

低能离子束诱导单晶硅点状纳米结构与光学性能研究

陈智利 刘卫国

(西安电子科技大学微电子学院, 陕西 西安 710064)

摘要 使用微波回旋共振离子源,研究了低能 Ar^+ 束在不同入射角度下对旋转单晶硅(100)表面的刻蚀效果及其光学性能。结果表明:样品旋转、离子束能量为 1000 eV、束流密度为 $265 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、刻蚀时间为 60 min 时,在不同入射角度下,刻蚀后的样品表面可形成均匀的自组装点状结构。入射角度为 $0^\circ \sim 25^\circ$ 时,随着角度增加,样品表面粗糙度增大,点状结构有序性更强,光学透射率提高;继续增加入射角度,样品表面粗糙度及点状结构尺寸开始减小,光学透射率降低;增加入射角度到 45° 时,自组装点状结构消失,粗糙度和平均光学透射率达到最小值分别为 0.83 nm 和 55.05%;进一步增加入射角度,样品表面再次出现自组织装点状结构,表面粗糙度急剧增大,入射角度在 65° 时,平均光学透射率达到极大值 64.59%;此后,随着离子束入射角度的增加,表面粗糙度缓慢减小,光学透射率降低。自组织结构变化是溅射粗糙化和表面弛豫机制相互作用的结果。

关键词 表面光学;微纳米制造技术;自组织纳米结构;低能离子束刻蚀;表面形貌;光学透射率

中图分类号 O484 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0922003

Nanodots Pattern and Optical Properties of Monocrystalline Silicon Induced by Low Energy Ion Beam

Chen Zhili Liu Weiguo

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

Abstract Electron cyclotron resonance (ECR) has been employed to etch the surface of monocrystalline silicon (100) with sample rotation, etching effects and optical properties of low energy Ar^+ beams at different ion-beam incident angles are studied. The experimental results indicate that, when ion beam energy is 1000 eV, beam current density is $265 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, and etching time is 60 min with simultaneous sample rotation, well ordered self-organized nanodot patterns form on the Si surface. Within $0^\circ \sim 25^\circ$, if the incident angle increases, root mean square (RMS) of the roughness and optical transmittance of the sample are enhanced with the growth of self-organizing nanostructure, when surface roughen functions principally. If the incident angle remains increaseing, the reducing size of self-organized nanodots lessen RMS and optical transmittance of samples. If the incident angle continues to increase nearly up to 45° , the dot patterns fade away, and RMS and mean optical transmittance of samples reach the minimums of 0.83 nm and 55.05%, and the polishing effect is obvious for ion beams. If the incident angle further increases, the self-organized dot patterns appear on the sample surface again, RMS is dramatically enlarged and optical transmittance start to magnify with the angle increasing, and at about 65° , the mean optical transmittance get the maximum of 64.59%, then the RMS and optical transmittance begin to decrease slowly with the incident angle increasing. The transformation self-organized nano-structure patterns results from the interaction of spurting roughness and relaxation mechanism.

Key words optics at surfaces; micro and nano-fabrication technology; self-organized nano structures; low energy ion beam erosion; surface topography; optical transmittance

OCIS codes 350.3950; 160.4236; 350.5400; 310.1210

收稿日期: 2013-03-15; 收到修改稿日期: 2013-04-16

基金项目: 欧盟第七科技框架玛丽居里计划项目(247644)、陕西省教育厅科学研究项目(12JK0469)、广东省科技厅高新区发展引导专项(2011B010700101)、西安工业大学校长基金(XAGDXJJ1002)

作者简介: 陈智利(1973—),男,副教授,博士研究生,主要从事微纳米制造技术方面的研究。E-mail: medichen@163.com

导师简介: 刘卫国(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光电子技术、电子材料方面的研究。

E-mail: wgliu@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

量子点、量子线等纳米结构材料在光电子学、光、电、磁功能器件方面有着广阔的应用前景。低能离子束溅射/刻蚀固体表面形成自组织纳米微结构,是一种高效、简便、低成本制造大面积有序纳米结构的方法。离子束在溅射/刻蚀过程中,能量从入射离子传递给目标原子,除引起材料去除外,溅射粗糙化和表面弛豫机制相互作用,还可以形成孔洞、条纹和点状等多种纳米结构和图形^[1-2],且可在合适的离子束条件下对样品表面进行抛光^[3]。

低能离子束刻蚀样品表面获得自组装纳米微结构,具有加工精度高,改变离子束参数可实现纳米微结构的尺寸控制和易于实现自动化等优点,所以低能离子束刻蚀晶体表面形成自组织纳米结构一直是欧美发达国家的研究热点。近年来,日本、韩国、新加坡学者也相继对半导体材料进行了相关的研究^[4-6]。国内利用离子束刻蚀进行了一些抛光和刻蚀实验,并对其光学性能进行了讨论,但利用离子束刻蚀形成纳米微结构方面的研究还很少^[7-9]。采用低能离子束刻蚀样品表面可以获得两种典型的纳米微结构,即条纹和点状自组装纳米微结构。近年来,研究人员使用大束流低能量的考夫曼或微波回旋共振(ECR)等离子源,利用 Ar^+ 、 Kr^+ 、 Xe^+ 等惰性气体离子对 InP 、 GaSb 、 InAs 、 Si 、 Ge 等半导体或金属材料表面进行低能离子束刻蚀。当样品不发生旋转,离子束以一定的角度入射时,样品表面就会产生类似条纹状的纳米结构,如果离子束接近于垂直入射,条纹方向与入射离子束方向垂直,而在离子束接近掠入射时,条纹方向会与入射离子束方向平行;在样品旋转的情况下,离子束垂直或倾斜入射于单晶半导体表面,形成自组织纳米点状结构。控制离子束参数,可使这些纳米级的点排列有序,呈现出相对整齐的分布^[10-12]。2008年 Oates 等^[13]利用离子束刻蚀形成的规则有序的条纹结构,在其上沉积一层金属,退火生成规则银和钴纳米线,这种技术可以延伸到许多基底材料、图形阵列和纳米粒子材料的加工。同年, Toma 等^[14]利用平行 Ar^+ 束溅射/刻蚀介电基板形成条纹状纳米结构,掠入射沉积 Ag 膜形成纳米线阵列,在可见光范围内实现了光学各向异性特性的调制。

目前学者对离子束刻蚀金属及化合物半导体时,离子束参数与表面纳米结构的关系研究较多,实验给出了样品表面小尺度规则排列的结构,但还不能确定离子束参数与表面结构之间的关系,实现对

颗粒间隔、周期等参数的控制,对其光学性能的研究也很少。本文主要通过控制不同离子束入射角度,对旋转样品进行刻蚀,研究了刻蚀后样品表面纳米组装微结构和光学性能的变化规律。研究发现,刻蚀后样品的透射率有明显的提高,这是由于刻蚀产生的纳米自组装微结构相当于在样品表面覆盖了一层减反射薄膜,这层薄膜与基底为同一材料,其性能稳定,不会脱落,可大大提高薄膜的高温阈值,而且纳米微结构具有优异的增透性质,通过控制组装条件实现可见光到近红外高增透效率,这对于提高红外窗口高温及抗损伤阈值、提高器件性能具有重要意义。

2 实验设备与方法

为了研究低能离子束在斜入射下对单晶硅的刻蚀作用,利用自制的离子束刻蚀系统进行实验。

采用微波回旋共振离子源产生等离子体。微波回旋共振离子源如图 1 所示,该离子源由微波源与传输波导、放电室、工作室、真空系统与配气系统组成。微波源频率为 2.45 GHz,功率为 0~400 W 可调,产生的微波经耦合波导、环行器、定向耦合器、阻抗匹配器及直波导输入放电室。在放电室内,电子在垂直磁场的平面上受洛伦兹力的作用而做回旋运动,在磁感应强度为 87.5 mT 处,电子回旋频率和沿磁场传播的右旋圆极化微波频率相等(2.45 GHz)时产生共振,电子在微波电场中被不断同步加速而获得足够大的能量,碰撞气体分子使其电离,实现等离子体放电,获得活性反应离子,形成高密度的 ECR 低温等离子体。

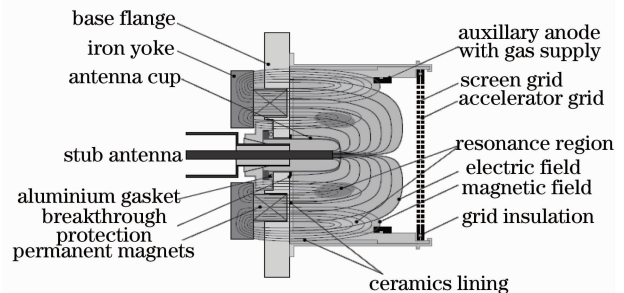


图 1 微波回旋共振离子源工作原理示意图
Fig. 1 Schematic diagram of microwave cyclotron resonance ion source

在实验中,样片选用双面抛光单晶 $\text{Si}(100)$,粗糙度均方根(RMS)为 1.05 nm。样片安装在具有水冷装置的工件台上,该工件台可绕自身轴旋转,离子束入射角度相对于样片表面法线可实现 $0^\circ \sim 90^\circ$ 可调。

微波回旋共振离子源口径为 120 mm,配置三栅系统使离子束发散角小于 $\pm 10^\circ$,离子源微波功率为 0~400 W、离子束能量为 200~2000 eV、束流密度为 0~3000 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 可调节。

实验在室温下进行,选择本底真空为 5.0×10^{-4} Pa,工作真空为 3.0×10^{-2} Pa,放电气体选用 Ar_2 ,纯度为 99.999%,充气流量由气体流量计进行控制。设置离子源微波功率为 345 W,离子束入射能量为 1000 eV,束流密度为 $265 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,加速电压为 500 eV,刻蚀时间为 60 min,在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内改变离子束入射角度,样品旋转。

采用布鲁克生产的 MultiMode-8 型多模式原子力显微镜(AFM)来观察硅片表面的形貌变化,使用 Taylor SurfCCI2000 非接触式表面测量仪测定硅片表面的粗糙度和刻蚀深度,使用 Spectrum GX 型傅里叶变换红外光谱仪进行透射率测量。

3 实验及测量结果

3.1 离子束入射角与纳米自组织结构的关系

样品旋转时不同角度下刻蚀后表面的原子力显微镜检测结果如图 2 所示, Z 为纳米点状结构的纵向

高度。检测区域为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 。图 3 给出了图 2 中的 AFM 图对应的功率谱密度(PSD)曲线,左边第一个值代表刻蚀后样品表面自组装微结构的特征波长 λ_c 。由图 2 可以看出:在离子束能量为 1000 eV、束流密度为 $265 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、样品旋转时,不同离子束入射角度下,经刻蚀后,单晶硅表面可形成均匀的自组织点状结构。当离子束入射角度为 5° 时,样品表面形成无序的孔洞结构[图 2(a)];增大离子束入射角度到 25° ,样品表面形成较为均匀的纳米点状结构,其纵向高度 Z 约为 3.5 nm,从图 3 中可以看出该纳米点状结构的 λ_c 为 66.7 nm;继续增加离子束入射角度到 35° ,纳米自组装点状结构的特征波长($\lambda_c = 52$ nm)和高度($Z = 2$ nm)都减小;当离子束入射角度增大到 45° 时,刻蚀后的表面自组织点状结构不再明显,从图 3 可以看出,此时 PSD 曲线上没有明显的峰值,样品表面趋于光滑;继续增大角度,自组织纳米结构再次出现,且随着角度的增大,这些规则的点状结构的特征波长由小变大(在 65° 时, $\lambda_c = 60.6$ nm; 85° 时, $\lambda_c = 80$ nm),同样,可以从图 3 所示的 PSD 曲线看出第一个峰值也由小变大,表明自组织点状纳米结构有序性更强。

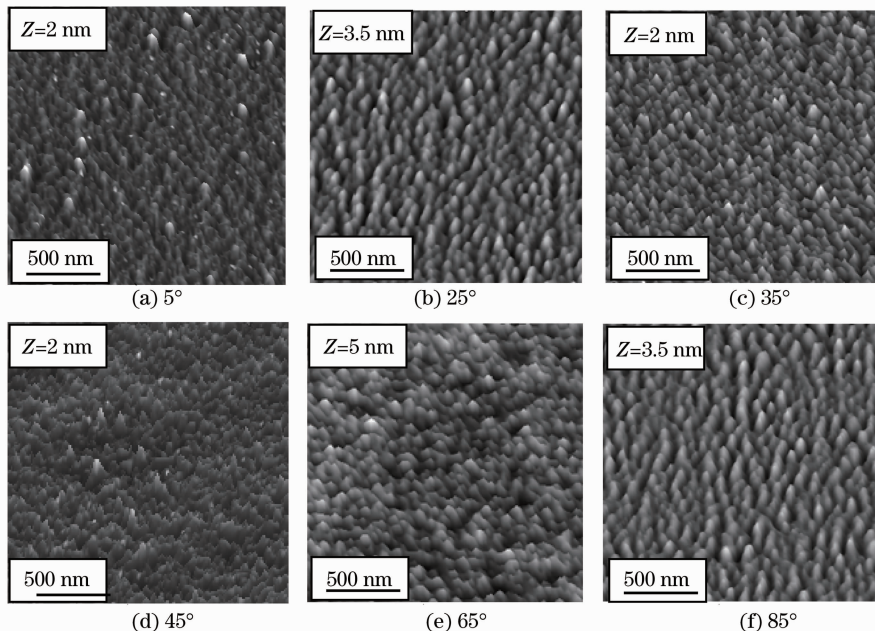


图 2 经不同角度离子束刻蚀后硅片表面的 AFM 图

Fig. 2 AFM images of self-organized nanostructure at different beam incident angles

3.2 离子束入射角与刻蚀表面粗糙度的关系

不同离子束入射角度下,样品的表面粗糙度 RMS 检测结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出:离子束入射角度在 $0^\circ \sim 25^\circ$ 之间,随着角度的增大,样品表面粗糙度增加, 25° 时,

粗糙度 RMS 达到 1.12 nm,此时离子束刻蚀粗糙化起主要作用,样品表面出现有序的点状自组织结构;随后增加离子束入射角度,样品表面粗糙度开始下降,到 45° 附近时样品表面粗糙度达到最小值,入射角度为 45° 时,表面粗糙度为 0.83 nm,此时表面的

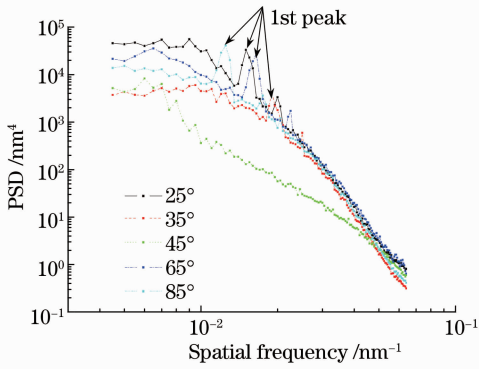


图 3 不同离子束角度的 PSD 曲线
Fig. 3 PSD curves of samples at different beam incidence angles

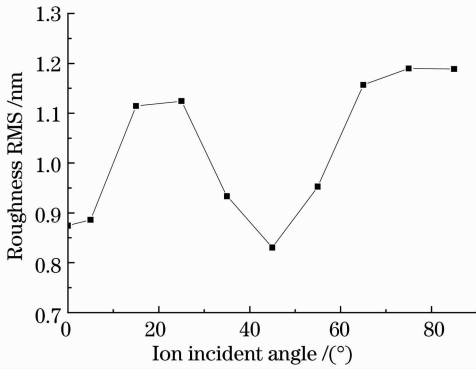


图 4 离子束入射角度与刻蚀后硅片的表面粗糙度的关系

Fig. 4 Relationship between roughness of etched samples and beam incident angles

点状结构不再明显,表面原子扩散影响显著,离子束起抛光作用。继续增加入射角度,样品表面再次出现自组织点状结构,表面粗糙度急剧增大,到 75° 时,达到最大值 1.19 nm,此后粗糙度随入射角度增大缓慢下降,图 3 中相应的 PSD 曲线特征峰明显,表明样品表面的点状结构排列有序,大小较均匀。

3.3 离子束入射角度与透射率 T 的关系

使用 Spectrum GX 型傅里叶变换红外光谱仪对刻蚀后样片的红外透射性能进行了测量,在近红外 1100~2000 nm 波段的透射率如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,使用不同入射角度对样品刻蚀,刻蚀后的样品在测量波段范围内,透射率明显提高。在离子束入射角度为 5° 时,表面形成了孔洞结构,有序性较差,平均透射率为 57.92%。随着离子束入射角度增大,表面纳米自组织点状结构逐渐变得密集,有序性也加强,其透射率也相应地提高,25° 时平均透射率达到 60.81%,继续增加入射角度,表面点状结构规律性减弱,表面变得平滑,平均

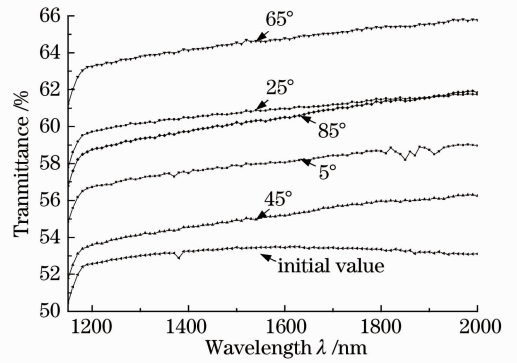


图 5 不同离子束角度刻蚀后硅片的透射率
Fig. 5 Optical transmittance of etched samples at different beam incident angles

透射率降低,在入射角度为 45° 时,平均透射率达到最小值 55.05%;继续增加入射角度,表面再次出现纳米点状结构,透射率开始上升,当入射角度为 65° 时,透射率达到最大值 64.59%;之后,光学透射率开始下降,在入射角度为 85° 时,平均透射率降低到 60.35%。

单晶硅刻蚀后透射率提高和传统的减反射薄膜机理不同,后者通过干涉理论实现,而对于前者,由于刻蚀形成的纳米周期结构尺寸小于 $\lambda/10$ (λ 为入射波长),即 $\lambda/\lambda_c \geq 10$,光脱离共振区(衍射区),此时可以通过等效折射率理论来描述。

刻蚀后样品表面产生的纳米自组装微结构相当于在样品表面覆盖了一层薄膜,薄膜的等效厚度为 d ,图 6 给出了刻蚀后样品表面的等效折射率模型。这层等效薄膜的折射率可表示为

$$n_{//} = (n_1^2 f_1 + n_2^2 f_2)^{0.5},$$

$$n_{\perp} = (f_1/n_1^2 + f_2/n_2^2)^{-0.5}, \quad (1)$$

式中 n_1 为入射介质的折射率, n_2 为刻蚀材料的折射率,刻蚀结构的占空比为 f_1/f_2 , $f_1 = \frac{d_1}{d_1 + d_2}$,

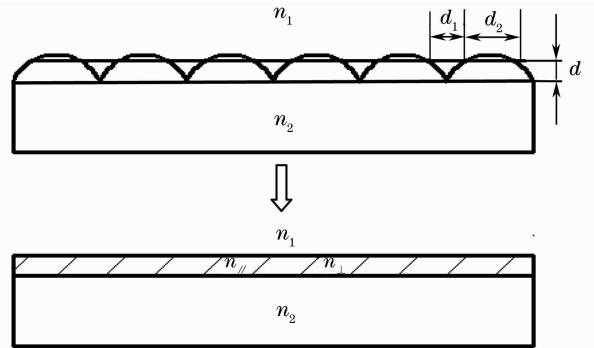


图 6 刻蚀后表面微结构等效折射率模型
Fig. 6 Equivalent refractive index model of the surface microstructure of etched samples

$$f_2 = \frac{d_2}{d_1 + d_2}.$$

实验中,入射介质为空气层($n_1=1$),通过(1)式得到的折射率小于基底折射率 n_2 ,等效层对单晶硅起增透效果。同时由(1)式还可以看出,通过改变样品表面自组装结构的特征尺寸,可改变样品表面微结构的占空比,即可改变等效层的折射率。因此,可以通过控制离子束的参数,达到调制样品光学性能的目的。

3.4 离子束入射角度与刻蚀速率的关系

离子入射角度对刻蚀速率的影响规律如图 7 所示。

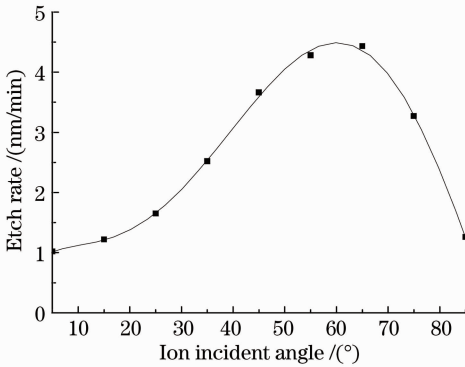


图 7 不同离子束角度的刻蚀速率

Fig. 7 Etch rate of samples at different beam incident angles

从图 7 可以看出,Ar⁺束的入射角度在 0°~90° 的范围内变化时,样片表面的刻蚀速率随离子束入射角度先增大后减小,在 60°附近达到最大值。从刻蚀速率曲线上可以看出,通过选择合适的离子束入射角度,可以控制样品刻蚀速率的大小。

4 讨 论

在低能量(0~2000 eV)情况下,入射离子穿透材料表面,将服从高斯分布的平均能量传递给材料表面的原子,一部分原子被溅射出来,而另一部分则离开原先的平衡位置。材料上某点被溅射掉的物质,正比于所有入射离子在这点沉积能量的总和。低能离子束在溅射/刻蚀过程中,样片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^[15],即

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

式中 $v_0(\theta)$ 是没有外部干扰时刻蚀速率, h 为样品的表面高度, $\eta(x, y, t)$ 是高斯型随机噪声, $v_x(\theta)$, $v_y(\theta)$ 为刻蚀过程中 x 和 y 方向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

$$K = [D_s \gamma \Omega^2 n / (k_B T)] \exp[-\Delta E / (k_B T)], \quad (3)$$

式中 ΔE 是表面激活能, γ 是单位面积的自由能, T 为温度, D_s 为表面扩散常数, Ω 是原子体积, n 为表面上单位区域的分子数。

(2)式中第一项 $v_0(\theta)$ 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,如条纹波长和条纹振幅,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;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 $v_y(\theta) \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$, $v_x(\theta) \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}$ 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波纹形成中不稳定性的来源,因此,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。当离子束斜入射时,表面形貌主要由参数 $v_x(\theta)$, $v_y(\theta)$ 决定。

图 8 为离子束入射角度与归一化表面张力的关系曲线。由图 8 可以看出,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 θ 的增大, $v_x(\theta)$, $v_y(\theta)$ 仍都小于 0,但 $v_x(\theta)$ 的绝对值小于 $v_y(\theta)$,表面将出现波

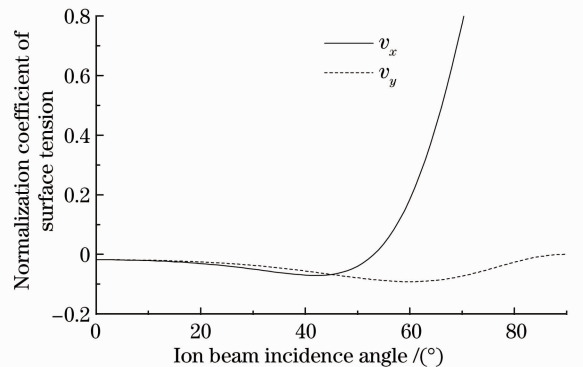


图 8 不同角度下表面张力归一化系数

Fig. 8 Normalization coefficient of surface tension at different ion beam incident angles

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。继续增大角度 θ , $v_x(\theta)$ 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,离子束起抛光作用;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。

5 结 论

使用微波回旋共振离子源,在样品旋转条件下,利用低能 Ar^+ 束在不同入射角度下对单晶硅(100)表面进行了刻蚀,采用原子力显微镜、非接触式表面测量仪和傅里叶变换红外光谱仪对刻蚀后硅片的表面形貌、表面粗糙度和光学透射率进行了测量,研究了低能 Ar^+ 束在不同入射角度下对单晶硅的刻蚀效果及其光学性能。

实验结果表明,当离子束能量为 1000 eV、束流密度为 $265 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、刻蚀时间为 60 min 下,样品旋转时,在不同离子束入射角度下,经离子束刻蚀后,单晶硅表面会形成均匀的自组织点状结构,并呈现出高度的有序性。随着点状结构的出现,入射角度在 $0^\circ \sim 25^\circ$ 范围内,随着角度增加,样品表面粗糙度增大,点状结构有序性更强,光学透射率提高;继续增加离子束入射角度,点状结构尺寸减小,粗糙度减小,同时光学透射率降低。此后继续增加入射角度到 45° 附近,自组织结构逐渐消失,粗糙度和平均光学透射率到达最小值分别为 0.83 nm 和 55.05%,离子束主要起抛光作用;此后继续增加入射角度,样品表面再次出现明显的自组织点状结构,此时表面粗糙化起主要作用,表面粗糙度急剧增大,光学透射率随着角度增加开始增加,在 65° 附近,点状结构特征波长 λ_c 为 60.6 nm,光学透射率达到极大值 64.59%;此后,随着入射角度的增加,表面粗糙度又开始减小,光学透射率开始降低;离子束在入射角度为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内,对样片表面的刻蚀速率随离子束入射角度先增大后减小,在 60° 附近达到最大值。自组织结构是溅射粗糙化和表面弛豫机制相互作用的结果,随着时间的增加,由于样片表面原子扩散影

响,点状结构排列趋于均匀。

参 考 文 献

- 1 T Bobek, S Facsko, T Dekorsy, *et al.*. Ordered quantum dot formation on GaSb surfaces during ion sputtering [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2001, 178(1-4): 101-104.
- 2 B Ziberi, F Frost, B Rauschenbach. Pattern transitions on Ge surfaces during low-energy ion beam erosion [J]. Appl Phys Lett, 2006, 88(17): 173115.
- 3 F Frost, R Fechner, D Flamm, *et al.*. Ion beam assisted smoothing of optical surfaces [J]. Appl Phys A, 2004, 78(5): 651-654.
- 4 K Takahiro, K Ozaki, K Kawatsura, *et al.*. Ion-induced self-organized ripple patterns on graphite and diamond surfaces [J]. Appl Surf Sci, 2009, 256(4): 972-975.
- 5 S K Tan, R Liu, C H Sow, *et al.*. Self-organized nanodot formation on InP(100) by oxygen ion sputtering [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2006, 248(1): 83-89.
- 6 H Park, H W Choi, W K Choi. Nano patterning and structuring of InP(100) by low energy ion beam irradiation [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201(19-20): 8469-8476.
- 7 Wang Haibin, Liu Quan, Wu Jianhong. Fabrication of convex blazed grating by Ar^+ ion-beam etching [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0405002.
汪海宾, 刘 全, 吴建宏. Ar^+ 离子束刻蚀制作凸面闪耀光栅 [J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0405002.
- 8 Xu Qinfang, Liang Lei, Hu Manli, *et al.*. Antireflection of silica nano-microsphere surface structure in visible light [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1216001.
徐琴芳, 梁 磊, 忽满利, 等. SiO_2 纳米微球表面结构在可见光波段的减反特性[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1216001.
- 9 Ding Wenge, Lu Yunxia, Sun Xue, *et al.*. Temperature-dependent photoluminescence of silicon-nanostructure thin film [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0831002.
丁文革, 卢云霞, 孙 雪, 等. 纳米硅结构薄膜光致发光的温度依赖特性[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0831002.
- 10 B Ziberi, F Frost, B Rauschenbach. Formation of large-area nanostructures on Si and Ge surfaces during low energy ion beam erosion [J]. J Vac Sci Technol A, 2006, 24(4): 1344-1348.
- 11 B Ziberi, F Frost, M Tartz, *et al.*. Ripple rotation, pattern transitions, and long range ordered dots on silicon by ion beam erosion [J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(6): 063102.
- 12 F Frost, B Ziberi, A Schindler, *et al.*. Surface engineering with ion beams: from self-organized nanostructures to ultra-smooth surfaces [J]. Appl Phys A, 2008, 91(3): 551-559.
- 13 T W H Oates, A Keller, S Noda, *et al.*. Self-organized metallic nanoparticle and nanowire arrays from ion-sputtered silicon templates [J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(6): 063106.
- 14 A Toma, D Chiappe, D Massabò, *et al.*. Self-organized metal nanowire arrays with tunable optical anisotropy [J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(16): 163104.
- 15 R M Bradley, J M Harper. Theory of ripple topography induced by ion bombardment [J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 1988, 6(4): 2390-2395.