

# 갈륨 이온 주입을 이용한 나노 구조물 제작의 메카니즘 연구 A study on mechanism of nanostructure fabrication using Ga ion implantation

\*한진, 김태곤, #민병권, 이상조

\*J. Han, T.-G. Kim, #B.-K. Min(bkmin@yonsei.ac.kr), S. J. Lee  
연세대학교 기계공학부

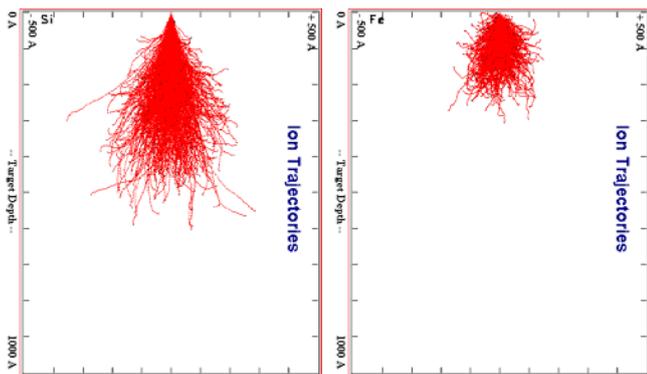
Key words : local Ga ion implantation, silicide, nanostructure

## 1. 서론

이온 주입은 일정 에너지를 갖는 이온이 시편 내부로 침투되어 시편 원자와의 충돌로 인한 재료 내부의 물리 화학적 변화를 야기시키기 때문에 기계적 특성을 향상시키는 표면 개질에 응용된다<sup>1</sup>. 집속이온빔 장치는 이온 경통 아래에 설치된 편향기를 이용하여 빔 조사 위치를 제어 할 수 있는 장점으로 국부적으로 갈륨 이온을 주입시킬 수 있다. 별도의 마스크가 필요 없는 공정을 이용한 갈륨 이온 주입 방법을 응용하여 실리콘 기반의 시편에 습식 식각, 건식 식각, MR(magnetorheological) 공정을 이용하여 나노 구조물을 제작한 연구 결과가 보고되었다<sup>2</sup>. 금속 재료는 실리콘의 반경 방향 이온 침투 범위가 작기 때문에 재료 제거 선택비를 이용한 복합 공정의 정밀도를 향상시킬 수 있다. 실리콘 표면 위에 증착된 금속 재료에 갈륨 이온을 국부적으로 조사한 후 습식 식각을 통해 나노 구조물 제작 하고, 제작된 나노 구조물을 DRIE 마스크로 이용하여 나노 채널을 제작한 연구 결과를 발표하였다<sup>3</sup>. 갈륨이 주입이 되지 않은 영역에서는 습식 식각 공정을 통해 증착된 금속이 제거가 되지만 갈륨이 주입된 영역은 식각액과 반응하지 않아 나노 구조물을 제작 할 수 있는 것이다. 하지만 금속의 갈륨 이온 주입에 의한 습식 식각 공정에서의 선택비 차이에 대한 원인 분석은 없었다. 본 논문에서는 AES(Auger electron spectroscopy)와 XPS(X-ray photoelectron spectroscopy) 분석 장치를 이용하여 재료 제거 메카니즘을 분석하였다.

## 2. 이온 주입 및 실험 방법

일정 에너지를 갖는 이온을 시편에 주입시키면 시편 안의 원자와 전자의 충돌에 의해 에너지를 손실하면서 깊이 방향과 측면 방향으로 퍼진다. 따라서 이온이 시편 안으로 이동한 거리는 깊이 방향의 도달거리와 측면 방향의 도달거리로 구분할 수 있다. 도달 거리는 입사하는 이온의 질량, 입사 각도, 시편의 종류, 가속 전압 등에 의해 결정된다. 그림 1은 실리콘과 철 시편에서의 30 kV의 가속 전압, 수직 방향의 입사 각도에 대한 갈륨 이온의 도달 거리를 SRIM 시뮬레이션을 사용하여 나타낸 결과이다. 실리콘과 철에서의 깊이 방향의 도달 거리는 각각 27 nm, 11 nm 이고 측면 방향의 도달 거리는 각각 6 nm, 3 nm 이다. 낮은 측면

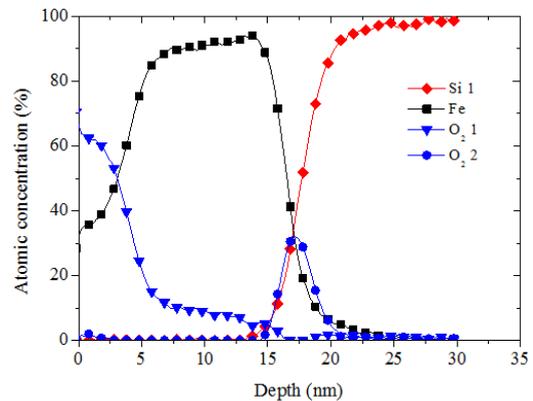


(a) Silicon (b) Fe  
Fig. 1 SRIM result of penetration depth

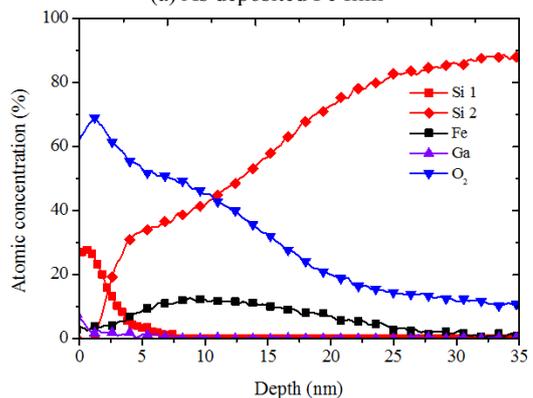
방향의 도달 거리는 이온 조사에 의해 물성 치가 변화는 영역이 작아지기 때문에 높은 정밀도를 기대할 수 있다. 갈륨 이온 주입에 의한 시편 내부 구조의 조성 변화를 측정하기 위해 AES 측정을 수행하였다. 5keV의 에너지를 갖는 전자를 10 μm × 10 μm 영역에 조사한 후 방출되는 오제이 전자의 에너지를 측정하였다. 깊이 방향에 대한 분석을 위해 Ar 이온으로 일정 영역을 스퍼터링 한 후 전자 빔으로 분석하였다. 또한 화학적 결합 상태를 확인하기 위해서 XPS를 이용하여 재료의 결합에너지를 측정하였다. Al Kα 소스를 사용하여 철 상태의 스펙트럼을 분석 비교하였다.

## 3. 결과 및 토의

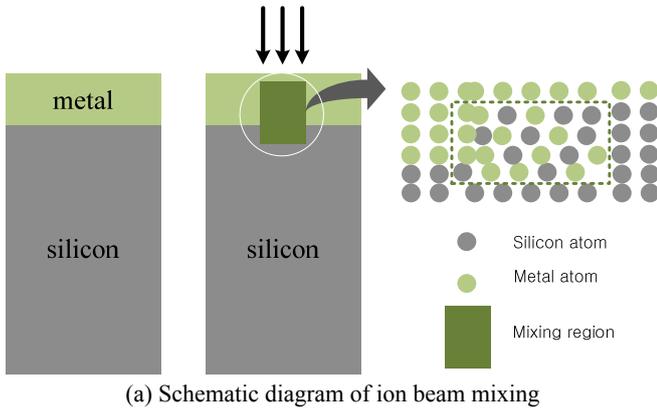
그림 2는 AES를 이용하여 깊이 방향에 따른 구성 성분의 분포를 보여준다. 그림 2(a)는 실리콘 웨이퍼 위에 15 nm 두께의 철을 증착 한 후의 측정 결과이다. 산소 성분은 철과 실리콘이 공기 중의 산소와 자연산화 된 산화 철과 이산화규소(SiO<sub>2</sub>)에 의한 것으로 예상된다. 그림 2 (b)는 증착된 표면에 갈륨 이온이 조사된 영역의 분석결과이다. 갈륨 이온이 깊이 방향 10 nm 까지 측정이 되었다. 그림 2(a)와 다르게 갈륨 이온이 주입되면 15 nm 이하에서 측정되었던 실리콘이 표면 근처에서도 측정됨을 확인할 수 있다. 철 성분 또한 실리콘만 측정되었던 영역에서 발견되었다.



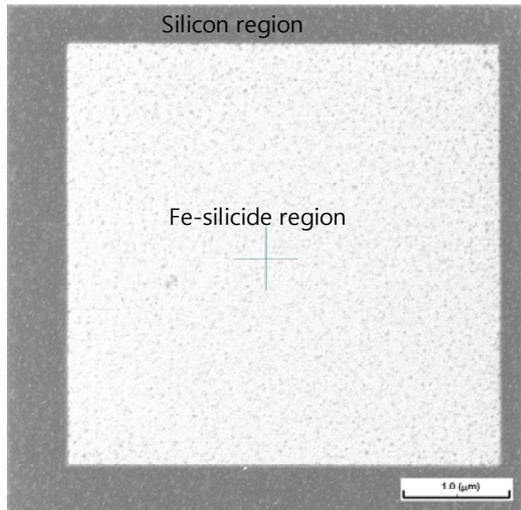
(a) As deposited Fe film



(b) Ga ion implanted on deposited surface  
Fig. 2 AES depth profile of Fe deposited on Si



(a) Schematic diagram of ion beam mixing



(b) FIB image of fabricated structure after wet etching

Fig. 3 Ion beam mixing

이것은 갈륨 이온 주입으로 철과 실리콘 사이의 계면에서 이온 믹싱이 발생한 것으로 가정된다. 이온 믹싱 현상은 경계층 내에서 이온과의 충돌로 인해 각 원자의 재정렬로 인해 두 원자가 서로 섞이게 되는 것이다. Fig. 3 (a)는 이온 믹싱의 개략도이다. 갈륨 이온과 원자의 1 차 충돌과 PKA(primary knock-on atom)과 원자의 2 차 충돌로 인해 두 경계층 근처에서 서로 섞인다. Fig. 3 (b)는 철 위에 갈륨 이온 조사 후 습식 식각을 한 실험 결과이다. 밝은 음영 부분이 철-실리사이드가 형성된 부분이고 주변은 철이 에칭이 된 실리콘이다. 경계층 내에서의 두 물질에 대한 이온 빔 주입에 의한 믹싱 여부는 heat of mixing 으로 구분된다. Heat of mixing 의 음의 값을 가질 때에는 두 물질이 서로 잘 섞이는 것을 의미하며 양의 값을 가질 때에는 서로 잘 섞이지 않는 것을 의미한다. 실리콘과 철에 대한 heat of mixing 은 macroscopic atom model 을 통해 -18 KJ/mole 로 예측되어 서로 잘 섞이는 물질임을 나타내며 실험 결과와 일치한다<sup>4</sup>.

그럼 4 는 철-실리콘 사이의 화학적 결합 상태를 확인한 XPS 결과이다. 그림 4 에서의 갈륨 이온 주입 시편에서는, 철의 피크치가 순수한 철과 비교했을 때 706.88 eV 에서 709.83 eV 로 이동되었다. 철의 스펙트라 분석을 통한 피크 결합 에너지 이동은 철과 다른 물질의 화학적 결합을 의미한다. 709.83 eV 의 피크 에너지는 철과 실리콘이 화학결합을 한 철-실리사이드의 에너지와 일치한다.<sup>5</sup> 이것은 갈륨 이온 주입을 통한 철과 실리콘의 믹싱으로 두 원자가 반응하여 철 실리사이드를 형성한 것이다.

선택비 차이의 원인에 대한 다른 가능성은 증착된 철과 갈륨과의 반응이다. 직접 반응 가능성 확인을 위해 두꺼운 철을 실리콘 위에 증착하여 갈륨 이온 조사 후 습식 식각을 수행하였다. 갈륨의 침투 깊이 보다 두꺼운 철을 증착

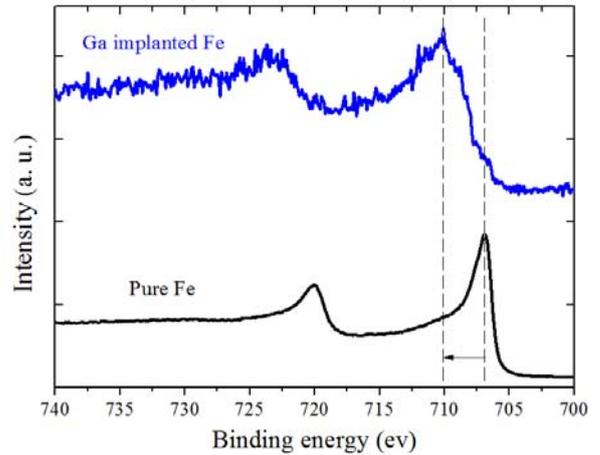


Fig. 4 XPS result of Fe spectra

하였기 때문에 철과 실리콘의 믹싱이 발생하지 않은 조건이다. 습식 식각 공정에서의 리프트 오프를 방지하기 위해 증착 두께보다 큰 영역에 갈륨 이온을 주입하였다. 두꺼운 증착 두께에서 의 경우에는 갈륨 이온을 주입하지 않은 경우와 같이 철 박막이 모두 제거가 되었다. 이것은 갈륨과 철의 반응이 아닌 철과 실리콘의 믹싱에 의한 실리사이드 층 형성이 재료 제거 선택비의 직접적인 원인임을 증명한다.

#### 4. 결론

실리콘 웨이퍼 위에 증착된 철 박막에 대한 갈륨 이온 조사 영역의 습식 식각 공정에서의 재료 제거 선택비 차이에 대한 메커니즘 분석을 하였다. AES 분석 결과 갈륨 이온의 주입으로 인해 원자의 재정렬이 발생하는 이온 빔 믹싱이 된 것을 확인하였다. 또한 XPS 를 사용하여 믹싱된 부분의 화학적 결합 상태가 철-실리사이드가 형성됨을 결합 에너지의 변화를 통해 확인하였다. 이온 빔 믹싱 효과를 이용하여 광학 성질, 마그네틱 성질 또는 금속간 화합물 등의 고유한 물성치를 갖는 금속에 적용 할 수 있다. 이종 재료에 대한 나노 구조물 제작을 통해 바이오 진단, 치료, 이미징 등의 응용 분야에 적용 할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후기

본 연구는 한국인체기초공학연구재단의 지원(KOHTERF-2009-11)과 지식경제부 청정제조기반 산업원천기술개발사업인 “고효율 에너지빔 응용 초미세 부품 제조용 In-line 시스템 개발” 연구비 지원으로 이루어 졌습니다.

#### 참고문헌

1. Follstaedt, D. M., Knapp, J. A., Myers, S. M., "Mechanical properties of ion-implanted amorphous silicon," Journal of material research, **19**, 338-346, 2004.
2. Han, J., Kim, J.-W., Lee, H., Min, B.-K., and Lee, S. J., "Microfabrication method using a combination of local ion implantation and magnetorheological finishing," Applied physics express, **2**, 026503, 2009.
3. Han, J., Kim T.-G., Min, B.-K., and Lee, S. J., "Fabrication of Nano Channels with High Aspect Ratio on Silicon Substrate by Local FIB Implantation and DRIE," Journal of Japanese applied physics, Accepted
4. De Boer, F. R., Pettifor, D. G., "Cohesion in metals Transition metal alloys," North-Holland, 1988
5. Lim, A. S., Atrons, A., "ESCA studies of Si-Fe alloys," Applied Physics A, **53**, 273-281, 1991.