양성자 가속기 연구센터 이온빔 장치 현황 및 계획

DOI: 10.3938/PhiT.25.004

여 순 목

Current Status and Future Plan of Ion Beam Implanters at KOMAC

Sunmog YEO

The Korea Multi-purpose Accelerator Complex (KOMAC) operates a gaseous ion beam facility, a metal ion beam facility, and a vertical-type ion beam facility. The gaseous ion beam facility and the vertical-type ion beam facility can implant gas ions such as H, He, N, Ne, and Ar into materials while the metal ion beam facility can irradiate metal ions such as Cr, Fe, Co, and Cu. In order to provide better beam quality, the KOMAC has plans to upgrade these facilities, and to develop an ion accelerator for surface analysis, an 1-MeV electrostatic ion accelerator and a 4 MeV He Radio Frequency Quadrupole (RFQ) accelerator. Moreover, the KOMAC operates a R&D support center for industries. That center can help industries to develop their apparatuses and to solve their technical problems.

서 론

이온 주입 기술은 원자 또는 분자를 이온화시켜 가속시킨 다음 수십 ~ 수백 keV의 에너지로 재료의 표면에 주입함으로써 재료의 전기적, 기계적, 화학적, 광학적 특성을 변화시키는 표면처리 기술이다. 이온빔 조사를 통하여 전기적 물성변화를 발생시키는 기술은 반도체 제조에서 불순물을 도핑하는 필수적인 공정으로 이미 자리 잡았다. 또한 이온빔 조사를 통해 재료표면의 조성, 결합 상태, 결정구조 등에 변화를 주어 재료의 경도, 조도, 내마모성, 내부식성, 내피로성 등의 기계적 특성을 향상시킬 수 있는 기술은

재료의 치수는 변화시키지 않는 표면처리 기술로 정밀 제품의 표면처리로 유용하며 완제품의 특성을 향상시킬 때도 사용된다. 또 다른 이온 주입 기술의 장점은 상온에서 처리가 가능하며 환경오염을 유발하지 않는 친환경 기술이라는 점이다. 이와 같이 이온 주입 기술은 여러 가지 장점이 있으며 국내에서는 한국원자력연구원의 양성자가속기연구센터가 다양한 이온빔 장치를 이용해 활발한 연구를 진행 중이다.

양성자가속기연구센터는 2013년 1월에 출범하였고 한국원자력연구원에서 1987년에 개발된 DuoPIGatron 이온원과 1993년 건조된 금속이온빔 장치기술을 계승, 발전시켜온 연구센터이다. 양성자가속기연구센터는 2013년 3월부터 기체이온빔 장치, 금속이온빔 장치, 대전류 이온빔 장치를 이용해 산업체, 학교, 연구소에 필요한 이온빔 서비스를 하고 있으며 2015년 1월 빔이용연구동을 건축하고 이온빔 장치를 이전할 때 기존의 기체 이온빔 장치와 금속 이온빔 장치를 upgrade하였고 수직 이온빔 장치를 설치하여 이 장치들에 대한 시설 검사를 2015년 2월에 받고 3월부터 이온빔 서비스를 재개하였다. 또한 같은 해 5월부터는 산업체 R&D 통합 지원센터를 열어서 산업체에서 필요한 기술을 개발하고 산업체의 애로 기술 문제를 해결하고자 노력하고 있다.

본 특집호에서는 양성자가속기연구센터가 보유하고 있는 여러 가지 이온빔 장치들의 제원과 용도를 소개하고 기존의 이온빔 장치의 개선될 내용과 새롭게 설치하는 이온빔 장치에 대한 정보를 제공할 뿐만 아니라 이온빔 장치를 활용한 산업화 기술을 소개함으로써 독자들의 이해를 돕고 활용에 도움이 되도록 구성하였다.

본 론

1. 이온빔장치의 현재

(1) 기체이온빔장치(Gaseous Ion Beam Facility)

그림 1은 현재 양성자가속기센터가 보유하고 있는 기체이온빔장치이다. 기체이온빔장치는 기체원자 또는 분자를 이온화시키고 가속시켜서 재료의 표면을 처리하는 장치이다. 기체 이온을 만들기 위해 DuoPIGatron 이온원을 사용하며, 만들어지

저자약력

여순목 박사는 Florida State University에서 응집물리 실험으로 박사학위(2003년)를 받았으며 2007년부터 한국원자력연구원에 입사하여 현재 양성자가속기연구센터에서 책임연구원으로 재직 중이다.(sunmog@kaeri.re.kr)

Fig. 1. The overview of gaseous ion beam facility.

Fig. 2. The overview of metal ion beam facility.

는 기체 이온은 수소, 헬륨, 질소, 네온, 아르곤, 제논 등 표준 상태에서 기체로 존재하는 대부분의 단일 기체이다. 이온원에서 이온화된 기체이온은 정전형 가속관을 거쳐 최고 200 keV의 에너지를 가질 수 있으며 빔 전류는 최대 5 mA까지 인출 가능하고 최대 조사면적은 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 이다. 이온빔은 사극 전자석(Magnetic Quadrupole Doublet)을 통하여 집속 또는 분산되고 정전형 x-y scanner는 사극 전자석을 통해 집속된 이온빔을 상하좌우로 흔들어 줌으로써 타겟 진공함에 있는 시료의 표면에서 균일한 빔을 만드는데 사용된다. 타겟 진공함과 정전형 x-y scanner 사이에는 패러데이컵, 빔 프로파일 모니터, 빔 서터 등을 위치시켰다. 패러데이컵은 이온빔의 도즈(dose)를 측정하는데 사용하며 빔 프로파일 모니터는 시료에 조사되는 빔의 모양을 감시하기 위한 장치이며 빔 서터는 시료의 빔 조사를 막기 위해 사용된다. 기체이온빔장치는 금속이나 세라믹의 내구성 향상을 위한 표면개질과 고분자의 기능성 표면개질(예, 내스크래치성, 자외선차단, 기체투과도), 폴리머 및 금속의 친수성, 소수성 제어 등에 활용되고 있다.

(2) 금속이온빔장치(Metal Ion Beam Facility)

그림 2는 양성자가속기연구센터가 보유하고 있는 금속이온빔 장치의 사진이다. 이 금속이온빔 장치는 금속 이온을 만들기 위해 버나스(Burnas) 이온원을 사용한다. 버나스 이온원은 금속 염화물(예: CrCl_3 , FeCl_2 , CoCl_2 , CuCl)을 가열하는 히터가 내장되어 있고 선형 빔을 인출하도록 설계되어 있다. 금속 염화물을 쓰는 이유는 금속 자체를 기화시키는 것보다 염화물을 쓰면 상대적으로 낮은 온도에서 금속 이온을 얻을 수 있기 때문이다. 질량분리

Fig. 3. The overview of vertical type ion beam facility.

전자석은 버나스 이온원에서 인출된 이온의 종류에 따라 자장의 세기를 조절하여 최적의 이온빔을 정전형가속관으로 전달한다. 금속이온빔장치로 얻을 수 있는 이온의 최대에너지는 150 keV이며 빔 전류는 1 mA, 최대 조사면적은 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 이다. 사극 전자석, 정전형 x-y scanner, 빔 프로파일 모니터, 패러데이컵, 빔 서터 등의 역할과 기능은 기체이온빔장치와 동일하다. 금속이온빔장치는 보석에 금속이온을 주입하여 색상을 발현시키기도 하고 반도체 물질에 금속이온을 도핑하는 연구 또는 인공관절이나 인공치아의 표면처리연구에도 활용되고 있다.

(3) 수직이온빔장치(Vertical type Ion Beam Facility)

수직이온빔장치(그림 3)는 기체이온빔장치와 같은 DuoPIGatron 이온원을 쓰기 때문에 기체이온빔장치와 같은 이온종을 인출할 수 있다. 빔은 수직으로 조사되고 빔 조사면적은 기체이온빔장치보다 넓은 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 이다. 가속된 이온은 수직으로 진행하고 최대 에너지는 60 keV, 최대 빔전류는 20 mA이다.

양성자가속기연구센터는 이온빔장치를 이용해 산업체, 연구소, 대학교 등의 여러 기관에 빔 서비스를 제공하고 있으며 이용 분야도 나노, 재료, 반도체, 기초과학, 에너지, 환경 등과 같이 다양한 연구 분야에 빔을 제공하고 있다.

2. 이온빔장치의 미래

(1) 이온빔장치 upgrade

빔 서비스의 질을 향상시키기 위해 현재 운영 중인 이온빔장치를 개선할 계획이다. 기체이온빔장치의 경우 스위칭 전자석(switching magnet)과 새 표적함을 설치할 계획이다. 그림 4의 (a)는 스위칭전자석과 새 표적함을 설치할 계획인 도면이며 (b)는 진공 시험 중인 새 표적함이다. 새 표적함의 target stage는 모서리에 패러데이 컵을 설치할 수 있도록 구성되어(그림 5(c)) 있어서 정전형 x-y 스캐너로 상하좌우 균일하게 흔들어 줄 경우 실시간으로 시료에 조사되는 이온 빔의 도즈를 측정하는 장점이 있다.

Fig. 4. (a) The schematic view of gaseous ion beam facility with new target chamber and switching magnet. (b) New target chamber. (c) Target stage with Faraday cup holder. (d) Switching magnet.

Fig. 5. (a) The schematic view of ion accelerator for surface analysis. (b) Overview from ion source. (c) Overview from beam line.

이온원에서 인출된 빔은 가속관을 거치면서 중성입자가 생성되는데 가속관에서 발생된 중성 입자는 스위칭마그넷을 설치하여 빔 방향을 바꿈으로써 제거된다. 또한 스위칭마그넷의 자기장을 조절함으로써 원하는 이온을 선택적으로 골라서 조사할 수 있는 장점이 있다. 금속이온빔장치에도 실시간으로 빔 도즈를 측정하는 표적함을 제작하고 Ti, Ag, Mg, P와 같은 이온도 인출할 예정이며 기체이온빔장치와 수직이온빔장치의 빔 조사 에너지를 각각 400 keV와 100 keV까지 올려서 빔 서비스를 제공할 계획이다.

Fig. 6. (a) SF₆ gas pressure vessel, high voltage power supply, and 450 Hz power supply. (b) High frequency ion source. (c) Schematic view of 4 MeV He RFQ accelerator.

(2) 분석용 이온가속기(Ion Accelerator for surface analysis)

양성자가속기연구센터는 Tandem 가속기를 이용하여 시료의 원소분석을 하고 중성자 표준장도 만드는 다목적 분석용 이온가속기를 구축하고 있다. 분석용 이온가속기는 2015년 12월 인허가를 받았고 2016년에 시설검사를 받기 위한 준비 중이다. 그림 5의 (a)는 분석용 이온가속기의 개략도이며 (b)는 이온원 쪽에서 본 가속기의 사진이며 (c)는 빔라인쪽에서 본 가속기의 사진이다. 분석용 이온가속기는 SNICS(Source of Negative Ion by Cesium Sputtering)와 Duoplasmatron 두 개의 이온원을 사용하고 Tandem 가속관을 거쳐 최대 에너지 1.7 MeV, 최대 빔전류 300 μ A를 가지는 이온빔장치이다. 가속기를 이용하여 중성자를 만들 경우 9개의 단색중성자 생성이 가능한데 분석용 이온가속기로는 양성자빔을 Li 또는 H³에 조사하여 144 keV, 250 keV, 565 keV, 2.5 MeV 등 4개의 단색중성자를 생성할 예정이다. 이렇게 생성된 단색중성자는 핵자료 생산과 중성자 검출기 성능시험, 비파괴 검사, 단색장과 혼합장을 연계한 검출기 검, 교정 등 중성자 R&D 연구에 활용된다. 시료의 원소분석은 RBS(Rutherford Backscattering), PIXE(Proton Induced X-ray Emission), ERD(Elastic Recoil Detection) 등을 이용할 예정이다. RBS는 Probe beam을 주로 He 이온을 사용하여 시료에 조사하고 시료의 원자핵과 탄성 충돌한 다음 후방 산란되는 He 이온의 에너지와 세기를 측정하여 시료의 성분을 분석하는 방법으

Fig. 7. Examples of industrial application: (a) Hair cutter, (b) Car interior materials (c) color formation of jewels.

로 깊이에 따른 성분의 정량분석이 가능하다. PIXE는 Probe beam으로 양성자를 사용하고 시료에 조사했을 때 발생하는 X-ray의 에너지와 세기를 SiLi detector로 측정하여 시료의 성분을 분석하는 방법으로 ppm 이하 수준의 높은 검출 효과를 가진다. ERD는 프로브 빔으로 염소나 금과 같은 무거운 이온을 이용하여 시료에 조사하고 시료의 핵과 전방 산란되는 입자의 에너지와 세기를 측정하여 시료의 성분을 분석하는 방법으로 수소를 포함하는 질량이 작은 원소의 정량분석에 사용된다.

(3) 1 MeV 정전형 이온가속기와 4 MeV He RFQ 가속기

현재 운영 중인 기체이온빔장치는 최대에너지가 200 keV이므로 이보다 높은 에너지를 필요로 하는 경우 빔 서비스를 할 수 없었지만 1 MeV 정전형 이온가속기가 완성되면 최대 1 MeV까지 질소 이온을 비롯한 기체이온의 조사가 가능해진다. 현재 SF6 가스 처리기와 고전압 전원, 450 Hz 전원 등은 구비가 되었으며 (그림 6(a)) 고주파 이온원도 개발 중이다(그림 6(b)). 4 MeV He RFQ(Radio Frequency Quadrupole) 가속기는 소형 중성자원으로 활용하고 반도체에 조사하여 물성을 변화시키는데 이용할 목적으로 개발 중이다. 4 MeV He RFQ가속기에 사용되는 이온 종은 D, He, Ar 등이며 200 MHz RFQ를 통하여 가속된다. 그림 6(c)는 개발될 4 MeV He RFQ 가속기의 설치 예정 그림이다.

3. 이온빔 장치 활용 및 산업화

양성자가속기연구센터는 이온빔 장치를 이용하여 개발한 여러 가지 기술을 산업체에 이전한 경험이 있다. 금속에 질소 이온을 주입했을 때 금속 표면의 경도가 향상되는 것을 이용하여 이용기 날의 수명을 연장시켜 산업체에 기술이전을 실시하였으며 현재 상업적으로 생산 중이다(그림 7(a)). 또한 이온빔 공정조건을 조절하여 폴리머의 표면을 개질함으로써 광학적 특성을 조절할 수 있

Fig. 8. Support scheme for industry at KOMAC.

다. 그림 7(b)는 ion beam을 조사하여 금속처럼 보이게 한 것과 광택을 나게 한 것을 비교하여 보여준다. 또한 금속 이온빔을 보석에 주입했을 때 금속이온의 종류에 따라 금속산화물이 보석 내에서 color center로 작용하는 것을 이용하여 보석의 색상을 바꿀 수 있다. 그림 7(c)는 사파이어 원석에 철이온과 코발트이온을 주입했을 때 발색된 보석의 사진이다. 이 외에도 이온빔 공정을 통해 접촉각을 조절함으로써 물질의 표면을 친수성 또는 소수성으로 바꾸는 연구도 진행하고 있다.

양성자가속기연구센터는 2015년 5월 산업체 R&D 통합지원센터를 열어 이온빔을 이용한 기술을 산업체에 지원하고 또한 산업체에서 요구되는 기술을 개발할 수 있는 시스템을 마련하고 있다. 그림 8는 센터에서 산업체에 기술개발 지원을 하는 체계도이다. 빔서비스 장치 및 공동연구실을 두어 산업체에 빔 서비스를 제공하고 산업체에 필요한 장치기술을 연구할 수 있도록 하고 여기서 개발된 기초 기술을 이용하여 시작품 제작을 지원하며 양산장치를 제작할 필요가 생길 경우 생산허가실에서 양산장치를 제작 및 조립할 수 있도록 서비스를 제공하고 있다. 이온빔 장치는 방사선 발생장치이므로 원자력안전위원회의 생산허가를 얻어서 이온빔장치를 제작하고 있으며 실증 실험 지원을 위한 이온빔 장치 모듈화도 추진 중이다.

결 언

양성자가속기연구센터는 기체를 이온화하여 시료에 주입하는 기체이온빔장치와 수직이온빔장치, 그리고 금속이온을 조사할 수 있는 금속이온빔 장치를 운영 중이다. 이 장비들의 이용은 대학, 연구소, 산업체 등에 열려져 있으며 보다 질 좋은 빔을 제공하기 위해 계속 upgrade를 하고 있다. 또한 이용자들의 요구에 부응하여 분석용 이온가속기, 1 MeV 정전형 이온가속기, 4 MeV He RFQ 가속기 등을 개발하고 있으며 산업체의 기술개발을 지원하기 위해 산업체 R&D 통합지원센터를 운영 중이다.