

Field Ion Microscope(장 이온 현미경)에 관하여

손 운 택
국방과학연구소

1. FIM의 역사

(1) Field Emission Microscope의 발견

1928년에 Gamow가 방사성 알파 감쇄를 Tunneling효과로 설명하였다. 그리고 금속에서의 Field electron emission을 Fowler 와 Nordheim이 또 하나의 경계선 돌파의 예로 설명하였다. 같은 시기에 Oppenheimer가 수소가 Electric Field 내에서 이온화할 확률이 있음을 제안하였다. 이러한 이론들은 많은 흥미를 끌었으나 실험으로 증명하기에는 막대한 Field를 발생시켜야 하는 어려움이 있어서 업두들을 내지 못하고 있었다.

1936년에 E. W. Muller가 처음으로 높은 Field를 발생할 수 있는 시험법을 발견하였다. 시편을 아주 뾰족하게 하고 전장을 걸어 주면 시편의 기하학적 특성에 의하여 높은 Electric Field를 얻을 수 있다는 아주 간단한 원리를 이용한 것이다. 이 원리를 이용하여 Muller는 시편 끝에서 Tunneling한 전자가 형광 스크린에 상을 형성하는 Field Emission Microscope를 발명하였다. 원리와 구조는 대단히 간단하였으나 고 진공을 요함으로 당시의 진공기술로는 어려움이 많았다. 또한 이러한 실험을 통하여 높은 Electric Field를 걸어 주면 시편의 표면에 있는 흡착물들이 Field Desorption에 의하여 표면에서 제거된다는 것을 발견하였다. 그러나 이 Field Emission Microscope의 분해능은 방출된 전자의 횡적 속력 Component에 의하여 제한된다는 것을 알았고 de Broglie의 파장에 의하여도 제한되어 원자 레벨의 분해능을 얻는다는 것은 불가능하다는 것을 알아냈다.

Muller는 금속 시편을 뾰족하게 하여 이것을 Cathode로 하고, 형광 스크린을 Anode로 하여 진공의 유리 튜브 내에 넣고 충분한 전압을 가하면, 그 시편의 끝에서의 Field는 30에서 50MV/cm 까지 이르게 된다는 것을 발견하고, 시편의 구형 표면에서는 전자의 Tunneling이 일어나 전자가 시편에서 튀어나오게 되고 이 전자는 시편 표면의 전자 발생의 농도에 따라 형광 스크린 상에 상(pattern)을 형성하게 된다는 것을 발견하였다. 그 확대비율은 대략 시편의 꼭지 반경과 시편에서 형광 스크린까지의 거리의 비에 비례한다. 이 시편 꼭지의 반경을 100nm로 하고 시편과 스크린과의 거리를 10cm로 하면 백만 배의 확대는 쉽게 얻을 수 있으며 분해능은 25Å이 된다.

(2) Field Ion Microscope의 발견

Field Emission Microscope의 단점을 어떻게 보완할 것인가 하고 고민하던 Muller는 양이온을 이용하여 시편의 표면을 관찰하기 위하여 수소 이온을 처음으로 사용한 것이 1951년도였다. 처음에는 시편을 상온에서 Field Emission시와 반대의 전압을 가하여 수소 이온을 발생하게 하는 아주 간단한 것이었으며, 원자 레벨의 분해능을 나타낸 최초의 현미경이 된 것이다. 그후에 5년이 경과한 1955년도에 시편의 냉각을 통해서 처음으로 원자 레벨의 분해능을 얻을 수 있었다. 초기의 현미경은 거의 전부가 유리 플라스크를 본체로 하고 Diffusion Pump를 진공 펌프로 사용하였다. 그 후에 본체 전부를 금속으로 만든 현미경이 출현하였고 표면의 원자 하나 하나를 볼 수 있는 최초의 현미경이 된 것이다. 진공 장비가 발전하고 저온기술의 발전으로 FIM으로 관찰

할 수 있는 금속도 증가하였으며 수소 이외의 이온을 사용함으로써 순 금속뿐만 아니라 합금도 관찰할 수 있게 되었다. FIM의 구성도 근본적으로 FEM과 같다. 다만 시편이 더욱 뾰족하여야 하며 더 높은 양의 전압을 가하여 500MV/cm 정도의 Field를 걸어 주어야 한다. 시편 표면의 상 정보(Image Information)는 시편 표면에서 스크린까지 수직으로 투사된 양이온에 의하여 형성된다. 확대율은 수 백만 배가되며 분해능은 2 내지 3Å이 된다. 시편의 표면에서 이온화된 Image Gas가 이온원이 되며 이 Gas는 10^{-3} 정도의 기압으로 공급된다.

2. FIM의 원리

(1) Field Ionization

원자를 이온화시키는 방법에는 전자에 에너지를 가하여 전자가 방출하게 하는 방법 즉 열전자(phonon), 광전자(photon), 입자(particle) 등을 쏘여 방출하게 하는 방법과 전자가 간헐 있는 장벽을 낮추어서 방출하게 하는 방법이 있다. Field ionization은 후자에 속하며 그 Mechanism은 다음과 같다. 자유원자 내에 있는 전자를 Potential 우물 속에 갇힌 것으로 볼 때, 이 원자에 전기장이 가해지면 Potential 우물의 벽에 변형이 와서 안에 갇혀 있던 전자가 Tunneling에 의하여 방출되어 원자의 이온화가 가능하며, 이러한 현상을 Field Ionization이라 한다. 이러한 Tunneling 현상이 충분히 일어나려면 가해진 전장의 강도가 충분히 커서 전위 장벽의 변형을 전자의 de Broglie 파장 이하로 감소시켜야 한다. FIM에 있어서 Gas원자의 전위 장벽은 시편의 표면에 접근할수록 좁아져서 이온화 확률이 높아진다. 그러나 일정한 거리 이내로 들어가면 원자 내의 전자의 에너지 레벨이 금속의 Fermi level이하로 떨어져서 이온화가 될 수가 없다.

(2) Field Desorption

모든 시편의 표면에는 여러 가지 원소들이 아주 약한 Bonding으로 존재한다. 대기 중에서는 물론 질소가 가장 많고, 진공 하에서도 이러한 원소들은 증발하지 않고 잔류한다. 그러나 전장을 가해 주면 표면에서 제일 먼저 이 원소들이 Field Ionization에 의하여 이온화되어 표면에서 떨어져 나오게 된다. 이러한 현상을 Field Desorption이라 하며, 진공 중에서 가열하지 않고 표면을 정화할 수 있는 방법이다. 이 방법으로 FIM의 시편의 표면을 Atomically Clean Surface로 하여 관찰을 할 수 있다.

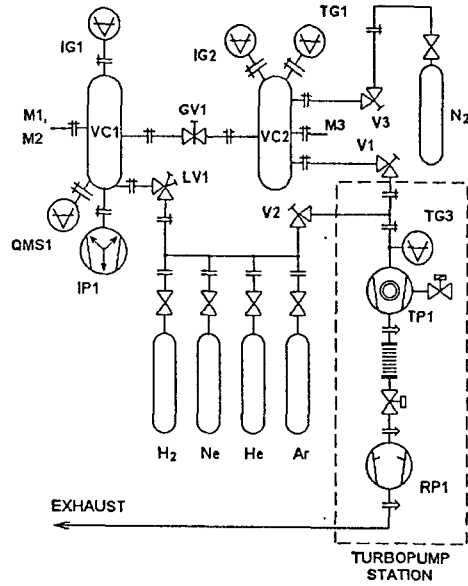
(3) Field Evaporation

시편의 표면에 충분히 높은 Field가 가해지면 시편 표면의 원자들이 Field Ionization에 의하여 이온화 되어 표면에서 이탈되게 된다. 이 현상을 Field Evaporation이라 한다. Field Evaporation은 표면의 제일 외측에 위치하여 약한 Bonding을 하고 있는 원자부터 시작하여 시편의 표면 원자를 한 겹씩 벗겨 나가서 결국은 아름다운 FIM Image를 얻을 수 있게 되는 기본 현상이다. FEM의 경우에는 표면에 양이온이 흡착되어 점차 시편의 표면이 오염되지만, FIM의 경우는 그 반대로 표면의 원소를 한 겹씩 제거하여 그야말로 Atomically Smooth한 표면을 형성하여 시편 특유의 Pattern을 얻을 수 있게 된다.

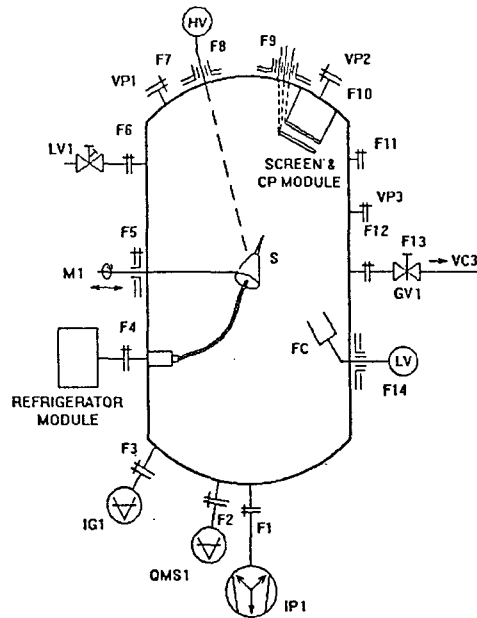
Field Evaporation 이론에서 단일 표면 원자의 증발은 장의 세기, 화학적 특성, 그리고 온도의 함수가 된다. 또한 증발하려는 원자의 주위환경 즉, 그 위치의 국부 Topography, 결정구조, 시편 Tip의 형태와 크기, 합금이나 불순물 원소, 그리고 존재 가능한 Gas 등의 모든 인자들이 Field Evaporation의 최종 형태를 결정 짓는 인자들이 된다.

3. FIM의 구성

(1) Block Diagram of FIM System



(2) Block Diagram of FIM Chamber



4. FIM의 응용

(1) 표면 과학

Field Ionization에 의하여 야기되는 Field Evaporation 에너지를 측정함으로써 표면 원자들의 결정격자 위치에 따른 Binding Energy를 측정할 수 있으며, 표면에서 발생하는 Adsorption Desorption Energy도 측정할 수가 있어 표면현상 연구에 아주 중요한 도구가 되며 표면 부식의 원자 레벨의 연구에 유일한 방법이 된다.

(2) 재료공학

격자결함 즉 Vacancies, Dislocation, Interstitials, Impurity Interstitial, 그리고 격자 경계, Grain boundary, Stacking faults, twin, anti domain boundary 등을 원자 레벨에서 연구할 수 있고, 각종 기계적 변형에서 발생하는 결정격자의 원자 레벨 변화의 관찰도 가능하며, 현재 이러한 방법의 연구가 많이 진행되고 있는 중이다.

(3) 기타

FIM 그 자체의 응용 외에 그 기본 원리가 되는 Field Emission이론을 바탕으로 전자의 source로 응용하려는 분야가 아주 활발하다. Micro Electronic 분야, 전자현미경의 전자총, 평면 표시 장치 등 첨단 미래지향적인 응용분야가 속출하고 있다.

5. 결론

FIM은 오늘날까지 알려진 현미경 중 가장 간단하며 가장 배율이 큰 현미경이다. 그렇다고 아무나 손쉽게 만들어 쓸 수 있는 것은 아니다. 초고진공, 시편의 준비, 표시 및 기록장치 등 고도의 기술을 요구하는 일면도 있다. 그 응용은 분석 장비로 뿐만 아니라 전자 발생 장치로 특히 2000년대에 각광을 받을 Micro Electronics, Nanoscale 재료, Field Emission Display 등 광범한 응용 범위가 나타나서 선진국에서의 연구가 활발한 분야이므로 우리도 이 분야의 개척이 시급하며 많은 분들의 참여를 권장하는 바이다.