

집속렌즈계 요소기술 개발에 대한 연구

이연진*, 구종모, 노명근, 정광호

Abstract

본 연구에서는 금속 원자를 단일 팽창시켜 클러스터를 만들고, 생성된 클러스터를 이온화 시킨 후 집속렌즈 및 electric quadrupole을 이용하여 기판으로 증착 하였다. 집속렌즈의 설계에서는 단일 초점 방식의 렌즈보다 성능을 높이기 위하여 이중 초점과 핀홀을 써서 집속 효과 및 효율을 높였다. 렌즈의 설계는 일반적으로 하전입자의 에너지 손실 없이 집속할 수 있는 Einzel렌즈를 기본으로 하였으며, SIMION software를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 후 실제 렌즈계 및 정전압원을 제작하여 금(Au)의 클러스터를 생성하여 렌즈계를 통과한 후 실제 기판위로 증착이 되는 것을 AFM(Atomic force microscopy)과 XPS(X-ray photoemission spectroscopy)를 이용해 조사하여 렌즈계가 실제로 동작함을 확인하였다.

1. 서론

본 연구는 집속이온빔 장치의 개발에 있어서, 기본요소 기술기발을 목표로 하며, 특히 집속 이온빔 장치의 핵심을 이루는 정전 렌즈형 이온 집속용 렌즈 시스템의 기본 설계와 이온빔의 집속성능을 높일 수 있는 렌즈 시스템의 시뮬레이션 및 최적화 설계를 목표로 하였다.

이온빔을 집속하기 위한 가장 보편적인 방법으로 3극의 정전렌즈를 보통 사용한다. 정전 렌즈 중에서 Einzel 렌즈(혹은 Unipotential렌즈)는 이온빔의 에너지를 변화시키지 않고 이온선을 집속시키는 방법을 제공해 주기 때문에 가장 많이 사용되는 정전집속렌즈이다.1 이 경우 이온원에서 추출된 이온 전류의 손실을 최소로 하면서 입사이온의 에너지를 변화시키지 않고 이온빔을 집속시킬 수 있다. 입사한 이온선을 집속시키기 위해서는 전극의 형태가 회전축에 대하여 대칭을 이루어야 하며 회전대칭 형태로는 제작이 가장 간편한 aperture형태와 tube형태를 사용하는데, 이들 형태에 관한 이온 광학적 특성은 어느 정도 알려져 있으나

발표된 결과들이 특정한 기하학적 구조를 가지는 렌즈의 특성에만 국한되어 있으므로, 실제 정전렌즈의 설계, 제작에 필요한 연구가 이루어져, 수차를 최소화할 수 있는 최적의 형태에 대한 기본적 정보를 찾아야한다.

일반적으로 3 tube 형태의 Einzel 렌즈가 수차가 가장 작다고 알려져 있으나, 집속이온빔의 집속도를 향상시키고 구면수차를 최소화기 위하여 렌즈 도입부분의 구조를 변경하거나, 4극 또는 5극의 구조를 고려할 수 있다. 특히 렌즈의 기하학적 구조는 구면수차와 직접적인 연관이 있기 때문에 최적화된 정전렌즈 설계는 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 3 tube가 아닌, 개선된 형태의 정전렌즈를 설계하여 특성을 평가 하였다.

2. 실험 및 시뮬레이션

본 실험에서는 먼저 클러스터를 생성시킨 후 렌즈계를 이용하여 이온화된 클러스터 빔2을 조사하였다. 본 system에서는 source로 pulse type의 laser를 사용하여 cluster를

* 서울특별시 서대문구 신촌동 134 연세대학교 물리 및 응용물리 사업단

생성하는 방법을 채택하였다.

실험의 개략도는 그림1에 나타난 바와 같다. 모든 실험은 $1 \sim 10^{-8}$ Torr이하의 초고진공 상태에서 수행 되었다. (a)와 같이 레이저를 target 물질에 조사하여 플라즈마를 생성 시키고 플라즈마가 생성되는 시점에서 carrier gas를 주입하여 노즐을 통해 초고진공 상태의 챔버내로 supersonic expansion시켜 단열팽창에 의해 클러스터들이 생성된다. 생성된 클러스터는 이온화 후, (b)에 도시된 것과 같은 렌즈계와 quadrupole을 결합시킨 장치를 사용하여 기관위로 증착된다.

본 장치의 핵심인 렌즈계를 설계하기 위하여 먼저 그림2와 같은 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션은 SIMION 7.0 (Scientific instrument services, Inc.)을 사용하여 수행 하였다. 그림2는 렌즈계의 각 단계 정전압을 걸고 이온 클러스터 빔을 입사시켰을 때의 포텐셜 분포와 빔의 궤도를 나타낸다. 각 부분의 전압은 입사하는 이온의 에너지에 따라 결정하여 걸어주게 된다. 이온클러스터빔은 좌측에서 우측

으로 입사되며 각 부분을 거쳐서 그림2에 표시한 (10)으로 나와 기관에 증착되게 된다. 본 렌즈계는 acceptance angle이 $\pm 5^\circ$ 이며 0~2000eV까지의 이온빔을 받아들일 수 있도록 설계 되었다. 또한, 렌즈계의 성능을 좌우하는 요소 중 하나인 안정적인 정전압의 공급을 위하여 PC로 제어되는 스위칭 파워를 사용하여 입사빔의 에너지에 따라 렌즈계에 걸리는 전압을 정밀하게 조절 하였다. 렌즈계는 크게 3부분으로 나누어 지는데, (1)~(5)번에 해당하는 정전압 Einzel lens 부분, (6)번은 quadrupole 이며, (7)번은 edge effect를 줄이기 위한 corrector이다. (2), (4)번 부분은 클러스터 이온의 운동에너지에 따라 정전압이 걸리며, (1), (3), (5)번은 0V를 유지하는 기본적으로 2-stage Einzel 렌즈계이다. (8)번위치에 첫번째 초점이 오도록 설계 하였으며, 이 위치에 pin hole을 두어 효과를 높였다. 두 번째 초점은 (9)근처이며, 이 두 번째 초점이 quadruple로 입사하는 빔의 출발점이 되도록 설계 하였다. Quadruple로 입사 된 빔은 90° 휘

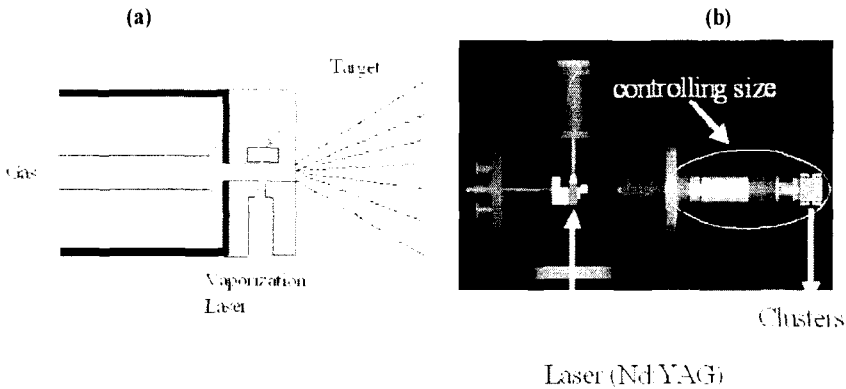


그림1. 클러스터 생성 및 렌즈계

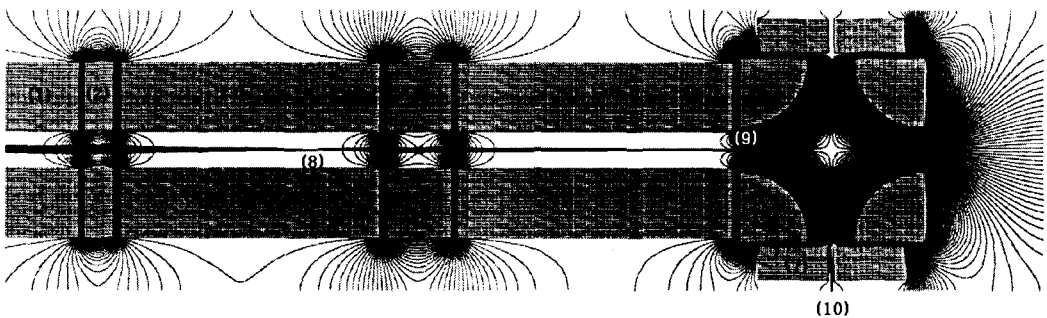


그림2. 렌즈계 시뮬레이션. (1)~(7)정전압 렌즈 parts. (8)~(10) 이온빔 궤도

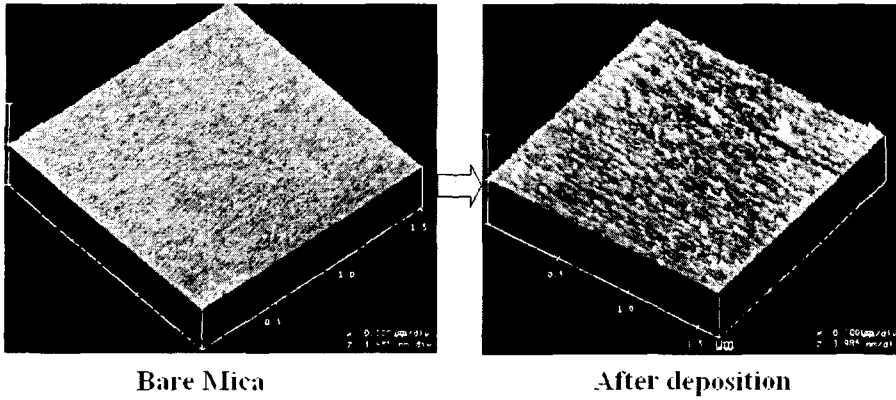


그림3. 금 증착 전후의 운모표면

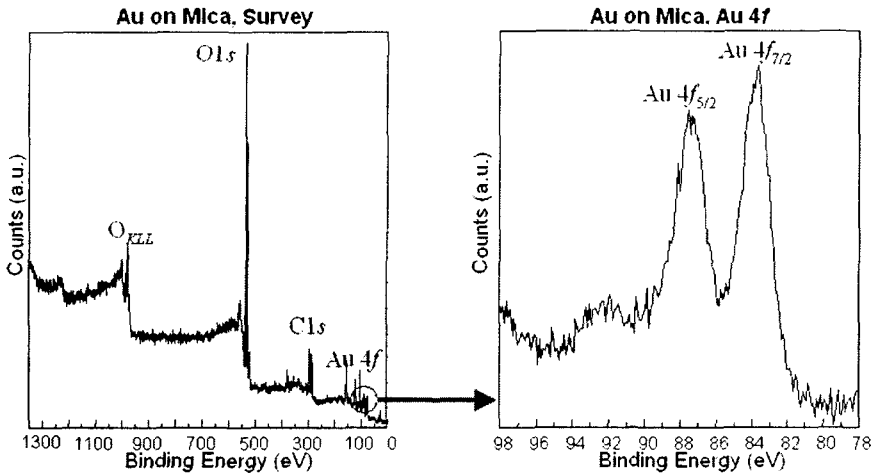


그림4. 금 증착 후의 XPS 스펙트럼

게 되며, 휘고 난 빔은 corrector인 (7)번을 지나 (10)번으로 나오게 된다. 일반적으로 corrector가 없는 경우 edge에서의 전기장의 왜곡으로 인해 원하는 빔의 궤도를 얻기 힘들다, corrector를 도입함으로써 이러한 효과를 최소화 하였다. 각 렌즈 단의 전압과 quadrupole 전압을 조절하여 특정 에너지 영역에 들어오는 빔만을 (10)으로 뽑아낼 수 있다. 따라서 원하는 에너지의 빔을 렌즈계를 통하여 필터링도 가능함을 알 수 있다.

시뮬레이션이 끝난 렌즈계는 그림1-(b)와 같이 실린더 형태의 렌즈와 quadrupole 을 바로 접속하여 제작 되었다. 실제 제작에 있어 가장 중요한 것은, 렌즈 시스템 시뮬레이션에서의 이온빔의 집속성능 평가 및 렌즈설계에 있어서 절연

체의 정전기 방지 고려, 조립 및 가공의 용이성 등이며, 이러한 제반 사항을 종합적으로 고려하여 제작 하였다. 먼저 렌즈계 및 quadrupole의 재질은 모두 알루미늄(Al)으로 채택 하였다. 알루미늄은 자성을 띄지 않는 물질로서 이온빔을 다루는데 있어 적합하며 가공 또한 용이한 장점이 있다. 또한 각 부분의 절연은 사파이어볼(sapphire ball)을 사용하였으며, 이온이 지나는 경로에서는 보이지 않도록 하여 charge accumulation에 의한 절연물의 포텐셜 증가를 원천적으로 막았다. 각 렌즈 부분 사이의 간격을 일정하게 맞추기 위하여 5/1000 mm이하의 정밀도를 갖는 thickness gauge를 사용하여 제작 하였다.

제작된 렌즈계는 앞서 설명한 클러스터 소스와 연결하여

실제 특성을 평가 하였다. 물질은 금(Au)을 클러스터화 하여 렌즈계로 입사 시켰다. 금을 선택한 이유는 반응성이 작고, 전기적으로 매우 좋은 도체 이므로 정전기 발생이 거의 없어 렌즈계를 테스트하기에 적당하기 때문이다.

실제로 금 클러스터가 생성되어 이온화 되어 렌즈계로 입사 하였고 렌즈가 제대로 작동한다면, 그림2의 (10)위치에서 금 원자(또는 클러스터)가 발견 되어야 할 것이다. 이를 위해 실제로 운모(mica) 기판을 (10)위치에 두고 실제로 금이 발견 되는지를 XPS(X-ray photoelectron spectroscopy)와 AFM(Atomic force microscopy)으로 확인하였다. 운모 기판을 사용한 것은 운모기판이 원자수준에서 평평하므로 AFM측정을 용이하기 때문이다.

그림3에는 금 클러스터 증착 후의 운모 표면의 AFM영상이 도시 되어있다. 금을 증착한 후 많은 수의 hillock들이 생성되었음을 알 수 있다. 이는 실제로 생성된 클러스터가 렌즈계를 통과하여 그림2의 (10)의 위치 까지 도달 하였음을 나타낸다. 또한 hillock의 크기가 상당히 큰 것을 볼 때 원자상태가 아닌 클러스터가 생성당시의 형태를 유지하면서 증착 되었음을 알 수 있다. AFM측정에 이어 실제로 증착된 물질이 금인지 확인하기 위하여 XPS를 측정하였다. 그림 4는 측정된 XPS 스펙트럼이다. 금 클러스터는 매우 크기가 작으므로 대부분의 스펙트럼은 기판인 운모에서 온 peak들이다. 우측에 특정에너지 영역을 확대한 스펙트럼을 보면, 금의 $4f_{7/2}$ peak이 약 84eV 정도에서 잘 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 금의 알려진 에너지 위치와 잘 일치한다.³

따라서 실제로 증착된 물질은 금임을 알 수 있고, AFM 영상을 볼 때, 클러스터의 형상도 유지되면서 증착 되었음을 알 수 있다. 따라서 렌즈계가 시뮬레이션과 같이 이온을 휘게 하도록 작동함을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 금(Au) 원자를 단일 팽창시켜 클러스터를 만들고, 생성된 클러스터빔을 이온화 시켜 렌즈 시스템에 입사 시켰다. 렌즈 시스템은 이온빔을 집속하고, 휘게 하도록 설계 되었으며, 이는 시뮬레이션을 통해 확인 되었다. 시뮬레이션을 통해 최적화된 구조로 렌즈계가 실제로 제작 되었으며, 금 클러스터 이온 빔을 운모 기판으로 증착을 하였다. AFM 및 XPS 분석을 통하여, 실제로 금 클러스터가 렌즈계를 통과하여 기판까지 증착됨을 확인 하였고, 따라서

렌즈계가 실제로 이온빔의 궤도를 조절 할 수 있음을 알 수 있었다. 시뮬레이션과 근접한 이온 궤도를 얻기 위해서는 좀더 정밀한 테스트를 거쳐 실제 렌즈계가 시뮬레이션과 일치하도록 렌즈계의 구조 설계 연구가 더 수행 되어야 하겠다.

-
- 1 Electrostatic lenses, E.Harting, F.H.Read, (Elsevier scientific publishing company, New York, 1976)
 - 2 W.A. de Heer, Review of modern physics. 65, 611 (1993)
 - 3 Handbook of X-ray photoemission spectroscopy (Physical electronics, Inc., 1992)