

가스 클러스터 이온빔을 이용한 고체 표면 평탄화 및 식각에 대한 연구

송재훈 · 최덕균* · 최원국†

한국과학기술연구원 박막기술연구센터

*한양대학교 무기재료공학과

(논문접수일 : 2002년 3월 27일)

Solid surface smoothing and etching by gas cluster ion beam

Jae-Hoon Song, Duck-Kyun Choi*, and Won-Kook Choi†

Thin Film Technology Research Center, Korea Institute of Science and Technology

**Department of Inorganic Materials Engineering, Hanyang University*

(Received March 27, 2002)

요 약

150 kV급 가스 클러스터 이온 가속기를 제작하여 CO₂와 N₂O 클러스터의 크기를 비행시간 측정법을 통하여 조사하였다. Isolated cluster ion impact를 통하여 클러스터 이온이 고체 표면과 충돌시 1 nm 정도 높이와 수십 nm 폭을 가지는 hillock을 형성시키는 것을 원자간 척력 현미경으로 관찰하였다. 또한 hillock이 존재하는 ITO 표면에 CO₂ 클러스터 이온을 조사하면 단원자 이온의 충돌시 보이는 sharpening 현상과는 다른 다중 충돌에 의한 sputtering 효과가 관찰되었으며, 25 kV의 가속 전압에서 CO₂ 클러스터 이온을 $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 만큼을 ITO 표면에 조사시킨 경우에는 표면이 평탄화되었다. 또한 표면 거칠기가 0.3 nm 정도인 Si 기판 위에 CO₂ 클러스터 이온을 조사하면서 이온 조사량에 따른 표면 형상 및 거칠기의 변화를 조사하였다. $10^{12}/\text{cm}^2$ 이하의 낮은 이온 조사량에서는 hillock들의 형성과 그 밀도의 증가로 표면의 거칠기가 증가하는 surface embossment 현상이 지배적으로 이루어졌으며, 형성된 hillock의 면적과 비조사된 곳의 면적이 같아지는 임계 이온 조사량부터는 hillock이 스퍼터링되고 그 원자들의 표면확산에 따른 hillock 사이의 valley들이 채워지는 스퍼터링과 표면의 평탄화가 이루어지는 구간이 관찰되었고, 그 이후 더 높은 이온 조사량부터는 깊이 방향으로의 식각이 진행되는 연차적인 충돌과정의 관찰되었다.

주제어 : 가스클러스터이온, 표면 평탄화, 식각, ITO표면, Si표면

Abstract

A 150 kV gas cluster ion accelerator was constructed and the cluster sizes of CO₂ and N₂O gases were measured using time-of-flight mass spectrometry. Through isolated cluster ion impact on a HOPG, hillocks with 1 nm height and a few tenth nm in diameter were found to be formed by an atomic force microscope. When monomer ion beams were irradiated on the hillocks existed on a ITO surface, they became sharper and the surface became rougher. But they changed into round-shaped ones by cluster ion irradiation and the surface became smooth after the irradiation of $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ at 25 kV.

As the cluster ion dose was varied, the change of surface morphology and roughness of Si was examined. At the lower dose, the density of hillocks and surface roughness were increased, called surface embossment process. And then after the critical dose at which the area of the formed hillocks equals to the unirradiated area, the sputtering from the hillocks was predominantly evolved, and dislocated atoms were diffused and filled among the valleys, called surface sputtering and smoothing process. At the higher ion dose, the surface consisting of loosely bounded atoms was effectively sputtered into the depth and etching phenomenon was happened, called surface etching process.

Key Words : gas cluster ion, surface smoothing, etching, ITO surface, Si surface

1. 서 론

클러스터는 물리적으로 여러 개의 원자나 분자들이 van der Waals 힘에 의해 매우 느슨하게 결합되어 존재하는 거대 입자이다. 이러한 거대 입자는 단원자나 단분자들에 비하여 비표면적 즉 표면적/부피의 비가 매우 크고 전자들의 밀도가 클러스터 표면 부분에서 커서 화학적으로 활성화된 성질을 가지고 있어서 촉매 현상 분야에서 많이 연구되고 있다. 이 중 가스 클러스터 이온의 경우 최근 고체 표면과의 상호 충돌시 단원자 이온에 비하여 다중충돌에 의한 10^{-10} 의 높은 스퍼터 수율을 보이며, 운동량의 표면 확산이 커서 빠른 표면 식각 및 표면의 평탄화에 매우 우수한 특성을 보이고 있다. [1,2] 이러한 특징을 이용하여 수-수십 nm 깊이의 낮은 농도를 가지는 경원소 분석에 필요한 SIMS ion sputter로의 응용이 유망시되고 있으며, [3] 초전도 박막 및 자기기록용 금속 박막의 표면 평탄화를 [4,5] 통한 물리적 성질 향상을 비롯하여 기상화학 증착법에 의해 제작된 초경도 물질인 다이아몬드 박막의 평탄화, Pyrex, quartz와 같은 물질의 micromachning 등을 위한 획기적인 기술로 주목을 받고 있다 [6,7]. 한편 비전하 값이 작아서 표면충돌 및 이온주입시 낮은 이온선량에서도 빠른 비정질화가 가능하고, 전하 축적의 효과를 제거할 수 있어서 최근 deacaborane을 이용한 40 nm의 gate oxide 선폭을 가지는 초고 집적 p-MOSFET 제작에 성공하는 등 차세대 Tera bit 급 반도체 메모리에 매우 유용한 기술로 대두되고 있다 [8].

클러스터 이온이 단원자 이온에 비하여 국부적인 부분에 큰 에너지 및 운동량을 전달하고 다중충돌 효과에 의해 큰 스퍼터링 수율을 보이며, 이러한 특성을 위하여 표면 평탄화에 많이 사용되는 연구가 진행 중이다. 한편 클러스터 이온 충돌시 표면에서는 운석이 지구 표면에 충돌할 때 발견되는 분화구의 형성이 관측된다는 보고와는 달리 hillock의 형성이 보고된다는 결과가 상충하고 있다. 이때 생성되는 분화구와 hillock의 반경은 모두 수십 nm크기를 가지며 입사된 클러스터의 운동에너지에 비례하며 고체의 고유한 Brinell 강도 반비례하는 것으로 알려져 있다 [9].

본 논문에서는 CO₂와 N₂O 기체를 이용한 클러스터 생성 및 크기를 비행 시간 측정법에 의해 측정 한 것과 클러스터의 존재를 하고자 하였으며, 이를 원자 수준의 표면 거칠기를 가지고 있는 Si 웨이퍼 위에 각각의 클러스터 이온과 고체 표면과의 충돌 현상이 겹치지 않는 낮은 이온선량을 이용하여, 점차적으로 총 이온 조사량을 증가시키면서 각 충돌에 기인한 나노 구조물의 형성을 조사하고, 표면의 거칠기 변화 및 평탄화 과정과 이온 조사량 의존성을 조사하였다. 즉 가스 클러스터 이온의 에너지는 일정하게 고정하여 표면에 발생하는 나노 구조물의 크기는 일정하게 하고, 이온조사량에 따른 표면의 거칠기 및 표면 구조가 어떻게 변화해 가는 지를 관찰하였다. 한편 Si 단결정보다는 표면 거칠기가 10 배정도 높으며 이미 표면에 hillock 구조물을 가지고 있는 ITO 세라믹 고체 표면의 이온 조사량에 따른 초평탄화 과정 및 식각 과정을 연구하였다.

2. 클러스터 이온 가속기

2.1 150 kV 클러스터 이온 가속기

그림 1은 150 kV 클러스터 이온 가속기의 개략도를 보여주고 있다. 가스 클러스터의 발생을 위하여 석영을 이용한 Laval 노즐을 제작하였고, 이 노즐의 지름은 0.11 mm 정도이고 길이는 26 mm이다. 기체의 입력 압력은 1-5기압까지 변화시켰으며 스키머와 노즐 사이의 압력은 로터리와 부스터 펌프를 이용하여 입력 압력 5 기압시 70 mTorr까지 배기할 수 있었다. Main chamber의 초기 진공은 터보 펌프를 (900 l/s) 이용하여 7×10^{-7} Torr를 유지하였으며, 입력압력 5 기압시 main chamber 내의 압력은 최고 1.2×10^{-5} Torr까지 상승하였다. 생성된 중성 클러스터 빔 가운데 중앙부분의 클러스터를 추출하기 위하여 main chamber와 stagnation chamber 사이에 스키머 (직경 0.5 mm)를 설치하였다. 추출된 중성 클러스터는 스키머 다음에 설치된 이온화 부에서 클러스터 이온으로 이온화되었다. Thoria가 코팅된 W 필라멘트를 이용하여 방출된 열전자들은 200 V로 가속되어 중성 클러스터를 이온화시켰고 이때 방출 전류는 70 mA 정도에서 실험을 하였다. 이온화된

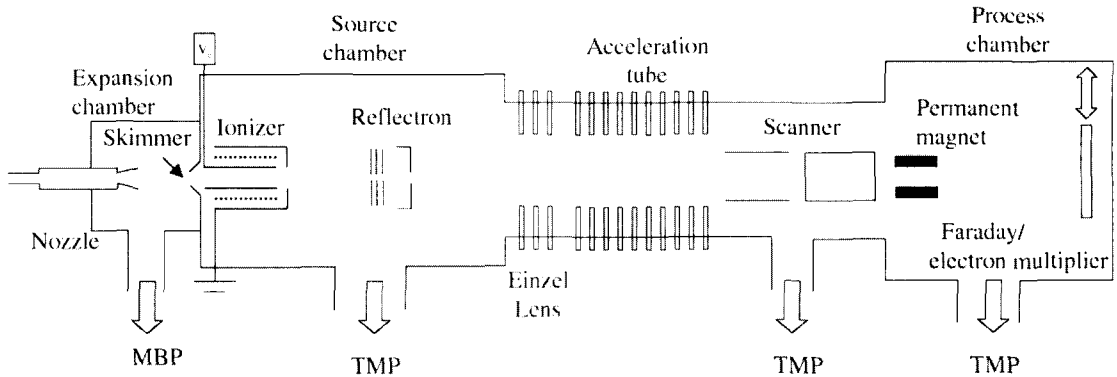


그림 1. 150 kV 클러스터 이온 가속기의 개략도.

클러스터는 Einzel 렌즈를 통과한 후 150 kV 가속단에 의해 시편까지 가속되었다. 가속단 후에 X-Y scanning system을 설치하였고, 전류 측정을 위한 Faraday cup 과 비행거리측정을 위한 electron multiplier를 설치하였다.

2.2 클러스터 크기 측정

클러스터 크기를 측정하는 방법으로는 retarding field analyzer, time-of-flight, quadruple mass spectrometry 및 electron diffraction image 분석법 등이 있는데 이중 가장 정확하게 크기를 예측하는데 사용되는 time-of-flight (TOF) 방식을 이용하여 클러스터 크기를 측정하였다. 이온화 부에서 전자를 인출하는 음극에 10 μ s pulse를 가한 후 이온화된 단분자 이온과 클러스터 이온을 40 kV로 가속하여 main chamber에 설치된 electron multiplier까지 비행하는 거리를 디지털 oscilloscope를 이용하여 신호를 측정 분석하여 클러스터 크기를 측정하였고 자세한 실험 장치 및 TOF 모듈에 대한 설명은 참고문헌에 잘 나타나 있다 [10,11].

표 1에는 여러 가지 가스에 대한 끓는 온도 (T_b)와 정적 비열 (C_v)과 정압 비열 (C_p) 비 (γ)가 표시되어있다. 표 1에서 보는 바와 같이 T_b 가 He, N₂, Ar, O₂ 등의 경우는 4 K, 77 K, 87 K 그리고 90 K로 매우 낮은 반면 CO₂, N₂O의 경우는 194 K, 184 K로 상당히 높아 상온에서 클러스터 형성을 위한 단일 팽창시 응축이 잘 일어나는 기체로 잘 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 CO₂ 와 N₂O 기체를 사용하였다.

표 1. 여러 가지 가스의 끓는 온도 (T_b)와 정적 비열 (C_v) 과 정압 비열 (C_p) 비 (γ).

Gas	He	N ₂	Ar	O ₂	CO ₂	N ₂ O
T_b (K)	4	77	87	90	194	184
γ	1.67	1.4	1.67	1.4	1.33	1.33

3. 결과 및 고찰

3.1 클러스터 크기 측정

그림 2는 각 기체의 입력 압력을 1 bar에서 5 bar 까지 변화시키면서 TOF로 측정된 클러스터의 크기이다. 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 CO₂ 클러스터는 기체 공급압력이 3기압 이하에서는 관찰되지 않았으나 4기압 이상에서는 단분자에 의한 단분자 이온 peak 이외에 200 μ s 근처의 broad한 peak이 관찰되는 것을 알 수 있다. 단분자 peak을 기준으로 하여 클러스터의 크기를 계산하여 보면 평균 크기 750여 개 정도의 분포를 보이고 있다. 그림 2(b)에서 보는바와 같이 N₂O 가스의 경우도 4 bar에서 약한 peak signal이 보이기 시작하면서 5 bar에서 확실한 클러스터의 형성을 나타내는 signal이 관측되고 7 bar에서는 평균 크기가 증가하고 있음을 알 수 있다.

온도에 따른 클러스터 크기의 변화를 알아보기 위하여 노출의 온도를 각각 223 K에서 333 K까지 변화시키면서 4 bar에서 측정된 클러스터 크기의 분포는 그림 3과 같다. 223, 298, 333 K에서 측정된 TOF 신호로부터 크기를 계산하면 평균 크기가 각각 1050, 700, 500개로 온도가 낮을수록 평균 크기가

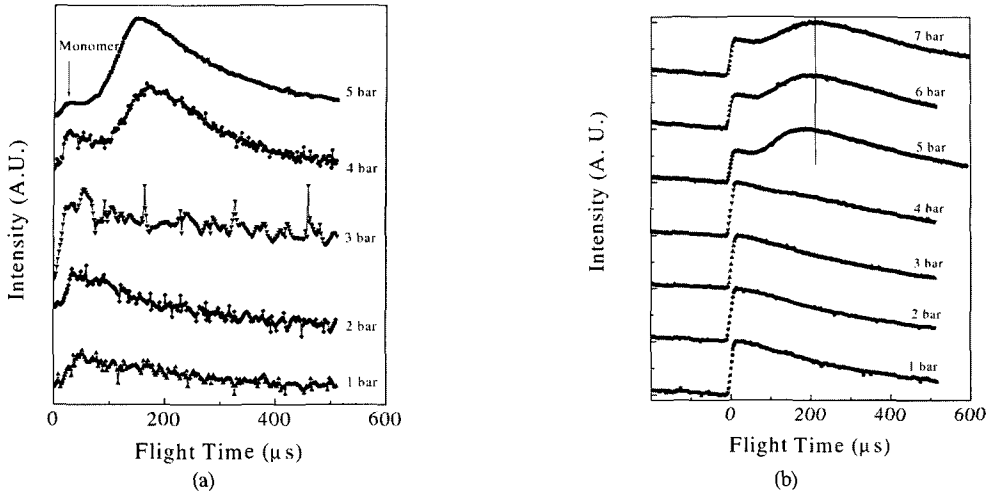


그림 2. (a) CO₂ 및 (b) N₂O 공급 압력에 따른 Time-of-Flight 스펙트라.

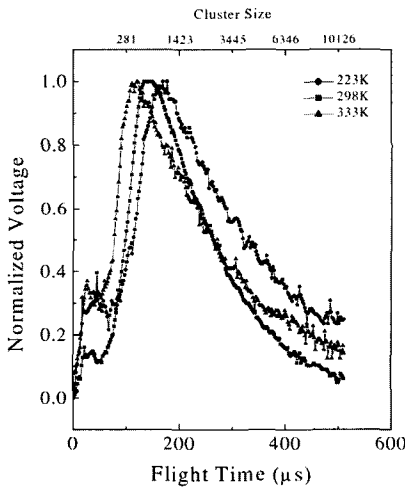


그림 3. CO₂ 기체의 공급 온도에 따른 Time-of-Flight 스펙트라.

증가함을 알 수 있고 클러스터화가 잘 진행됨을 알 수 있었다.

3.2 Isolated cluster ion impact

클러스터 이온의 존재 확인과 동시에 고체 표면과의 상호 작용을 알아보기 위한 isolated cluster ion impact를 위해 매우 낮은 이온선량 (flux), $\phi=10^7/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 하에서 CO₂ 클러스터를 좋은 결정성과 표면 거칠기

가 낮은 STM 보정용 HOPG (highly oriented pyrolytic graphite) 상에 2초간 조사하였다. 조사된 HOPG 표면을 $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ 면적에서 원자간 척력 현미경 (atomic force microscope: AFM)을 이용하여 주사하여 얻은 표면 사진을 그림 4에 나타내었다. 일정한 선 모양은 탄소 입자들이 잘 배열되어 있는 것을 알 수 있고, 군데군데 CO₂ 클러스터 이온이 충돌한 곳에서 hillock 모양으로 표면이 돌출 되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이 중 한 개의 hillock을 150 nm 영역에서 line-scan하여 보면 높이가 약 0.8 nm이고, 측면의 길이가 20 nm인 것을 알 수 있다. 보통 Ar 단일 입자가 HOPG 표면 충돌시 hillock 형태의 흔적의 높이는 0.2-0.3 nm이고 직경이 2-3 nm이라는 보고와 비교하여 보면 이보다 거대한 입자와의 충돌에 의한 것임을 알 수 있다 [12]. 즉 CO₂ 클러스터의 존재를 직접적으로 확인할 수 있는 결과로 여겨진다. 이러한 클러스터 이온에 의해 유도되는 hillock의 형성은 이전에 클러스터 이온과 Si 표면간의 충돌에서 발견된 Gspann의 결과와 잘 일치하고 있고, 이러한 클러스터 이온 충돌에 의해 고체 표면에 hillock이 형성되는 것은 10^{-14} s 동안 고체 표면의 온도가 10^4 K 정도까지 상승하게 되고, 이로 인해 용융된 충돌 부위의 탄성 되튀김 (elastic rebound)에 의하여 표면 밖에서 급냉 효과에 의해 형성되는 것으로 설명되어지고 있다 [13].

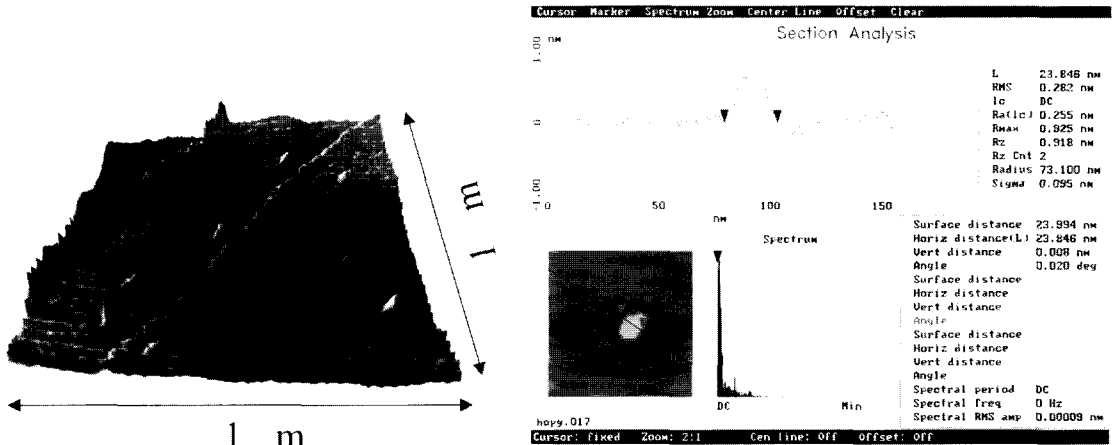


그림 4. CO₂ 클러스터 이온이 2초간 조사된 HOPG 표면의 AFM 이미지.

3.2 Si surface

평균 크기가 750여개 정도인 CO₂ 클러스터 이온을 50 kV까지 가속하였으며, 이온 선량은 약 10⁹/cm²·s 이었고, 5×10¹⁰에서 5×10¹¹/cm²의 이온 조사량을 이용해서 CO₂ 클러스터 이온을 Si 표면에 조사하였다.

Si 웨이퍼는 tetrachloroethylene과 acetone, methanol, ethanol을 이용해서 잔류 유기물질을 제거하였으며 native 산화층을 제거하기 위하여 붉은 HF 용액을 사용하였다. 50 kV로 가속된 클러스터 이온이 조사된 Si 표면의 표면 거칠기와 표면의 변화를 AFM을 이용하여 측정하였으며 bare Si의 경우에는 표면 거칠기는 0.45 nm로 원자적으로 평탄한 것을 확인하였다.

그림 5는 이온 조사량에 따른 CO₂ 클러스터 이온이 조사된 Si 표면의 AFM 이미지이다. 그림 5(a)에서 보는 바와 같이 5×10¹⁰/cm² 만큼 조사된 Si 표면에는 끝이 뭉뚝한 석순과 같은 hillock들이 생겨났으며 이로 인하여 표면 거칠기는 1.15 nm로 증가하였다. 조사되는 클러스터 이온의 크기 분포에 따라서 생성된 hillock의 크기가 영향을 받을 것으로 생각된다. Gspann은 10¹⁰/cm²만큼 100 keV 클러스터 이온이 Si 표면에 조사되었을 때 hillock이 생성되는 것을 관찰하였으며 이온 조사량이 증가할 경우 hillock의 수 또한 증가하는 것을 보고하였다 [13].

클러스터 이온을 조사량을 5×10¹¹/cm²로 증가시켜서 조사한 경우에는 더 많은 hillock들이 생겨났

으며 표면 거칠기는 1.27 nm로 증가하였다. Ar 클러스터 이온이 금속과 HOPG 표면에 조사되었을 경우에는 STM으로 관찰한 결과 hillock 대신 분화구가 생성이 된다는 것이 알려져 있으나 [14], 본 연구의 경우 AFM을 통하여 조사한 결과, 클러스터 이온이 고체 표면에 충돌시 표면에 분화구 대신 hillock이 관찰되는 것은 STM과 AFM의 분해능의 차이에서 기인한 것으로 생각될 수 있다. 클러스터 이온을 5×10¹¹/cm²만큼 조사시킨 Si 표면을 STM을 이용하여 측정하여 본 결과 그림 6(a)과 330×330 nm² 내에서 형성된 hillock이 잘 관찰되고 있고, 좀 더 좁은 35×35 nm² 내에서의 hillock을 관찰한 STM 형상에서도 Si 표면이 밖으로 돌출된 hillock을 관찰할 수 있었다. 즉 분화구 형태가 아닌 AFM 상에 나타난 것과 같은 hillock이 형성되어 있음을 알 수 있었다.

한편 그림 5(c)에서 보는 바와 같이 클러스터 이온을 5×10¹²/cm²만큼 조사시킨 경우에는 오히려 hillock의 수가 감소하였고 표면 거칠기 또한 1.22 nm로 감소하였다. 이와 같은 표면 거칠기의 감소는 다음과 같이 설명할 수 있다. 클러스터 이온이 고체 표면에 충돌시 평탄한 표면보다는 hillock과 같은 뾰족한 부분에서 스퍼터링 수율이 높게 측정되는 연구 보고가 있으며 [15], 이때 스퍼터링된 입자들은 기존의 단원자 이온들이 충돌시 알려진 cosine 법칙에 따르지 않고, 대부분이 표면에 평행한 방향으로 스퍼터링이 되고 따라서 hillock 부분에서 스퍼터링

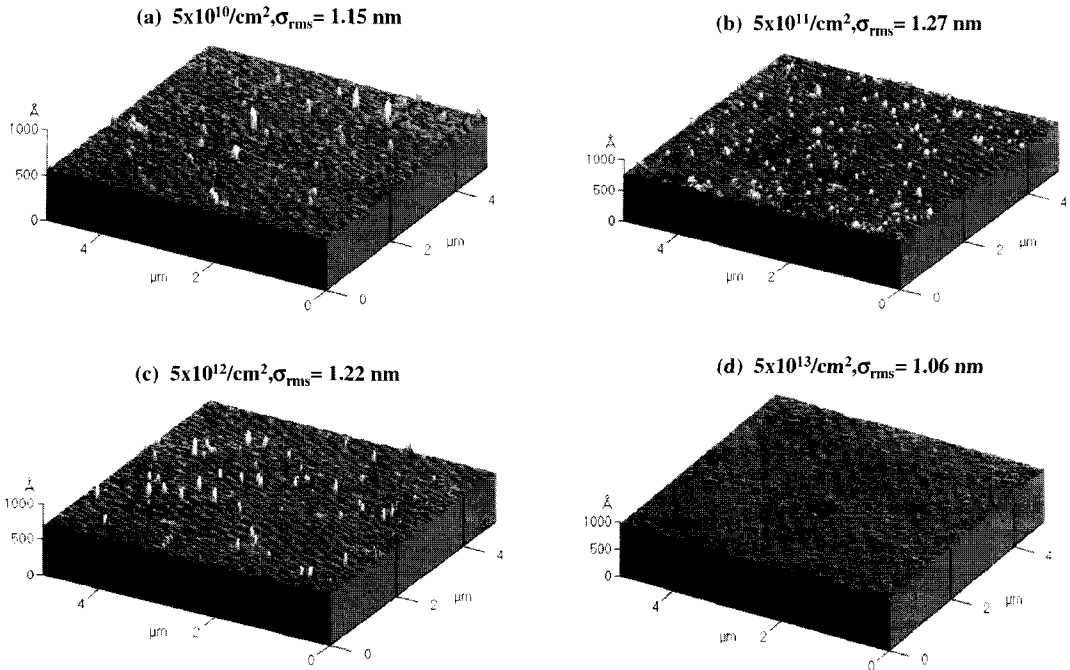


그림 5. (a) $5 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ (b) $5 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ (c) $5 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ (d) $5 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 만큼 CO_2 클러스터 이온이 조사된 Si 웨이퍼의 AFM 이미지.

된 입자들은 진공 내로 탈착되기 보다는 표면 위를 이동하면서 hillock 사이의 valley들을 채우게되어 표면 평탄화에 기여하게된다.

그림 5(d)은 $5 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 만큼 클러스터 이온이 조사된 Si 표면의 AFM 사진으로 이 경우 hillock들이

관측되지 않았고 조사된 Si 표면의 거칠기는 1.06 nm로 감소하였고 AFM 이미지로서 조사된 곳이 조사되지 않은 곳에 비해서 5.45 nm만큼 식각이 된 것이 확인되었다.

이상에서 AFM을 이용하여 살펴본 바와 같이 isolated CO_2 클러스터 이온의 고체 표면 충돌을 현상학적으로 설명하면 다음과 같다. Isolated impact에 의해 이온빔이 조사된 부분은 대부분 비정질화되고, 용융화된 물질의 탄성 되튀김과 급냉 효과에 의해 hillock이 형성되어, 어느 정도의 이온 조사량까지는 그 밀도의 증가를 보이며 이에 따라 표면의 거칠기가 증가함을 보이게 된다. 이 후 형성된 hillock이 차지하는 면적의 증가로 이온빔이 조사되지 않은 면적과 같게되는 임계 조건에서 hillock의 형성보다는 hillock으로부터의 스퍼터링이 우세하게되어 스퍼터링 원자들이 표면을 따라 확산하여 표면에 hillock 사이의 valley를 채우게 된다. 임계면적은 생성된 나노구조물의 차지하는 면적과 이온과 충돌하지 않은 나머지 면적이 같아지는 이온 조사량으로 이 때의 임계조건은 입사 클러스터 이온의 경우 나노 구조물

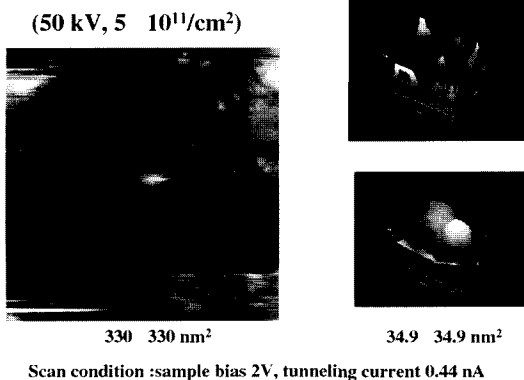


그림 6. $5 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 만큼 CO_2 클러스터 이온이 조사된 Si 웨이퍼의 (a) $330 \times 330 \text{ nm}^2$ (b) $35 \times 35 \text{ nm}^2$ 영역에서 얻은 STM 이미지(sample bias: 2 V, tunneling current: 0.44 nA).

을 생성할 확률과 이미 생성된 나노구조물 위에 충돌할 확률이 같아지는 조건이다. 표면을 따라 확산되어 존재하는 스퍼터링된 원자들은 매우 느슨하게 속박된 원자들이 결합한 상태로 변화된다. 임계조건 이상의 이온 조사량에서는 클러스터 이온과의 충돌시 매우 느슨하게 결합하고 있는 표면 원자들은 쉽게 다시 스퍼터링되거나 진공 속으로 탈착되어 떨어져 나가게된다. 이후 더 높은 이온 조사량으로 표면에 조사되는 경우 느슨하게 결합된 표면층들이 효과적으로 스퍼터링되어 내부방향으로의 식각이 이루어지게 된다.

4.3 ITO surface smoothing

그림 7는 $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ 영역을 스캔한 AFM 이미지로서 오른쪽은 CO_2 클러스터 이온이 조사되지 않은 쪽으로 왼쪽은 $1.5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 의 클러스터가 조사된 곳이다. 클러스터 이온이 조사되는 것을 막기 위해서 stainless steel 마스크를 사용하였다. 비조사된 곳을 조사된 곳과 비교를 하면 ITO 표면상의 hillock의 수와 높이가 감소한 것을 관찰할 수 있었다. 그림 8은 bare ITO 표면과 단분자 이온 및 클러스터 이온빔이 조사된 ITO 표면의 AFM 이미지이다. 그림 8(a)의 이미지 상에는 수백 nm의 폭과 15 nm의 높이를 가지는 hillock들이 약 10개정도 관찰이 되었다. 이것은 $4 \times 10^7/\text{cm}^2$ 의 hillock 밀도에 해당이 된다. Bare ITO glass의 표면 거칠기는 1.31 nm이었다. 그림 8(b)는 공급압력 1 bar에서 생성된 단분자 이온이 $1.5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 만큼 조사된 ITO 표면의 AFM 이미지이다. 이 경우에는 표면의 hillock의 밀도는 크게 변하지는 않았

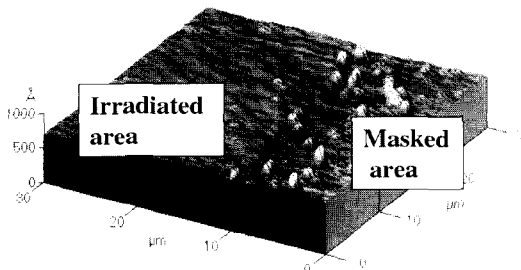
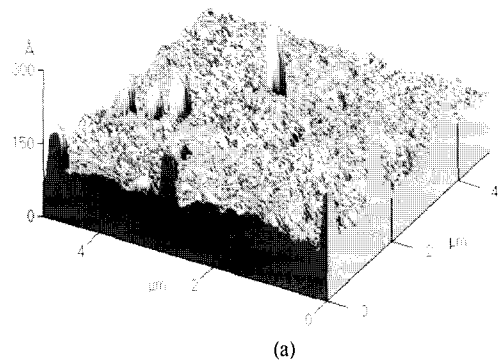
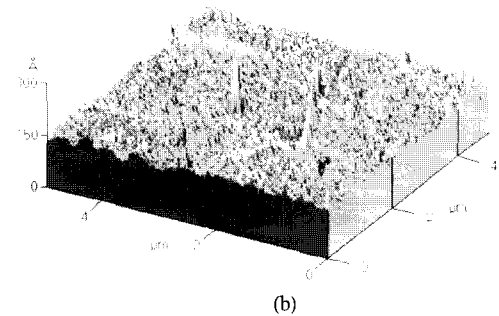


그림 7. $1.5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 만큼 CO_2 클러스터 이온이 조사된 곳(왼쪽)과 조사되지 않은 곳 (오른쪽)의 ITO 표면의 AFM 이미지.



(a)



(b)

그림 8. (a) bare (b) CO_2 monomer 이온이, $1.5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ CO_2 클러스터 이온이 (c) $1 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ (d) $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 만큼 조사된 ITO 표면의 AFM 이미지

으나 석순과 같은 모양에서 송곳과 같은 뾰족한 모양으로 변화였다. 게다가 표면의 거칠기는 1.6 nm로 증가하였다. 반면에 클러스터 이온이 조사된 경우에는 다른 현상이 ITO 표면에서 관찰되었다. 클러스터 이온이 $1 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 만큼 조사된 경우, 나노 크기의 hillock 구조물들은 거의 보이지 않았으며, 조사된 표면의 거칠기는 1.05 nm로 bare ITO나 단분자 이온이 조사된 ITO glass보다 더 평활 하였다. 한편 그림 8(d)의 경우 $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 만큼 조사된 경우 표면의 거칠기가 0.93 nm 정도로 완전히 표면이 초평탄화 되었음을 알 수 있다.

한편 CO_2 클러스터 이온 조사량에 따른 전기적, 광학적 성질의 변화를 보면, 이온 조사량이 많을수록 ITO 박막의 저항치가 증가하는 경향을 보였는데, 이는 첫 번째로 ITO 박막의 스퍼터링 및 에칭에 의해 두께가 감소하여 박막의 저항치가 증가한다고 생각된다. 또한 ITO의 경우 일반적으로 $O/\text{In}=1.67$ 의

조성비에서 가장 낮은 비저항값을 보이게 되는데, CO₂ 클러스터 이온의 충돌로 인해 ITO 박막 내에서 질량이 적은 산소 원자 스퍼터링이 우세하게 이루어지고, 이에 따라 일반적으로 ITO 박막의 조성이 화학양론 값에서 벗어남으로 인해 박막의 표면 저항 값이 많이 증가함을 알 수 있다. 한편 광학적 면에서 육안 상의 변화는 거의 없었으며 클러스터 이온의 경우 ITO표면에 충돌시 그 침투 깊이가 크지 않기 때문에 이러한 미세 변화에 의해 가시광 영역에서의 투과도에는 큰 영향을 미치지 않는다고 판단된다.

현재 ITO는 유리, 고분자 위에 증착되어 디스플레이의 기판, 특히 최근에 들어서는 유기 EL 디바이스의 투명 전극 중 양극으로 사용되는데 용이한 홀 주입을 위하여 ITO의 일함수를 높이기 위하여 산소 플라즈마에서 표면처리를 하는 연구들이 보고되었다 [16]. 본 연구와 관련하여 위와 같은 디스플레이의 투명전극으로 사용하기 위하여 표면 거칠기의 감소 이외에 표면 조도 및 화학양론의 변화를 방지하여야하는 중요한 공정 상의 문제를 해결하여야 한다. 이와 같은 문제점을 개선하기 위해 CO₂ 클러스터 이온빔 대신 표면의 거칠기의 향상을 이루고, 더불어 산소 결핍 등의 문제를 해결할 수 있도록 O₂ 클러스터 이온빔을 이용한 ITO 표면 처리 결과와 비교하는 실험을 진행하고 있으며, 차 후 표면 조성 분석 및 비저항 측정을 통하여 전기적, 광학적 성질을 비교해 보는 것이 필요하다.

4. 결 론

CO₂, N₂O 가스를 석영 Laval 노즐을 통하여 단열 팽창시키면서 상온에서 클러스터 입자의 형성과 크기를 비행시간 측정법에 의하여 확인하였으며, CO₂ 클러스터 이온을 HOPG 표면에 충돌시 20 nm 크기, 1 nm 높이의 hillock 형성으로부터 그 존재를 확인할 수 있었다. 고체 표면에 isolated cluster ion impact시 낮은 이온 조사량에서는 nm 크기 및 높이의 hillock 이 형성되는 surface embossment 과정이 관측되었으며 이온 조사량의 증가에 따라 hillock의 밀도가 증가하며 임계 조사량 이후에는 hillock의 형성보다는 스퍼터링된 원자들의 확산에 의한 표면 조도가 감

소하는 surface sputtering/smoothing 현상이 일어나게 되고 그 이 후의 이온 조사량에서는 느슨하게 결합된 원자들로 이루어진 표면과 클러스터 이온에 의해 손상된 표면층 등이 깊이 방향으로 효과적으로 스퍼터링되는 surface etching 과정으로 현상학적으로 설명할 수 있다. 한편 ITO 표면에 형성된 hillock을 제거하기 위해 단원자 이온빔을 이용하는 경우 hillock의 형태가 뾰족하게 변화하는 과정이 관측된 반면 클러스터 이온빔의 경우 이와는 달리 hillock의 모양이 둥글게 스퍼터링되어 감을 알 수 있었다.

감사의글

본 연구는 New-Frontier Tera-bit Nano Device 연구단의 일부 지원을 받아 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] I. Yamada, Mater. Sci. Eng. A **217/218**, 82 (1996).
- [2] K.-I. Goto, J. Matsuo, Y. Tada, T. Sugi, and I. Yamada, IEEE Trans. Electron Devices **46**, 683 (1999).
- [3] N. Toyoda, J. Matsuo, T. Aoki, I. Yamada, and D. B. Fenner, Nucl. Instru. and Meth. B (to be published).
- [4] D. Fathy, O. W. Holland, R. Liu, J. Wosik, and W. K. Chu, Mater. Lett. **44**, 248 (2000).
- [5] J. A. Greer, D. B. Fenner, J. Hautala, L. P. Allen, V. DiDilippo, N. Toyoda, I. Yamada, J. Matsuo, and E. Minami, H. Katsumata, Surf. Coating Tech. **133-143**, 273 (2000).
- [6] J. Gspann, Nucl. Instru. and Meth. B **112**, 86 (1996).
- [7] J. Gspann, Surf. Rev. Lett. **3**, 897 (1996).
- [8] J. Matsuo, D. Takeuchi, T. Aoki, and I. Yamada, *Int. Conf. Ion Implantation Technology*, (1996), p. 772.
- [9] J. Gspann, *From Clusters to Crystals*, Vol. 2, Kluwer, Dordrecht, 1992, p. 115.
- [10] J. H. Song, S. N. Kwon, D. K. Choi, and W. K. Choi, Nucl. Instru. and Meth. B **179**, 568 (2001).
- [11] J. H. Song, D. K. Choi, and W. K. Choi, Current

- Appl. Phys. **1**, 521 (2001).
- [12] L. Porte, C. H. de Villeneuve, and M. Phaner, J. Vac. Sci. Technol. B **9**, 1064 (1991).
- [13] J. Gspann, *Similarities and Differences between Atomic Nuclei and Clusters*, AIP, 1998, p. 299.
- [14] T. Seki, T. Kaneko, D. Tekeuchi, T. Aoki, J. Matsuo, Z. Insepov, and I. Yamada, Nucl. Instru. and Meth. B **121**, 498 (1997).
- [15] A. Yoshida, M. Deguchi, M. Kitabatake, T. Hirao, J. Matsuo, N. Toyoda, and I. Yamada, Nucl. Instru. Meth. B **112** (1996) 248.
- [16] J. S. Kim, F. Cacialli, M. Granstrom, R. H. Friend, N. Johanson, W. R. Salaneck, R. Daik, and W. J. Feast, Synth. Mat. **101**, 111 (1999).