度进一步增大,晶粒开始团簇,大粒子开始吞噬小粒子,样品表面出现大的起伏,粗糙度明显提高,如图2(d).

## 2.3 离子束能量对银膜微结构影响

选择离子束流密度为15  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、改变离子束流能量1000~1800 eV,在32℃、100℃和200℃下对银膜进行了离子束辅助镀制.

离子束溅射后银膜微结构横向尺寸和粗糙度随离子束能量的增加变化关系如图4. 图4中可以看出,在不同温度下,银膜纳米微结构尺寸随离子束能量的增大变化规律一致,即在温度一定时,随着离子束能量的增加,银纳米结构尺寸增大. 温度对纳米结构横向尺寸影响显著,当温度升高时,纳米点状结构横向尺寸 $\lambda_c$ 迅速增加;图4还给出了离子束溅射后银膜表面粗糙度与离子束能量的关系,图中可以看出,在相同温度

下,随着离子束能量的增加,银纳米结构表面粗糙度先增加,然后缓慢减小;而升高温度时,粗糙度先减小(32~100℃)后迅速增大(100~200℃),结论和前节相同.在32℃时,离子束能量1 000 eV得到纳米结构平均尺寸 $\lambda_c$ 为35 nm,粗糙度RMS为0.803 nm;增加离子束能量,纳米结构尺寸迅速增加,到1 400 eV时, $\lambda_c$ 达到为51 nm,粗糙度RMS为0.937 nm,此时,溅射粗糙化作用其主要作用;继续增加离子束能量,纳米结构尺寸缓慢增加,粗糙度降低,到1 800 eV时, $\lambda_c$ 为54.5 nm,RMS为0.884 nm,增大离子束能量使得样品表面原子获得的能量提高,原子扩散作用加强,迁移率提高,表面粗糙度降低.

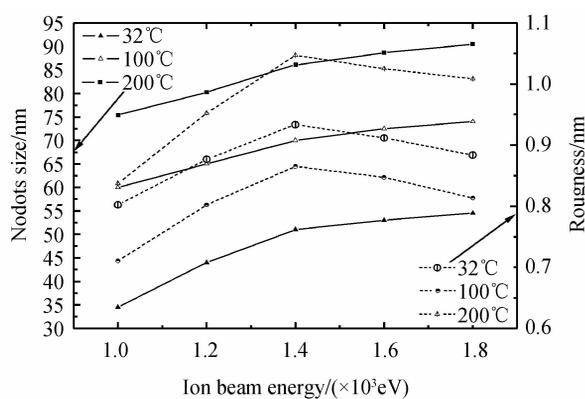


图4 离子能量与刻蚀后银膜的纳米尺度及粗糙度的关系  
Fig. 4 Relationship between nanodots size, roughness of etched

### 3 讨论

#### 3.1 离子束能量和束流密度的作用

采用离子束辅助沉积Ag膜时,入射离子与膜层材料表面的原子碰撞,将服从高斯分布的平均能量传递给材料表面的原子,碰撞可能产生热尖峰效应,即在辅助离子与沉积原子进行动量交换时,将一部分能量瞬间转化为热能,使碰撞点附近区域急剧升温,并在极短的时间内冷却,使银膜成核并形成晶体.在实验中,升高离子束能量,使原子碰撞转换的热量提高,所以银纳米粒子横向尺度增大,晶粒变粗.而离子束流密度主要通过多个离子碰撞积累效果促使薄膜晶相和晶粒尺寸发生变化,但实验中采用的离子束流密度较小(15~45  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ),在热尖峰持续时间内,几乎没有别的离子再在该热尖峰效应发生处与沉积原子碰撞<sup>[15]</sup>,也就是说,该条件下不会存在多个热尖峰效应的积累效果.所以Ag膜表面的纳米点状结构横向尺寸随着束流密度的增加基本保持不变,而随着离子束能量的增加,银纳米结构尺寸增大.

#### 3.2 规则纳米微结构形成机理

低能离子束(0~2 000 eV)在溅射/刻蚀过程中,样品表面除了溅射去除作用之外,在能量传递的影响

下,表面原子还会发生迁移和扩散现象.由于局部曲面的不同,溅射产额产生了不稳定性,从而形成了周期性的调制结构.刻蚀速率取决于局部表面曲率,结合表面原子的迁移和扩散对表面光滑机制,B-H模型给出了样品表面形貌演化的方程<sup>[16]</sup>,即

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -v_0(\theta) + v_x(\theta) \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + v_y(\theta) \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K \nabla^4 h + \eta(x, y, t) \quad (1)$$

式中, $v_0(\theta)$ 是没有外部干扰时刻蚀速率, $\eta(x, y, t)$ 是高斯型随机噪音, $v_x(\theta)$ 、 $v_y(\theta)$ 为刻蚀过程中产生的有效表面张力,与离子入射角有关. $K$ 是由表面扩散引起的松弛率

$$K = (D_s \gamma \Omega^2 n / k_B T) \exp(-\Delta E / k_B T) \quad (2)$$

式中, $\Delta E$ 是表面激活能, $\gamma$ 是单位面积的自由能, $T$ 为温度, $D_s$ 为表面扩散常量, $\Omega$ 是原子体积, $n$ 为表面上单位区域的分子数.

式(1)中第一项 $v_0(\theta)$ 描述了表面的刻蚀速率,与离子束入射角度有关,此项并不影响表面微结构的特征,如纳米结构的周期和振幅,对于表面形貌的演化不起作用,在讨论离子束轰击对于材料表面形貌的影响时可以略去.式(1)中第二、三项依赖于表面曲率的溅射产额,决定了表面形貌,使表面变得粗糙;第四项描述了扩散松弛机制使表面趋于光滑.材料表面的微结构实际上是由刻蚀项 $v_x(\theta) \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$ 、 $v_y(\theta) \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}$ 和扩散项 $K \nabla^4 h$ 之间的平衡产生的.

负的表面张力系数是纳米结构形成中不稳定性的来源,因此,其在决定表面形貌中起着非常重要的作用.由于离子束的入射方向破坏了表面的对称性,系数 $v_x(\theta)$ 、 $v_y(\theta)$ 彼此不相等.当离子斜入射时,表面形貌主要由参量 $v_x(\theta)$ 、 $v_y(\theta)$ 决定.在垂直入射( $\theta=0$ )情况下, $v_x(\theta) = v_y(\theta) < 0$ ,表面在离子束溅射作用下形成自组织点状阵列.随着 $\theta$ 的增大, $v_x(\theta)$ 、 $v_y(\theta)$ 仍都小于0,但 $v_x(\theta)$ 的绝对值大于 $v_y(\theta)$ ,表面将出现波矢方向沿 $x$ 轴的条纹结构(与离子束入射方向垂直),如样片旋转,则样片表面呈现自组织纳米点状结构.继续随着 $\theta$ 的增大, $v_x(\theta)$ 增大、 $v_y(\theta)$ 继续减小,样片表面纳米微结构尺寸减小,直到 $v_x(\theta)$ 、 $v_y(\theta)$ 再次相等(此时 $\theta \approx 45^\circ$ ),样品表面微结构不再明显,离子束起光滑作用;此后, $v_x(\theta) > 0$ 、 $v_y(\theta) < 0$ 或 $v_y(\theta) < v_x(\theta)$ ,表面将出现沿 $y$ 轴的条纹结构或在样品旋转时为纳米点状结构,此结构随着 $v_x(\theta)$ 增大、 $v_y(\theta)$ 减小特征尺寸增大,离子束主要起粗糙化作用<sup>[17]</sup>.

### 4 结论

使用自制的冷阴极离子源,在单晶Si(100)基底上使用离子束辅助沉积银膜,采用SEM和非接触白光干

涉仪对沉积后银膜的表面形貌、表面粗糙度进行了测量,研究了低能  $\text{Ar}^+$  离子束  $30^\circ$  入射时,在不同离子束能量、束流密度和温度对银膜的辅助沉积效果。

结果表明:温度对纳米微结构尺寸和粗糙度影响显著,在较低基底温度下( $32 \sim 100^\circ\text{C}$ )辅助沉积银膜,膜层表面会呈现排列紧密、晶粒尺寸一致的金字塔状纳米结构;当温度升高时( $32 \sim 200^\circ\text{C}$ ),纳米微结构横向尺寸  $\lambda$  迅速增加,而粗糙度先减小( $32 \sim 100^\circ\text{C}$ )后迅速增大( $100 \sim 200^\circ\text{C}$ )。当离子束能量  $1\ 400\ \text{eV}$ 、束流密度  $15 \sim 45\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$  时,在相同基底温度下,随着离子束流密度的增大,纳米晶粒横向尺寸基本不变,粗糙度略有增加,纳米晶粒排列更加致密;当离子束流密度为  $15\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、能量  $1\ 000 \sim 1\ 800\ \text{eV}$  时,在相同温度下,随着离子束能量的增加,银纳米结构尺寸增加,而表面粗糙度先增加,然后缓慢减小,离子束流密度对纳米微结构影响较小,提高能量,离子束的溅射刻蚀作用加强,粗糙化其主要作用,使纳米微结构尺寸增大;而提高基底温度,有利于银原子表面扩散,银的扩散特性以及平滑覆盖特性消除了溅射产生的纳米微结构。自组织纳米结构的转变是溅射粗糙化和表面驰豫机制相互作用的结果。

#### 参考文献

- [1] OZBAY E. Plasmonics: Merging photonics and electronics at nanoscale dimensions[J]. *Science*, 2006, **311**(5758): 189-193.
- [2] TAKAYUKI N, YUKITOSHI O, NORIHIRO U. Optical dew sensor using surface plasmon resonance of periodic Ag nanostructure[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, **45**(30): 810-813.
- [3] XIA Zheng-rong, LI Rong-qing. Fluorescence enhancement of CdTe nanocrystals induced by Ag/TiO<sub>2</sub> core-shell nanoparticles[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2): 166-169. 夏峥嵘,李荣青.银/二氧化钛核壳纳米颗粒对碲化镉纳米晶的荧光增强研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(2): 166-169.
- [4] WILEY B J, IM S H, LI Z Y, *et al.* Maneuvering the surface plasmon resonance of silver nanostructures through shape-controlled synthesis[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2006, **110**(32): 15666-15675.
- [5] JIRI M. Present and future of surface plasmon resonance biosensors[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2003, **377**(3): 528-539.
- [6] FERRY V E, MUNDAY J N, ATWATER H A. Design considerations for plasmonic photovoltaics [J]. *Advanced Materials*, 2010, **22**(43): 4794-4808.
- [7] LI Z Y, XIA Y N. Metal nanoparticles with gain toward single-molecule detection by surface-enhanced Raman scattering[J]. *Nano Letters*, 2010, **10**(1): 243-249.
- [8] LI Hong-guang. Far-field characteristics of silver nanodisk optical antenna[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(8): 977-981. 李宏光.银纳米圆盘光天线的远场方向性研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(8): 977-981.
- [9] LI Zhi-yuan, LI Jia-fang. Recent progress in engineering and application of surface plasmon resonance in metal nanostructures[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(32): 2631-2661. 李志远,李家方.金属纳米结构表面等离子体共振的调控和利用[J]. *科学通报*, 2011, **56**(32): 2631-2661.
- [10] LEE K C, LIN S J, LIN C H, *et al.* Size effect of Ag nanoparticles on surface plasmon resonance[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, **202**(22/23): 5339-5342.
- [11] FROST F, ZIBERI B, SCHINSLER A, *et al.* Surface engineering with ion beams: from self-organized nanostructures to ultra-smooth surfaces[J]. *Applied Physics A*, 2008, **91**(3): 551.
- [12] ZIBERI B, FROST F, RAUSCHENBACH B. Formation of large-area nanostructures on Si and Ge surfaces during low energy ion beam erosion[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2006, **24**(4): 1033-1038.
- [13] ZIBERI B, FROST F, TARTZ M, *et al.* Importance of ion beam parameters on self-organized pattern formation on semiconductor surfaces by ion beam erosion[J]. *Thin Solid Films*, 2004, **459**(1-2): 106-110.
- [14] CHAN W L, CHASON E. Morphology of ion sputtered Cu (0 0 1) surface: transition from unidirectional roughening to bidirectional roughening [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 2006, **242**(1/2): 228.
- [15] ZHANG Da-wei, HONG Rui-jing, FAN Shu-hai, *et al.* The effect of ion current density in ion beam assisted deposition [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 477-480. 张大伟,洪瑞金,范树海,等.离子辅助沉积中离子束流密度的作用[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3): 477-480.
- [16] MARK B R, JAMES H M E. Theory of ripple topography induced by ion bombardment[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 1988, **6**(4): 2390-2395.
- [17] CHEN Zhi-li, LIU Wei-guo. Nanodots pattern and optical properties of monocrystalline silicon induced by low energy ion beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(9): 0922003-1-6. 陈智利,刘卫国.低能离子束诱导单晶硅点状纳米结构与光学性能研究[J]. *光学学报*, 2013, **33**(9): 0922003-1-6.