

액체 금속 이온원의 빔 안정도 향상

현정우*, 임연찬, 김성수, 박철우†, 이종항‡, 강승원

Beam stability improvement of a liquid metal ion source

Jeong Woo Hyun, Youn Chan Yim, Seong Soo Kim, Cheol Woo Park, Jong Hang Lee,
Seung Oun Kang

Abstract

Previous studies on the liquid Gallium ion sources used an electro-chemically etched tungsten wire with a coil-type heater. Such a structure requires excessive power consumption in the course of heating the liquid metal. In this work, a new structure is proposed that replaces the coil-type heater. It uses a Gallium reservoir made of six pre-etched 250 μm tungsten wires that surround the needle electrode. Gallium loading at the reservoir is observed to be much more stable, resulting in an improved beam stability.

Key Words : Liquid Gallium Ion Source, Gallium Reservoir

I. 서 론

80년대 중반부터 집속이온빔(Focused Ion Beam)장치가 개발되어 현재 여러 가지 기초 및 응용분야에 사용되고 있다^[1-2]. 여기에 사용되는 이온원(Ion Source)은 고전류 밀도, 고선명도(High Brightness)^[3], 낮은 에너지 퍼짐^[4] 등의 특성을 지니고 있는데 이때 사용되는 이온원의 종류로는 Ga, In, Au, Be, Si, Pd, Al, Ni 등의 액체금속이온원(Liquid Metal Ion Source)이 연구되고 있다. 액체금속이온원의 이온방출 형태의 관측결과^[5]로부터 전형적인 바늘전극의 반경은 $\sim 20 \mu\text{m}$ 정도이고, 이에 대한 전기장은 $\sim 10^8 \text{ V/m}$ 이다. 이러한 높은 전기장에 의해 액체막이 변형되어 전기응력과 표면장력이 평형을 이루게 되고 Taylor cone이 형성된다.

분석된 콘모델에 대한 전기장의 해를 사용하여 이온형성의 구조와 이온방출 영역 등의 크기에 대한 해석적 연구의 결과에 의하면 전기장 기화에 의한 이온방출의 경우 초기의 점화전압에서는 액체금속막이 콘각 49.29° 의 Taylor 콘과 유사한 형태로부터 돌기된 수 \AA 의 콘 표면에

서 이온이 방출되며, 전압의 증가로 $\sim 10 \mu\text{A}$ 의 전류일 때는 강한 전기장에 의하여 돌기 콘이 인장되면서 침점형이 되어 $30^\circ \sim 20^\circ$ 정도의 각을 갖는 수 10 \AA 크기의 콘으로부터 $\sim 20 \text{ \AA}$ 이내의 영역에서 이온이 방출된다^[6]. 또한 전기장이 온화에 의한 전류는 $0.1 \mu\text{A}$ 이하로 고전류 영역일수록 전기장 기화에 비하여 작은 비율을 갖는다. 이와 같은 결과는 Taylor 콘의 끝에 형성된 침점형 돌기로부터 콘 모델을 가정한 것이다. B. Willkens 와 T. Venkatesan^[7]의 경우에서도 에너지 결손이 서로 차이가 날 때, 특히 고전류 영역에서의 방출각(emission angle)에 따른 상대적인 세기의 관계를 통해 Taylor 콘의 끝에 침점형 돌기의 형성이 가능하다는 결과를 얻었다.

본 연구에서는 이와 같은 모델을 이론적 모델로 택하고서 직접 제작한 액체갈륨이온원에 대한 전류-전압 곡선과 빔의 안정도를 측정하였다

II. 실험장치 및 방법

바늘전극은 직경이 $360 \mu\text{m}$ 의 텅스텐 선을 전기화학적 방법을 사용하여 Taylor 콘을 갖는 바늘을 pre-etching,

* 현정우, 광운대학교 전자물리학과 (jwhyun74@hanmail.net)

서울시 노원구 월계동 447-1

† 한국산업기술대학교 기계공학과

‡ 한국산업기술대학교 기계공학과

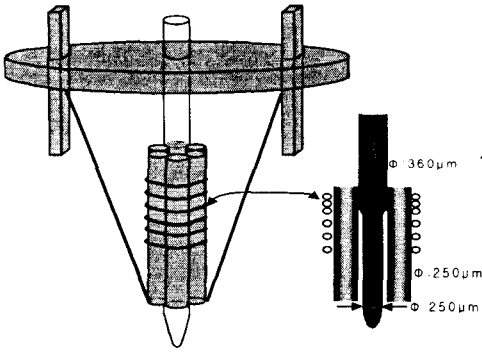


Fig. 1 A new structure for Gallium reservoir with six pre-etched tungsten wires

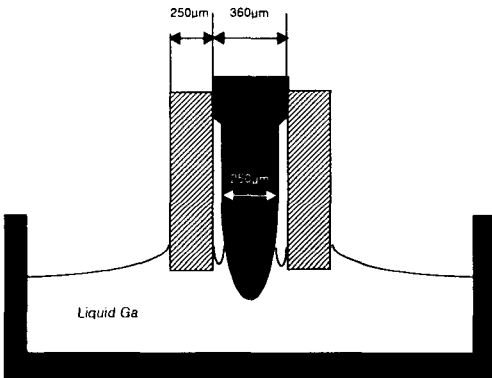


Fig. 2 The Gallium loading procedure on the ion source

pointing, blunting의 3단계 과정을 거쳐서 제작하였다. 전해질 용액으로는 CuSO_4 와 KOH 를 1000 ml의 물에 각각 0.25g, 640g을 넣어 만든 용액을 사용하였으며 갈륨 저장소의 제작은 pre-etching한 텅스텐 선을 가지고 제작하였고 그림1에 나타내었다. Pre-etching의 단계에서는 텅스텐 선의 표면에 홈(groove)을 만들기 위한 와이어의 굵기를 조절하기 위한 과정이다. 홈의 거칠기는 낮은 전압을 공급하면 텅스텐 선의 표면이 거칠어지고, 높은 전압을 공급하면 텅스텐 선의 표면이 매끄러워진다. 홈은 액체갈륨(액체갈륨)의 바늘표면에 대한 흐름저항에 관계하는 요소로서, 홈이 매끄러울 경우 흐름저항은 커진다. 흐름저항이 작을수록 I-V 특성곡선의 기울기가 급격하게 나타나고 너무작으면 액체돌기가 제대로 형성되지 않아 빔의 안정도가 매우 떨어지게 된다.

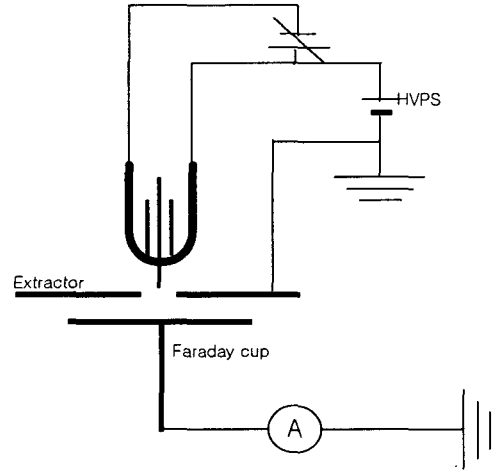


Fig. 3 Schematic of stability and I-V characteristic and beam stability measuring circuit

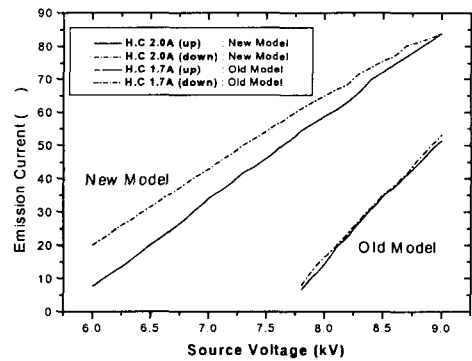


Fig. 4 I-V characteristic curve

Pointingblunting의 전단계로 텅스텐 선의 끝부분을 예리하게 etching한다. 그리고 blunting은 Taylor 콘 형성에 적합하도록 곡률반경 형태를 조절하는 과정이다. 바늘 정점의 점근선이 약 40° 정도 이어야 하며 이로서 Taylor 콘의 반각 49.29° 보다 약간 작은 값으로 돌기 형성에 적합하게 된다. 제작된 바늘전극을 그림1과 같이 세라믹 접착제를 이용하여 고정시켜 이온원을 제작하였다.

제작된 이온원을 이용한 액체갈륨의 로딩 과정은 액체갈륨의 산화 현상을 최소화 하기위해 $\sim 10^{-6}$ Torr의 진공도가 유지되는 진공 챔버 내에서 이루어진다. 고체 갈륨을 담은

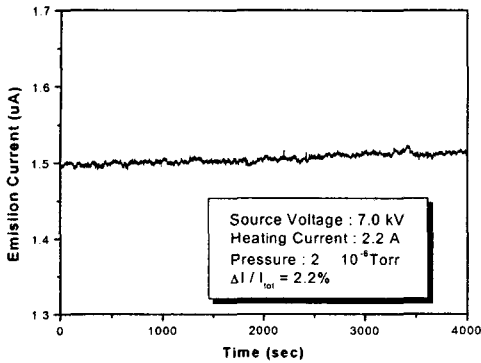


Fig. 5 Stability of emission current of new model

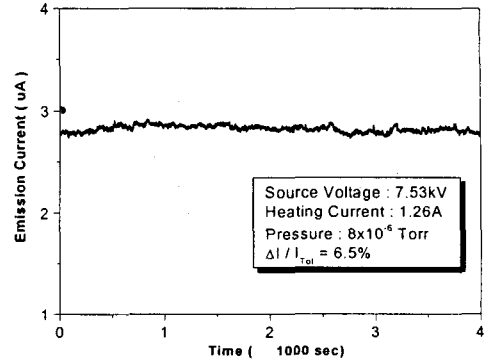


Fig. 6 Stability of emission current of old model

용기에 ~ 1 A의 heating current를 공급하여 용융시킨 후, 이온원에 1.5 V \sim 1.9 V의 전력을 공급하여 이온원의 전극과 갈륨저장소를 가열시키고 액체갈륨을 서서히 냉각이 되게 하면, 액체갈륨과 이온원 전극의 온도가 동일한 시점에서 모세관현상에 의해 갈륨저장소 내로 액체갈륨은 흘러 들어가게 된다. 이 때 이온원의 바늘전극 전체에 열이 고루 잘 퍼져야 갈륨저장소 끝까지 흘러 들어가게 된다.

제작된 갈륨 액체금속이온원을 진공 장치에 넣고 고전압과 heating current를 주면서 방출되는 이온의 전류를 Faraday cup으로 측정한다. 진공도는 이온원의 종류에 따라 약간의 조정이 필요하다. 예를 들면 갈륨은 산화가 잘 일어나므로 $\sim 10^{-5}$ Torr 이하의 고진공에서 사용되어야 한다. 일반적으로 빔의 안정성을 위해서는 $\sim 10^{-8}$ Torr 이하의 진공도가 필요하지만 본 실험에서는 $\sim 10^{-6}$ Torr로 유지된 상태에서 전류-전압 특성 곡선과 빔의 안정도를 측정하였다. 전류-전압 특성 곡선 측정과 빔의 안정도 측정은 이온원의 제작 후 반드시 거쳐야 하는 기본적인 실험이다.

III. 실험결과 및 분석

본 연구에서 개발, 제작한 새로운 모델의 전류-전압 특성 곡선 측정과 빔의 안정도를 측정하였다. 기존의 모델은 텅스텐 선으로 이루어진 바늘전극과 코일 형태의 히터사이의 온도가 균일하게 분포되지 못하여 갈륨의 흐름이 원활하지 않

아 바늘전극의 끝부분에서의 균일한 액체금속의 콘각 형성이 이루어지지 못하고 바늘전극의 끝부분과 저장소간의 액체갈륨이 끊어져 빔이 끊어지는 경우가 발생하기도 했지만 새로운 모델에서는 갈륨저장소와 바늘전극의 끝부분에서 온도가 균일하게 분포되어서 갈륨의 흐름이 원활하게 되었다.

그림 3은 전류-전압 특성곡선 및 안정도 측정을 위한 시스템의 개략도이다. 이 시스템을 사용하여 전류-전압 특성 곡선을 측정하였다. 그림 4는 액체 갈륨 이온원의 전류-전압 특성곡선을 보여준다. 특성을 보면 전압에 대한 전류의 선형적인 증가를 잘 볼 수 있다. 이온원에 공급하는 전압을 6.0 kV에서 9.0 kV까지 변화시키면서 이온전류를 측정하였다. 이전의 모델과 비교를 하기위해 그래프를 같이 나타내었다. 이전의 모델의 기울기가 급격한 것을 볼 때 흐름 저하가 새로운 모델보다 작아서 돌기부분이 불안정하다는 것을 알 수 있다. 처음으로 빔이 방출될 때가 전압이 7.8 kV 였지만 새로운 모델은 6 kV에서 처음으로 방출이 되었다. 액체갈륨에 공급하는 heating current도 변화시키면서 측정하였다. 그러나 heating current가 너무 높으면 액체갈륨의 흐름 저항이 커져서 바늘전극의 끝부분, Taylor 콘 지역에서 형성되는 돌기부분의 표면장력이 불안정하게 되어서 과전류가 형성되어 불꽃이 튀게 된다. 이러한 불꽃은 바늘전극의 끝부분의 형상을 변형시키거나 높은 온도에 의해서 끝부분에 산화막이 형성되기도 한다. 따라서 heating current의 조절을 잘 해주어야 바늘전극의 상태가 계속 유지될 수 있다.

그림 5와 그림 6은 빔의 안정도를 측정한 것이다. Heating current를 2.2 A를 주고 4000초 동안 측정한 것으로 $\Delta I / I =$

2.2% 이내로서 빔의 방출이 상당히 안정적임을 알 수 있다. 이전의 빔 안정성은 그림 6에 나와있듯이 안정도가 $\Delta I/I = 6.5\%$ 이내였다. 그림 5와 그림 6을 비교해 볼 때 새로운 모델의 빔 안정성이 더욱 좋다는 것을 알 수 있다. 빔 방출의 안정성에 크게 기여한 새로운 모델의 구조적인 요소로서는 액체 Ga의 흐름이 예전의 코일 형태의 heater를 사용하던 모델보다 안정적으로 나타난다는 것이다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 바늘 전극의 etching된 아래 부분과 etching이 되지 않은 윗부분과의 텅스텐 선의 굵기의 차에 의해 형성된 빈 공간을 갈륨 저장소로 이용하였고 저장소로 사용되는 텅스텐 선의 홈(groove)들이 평행한 방향으로 형성되어 있다. 따라서 이전의 모델보다 액체 갈륨의 흐름이 원활하여 갈륨공급이 일정하고 안정적이어서 빔의 안정적인 방출에 기여하였다.

IV. 결 론

새로운 갈륨저장소를 개발하고 제작하여 갈륨을 사용한 액체금속이온원을 제작하였다. 전압의 변화와 heating current의 변화에 따라 전류-전압 특성곡선을 측정하여 선형적인 증가를 보이는 것을 알 수 있었고 이전의 코일 형태의 특성곡선 측정 그래프와 비교를 해보면 새로운 모델의 LMIS가 더 낮은 전압에서 빔이 방출되는 것을 알 수 있었다. 빔 방출의 안정도는 총 방출전류량의 2.2% 이내였고, 방출되는 전류량은 공급 전압에 따라 변화하였다. 본 연구에서 새로운 모델의 LMIS에 대해 측정한 전류-전압 특성과 빔의 안정도를 통해 볼 때 이전의 코일 형태의 히터를 사용한 모델보다도 갈륨의 원활한 흐름에 의해 빔의 방출 전압이 낮아지고 빔 방출의 안정도가 향상되었음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2003년도 광운대학교 교내학술연구비와 산업자원에서 지원하는 차세대신기술개발과제인 “이온빔 이용 나노가공용 장비 개발” 사업으로부터 지원을 받아 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] J. Z. Wan, J. G. Simmins and D. A. Thompson,

1997, "Band gap modification in Ne^+ -ion implanted $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}/\text{InP}$ and $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$ quantum well structures," J. Appl. Phys. 81(2), pp. 765~770.

[2] G. Ben Assayag, C. Vieu and J. Gierak, 1993, "New characterization method of ion current-density profile based on damage distribution of Ga^+ forced-ion beam implantation in GaAs," J. Vac. Sci. Technol. B 11(6), pp. 2420~2426.

[3] L. Seliger, J. W. Ward, V. Wang and R. L. Kubena, 1979, "A high-intensity scanning ion probe with submicrometer spot size," Appl. Phys. Lett. 34, pp. 310~312.

[4] H. S. Uhm, E. H. Choi, G. S. Cho and S. O. Kang, 1994, "Shift of peak energy distribution in field-emitted charged particle beams," Phys. Plasmas 1, pp. 4105~4113.

[5] G. Benassayag, P. Sudraud and B. Jouffrey, 1985, "In situ high voltage TEM observation of an electrohydrodynamic(EHD) ion source," Ultramicroscopy 16, pp. 1~8.

[6] G. S. Cho, Y. Seo and S. O. Kang, 1992, "Liquid metal ion sources: The shape and size of the ion emitting area," J. Appl. Phys. 72(12), pp. 5892~5897.

[7] B. Wikens and T. Venkatesan, 1983, "High resolution mass spectrometry of liquid metal ion sources," J. Vac. Sci. Technol. B 1(4), pp. 1132~1136.