

전극 구조 변화에 따른 Cold Hollow Cathode Ion Source의 특성 변화

석진우[†] · V. S. Chernysh* · 한 성 · 백영환 · 고석근 · 윤기현**

주식회사 피앤아이 기술연구소

*국립모스크바대학교 물리학과

**연세대학교 세라믹공학과

(2003년 4월 2일 접수; 2003년 10월 15일 승인)

Characterization of Cold Hollow Cathode Ion Source by Modification of Electrode Structure

Jin Woo Seok,[†] V. S. Chernysh,* Sung Han, Young Hwoan Beag, Seok-Keun Koh, and Ki Hyun Yoon**

R & D Center, P & I Corporation, Seoul 131-221, Korea

*Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

**Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received April 2, 2003; Accepted October 15, 2003)

초 록

직경 5 cm cold hollow cathode 이온원을 박막의 이온보조증착법 또는 이온보조반응법에 사용하기에 적합한 이온빔으로 넓은 면적을 균일하게 조사할 수 있는 이온원을 설계, 제작하기 위한 방안으로 연구하게 되었다. 이온원은 글로우 방전을 위한 음극과 이온화 효율의 증가를 위한 자석, 플라즈마 챔버, 그리드 전극으로 이루어진 이온광학시스템, 직류전원공급장치로 이루어진다. 전자인출전극의 구조 및 형태로 구분하여 한개의 노즐로 이루어진 (I) 형태와 복수개의 노즐로 변형된 (II) 형태로 제작하였다. 서로 다른 구조의 전자인출전극 (I) 형태와 (II) 형태를 부착한 이온원에 beam profile을 측정할 결과 (I) 형태의 전자인출전극을 부착한 경우에는 이온원의 중심에서 $140 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 으로 측정되어졌으며, 외곽으로 멀어질수록 급격히 전류밀도가 감소하여 균일한 영역(최대값의 90%)은 직경 5 cm로 측정되어졌다. (II) 형태로 변형되어진 이온원의 경우 중심에서 $65 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 으로 (I) 형태와 비교하여 상대적으로 낮은 전류밀도가 측정되었지만 외곽으로 멀어졌을 경우에도 전류밀도는 완만하게 감소하여 균일한 영역은 직경 20 cm로 측정되었으며, 본 연구목적에 부합되는 특성이 측정되었다. 이온빔 균일도가 증가한 (II) 형태의 전자인출전극을 부착한 이온원으로 주입하는 아르곤 가스량의 변화, 이온광학시스템의 플라즈마 그리드 전극과 가속 그리드 전극 간격의 조절, 이온빔 에너지 변화에 따른 beam profile 및 특성을 관찰하였다.

ABSTRACT

The inner-diameter 5 cm cold hollow cathode ion source was designed for the high current density and the homogeneous beam profile of ion beam. The ion source consisted of a cylindrical cathode, a generation part of magnetic field, a plasma chamber, convex type ion optic system with two grid electrode, and DC power supply system. The cold hollow cathode ion sources were classified into standard type (I), electron output electrode modified type (II). The operation of the ion source was done with discharge current, ion beam potential and argon gas flow rate. The modification of electron output electrode resulted in uniform plasma generation and uniform area of ion beam was extended from 5 cm to 20 cm. Improved ion source was evaluated with beam uniformity, ion current, beam extraction efficiency, and ionization efficiency.

Key words : Cold cathode, Ion source, Ion beam, Plasma, Beam profile

1. 서 론

1960년대 인공위성의 정밀한 위치 제어를 위한 electric space propulsion 개발 사업으로 개발되어지던 이온원은 1970

년대에 이르러 박막 증착과 표면처리공정의 활용에 많은 관심을 가지게 되었으며, 이온빔의 응용연구로 인하여 기본적인 이온원의 개념과 응용 가능성의 토대가 마련되었다. 최초의 상업용 이온원인 Kaufman 형식의 이온원은 필라멘트의 가열에 의하여 플라즈마를 생성시키는 근본적인 구조문제로 인하여 산화물, 질화물 박막 증착에 사용되는 반응성 가스의 사용에 제약이 따르는 문제점 등으로 현재에는 단순 금속의 증착 등의 제한된 영역에 사용

[†]Corresponding author : Jin Woo Seok

E mail : ionjw@plasma-ion.com

Tel : +82-2-3422-4100 Fax : +82-2-3422-4105

되고 있으며, Kaufman 형식의 내구성, 반응성 가스 사용의 문제점을 해결하기 위하여 cold hollow cathode 이온원이 개발되어졌다. 여러 가지의 형태의 broad-beam 이온원은 기본적으로 플라즈마를 발생시키는 원리에 따라서 구분되며, end-hall,¹⁾ arc,²⁾ pulsed,³⁾ Kaufman,^{4,5)} cold cathode,⁶⁾ radio frequency,^{7,8)} microwave^{9,10)} 이온원 등이 연구되었으며, 우주선의 무연소 추진체¹¹⁾로도 사용되어지고 있다.

이온빔을 이용한 박막의 증착법은 기관과 증착물질의 높은 접착력과 고밀도 박막의 성장, 그리고 증착된 박막의 우수한 전기적, 광학적 특성으로 인하여 이온빔을 이용한 공정기술의 개발이 활발히 연구되어지고 있다. 이온빔을 이용한 박막의 증착은 기존의 thermal evaporation, e-beam evaporation, DC/RF sputtering 증착법과 비교하여 산화물, 질화물, 또는 2성, 3성분계 이상으로 이루어진 세라믹 박막의 증착시에 성분의 조성 조절이 용이하며, 다층 박막의 증착에 많은 장점을 가지고 있다. 이온빔을 이용한 증착법으로 Ion Beam Sputtering Deposition (IBSD),¹²⁾ Ion Beam Assisted Deposition (IBAD)¹³⁾ 등이 있으며, 이를 이용한 금속, 세라믹 물질의 다양한 박막 증착이 이루어지고 있다. 이온빔을 이용한 벌크 또는 박막의 식각 방법으로 Reactive Ion Beam Etching (RIBE), Chemically Assisted Ion Beam Etching (CAIBE) 등이 있으며 이온빔식각법에 대한 많은 개발이 이루어지고 있다. 그 밖에 이온원은 Ion Beam Cleaning (IBC), Ion Beam Milling (IBM), Ion Assisted Reaction (IAR) 등의 이온빔 조사로 인한 재료 표면의 세척, 연마, 고분자의 표면 개질등에 응용되고 있으며, 이러한 이온빔을 이용한 공정들은 기존의 공정에 비하여 상대적으로 많은 장점을 가지고 있으며 새로운 응용기술이 지속적으로 개발되어지고 있다.

Cold hollow cathode 이온원은 불활성 기체와 반응성 가스를 이온빔으로 생성시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 이온빔을 이용한 스퍼터링 또는 식각의 경우는 대전류를 가지는 이온원이 사용되어지며, 이온보조증착(ion assisted deposition)과 이온보조반응(ion assisted reaction)의 경우에는 넓은 면적을 균일하게 이온빔으로 조사할 수 있는 이온원이 사용되어진다. 이온빔은 플라즈마 형태와, 분포, 밀도, 균일도, 압력, 이온광학시스템에 의하여 조절가능하며, 이러한 요소들의 최적화를 바탕으로 이온원을 설계, 제작하게 된다. 본 실험에서는 이온보조증착과 이온보조반응법에 적용하기 위한 이온빔의 균일도를 증진시킨 이온원의 개발을 위하여 진행되었다.

2. 실험방법

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험 장치의 개략도를 나타낸 것으로, 진공 챔버는 직경 50 cm, 길이 100 cm의 원통형의 구조로 되어 있으며, 공정은 고진공($1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times$

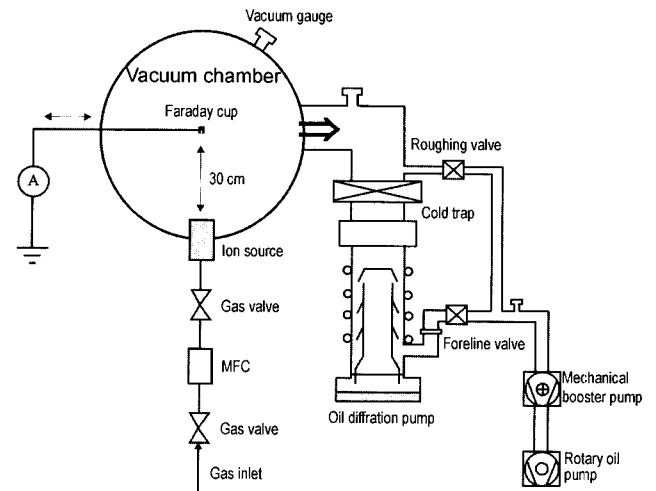


Fig. 1. Schematic drawing of vacuum chamber system.

10^{-5} torr)영역에서 진행되었다. Cold hollow cathode 이온원의 직경은 5 cm 크기로 제작하였다. 진공 챔버는 rotary oil pump (1500 l/min, KODIVAC), mechanical booster pump (600 m³/h, EDWARD), oil diffusion pump (12,000 l/sec)를 사용하였다. 펌프 오일 역류와 및 hydrocarbon에 의한 진공 챔버와 이온원 및 진공 장비의 오염을 방지하기 위하여 water-baffle과 액체질소 cold-trap을 부착하였다. 이온원에 주입하는 가스는 순도 99.99%의 아르곤 가스를 사용하였으며 mass flow controller (MFC, Tylan)를 사용하여 유량을 조절하였으며, 챔버 압력을 측정하기 위하여 convection gauge 및 ionization gauge를 사용하였다.

Fig. 2는 본 실험에 사용된 직경 5 cm cold hollow cathode 이온원과 전자인출전극의 형태(I)와 형태(II)의 개략도이다. 가스 주입구를 통하여 이온원 내부의 음극으로 유입된 중성기체는 방전전압장치에 인가되는 양전압과 음전압에 의하여 글로우 방전이 발생한다. 글로우 방전으로 생성된 전자는 전자인출전극과 양극의 전위차에 의하여 플라즈마 챔버로 인출된다. 인출된 전자는 주입된 중성기체와 충돌하여 플라즈마를 발생시키며, 음극과 플라즈마 챔버 주위에 200 mT 정도의 자기장을 유도하여 전자의 생성과 자기장의 의한 회절을 증가시켜 플라즈마의 밀도를 증가시키며, 가스 이온화 효율을 증가시킨다. 플라즈마에 이온빔 에너지 공급장치를 이용하여 양전압을 인가시키면 이온은 인가시키는 전압에 의하여 에너지를 얻게되며, 이온원 외부로 방출된다. 이온의 방출시에는 플라즈마 그리드 전극과 가속 그리드 전극으로 구성된 이온광학시스템으로 통하여 외부로 방출되어진다. 방출되는 이온의 안정적인 방출과 손실을 줄이기 위하여 가속 그리드 전극에 음전압을 인가하여 방출된 이온의 profile을 미세하게 조절할 수 있으며, 일반적으로 가속 전류가 최소화되는 음전압에서 사용되어진다. 이온빔이 사용되는

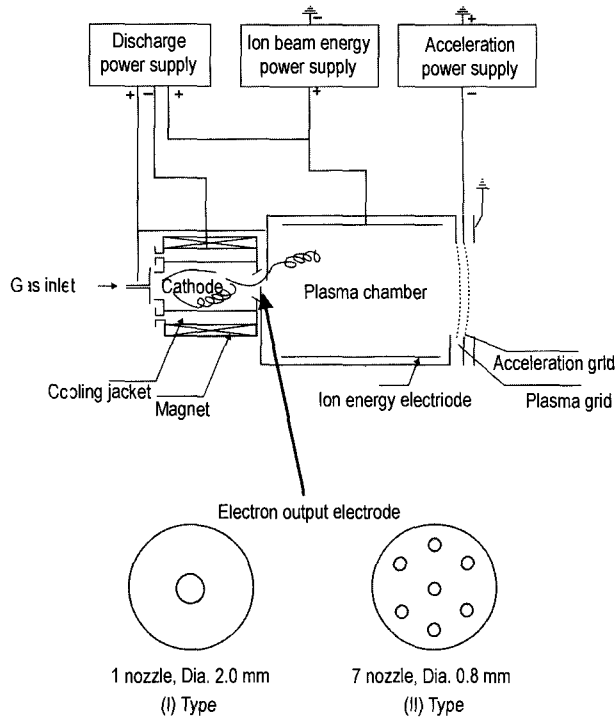


Fig. 2. Schematic diagram of cold hollow cathode ion source and electron output electrode.

동정에 적합한 특성을 가지는 이온원을 개발하기 위하여 구조, 형태, 변형등의 개량을 통한 성능의 향상과 안정적인 동작을 위해서 많은 연구와 개발이 이루어지고 있다.^{14,15)}

본 실험에서 사용된 이온원의 구조는 Fig. 2와 같다. 이온원에서 음극과 플라즈마 챔버 사이에 장착된 전자인출전극을 1개의 노즐($\Phi 2.0$ mm)로 이루어진 전자인출전극 형태(I)과 7개의 노즐로 구성되어진($\Phi 0.8$ mm) 전극 형태(II)로 변화시켰다. 전자인출 전극의 형태와 구조에 따른 전자 인출의 변화를 관찰하기 위하여 이온/전자 시뮬레이션 프로그램인 SIMION(Ver7.0)을 이용하여 형태(I)과 (II)의 전자의 인출을 관찰해 보았다. 전자인출전극의 노즐 형태에 따라 변화하는 이온빔전류밀도를 측정하였으며, 이온원의 중심에서 2 cm 간격으로 횡축으로 변화하는 전류값을 측정하였다. 이온 전류의 밀도를 측정하기 위하여 직경 3 mm faraday cup을 사용하여 측정한 전류값을 사용하여 단위면적당 전류값으로 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

본 실험은 이온보조증착과 이온보조반응법에 적용하기 위한 이온원의 개발을 위하여 진행되었다. Fig. 3은 전자인출전극이 1개의 노즐로 구성되어진 (I) 형태의 이온원과 7개의 노즐로 이루어진 (II) 형태 이온원의 beam profile을 측정하였다. 플라즈마와 이온빔의 생성을 위하여 아르곤

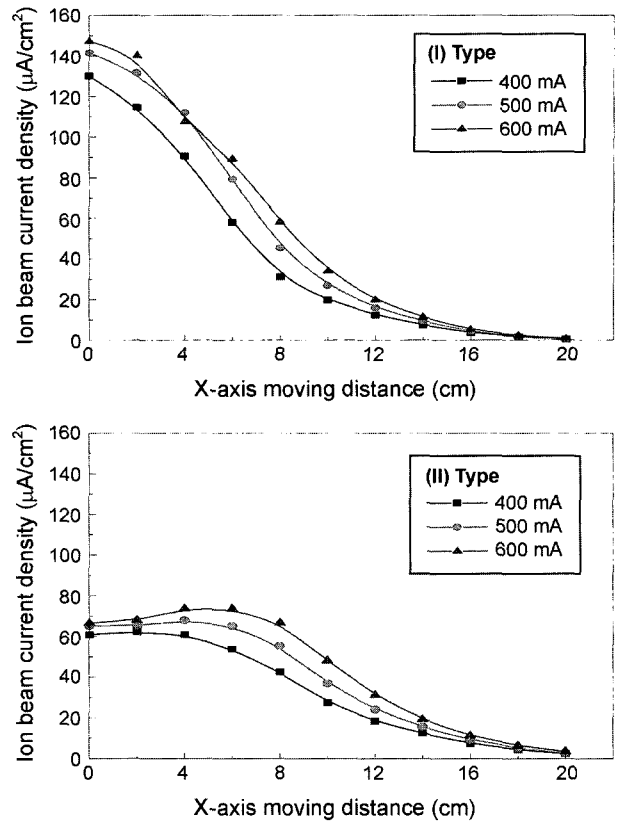


Fig. 3. Ion beam profile of (I) type and (II) type ion source for electron output electrodes.

가스 유량을 3 sccm으로 고정하고, 방전전원공급장치(정전류원)를 조절하여 방전전류를 400~600 mA 변화시켰다. 이온빔에너지공급장치(정전압원)와 가속에너지공급장치(정전압원)에 의해 이온빔전압과 가속전압을 각각 1000 V와 -400 V로 고정한 후 faraday cup을 이용하여 이온전류를 측정하여 beam profile을 측정하였다. (I) 형태의 전자인출전극의 경우 이온원의 중심에서는 $140 \mu A/cm^2$ 의 전류밀도를 얻을 수 있었지만 중심에서 횡축으로 멀어질수록 급격히 전류밀도가 감소하여 균일한 영역(최대전류밀도값의 90%)은 직경 5 cm로 측정되었다. (II) 형태의 전자인출전극을 장착한 이온원의 경우 중심에서의 전류밀도는 $65 \mu A/cm^2$ 로서 (I) 형태에 비하여 상대적으로 낮은 전류밀도가 측정되었지만, 균일한 영역의 경우는 직경 5 cm에서 20 cm로 4배에 가까운 크기로 확장되었다. (I)과 (II) 형태의 전자인출전극을 부착한 이온원의 beam profile을 이용하여 이온원의 방출의 효율을 비교(faraday cup으로 측정되어진 이온원에서 방출되어진 이온전류의 합계의 합계/이온원 내부에서 생성되어진 이온의 전류 합계로 이온전압 공급원에서 흐르는 전류)한 결과 (I) 형태는 방전전류의 증가에 따라서 생성이온전류가 38, 48, 56 mA로 변화하였고 방출효율은 12%로 동일하였으며, (II) 형태의 생성이온전류는 27, 31, 37 mA로 변화하였으며 방출효율은

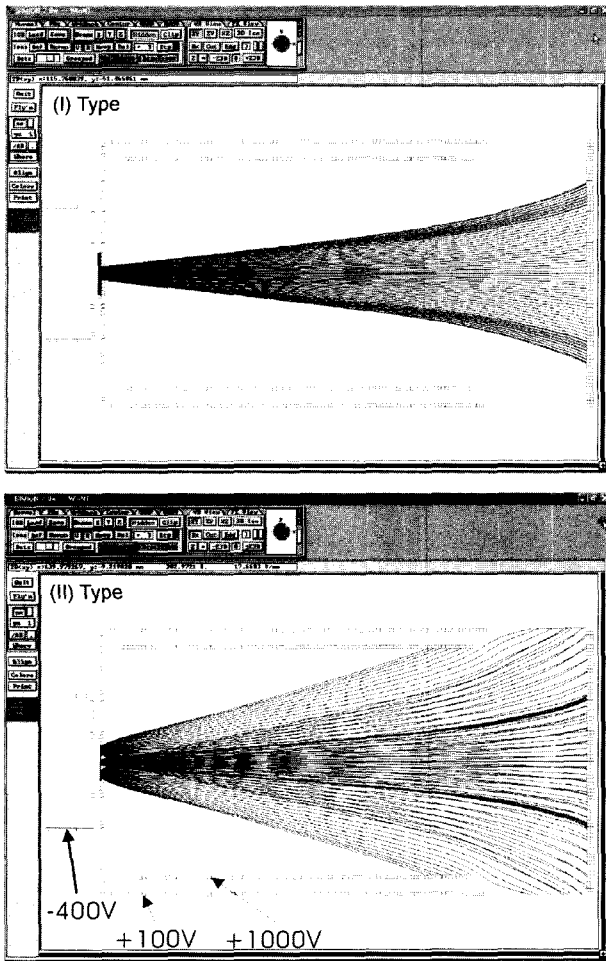


Fig. 4. Electron trajectory simulation of (I) type and (II) type ion source for electron output electrodes.

22, 23, 24%로 측정되었다. 이러한 결과는 전자인출전극의 형태 변화에 의하여 beam profile이 크게 변화됨을 보여 준다. 전극의 형태에 따른 전자 인출의 변화를 살펴보기 위하여 퍼스널 컴퓨터용 이온(전자) 광학 시뮬레이션 프로그램 SIMION(verion 7.0)을 이용하여 (I),(II) 형태 전극에서의 전자 인출을 시뮬레이션 하였다. Fig. 4는 SIMION 시뮬레이션을 이용하여 전자 인출 분포를 살펴본 결과이다. 이온원 내부의 압력, 플라즈마에 의한 간섭, 그리고 자기장에 의한 전자 운동의 변화등의 변수를 제외한 단순한 전극간의 전위차에 의한 전자 인출을 시뮬레이션 결과로서 전자인출전극 노즐의 변화로 인하여 전자의 분포가 변화함을 알 수 있었다. (I) 형태의 1개의 노즐로 이루어진 경우 플라즈마 챔버의 중심부에 집중되었으며, (II) 형태 전극의 경우에는 다중 노즐로 인하여 플라즈마 챔버로 좀더 넓게 분출되어 플라즈마 형태의 변화를 예측할 수 있었다.

이온원의 오염과 이온빔에 의한 시료와의 반응을 방지하기 위하여 불활성인 아르곤 가스가 일반적으로 사용되

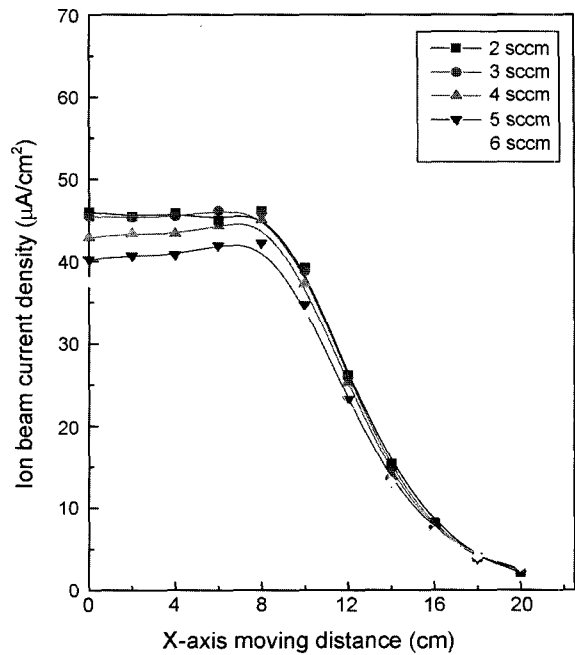


Fig. 5. Ion beam profile of (II) type ion source for in argon gas flow rate.

어지고 있다. 또한 이온빔을 이용한 공정은 고진공 영역에서 이루어지고 있기 때문에 낮은 압력을 유지하기 위해 가능한 적은 유량을 사용하였다. Fig. 5는 이온빔의 균일도가 우수한 전자인출전극 (II) 형태를 부착한 이온원에 아르곤 가스 유량을 변화시키며, beam profile을 측정하였다. 방전전류 300 mA, 이온빔전압 1000 V, 그리고 가속전압을 -400 V로 고정하였다. 아르곤 가스 유량이 1 sccm인 경우에 글로우 방전에 필요한 압력에 미치지 못하여 불안정한 방전 또는 방전이 개시되지 않는 현상이 발생하여 가스 유량은 2 sccm부터 6 sccm까지 1 sccm 단위로 변화시켰다. 가스 유량의 증가에 따라 전류밀도가 감소하였으며, 전류밀도가 균일한 영역은 직경 20 cm로 변화하지 않았다. 아르곤 가스의 유입량이 2와 3 sccm인 경우에 이온원의 중심에서 45~46 µA/cm²로서 높은 전류밀도가 측정되어졌으며, 4 sccm 이상에서 전류밀도는 감소하였으며, 6 sccm을 주입하였을 경우 37 µA/cm²까지 감소하였다. 가스의 입자의 과도한 증가는 플라즈마 밀도의 증가보다는 오히려 이온화된 입자를 다시 안정화(중성화) 시키며, 이러한 현상으로 인하여 플라즈마 밀도가 감소한 것으로 예측된다.

앞의 실험은 이온원의 방전 특성 및 전체적인 이온 인출 특성을 측정하였으며, 최적의 인출 조건 확립을 위하여 이온광학시스템을 평가하였다. 이온원의 플라즈마 챔버에서 이온빔전극에 전압을 인가하면 이온은 인가한 양전압과 이온의 양극성에 의한 반발력으로 인가해 준 전압의 에너지 ($I \propto V^{3/2}$)를 가지고 방출된다. Fig. 6은 아르

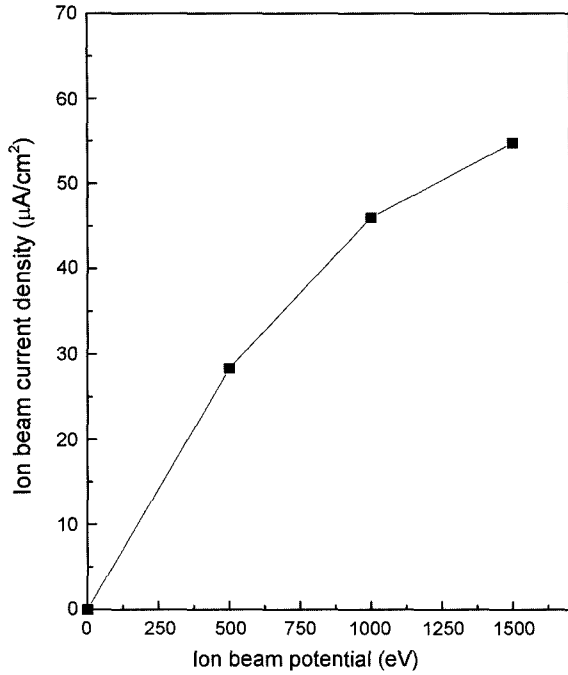


Fig. 6. Ion beam current density of (II) type ion source for ion beam potential.

곤 가스 3 sccm과 방전전류 300 mA, 가속전압을 -400 V로 고정된 후 이온빔 전압을 500, 1000, 1500 V로 변화하여 이온원의 중심에서의 전류밀도를 측정된 결과이다. 이온빔 전압의 증가에 따라서 방출되는 이온이 증가하였으며 이온원의 중심에서 측정된 전류밀도는 전압의 증가에 따라서 27 μA/cm², 47 μA/cm², 55 μA/cm²로 선형적으로 증가하였다.

이온 방출을 위한 이온광학시스템은 이온원의 가장 중요한 부분으로서 그리드 전극의 형상(수평, 볼록, 오목), 재질(Mo, Ti, C, etc.), 노즐의 형태(원형, 선형), 그리드 전극의 두께 등 다양한 변수에 의하여 특성의 조절이 가능하다. 플라즈마 그리드 전극으로 인출된 이온은 가속 그리드 전극을 통과하여 방출된다. 그리드 전극 사이의 배열과 간격의 미세한 변화에 의해 이온의 방출되는 방향이 왜곡될 수 있으며, 이러한 상황에서는 이온과 그리드 전극간의 충돌로 인하여 그리드 전극이 스퍼터링 되어 전극이 파손, 손상, 그리고 이온빔을 오염시킨다. 본 실험에서는 Fig. 7과 같이 플라즈마 그리드 전극과 가속 그리드 전극의 간격을 일반적인 이온원에서 적용되어지는 1.0 mm에서 1.8 mm, 2.7 mm까지 변화시키며 beam profile을 측정하였다. 아르곤 가스 3 sccm의 유량과 방전전류를 300 mA, 이온빔 전압과 가속 전압을 1000 V와 400 V로 고정하였다. 이온광학시스템의 플라즈마 그리드 전극과 가속 그리드 전극 간격이 1.0 mm인 경우에는 46 μA/cm²였으며, 균일영역은 직경 20 cm로 측정되어졌으며, 간격의 증가에 따라서 이온원에서 방출되는 전류밀도 및 균일 영역이 감

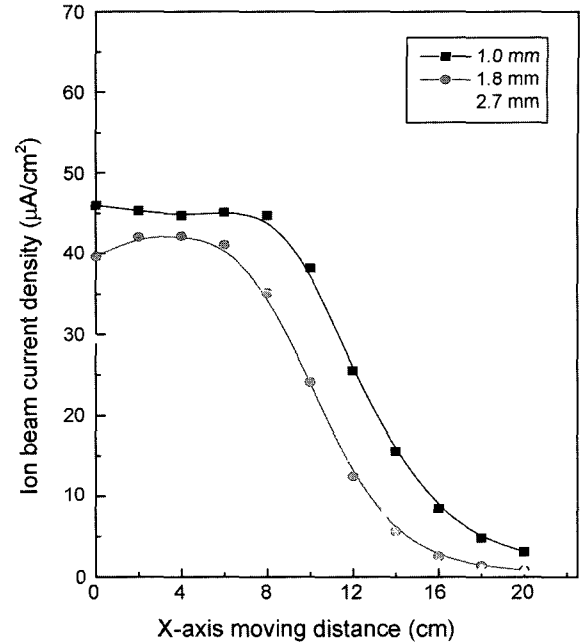


Fig. 7. Ion beam profile of (II) type ion source for between plasma grid and acceleration grid.

소되었다. 즉, 그리드 전극 간격의 증가로 인한 이온 방출각의 변화와 왜곡으로 방출되는 이온과 그리드 전극과의 충돌로 전류밀도의 감소와 균일한 영역이 감소하였음을 알 수 있다.

직경 5 cm의 cold hollow cathode 이온원의 이온빔 균일도와 안정성을 증가시키기 위하여 전자인출전극의 구조를 변경하였다. 전자인출전극 형태의 변화에 따라 이온원의 특성이 빔의 균일성이 변화를 알 수 있었으며, (I) 형태의 전자인출전극 상태에서 5 cm의 균일영역이 측정되었던 이온원에서 (II) 형태의 변화하였을 경우 직경 20 cm 정도로 이온빔 균일도가 크게 증가하였다. 이러한 특성을 바탕으로 이온원의 용도와 목적에 적합한 이온원의 설계, 제작 방향을 제시할 수 있었다.

4. 결 론

직경 5 cm cold hollow cathode 이온원에서 전자인출전극의 노즐의 크기, 배열, 수를 변화시켜 이온원의 beam profile을 통하여 이온원의 특성을 측정하였다. 전자인출전극의 구조에 있어서 (I) 형태는 1개의 노즐(Φ2.0 mm) 구성되어졌으며, 형태(II)는 7개의 노즐(Φ0.8 mm)로 이루어져 있다. 서로 다른 전자인출전극을 가진 (I) 형태와 (II) 형태 이온원의 beam profile을 측정한 결과 (I) 형태의 전자인출전극을 부착한 이온원의 경우는 이온원의 중심에서 30 cm 떨어진 위치에서 140 μA/cm²의 전류밀도가 측정되어졌으며, 전류밀도가 균일한 영역은 직경 5 cm로 측

정되어졌으며, (II) 형태의 전자인출전극을 부착한 이온원의 경우에는 $65 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 와 균일한 영역이 직경 20 cm로 넓게 측정되었다. 전자인출전극의 변화에 의하여 이온의 전류밀도는 상대적으로 감소하였지만, 본 실험의 목적인 넓은 면적을 균일하게 처리할 수 있었다. 이온원 내부에서 생성된 이온과 방출된 이온을 비교한 결과 (I) 형태에서는 12%, (II) 형태의 경우에는 22~24%로 이온빔 방출 효율이 증가되었다. 또한 기본적인 이온빔 방출 조건 확립을 위한 실험으로 플라즈마 그리드 전극과 가속 그리드 전극 간격을 조절하여 beam profile을 관찰한 결과 1.0 mm의 간격에서 최대 전류밀도와 균일도가 가장 높았다.

REFERENCES

1. H. R. Kaufman, "Broad-beam Ion Sources : Present Status and Future Directions," *J. Vac. Sci. A*, **A4** 764-71 (1985).
2. Ian G. Brown and Efim M. Oks, "Vacuum Arc Ion Source-a Brief Historical Review," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **25** [6] 1222-28 (1997).
3. G. E. Remmnev, I. F. Isakov, M. S. Opekounov, V. M. Matvienko, V. A. Ryzhkov, V. K. Struts, I. I. Grushin, A. N. Zakoutayev, A. V. Potyomkin, V. A. Tarbokov, A. N. Pushkaryov, V. L. Kutuzov, and M. Y. Ovsyannikov, "High Intensity Pulsed Ion Beam Sources and their Industrial Applications," *Surf. and Coating Technol.*, **114** 206-12 (1999).
4. H. R. Kaufman, J. J. Cuomo, and J. M. E. Harper, "Technology and Applications of Broad Beam Ion Sources Used in Sputtering. Part I. Ion Source Technology," *J. Vac. Sci.*, **21** 725-36 (1982).
5. H. R. Kaufman and R. S. Robinson, "Ion Source Design for Industrial Applications," *AIAA J.*, **20** 745-60 (1982).
6. G. A. Garzino-Demo and F. L. Lama, "Low Energy Universal Cold Cathode Ion Source," *Surf. and Coating Technol.*, **76-77** 645-54 (1995).
7. M. Tanjyo, S. Sakai, and M. Takahashi, "RF Ion Source for Low Energy Ion Implantation-beam Profile Control of a Large-area Ion Source Using 500-MHz Discharge," *Surf. and Coating Technol.*, **136** 281-84 (2001).
8. D. Korzec, J. Engemann, and J. Rapp, "Performance Characteristics of a Capacitively Coupled 3 cm RF Ion Source," *Rev. Sci. Instrum.*, **63** [5] 3068-72 (1992).
9. G. Voronin, D. Solnyshkov, M. Svinin, and A. Solnyshkov, "High-current ECR Ion Source," *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. B*, **161-163** 1118-22 (2000).
10. J. Asmussen, Jr., Timothy A. Grotjohn, PengUn Mak, and Mark A. Perrin, "The Design and Application of Electron Cyclotron Resonance Discharges," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **25** [6] 1196-1206 (1997).
11. K. H. Groh and H. W. Loeb, "State of the Art of Radio-frequency Ion Sources for Space Propulsion," *Rev. Sci. Instrum.*, **65** [5] 1741-44 (1994).
12. C. X. Wang, Z. Q. Chen, L. M. Guan, M. Wang, Z. Y. Liu, and P. L. Wang, "Fabrication and Characterization of Graded Calcium Phosphate Coatings Produced by Ion Beam Sputtering/Mixing Deposition," *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. B*, **179** 364-72 (2001).
13. J.-S. Cho, K. H. Yoon, and S.-K. Koh, "Microstructure of Indium Oxide Films in Oxygen Ion-assisted Deposition," *Thin Solid Films*, **368** 111-15 (2000).
14. P. Spadtke, L. Brown, and P. Fojas, "Low-energy Ion Beam Extraction and Transport : Experiment-computer Comparison," *Rev. Sci. Instrum.*, **65** [4] 1441-43 (1994).
15. N. V. Gavrilov and E. M. Oks, "High-current Pulse Sources of Broad Beams of Gas and Metal Ions for Surface Treatment," *Nucl. Instr. and Phys. Res.*, **A 439** 31 (2000).