

## 고출력 저에너지 이온빔을 이용한 InP(100) 표면의 나노 패턴형성

박종용 · 최형욱 · Y. Ermakov\* · 정연식, 최원국<sup>†</sup>

한국과학기술연구원, 박막재료연구센터

\*Moscow Institute of Radioengineering, electronics, and Automatics (MIREA), 78,  
Prospect Verndskogo, Moscow, Russia

### Fabrication of Nanostructures on InP(100) Surface with Irradiation of Low Energy and High Flux Ion Beams

Jong Yong Park, Hyoung Wook Choi, Y. Ermakov\*, Yeon Sik Jung and Won-Kook Choi<sup>†</sup>

Thin Film Materials Research Center, KIST, Korea

\*Moscow Institute of Radioengineering, electronics, and Automatics (MIREA), 78,  
Prospect Verndskogo, Moscow, Russia

(2005년 4월 19일 받음, 2005년 5월 20일 최종수정본 받음)

**Abstract** InP(100) crystal surface was irradiated by ion beams with low energy (180~225 eV) and high flux ( $\sim 10^{15}/\text{cm}^2/\text{s}$ ), Self-organization process induced by ion beam was investigated by examining nano structures formed during ion beam sputtering. As an ion source, an electrostatic closed electron Hall drift thruster with a broad beam size was used. While the incident angle ( $\theta$ ), ion flux ( $J$ ), and ion fluence ( $\phi$ ) were changed and InP crystal was rotated, cone-like, ripple, and anisotropic nanostructure formed on the surface were analyzed by an atomic force microscope. The wavelength of the ripple is about 40 nm smaller than ever reported values and depends on the ion flux as  $\lambda \propto J^{1/2}$ , which is coincident with the B-H model. As the incident angle is varied, the root mean square of the surface roughness slightly increases up to the critical angle but suddenly decreases due to the decrease of sputtering yield. By the rotation of the sample, the formation of nano dots with the size of 95~260 nm is clearly observed.

**Key words** Closed electron Hall drift thruster, surface energy, surface modification by low energy ion beam, x-ray photoelectron, nanostructure.

### 1. 서 론

일반적으로 수 keV의 저에너지를 이용한 이온빔 증착 시에서는 표면의 기하학적 모양에 따른 원자 충돌로 인한 거칠어짐과 증착된 입자들(projectiles)의 표면 확산에 의한 평탄화가 복합적으로 작용하여 표면 침식(erosion)이 나타나게 된다. 이러한 표면 거칠기의 증가 및 특이 표면 형상들의 형성은 secondary ion mass spectroscopy (SIMS), Auger electron spectroscopy (AES) 등의 깊이 에 따른 조성 분석(depth profiling)<sup>1-3)</sup>을 위해 이온 증착과(focused ion beam)<sup>4)</sup>을 이용한 패턴 형성시 깊이 분해능 및 정밀도에 있어서 큰 오차를 가져오게 하는 저해 요인으로 알려져 있다.

최초로 유리 위에 이온빔을 일정한 입사각으로 조사시 발견된 물결 모양(ripple)의 형성에 관한 보고<sup>5)</sup> 이후 이러한 물결 모양을 다른 물질 표면 위에서도 많이 발견

되었다.<sup>6-8)</sup> 이러한 현상은 주로 비정질 물질의 스퍼터링 현상을 설명하기 위한 Sigmund의 선형적 캐스캐이드(linear cascade) 이론<sup>9,10)</sup>에 근거한 Bradley-Harper (BH) 모델에 의해서 설명되고 있다. 또한 국부적 곡률(local curvature)에 의존하는 증착효과에 의한 거칠어짐(roughening) 과정과 표면에서의 확산에 의한 평탄화(smoothing) 과정의 상호 정도에 따라 만들어지는 표면 형상의 불안정성(instability)에 기인한 것으로 잘 설명 된다.<sup>11)</sup> 이와 더불어 비열적(non-thermal) 표면 평탄화를 표면 완화(surface relaxation) 기구에 의해 설명하고 있다.<sup>12,13)</sup> 한편 최근에는 GaSb, InP, InSb등의 III-V 반도체 결정의 시료 표면 또는 Si에 수직으로 이온빔을 입사하거나, 일정한 입사각에 고정시킨 후 시료를 회전하면 0 또는 2 차원의 나노 구조가 표면에서 잘 형성됨을 관측하였으며, 이러한 비등방적인 요소의 제거를 통하여 100 nm 미만의 원뿔(cone) 모양의 나노 패턴(pattern) 또는 나노점(nano dot)들을 제작할 수 있는 결과들이 보고되고 있다.<sup>14-16)</sup> 나노 기술의 빠른 발전에 따라 이러한 이온빔을 조사하여

<sup>†</sup>E-Mail : wkchoi@kist.re.kr

표면에 나노 구조를 형성하는 방식은 자기 조립(self-assembly) 방식과 비슷한 일종의 자기 조직화(self-organization), 또는 자발적 패턴 형성(spontaneous pattern formation) 방식으로, 최근 200 nm 미만의 나노 구조 형성을 위한 복잡한 리소그라피 및 에칭 공정에 비하여 비용이 매우 적은 bottom-up 방식의 한가지로서 많은 연구가 시작되고 있다.

이제까지의 연구에 의하면 나노 물결(ripple) 패턴의 파장 ( $\lambda$ ) 간격은 이온전속  $J$  (ion flux 또는 areic dose rate)에  $\lambda \propto J^{-1/2}$ <sup>11)</sup>, 또는 이온선량  $\phi$  (ion fluence 또는 areic dose)에  $\lambda \propto J^{-1/2}$ <sup>17)</sup>, 또는 증착 시간에  $\lambda \propto t^y$ 로 비례하는 의존성을 보인다고 보고 되고 있다.<sup>18)</sup> III-V 화합물 반도체층에서 InP는 증착 시 다양한 표면 거칠기의 변화를 보이는 물질로 알려지고 있어서 이에 대한 연구가 집중적으로 진행되었으며, 대부분 이온빔의 에너지는 0.5-17 keV 영역을 사용하여 원뿔, 물결 또는 나노점 등 다양한 나노 구조를 형성하였다. 특히 물결 형성 시 InP 결정의 경우 약 파장이 65 nm가 가장 작은 값으로 보고 되고 있고,<sup>18)</sup> 최근 나노 점의 경우 30~60 nm 정도의 크기까지 조절이 가능하다고 보고되고 있다.<sup>19)</sup>

본 연구에서는 나노 구조의 밀도를 증대시키고, 대면적 처리 공정이 가능 하도록 아주 낮은 에너지 영역인 180~225 eV에서 고이온전속을 가지는 폐쇄 전자-홀 표류(closed electron-Hall drift) 이온원을 사용하여 입사각( $\theta$ ), 이온전속  $J$  및 이온선량  $\phi$ 를 변화시면서 InP(100) 결정면 위에서의 나노 패턴 형성 및 표면 거칠기의 변화를 조사하였다.

## 2. 실험 방법

나노 패턴형성을 위하여 실린더형 폐쇄 전자-홀 표류 이온원을 사용하였다. 동심원 양극 채널의 직경이 50 mm 인 stationary plasma thruster (SPT)로 알려진 이온 소스이다. 기존의 소형 이온원 비하여 약 4인치 정도의 크기까지 처리가 가능하며, 그리드가 없는 형태로 고이온선량 조사가 가능하다. 아르곤 이온의 경우 0.35~4 mA/cm<sup>2</sup> 정도의 이온 전류 밀도를 확보할 수 있다. 이온빔을 이용한 나노 패턴형성을 위한 진공 시스템의 기본 진공은 터보 분자 펌프 (Seiko Seiki, TPH2000, 2000 l/s)를 사용하여  $5 \times 10^{-7}$  torr까지 배기하였고, 이온빔 조사시 실험은  $2 \sim 5 \times 10^{-4}$  Torr에서 진행되었다. 시편은 반절연 InP(100) (American X-tal Technology)를  $10 \times 10$  mm로 절단하여 사용하였다. InP 표면 패턴형성은 Ar<sup>+</sup> 이온빔을 사용하였으며, 각각 180 eV와 225 eV의 평균에너지에서, 이온선량을  $5 \times 10^{16} \sim 1 \times 10^{18}$ /cm<sup>2</sup>까지 변화시키면서 조사하였다. 입사각  $\theta$ 는 시료 표면의 수직 방향과 이온빔 사이의 각도로 정의하였으며, 0°, 15°, 30°, 45°, 60° 및

75°까지 변화시켰다. 또한 이온전속을 각각 0.43, 0.64, 0.93, 1.14 mA/cm<sup>2</sup>까지 증가시켰다. 이온 전류 밀도는 이온 소스로부터 15 cm 떨어진 곳에 설치된 Faraday cup을 통하여 pico-ammeter로 전류 값을 측정하여 구하였다. 측정된 이온전류 밀도는 입사각이 0°일 때 측정한 값이다. 표면 거칠기 및 나노 패턴을 Atomic Force Microscopy (AFM; Nanoscope IV, DI3100)을 이용하여 tapping 모드로 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 SPT 이온원의 특성 조사

Fig. 1은 SPT의 기본 구조를 나타내는 개략적인 단면도이다. 음극 (4)에 아르곤 가스를 흘려주고 수백 볼트로 방전시키면 전자가 발생한다. 이때 발생된 전자의 일부는 양극 (3)의 방향으로 가속된다. 가속될 때 채널 (2)의 밖에 설치된 자석의 자기장 (1)에 의해 회전 운동을 하면서 양극 근처에서 입사된 가스와 충돌하면서 플라즈마를 형성하고, 결국 양극에 부딪치면서 없어지게 된다. 이때 이온화된 가스 중 양의 전하를 띠고 있는 입자는 양극에서 시료 쪽으로 가속된다. 이러한 양전하가 고분자나 산화물과 같은 절연체 시료의 표면에 충돌하면 시료가 가지고 있던 표면 근처의 전자들을 진공 중으로 추출시키고 중성이었던 초기의 전기적 상태가 전자수의 감

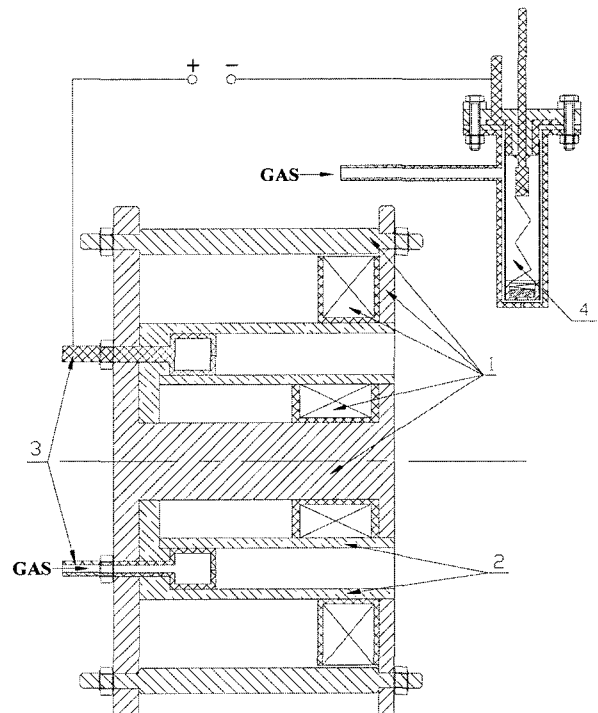


Fig. 1. Schematic diagram of closed electron Hall drift thruster source. 1. electro magnet, 2. ceramic channel, 3. gas inlet and anode, 4. Cathode

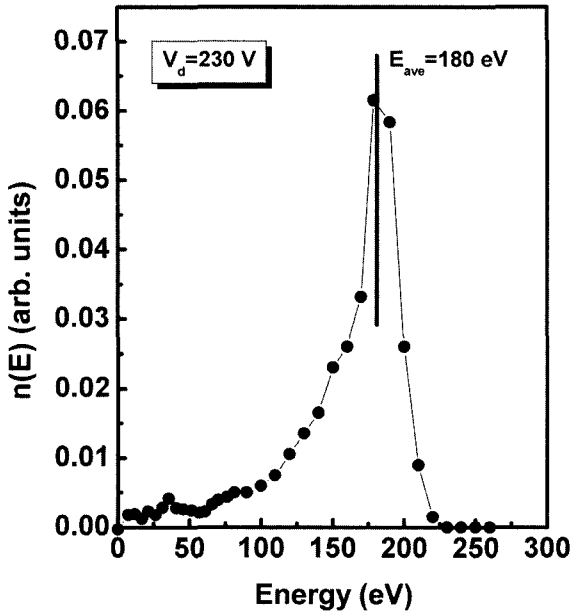


Fig. 2. Average energy of Ar<sup>+</sup> ion generated from closed electron Hall drift thruster by energy analyzer ( $E_{ave}=180$  eV,  $E_d=\pm 15$  eV).

소로 양의 전기를 띄게 된다. 또한 입사하는 양이온이 양의 전기를 더욱 증가시키게 되어 시료가 양의 전하를 띄는 물질로 바뀌게 된다. 이러한 현상을 전하 축적 (charge-up)이라 칭한다. 그러나, 폐쇄 전자-홀 이온빔의 경우 음극에서 발생된 전자가 양극으로 가속되는 것 이외에, 그 일부는 양이온 입자의 흐름에 참여하게 되고 부족한 음전하의 양을 시료 표면에 공급하는 역할을 하게 된다. 즉, 양전하가 중성화된 에너지를 갖는 중성 입자로 변화하여 시료 표면에 입사되어 양전하 축적 현상을 제거하는 중성화 (neutralization) 효과를 초래하므로 플라즈마 가속기라고 부른다.

Fig. 2는 가스 이온빔의 에너지를 측정된 것으로 Ar<sup>+</sup> 이온의 경우 방전 전압  $V_d=230$  V에서 평균 이온빔의 에너지는 약 180 eV 정도를 나타내며 방전 전압의 77%에 해당되는 값이고, 에너지 퍼짐 ( $\sigma_E$ )은 약  $\pm 15$  eV이다. SPT의 경우 이온빔 에너지 (E)와 방전 전압 ( $V_d$ )과의 관계는  $E=(2/3\sim 3/4)eV_d$ 로 알려져 있고,<sup>20)</sup> 위의 측정 결과는 이와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

3.2 입사각 변화에 따른 나노 패턴형성

평균 이온 에너지 180 eV에서, Ar<sup>+</sup>의 이온전속이 0.43 mA/cm<sup>2</sup>이고, 이온전량이  $8 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 일 때 입사각을 0°, 15°, 45°, 60°, 75°로 변화시켜 InP 조사한 후 나타나는 표면의 변화를 Fig. 3에서 나타내었다. 표면 처리되지 않은 InP의 표면은 깨끗하지만 Ar<sup>+</sup> 이온빔이 조사 되면서 표면의 거칠기와 형상의 변화가 선명하게 나타난다. 표

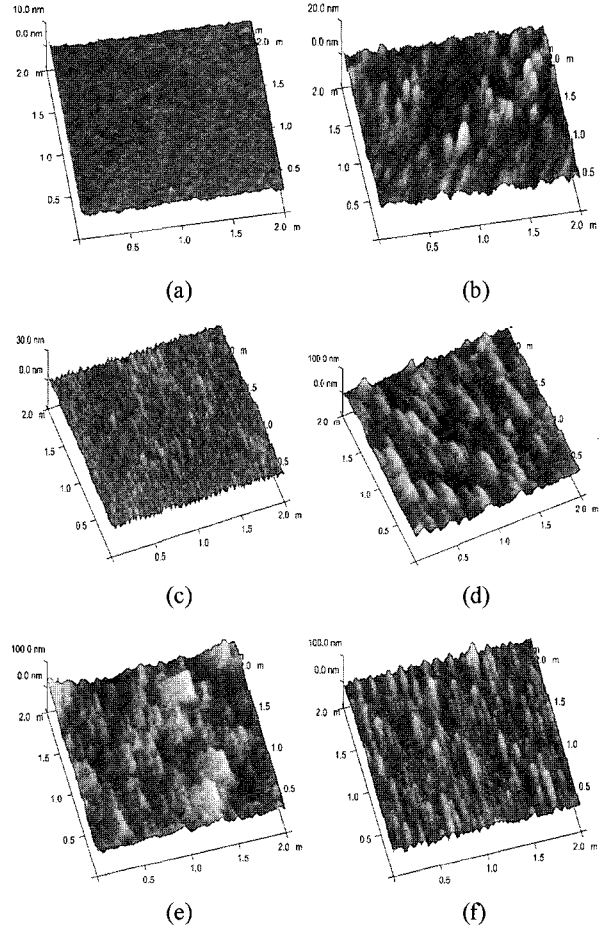


Fig. 3. AFM images of (a) clean InP and nano-structured InP surfaces performed with the same ion fluences ( $8 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ ) and the incidence angle of (b) 0°, (c) 15°, (d) 45°, (e) 60°, and (f) 75°, respectively.

면 처리되지 않은 InP의 표면 거칠기의 제곱 평균값 (root-mean-square:  $\sigma_{rms}$ )은 약 0.67 nm이다. 입사각이 0° 일 때 표면에는 크기가 약 정도  $90 \times 300$  nm인 직사각형의 마운드 형태가 나타나고, 15°로 입사시에는 매우 일정한 주기성을 가지는 물결 형태의 나노 구조가 형성되고 그 파장은 45 nm 정도이다. 45°, 60°에서는 다시 이 방향성을 가지는 사각형 마운드 모양으로, 그리고 75°에서는 전체적으로 물결의 형태와 닮은 모양으로 나노 구조가 형성되나 15°의 경우와 다른 점은 물결의 마루 부분에서 이온빔이 진행하는 방향과 수직으로 입사한 방향으로 연결이 끊어져 있는 나노 섬 (island)들의 형태로 패턴이 만들어지고 그 크기는 약 70~74 nm 정도이다. BH 모델에 의하면 저에너지 이온빔 증착시 표면에 형성되는 물결 모양의 파동 벡터(wave vector)의 방향은 이온빔의 입사각이 작으면 이온빔의 진행 방향과 수평한 방향으로 형성되며, 입사각이 크면 수직한 방향으로 방향이 바뀌면서 형성된다고 제시하였고 그 임계 입사각도  $\theta_c$ .

는 약  $70^\circ$  정도로 알려지고 있다. 입사각이  $75^\circ$ 에서는 형성된 물결 모양의 파동 벡터는 입사 이온빔의 진행 방향과 수직을 이루고 있어서 BH 모델에 잘 맞고 있으나 입사각이 작은 경우 ( $\theta=15^\circ$ )에는 이온빔의 방향과 수직 한 방향으로 물결 모양이 형성되어 잘 맞지 않는다. 위의 결과로부터 180 eV 정도의 저 에너지  $\text{Ar}^+$  이온빔을 고 이온 선속으로 조사하여 입사각의 변화시 화합물 반도체인 InP 표면에 마운드 또는 물결 모양 등의 나노 구조가 자기 조직적으로 형성됨을 확인할 수 있었다.

이러한 나노 표면 형상들은 일정한 기울기로 입사된 이온빔에 의한 표면 형상의 변화가 우선 배향성을 가지며 진행된다는 것 또는 비등방적 표면 확산에 기인하여 생성된다는 것이 BH 모델 또는 확률적 비선형 연속 방정식인 Kuromoto-Sivashinsky (KS) 방정식 등에 의해 잘 설명되어 지고 있다.<sup>21)</sup>

### 3.3 이온선속에 따른 나노 패턴형성

총 이온선량 ( $\phi=8 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ )과 입사각 ( $\theta=15^\circ$ )을 일정하게 고정시키고,  $\text{Ar}^+$ 의 시간당 이온선량  $J$ 에 따른 물결 나노 패턴과의 관계를 알아보기 위하여,  $J$ 를  $2.69 \times 10^{15}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ,  $4 \times 10^{15}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ,  $5.8 \times 10^{15}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  그리고  $7.13 \times 10^{15}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  순으로 증가시키면서 물결 형태의 나노 패턴을 AFM을 이용하여 조사하였다.

Fig. 4에서 보듯이 모두 일정한 방향과 모양으로 나노 물결을 형성하였다.  $J=2.69 \times 10^{15}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ,  $J=4 \times 10^{15}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  인 경우 Fig. 3의 (f)처럼 물결 모양의 마루 부분에 크기가 20~39 nm 정도인 섬 형태의 나노점이 형성되고,  $J$ 를  $7.13 \times 10^{15}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  까지 증가시키면 물결의 마루 부분에서 나노점이 잘 관측되지 않는 깨끗한 나노 물결이 형성된다. 단지 여러 부분에서 밝게 보이는 것과 같이 약간 넓은 크기의 언덕 (ridge)이 형성된다.

Fig. 5에서와 같이 AFM으로 측정된 물결 모양의 파장 값이 10~20 nm인 나노 물결로부터 구한 평균값은 각각  $47 \pm 4$  nm,  $42.8 \pm 5$  nm,  $41.4 \pm 9$  nm, 및  $39.4 \pm 4$  nm로  $J$ 의 증가에 따라 조금씩 감소한다. 또한 AFM으로 측정된 물결의 파고 (amplitude)는 모두 약 3.2~4.4 nm로 매우 작다.

BH 모델에 의하면 증착시 물결 모양의 파장  $\lambda$ 는 방정식 (1)로 나타난다.

$$\lambda(\theta, E) = 2\pi \left( \frac{2NB}{J_a Y(\theta, E) |\Gamma_i(\theta)|} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

여기서  $J$ 는 이온선속,  $Y$ 는 이온빔의 입사각과 입사 에너지가 각각  $\theta$ ,  $E$  일 때의 증착 수율,  $a$ 는 에너지 침적 평균 거리(average depth of energy deposition),  $B$ 는 표면에서의 확산 매개 변수(surface diffusion parameter),  $N$ 은 타겟 물질의 원자 밀도,  $\Gamma$ 는 각도 매개 변수 (angular

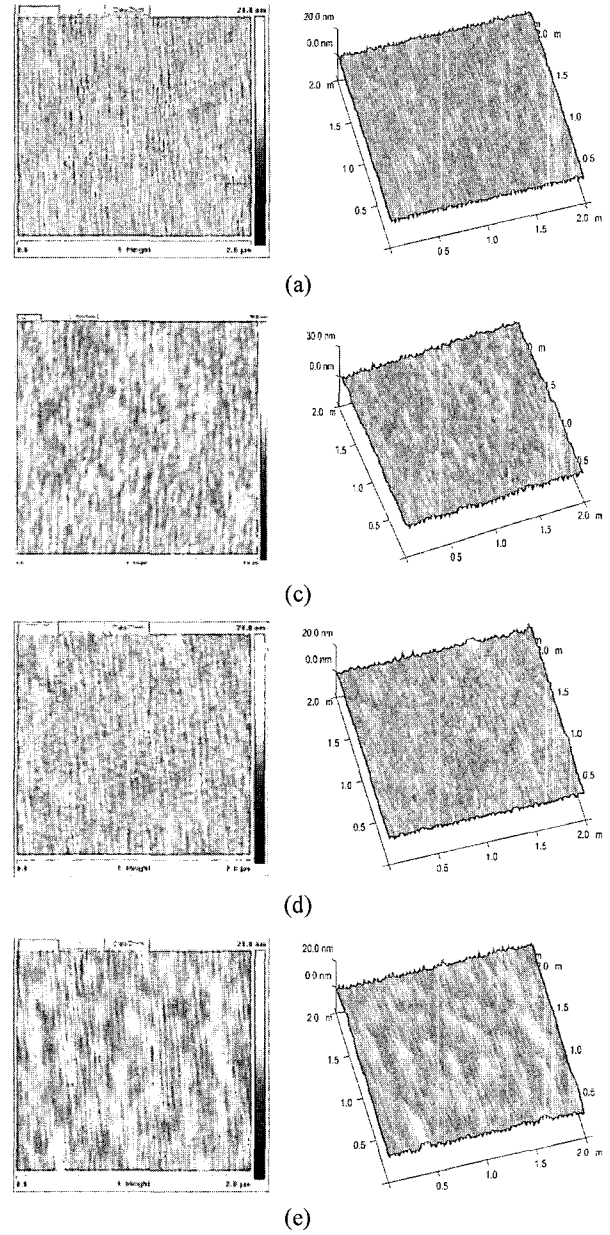


Fig. 4. AFM images of nano-structured InP surfaces performed with the same ion fluences ( $8 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ ), incidence angle, and the ion flux (a)  $J=0.43 \text{ mA}/\text{cm}^2$ , (b)  $J=0.64 \text{ mA}/\text{cm}^2$ , (c)  $J=0.93 \text{ mA}/\text{cm}^2$ , (d)  $J=1.14 \text{ mA}/\text{cm}^2$ , respectively.

parameter)를 각각 의미한다. 위 (1)식에 의하면  $E$ 와  $\theta$ 가 일정할 때 파장은  $J^{1/2}$ 에 반비례하여  $J$ 가 증가할수록 작아진다. Fig. 5의 측정된 값을 피팅하면 (점선)파장의 변화는  $\lambda(\text{nm})=27.5+10.5 J^{1/2}$ 로 나타낼 수 있고,  $\lambda \propto J^{1/2}$ 에 잘 일치한다. 다만 파장의 변화를 거시적으로 보면 40~47 nm 정도의 변화는 매우 작다고 할 수 있다.

### 3.4 이온선속에 따른 나노 패턴형성

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 평균 이온빔 에너지가 180 eV

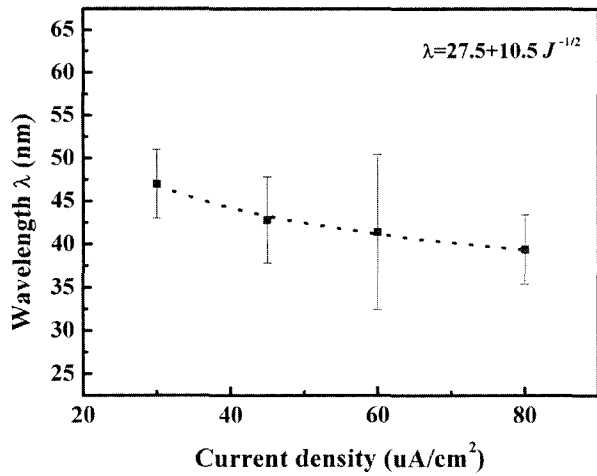


Fig. 5. The dependence of ripple wavelength is shown as a function of the ion flux.

와 225 eV에서 입사각과 이온선속을  $\theta=15^\circ$ 와  $J=5.8 \times 10^{15}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 로 고정하고 표면형상의 이온선량에 대한 의존성을 조사한 결과이다. Fig. 6은 총 이온선량  $\phi$ 을  $5 \times 10^{16}/\text{cm}^2$  부터  $3 \times 10^{18}/\text{cm}^2$  까지 변화시키면서 표면형상의 변화를 나타낸 AFM 사진이다. 이온선량  $\phi=5 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 에서는 크기가 약 180 nm이며 파고가 8.1 nm인 비교적 육방정계에 가까운 마운드들이 형성된다.  $2 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 까지 이온선량을 증가시키면, 크기가 수십 nm 정도로 훨씬 작은 원뿔 형태의 나노점과 같은 형태로 균일하게 형성된다. 한편  $8 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 이온선량에서는 나노점은 물결 모양으로 바뀌며 그 이상의 이온선량에서는 다시 물결 모양이 없어지고 약 200~300 nm 크기의 삼각형 대칭 구조를 가지는 마운드가 일정한 방향으로 형성되며, 이 때의 파고는 약 52 nm까지 증가한다. 이러한 마운드들 위에는 역시 섬들이 존재하며, 이온선량이 더욱 증가되면 크기가 더욱 균일한 삼각형 마운드들의 밀도가 증가한다. 따라서 Fig. 3의 경우에서와 같이 일정한  $J$ 에서 입사각의 변화와 마찬가지로 입사각을 고정시키더라도 이온 조사 선량에 따라 표면 형상 및 나노 구조가 변화됨을 알 수 있다.

평균 입사 이온의 에너지를 225 eV로 증가시켜서 표면의 증착 현상을 조사한 Fig. 7의 경우는 Fig. 6의 경우와 마찬가지로 이온선량이  $\phi=5 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 에서는 마운드가 형성되고, 그 크기는 150 nm로 에너지가 180 eV의 경우에 비하여 작고, 특히 마운드 윗 부분에 약 23 nm 정도의 크기를 가지는 섬모양들이 존재하는 것이 잘 관찰된다. 이온선량이  $\phi=2 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 로 증가하면, Fig. 6(b)에서와 같이 나노점들의 형성보다는 육방정계 모양의 마운드들이 삼각형의 형태로 변화하는 것처럼 보인다. 이는 마운드상의 나노 섬들이 마스크 역할을 하여 그 주변의 마운드들이 증착되며 모양이 변화되고 있음을 알

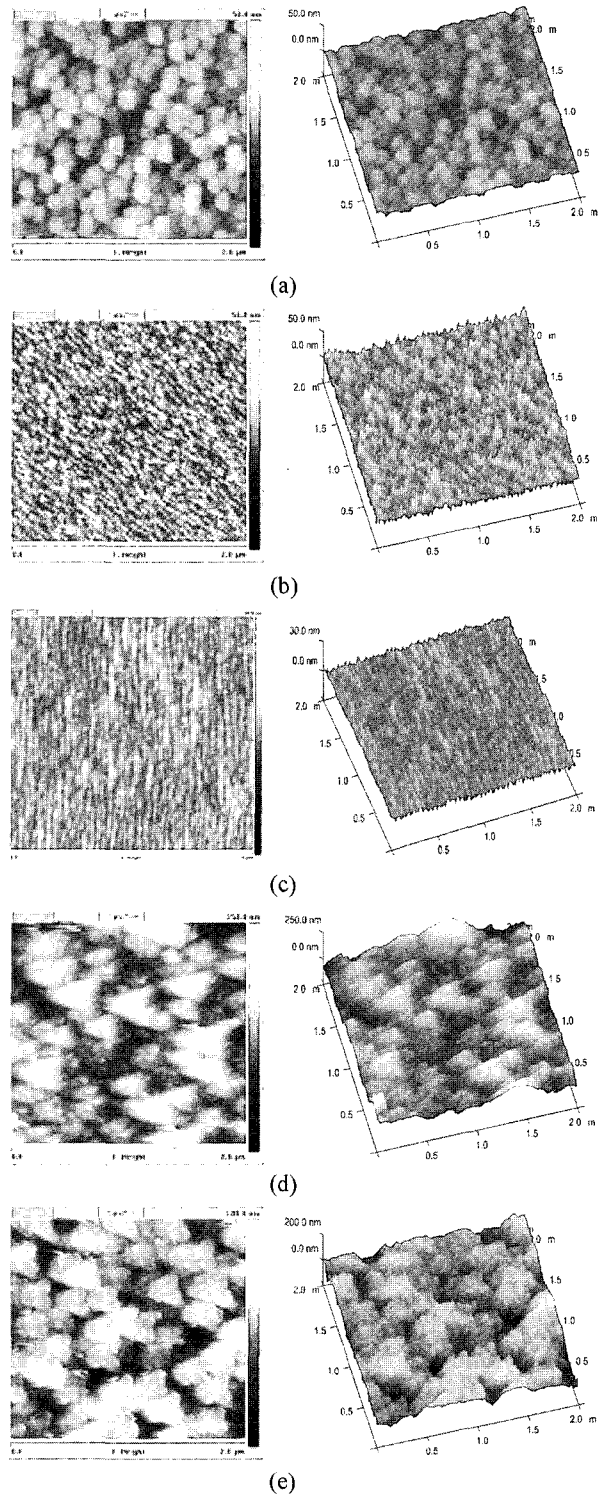


Fig. 6. AFM images of InP surfaces bombarded with 180 eV  $\text{Ar}^+$  at an incidence angle of  $15^\circ$ , are shown to illustrate the fluence dependence of the surface topography. (a)  $5 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ , (b)  $2 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ , (c)  $8 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ , (d)  $1.5 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ , and (e)  $3 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ .

수 있다. 이온선량이  $\phi=8 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 에서는 Fig. 6(d), 및 (e)와 유사한 삼각형 모양의 대칭 구조를 가지는 표면 형

상을 보여주고 있으며, 이는 225 eV의 이온에너지의 경우 180 eV의 경우에 비하여 비교적 낮은 이온선량에서 같은 형상이 형성되고 있음을 알 수 있다. 또한 삼각형 패턴 위의 섬들의 크기가 증가한 것을 알 수 있다. 한편 Fig. 6(c)와 같은 물결 형성은 관측되지 않는다. 이온선량을  $\phi=1.5 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ 까지 증가시키면 Fig. 6의 경우에는 관측되지 않은 크기가 130 nm 정도를 가지는 나노 마운드 형상들이 분포하고 있다.

Fig. 6(b)와 Fig. 7(b)에서 나타나는 마운드들이 거칠어지는 증착 현상은 Frost의 결과와 잘 일치한다.<sup>18)</sup> 이러한 현상은 마운드 위에 존재하는 나노 섬들에 기인한 것으로 알려지고 있는데, 섬 모양 등의 형성은 이온빔 조사로 인하여 원뿔 모양의 나노 패턴 형성 시 그 끝부분에서 InP에서 P의 우선적인 증착에 의해 주로 과잉의 In 금속 원자들이 존재하게 되며, 표면 확산의 증대에 따라 In 원자들은 응집되어 In 섬을 형성하게 된다.<sup>22)</sup> 이러한 섬모양은 지속적인 이온빔 조사에 노출되어 있어서 에너지를 얻게 되면 결정성이 우수한 결정립으로 변화되고 결과적으로 적층 성장의 형태를 취하게 된다. In과 InP의 다른 증착 수율로 인해 In 응집체는 증착 현상에 의한 원뿔 구조 형성의 원인으로 작용하게 되며, 따라서 Schwoeble 장벽은 증착 초기의 표면 형상에 영향을 미치게 된다. 이러한 In 응집체의 형성 및 결정구조는 투과 전자 현미경을 통하여 관찰한 보고들이 있다.

Fig. 6의 경우  $8 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 의 이온선량에서 나노점은 물결 모양으로 바뀌는데, 이는 InP의 경우 이온선량이 증가하면 원뿔 모양으로부터 점진적으로 물결 모양이 형성된다는 결과와<sup>17)</sup> 잘 일치하고 있다. 하지만 물결 모양이 생긴 이후에 물결 파장의 변화보다는 다른 형태의 표면 형상이 나타나기 때문에 결과적으로는 이온선량에 대한 물결 파장의 의존성이 없는 것으로 보여지고 있다.

한편 Fig. 8의 경우 입사각을  $75^\circ$ 에 고정하고 이온선량을 각각  $8 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 에서  $1.5 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ 까지 변화시키면서 생성된 물결 나노 구조의 나노 패턴 및 파장 변화를 조사한 것이다. 이온선량이 증가하면 파장이 33 nm에서 57 nm까지 증가하다가 52 nm로 감소 또는 포화된다.

여기서 식(1)의 경우 다음과 같이 두 가지 경우에 근사적으로 나누어 지는데, 고온과 낮은 이온선속의 경우 B-H모델<sup>11)</sup>에 의하면,

$$\lambda \propto (JT)^{-1/2} \exp(-\varepsilon_s / (kT)), \quad (2)$$

식 (2)에서  $\varepsilon_s$ 는 표면 확산에 필요한 활성화 에너지이다. 식 (2)의 경우 파장  $\lambda$ 은 이온선량과 무관함을 나타내고 있다. 한편 Vajjo에<sup>23)</sup> 의하면 저온과 높은 이온선속에서는 이온 유도 캐스캐이드(ion-induced cascade)를 고

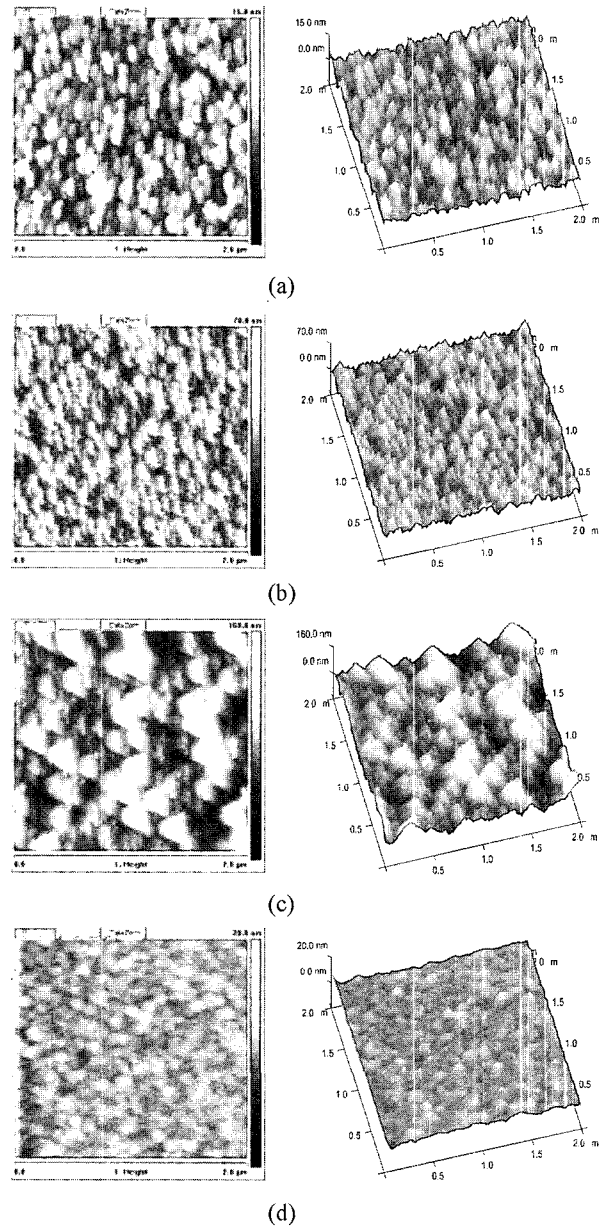
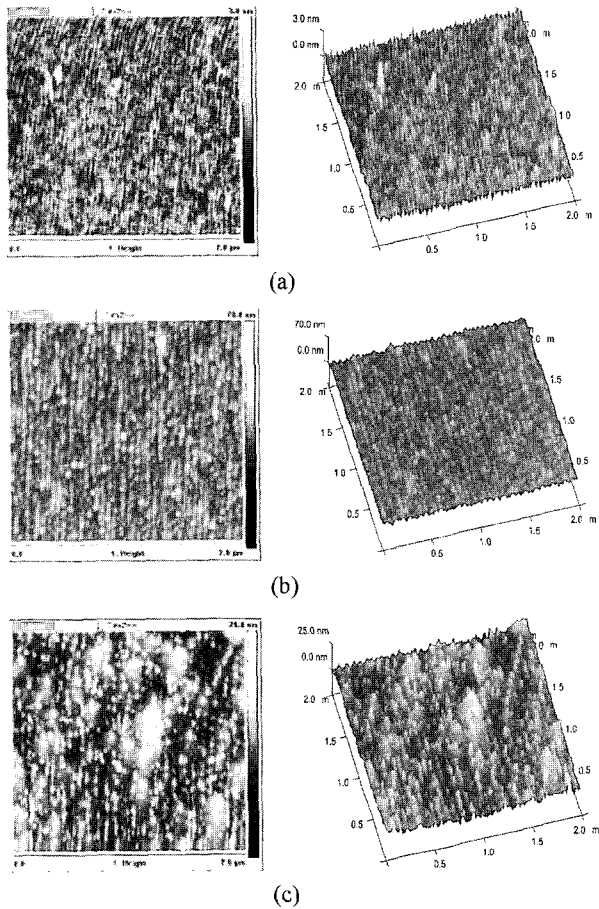


Fig. 7. AFM images of InP surfaces bombarded with 225 eV  $\text{Ar}^+$  at an incidence angle of  $15^\circ$ , are shown to illustrate the fluence dependence of the surface topography. (a)  $5 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ , (b)  $2 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ , (c)  $8 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ , and (d)  $1.5 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ .

려하여 식 (1)은 아래 식 (3)으로 표현된다.

$$\lambda(\theta, E) = 2\pi \left( \frac{0.14El^2\gamma v}{aE_d Y^2 \phi |\Gamma_i| NkT} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

식 (3)에서  $l$ 은 원자 뿔(jump)간의 변위 길이,  $E_d$ 는 최소 변위(displacement)에너지,  $\gamma$ 는 단위 면적당 표면 에너지,  $v$ 는 표면 확산 원자들의 면밀도(areal density)를 각각 나타낸다. 식 (3)으로부터 물결의 파장  $\lambda$ 는  $\lambda \propto \phi^{-1/2}$ 의 관계를 보여주고 있다. 즉 식 (2)와 (3)을 비교하면

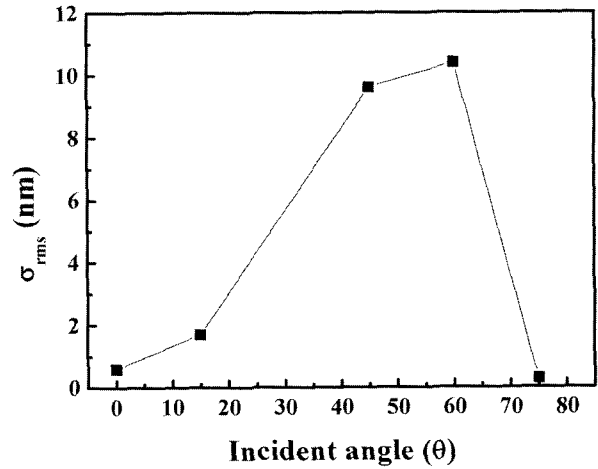


**Fig. 8.** AFM images of InP surfaces bombarded with 180 eV Ar<sup>+</sup> at an incidence angle of 15°, are shown to illustrate the fluence dependence of the surface topography. (a) 2×10<sup>17</sup>/cm<sup>2</sup>, (b) 8×10<sup>17</sup>/cm<sup>2</sup>, (c) 1.5×10<sup>18</sup>/cm<sup>2</sup>.

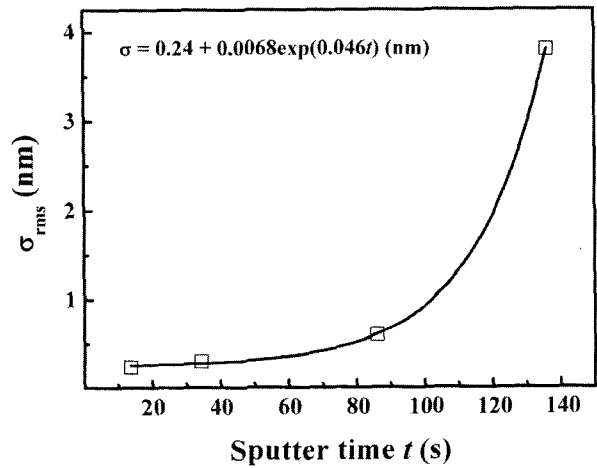
(2)는 이온선속과 온도, 그리고 (3)은 이온선량과 온도에 대한 의존성을 나타내는 식이다.

식 (2)의 경우는 상온에서 산소 이온을 이용하여 5.5~10.5 keV의 에너지로 GaAs 표면을 스퍼터링하면  $\phi$ 이 증가해도  $\lambda$ 는 거의 변화하지 않는 결과, 즉 이온선량에 무관하다는 결과와 일치하고 있는 것으로 보인다.<sup>1,24)</sup>

Fig. 8의 경우 이온선량이 증가하면 파장이 증가하고 있어서 식 (3)에서와 같은 이온선량에 대한 의존성과는 다르며,  $\phi^n$  ( $n>1$ ) 인 증가 곡선을 보이고 있어서 InP의 경우 이온선량의 증가에 따라 파장  $\lambda$ 가  $\lambda \propto \phi^{0.2}$ 의 관계로 약간 증가한다는 보고<sup>25)</sup>와도 상이한 결과를 보여주고 있다. 다만 이온선량을 증착 시간으로 환산하여 파장과 의 관계를 알아보면 (여기서 그래프는 보여주지 않음) 파장  $\lambda \sim t^{0.39}$ 의 관계를 보여주고 있어서, Frost<sup>18)</sup> 등이 제안한  $\lambda \sim t^\gamma$  ( $\gamma=0.26$ )과 유사한  $\gamma$ 을 보이는 증착 기구로 설명될 수 있다. 여기서  $\gamma$ 는 계층간 확산에 대한 Schwoebel 장벽(barrier)에 기인한 계수로 알려져 있다. 또한 식 (2), (3)에서  $J$ , 및  $\phi$  이외에 온도가 공동 변수로 표현되고 있



(a)



(b)

**Fig. 9.** The dependence of the rms roughness  $\sigma_{rms}$  is shown as a function of (a) the incidence angle and (b) the sputter time with 150 eV Ar<sup>+</sup> at an incidence angle of 75°.

어서 본 연구의 경우 고이온선량 및 이에 의한 온도의 증가가 예상됨으로 고온, 고 이온선속의 이온빔 증착법의 경우를 잘 설명할 수 있는 모델과 정확한 실험 데이터가 필요하다고 본다.

### 3.5 표면 거칠기의 변화

Fig. 9(a)에서 보는 바와 같이 InP 표면 거칠기는 입사각이 15°, 45°, 60° 일 때 각각 1.7, 9.62, 10.4 nm로 증가하다가 입사각이 75°가 되면서 0.29 nm로 다시 크게 감소하였다. 이는 입사 각도에 따라 증착 수율과 표면 침식(erosion)율이 다르기 때문에 나타난 결과로 Carter 등의 결과와 잘 일치한다.<sup>5)</sup> 다만 증착률이 최대를 보이는 각도  $\theta_m$ 은 물질마다 약간 다르지만<sup>26)</sup>, Fig. 10(a)에서와 같이 입사각이 60° 정도 까지는 증착률이 증가하여 표면 거칠기가 증가하나, 그 이상의 각도에서 이온빔



을 입사하면, 표면에 평행한 성분이 증가하는 그레이징 입사(grazing incidence)에 가까운 조건으로 이온빔의 표면 반사가 증가하여 스퍼터율이 감소하는 효과를 가져오고 표면이 거칠어 지는 효과는 매우 작아지는 결과를 가져온다. 이는 500 eV의  $Ar^+$  이온빔을 InP 표면에 조사한 경우 입사각의 증가에 따라 표면 거칠기가 감소하는 Frost등의 보고<sup>18)</sup>와 잘 일치하고 있다.

Fig. 9(b)는 Fig. 8의 조건에서 제작된 시료의 표면 거칠기 변화를 보여주고 있다. 이온선량을 스퍼터 시간으로 변환하여 비교하여 보면 표면 거칠기의 변화가 시간의 증가에 따라 지수적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. Carter 등에 의하면,<sup>27)</sup> 표면에서의 표면 형상의 높이(h) 변화는 식 (4)와 같은 J, Y, N를 포함하는 미분 방정식으로 표현된다고 보고하였다.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{-JY(\theta, E)}{N}, \quad (4)$$

여기서 Y, N이 일정한 경우 표면 형상 높이의 변화는 J의 적분 값 즉 총 이온선량에 따라 증가함을 알 수 있다. 또한 BH 모델에 의하면 이온빔 증착법에 의해 형

성되는 주기적인 표면의 파고 h는 증착 시간에 식 (5)와 같이 지수적으로 변화한다고 보고하였다.

$$h(t) = h_0 \exp(r \cdot t) \quad (5)$$

Fig. 9(b)에서 표면 거칠기의 변화는  $\sigma_{rms} \propto \exp(0.0046t)$ 으로 (5)식에서와 같이 표면 형상의 높이가 시간의 지수적 증가 형태를 따르고 있음을 알 수 있다.

### 3.6 기판 회전시의 나노 패턴형성

입사각을 고정시키는 경우 대부분이 이방성의 나노 구조 또는 나노 물결들이 형성되나 기판을 회전하는 경우 이러한 이방적인 특성을 제거할 수 있다고는 보고가 되고 있다. 지금까지는 InP 기판을 회전시키지 않은 상태로 표면 나노 구조 형성을 조사하였으나, Fig. 10에서는 각각 180과 225 eV의 에너지를 가지며, 입사각을  $15^\circ$ 에 고정 시킨 후 이온선량  $5 \times 10^{18}/cm^2$ 까지 조사한 후 측정된 AFM 사진이다. Fig. 10에서 보듯이 각각 95 nm 나노점과 260 nm 크기 정도의 비교적 큰 삼각형 모양의 나노점들이 균일하게 형성되며, 각각의 최대 진폭은 9 nm, 및 21.6 nm였고 평균 표면 거칠기는 4.4 nm 및

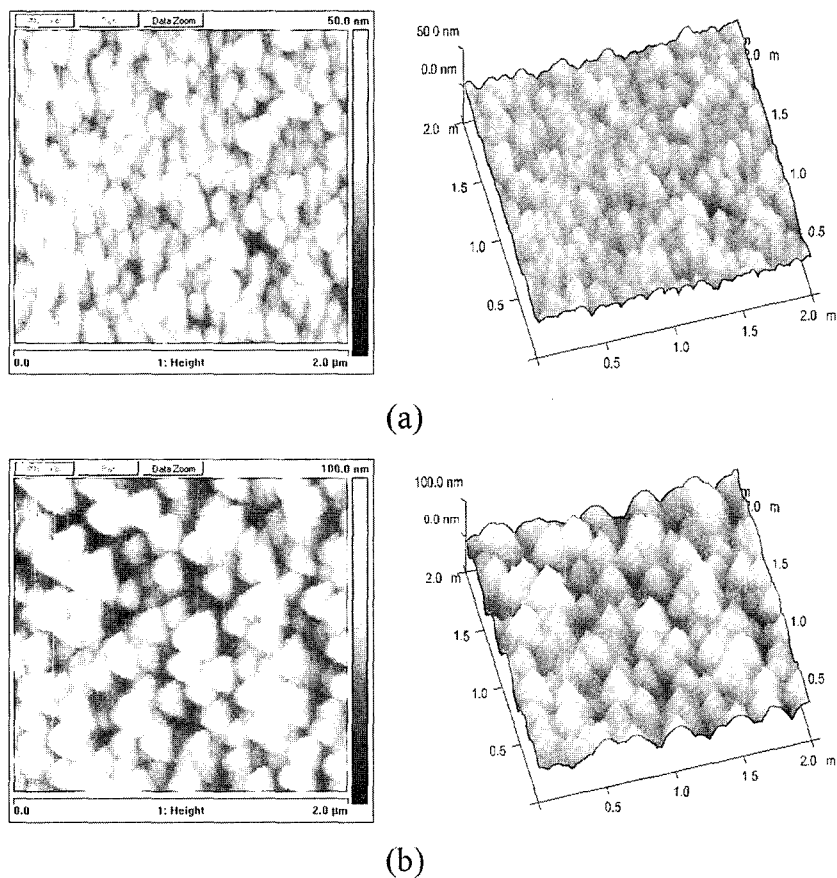


Fig. 10. AFM images of nano-structured InP surfaces performed with the same Ion fluences ( $5 \times 10^{18}/cm^2$ ), the incidence angle( $q=15^\circ$ ), and 14 rpm at (a)  $E_{ave}=180$  eV, and (b)  $E_{ave}=225$  eV.



15.8 nm이다. Forst 등에 의하면 회전을 통한 나노점들의 형성 시 각 나노점들 사이의 간격 즉 파장과 표면 거칠기는 이온선량에 따라 증가하며, 특히 각도 및 온도의 변화에 따라 표면의 나노 형상이 변화하거나 나노 패턴이 없어지는 조건들에 대한 보고가 있었다. 특이한 사실은  $200 \leq E_{ave} \leq 1200$  eV 조건에서 이온빔 에너지를 변화시키면서 나노 패턴을 조사한 결과 350 eV 이상에서만 나노 패턴의 형성을 관측할 수 있었다는 결과와는 달리 본 연구에서는 180, 및 225 eV의 저에너지 영역에서 나노 구조가 잘 형성되고 있는 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 사용한 이온빔의 에너지는 낮지만 이온선속이  $10^{15}/\text{cm}^2/\text{s}$  정도로 매우 높아서, 이러한 이온빔에 의한 새로운 증착 효과에 대하여 이온 입사각, 온도 등의 변수를 조절하면서 이에 대한 의존성과 함께 보다 상세한 연구가 필요하다고 생각된다.

#### 4. 결 론

180~225 eV의 저에너지와  $10^{15}/\text{cm}^2/\text{s}$  정도의 고이온선속을 가지는 이온빔을 InP(100)위에 입사하여 입사각, 이온선속, 및 이온 선량을 변화시키면서 표면 나노 형상의 형성을 조사하고 그 의존성을 조사하였다. 이러한 저에너지 이온빔을 InP 표면에 조사시 InP를 회전시키지 않은 경우 불결 모양 형태 또는 이방성을 가지는 직사각형 및 등방성의 삼각형의 마운드 구조를 형성하였는데, 지금까지 약 350 eV 이하의 이온빔에 관한 보고에서는 관측되지 않았던 자기 조직화 가능성을 보여주었다. 또한 불결 구조의 경우 파장이 약 40 nm 정도로 지금까지 보고된 값들에 비하여 짧은 것으로 나노 구조의 밀도를 높일 수 있는 결과로 보여진다. 나노 불결 파장의 이온선속 의존성은 BH 모델에 잘 일치하나, 이온선량에 대한 의존성은 잘 나타나지 않는다. 이는 파장이 이온선속 및 이온선량 모두가 온도와의 상관 함수 관계를 가지고 있기 때문에 좀더 자세한 실험이 이루어져야 할 것이다. 표면 거칠기의 경우 각도에 대한 의존성은 각도에 따른 증착 수율과 관련이 깊고, 증착 시간에 따라 지수함수 적으로 증가한다. 또한 시료의 회전을 통하여 이방성 효과를 줄여주면 나노점들이 형성됨을 알 수 있었다. 본 연구에서 저에너지, 고이온선량의 이온빔을 이용한 bottom-up 방식의 나노 패턴 자기 조직화가 가능하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 KIST의 미래원천 프로그램 (2N18510)과 한국과학재단의 특정 기초 연구사업 (R01-2004-000-10715-

0) 지원하에 이루어졌음에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. A. Karen, K. Okuno, F. Soeda and A. Ishitani, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A9**, 2247 (1991).
2. Y. Homma, S. Kurosawa, Y. Yoshioka, M. Shibata, K. Nomura and Y. Nakamura, *Anal. Chem.*, **57**, 2928 (1985).
3. D. P. Leta and G. H. Morrison, *Anal. Chem.*, **52**, 514 (1980).
4. S. Habenicht, K. P. Lieb, Koch and A. D. Wieck, *Phys. Rev.*, **B65**, 115327 (2002).
5. M. Navez, C. Sella and D. Chaperot, *Comp. Rend*, **254**, 240 (1962).
6. G. Carter, M. J. Nobes, F. Paton and J. S. Williams, *Radiat. Eff.*, **33**, 65 (1977).
7. C. M. Demanet, K. V. Sanker and J. B. Malherbe, *Surf. Interface Anal.*, **24**, 503 (1996).
8. S. Habenicht, *Phys. Rev.*, **B63**, 125429 (2001).
9. P. Sigmund, *Phys. Rev.*, **184**, 383 (1969)
10. P. Sigmund, *J. Mat. Sci.*, **8**, 1545 (1973)
11. R. M. Bradley and J. M. E. Harper, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A6**, 2390 (1988).
12. C. C. Umbach, R. L. Headrick and K. C. Chang, *Phy. Rev. Lett.*, **87**, 246104 (2001)
13. M. A. Makeev and A.- L. Barabasi, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 2800 (1997).
14. S. Facsko, T. Dekorsy, C. Koerd, C. Tappe, H. Kurz, A. Vogt and H. L. Hartnagel, *Science*, **285**, 1551 (1999).
15. F. Frost, B. Ziberi, T. Hoche and B. Rauschenbach, *Nucl. Instrum. Methods B*, **216**, 9 (2004).
16. R. Gago, L. Vazquez, R. Cuerno, M. Varela, C. Ballesteros and J. M. Albella, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 3316 (2001).
17. J. B. Malherbe, N. G. van der Berg, F. Claudel, S. O. S. Osman, R. Q. Odentaa, F. Krok and M. Szymanski, *Nucl. Instrum. Methods B*, **230**, 533 (2005).
18. F. Frost, A. Schindler and F. Bigl, *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 4116 (2000).
19. Y. Yubas, S. Hazama and K. Gamo, *Nucl. Instrum. Methods B*, **206**, 648 (2003).
20. A. I. Morozov and I. V. Melikov, *J. Tech. Phys.*, **44**, 544 (1974).
21. R. Cuerno and A.- L. Barabasi, *Pgys. Rev. Lett.*, **74**, 4746 (1995).
22. M. Nozu, M. Tanemura and F. Okuyama, *Surf. Sci. Lett.*, **304**, L468 (1994).
23. J. J. Vajo, R. E. Doty and E.- H. Cirlin, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A14**, 2709 (1996).
24. F. A. Stevie, P. M. Kahora and D. S. Simons, P. Chi, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A6**, 2390 (1988).
25. C. M. Demanet, J. B. Malherbe, N. G. van der Berg and K.V. Sankar, *Surf. Unterf. Anal.*, **23**, 433 (1995).
26. M. J. Witcomb, *J. Mater. Sci.*, **9**, 1227 (1974).
27. G. Carter, B. Navins and J. L. Whitton, *Sputtering by Particle Bombardment II*, p.231, Springer-Verlag, Berlin, Germany (1991).