論 文
57-1-13

이온 플레이팅용 장수명 플라즈마 건 장치의 개발

Development of a Plasma Gun System for Ion Plating with Long Lifetime

崔 永 旭†
(Young-Wook Choi)

Abstract - A hollow cathode which has extremely stable discharge characteristic has been developed. This is composed of the two separated lanthanum hexaboride (LaB6) of a disk type in the tube as the electron emitters. The way of design is of great advantage to extend the surface discharge area of the LaB6, which is also useful for optimal fixing of the LaB6. The hollow cathode is capable of producing 30 kW (100 V, 300 A) of power continuously. Because the generated plasma beam with the high temperature (above 3000 ℃) from the hollow cathode passes through the center hole of the two intermediate electrodes, it is designed with the high temperature material of the tungsten and the suitable structure of the water cooling. The combinations of the hollow cathode and the two intermediate electrodes are practically useful for the ion plating plasma beam source.

Key Words : Ion Plating, Hollow Cathode, Plasma Gun, LaB_6

1. 서 론

대전류를 발생시키는 중공(中空) 음극방전 장치(플라즈마 건)는 플라즈마 빔을 발생시켜 재료의 고속증착공정, 플라즈마 세정, 공구코팅 등 산업사회에서 다양히 적용되고 있다. 이를 위한 대전류를 발생시키기 위해 사용하는 핵심 소자로는 이차전자 방출계수가 큰 LaB_6 (lanthanum hexaboride)를 사용한다[1-8]. 이 소자를 사용하면 1800 ℃ 에서 40A/cm^{2}의 전류밀도를 발생하는 특성을 가지므로 직경 3~5 cm의 원형 표면적으로도 수백 암페어의 전류를 쉽게 발생시킬 수 있어서 방출하는 고출력의 용량으로 재료를 증발시켜 높은 증착률을 얻을 수 있다.

최근에 이를 이용하는 한 예로서 PDP의 전면판의 유전체 보호막인 대면적 산화 마그네슘 박막의 고속증착기술을 들 수 있다. 그런데 이러한 장치는 산업사회에 능률적으로 적용하기 위하여는 장시간 안정적 방전 특성, 유지보수의 편리성 그리고 경제적 운용비용 등의 조건이 필요로 한다. 특히 PDP제조 공정에서는 1 달 정도의 안정적 연속운전이 가능한 정도의 장치를 요구하고 있다. 또한 높은 증착률의 공정기술까지도 요구하고 있다. 재료의 증착률은 보통 플라즈마 건의 출력에 비례하는 데 증착률을 높이기 위하여 출력을 증대하는 기술이 또한 요구된다.

플라즈마 건의 출력을 높이는 기술은 첫째, LaB_6 부분의 음극부분의 설계가 중요하다. 왜냐하면 1800 ℃ 의 고온에서 운전하기 때문에 몰리브덴, 탄탈, 텅스텐 등과 같은 고온재료를 사용하여야 하고 고열에서도 내구성이 가지는 기계적 조립구조를 가지도록 설계 제작하는 것이 매우 중요한 관건이다. 둘째로는 LaB_6 부분의 음극에서 발생하는 수백 암페어의 대전류는 중간전극을 통하여 가속되고 진전하기 때문에 중간전극의 빔이 통과하는 부분도 고열에 의한 내구성이 있어야한다. 이 두 가지의 기술이 장수명을 가지도록 동시에 해결되어야 실제로 장시간을 사용할 수 있는 이온 플레이팅 시스템을 완성할 수 있다.

중간전극의 대전류가 통과하는 부분의 재료는 종래부터 융점이 3800 ℃ 정도이고 경제적이며 가공이 용이한 탄소(흑연)를 사용하여 왔다. 그러나 산업의 응용이 다양해지면서 점점 장수명화의 기술이 요구되었고 이러한 면에서 탄소는 장수명의 기술로 적용하기에는 한계에 도달하였다. 즉, 탄소는 재료의 특성상 증발속도가 빨라서 1 달 정도의 장시간 연속운전을 요구하는 공정에는 적용할 수 없으므로 이러한 면을 극복하는 재료와 기술이 요구되는 것이 현실이 되었다.

그러므로 본 연구에서는 LaB_6 부분의 음극의 내구성 설계기술과 중간전극의 설계도 동시에 고려하여 장시간 안정적으로 운전할 수 있는 플라즈마 빔 발생장치의 개발에 역점을 두었다. 구체적으로는 탄소 대신 텅스텐을 사용하여 중간전극의 내구성 기술문제를 해결하는 데 많은 역점을 두었다.

이러한 연구결과는 실제로 대면적 고속증착용 이온 플레이팅 장치에 적용하는 것을 목표로 하였으며, 실제로 구상하고 설계한 것을 제작하여 연구실험 한 결과 장수명을 위한 기술적 문제를 상당히 해결하였음을 알 수 있었다.

2. 중공(中空) 음극의 설계

설계한 중공 음극은 그림 1에 나타내었다. 본 중공 음극은 LaB_6 재료를 병렬로 1~2개를 사용할 수 있도록 하였다.

† 교신저자, 正會員 : 한국전기연구원 책임연구원
E-mail : ywchoi@keri.re.kr
接受日字 : 2007年 10月 11日
最終完了 : 2007年 10月 25日

그림 1에는 2개를 적용한 예를 보였다. 사용한 LaB_6는 외경 50 mm, 내경 10 mm, 두께 5 mm이다. 고온재료인 몰리브덴 원통은 내경 50 mm, 외경 56 mm, 두께 3 mm, 길이 140 mm로 하였고 직경 60 mm의 몰리브덴 봉재료를 선반으로 가공하여 제작하였다.

LaB_6재료는 디스크 형태로 제작하여 내부에 몰리브덴 원통형 지지장치로 고정하였다. 이렇게 고정하면 사용중 LaB_6가 열스트레스에 의해 균열이 생겨도 서로 맞물려 있는 상태로 유지하여 장시간 문제없이 사용할 수 있는 장점이 있다. 플라즈마 빔이 발생하여 나가는 구멍의 크기는 10 mm로하고 이 부분은 온도가 매우 높기 때문에 융점이 3300 ℃의 재료인 텅스텐을 사용하였다.

초기 방전 개시를 위해 LaB_6를 가열하는 수단으로는 텅스텐 필라멘트를 사용하였다. 텅스텐 코일의 직경은 1.3 mm, 저항은 22 mΩ 무게는 11.7 g이다. 몰리브덴 튜브는 스테인레스로 제작하고 고온에 대응하여 수냉각을 적용하였다.

본 플라즈마 건은 그림 5에 나타낸 바와 같이 외부에 코일이 있어서 외부 자장의 영향을 받게된다. 이 자장은 LaB_6 표면에 수직방향으로 작용하고 이는 LaB_6에서 발생하는 전장의 방향과 일치하므로 방전의 발생과 유지에 방해가 되는 마그네트론 컷오프 (magnetron cutoff)의[9] 영향을 받지 않도록 하였다.

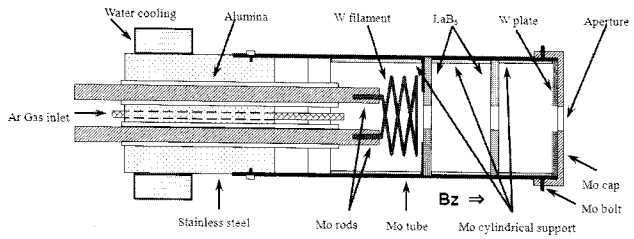

그림 1 설계한 중공 음극 방전장치

Fig. 1 Diagram of the newly designed hollow cathode

3. 장수명 운전을 위한 중간전극의 설계

그림 2에는 본 중공 음극장치를 이온 플레이팅 장치에 적용한 것을 보였다. 발생한 플라즈마 빔은 음극을 빠져나와 중간전극 (intermediate electrode) 1, 2를 통과한다. 이 때 발생한 플라즈마 빔의 중심부 온도는 최소한 3000 ℃ 이상이 되므로 융점이 높은 텅스텐을 사용하였다. 이 부분의 기술은 종래에는 주로 탄소(흑연)을 사용하였는데 흑연을 사용하면 수명이 현저히 제한을 받아 1 달 정도의 장시간 운전에 사용할 수 없다. 특히 중간전극 1 부분의 입구는 가장 온도가 높아서 텅스텐 재료를 사용하고 수냉각을 적용하였다. 이 부분의 텅스텐 재료는 두께 1 mm, 길이 35 mm이다. 그리고 냉각수는 13l/min로 하였다. 중간전극 1에는 영구자석을 넣고 중간전극 2에는 전자석 코일을 적용하여 중심부의 자장이 50 G가 되도록 하여 빔의 직진성 진로를 유도하였다.

중간전극의 설계시 장수명화를 위해 고려한 내용을 자세히 설명하기위해 그림 3에 탄소(흑연)와 텅스텐 재료의 증발률을 비교한 것을 보였다. 전반적으로 텅스텐의 증발률이

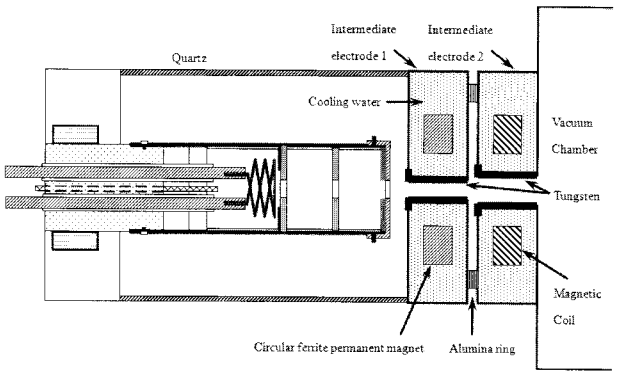

그림 2 중공 음극을 중간전극과 조합한 이온플레이팅 장치도

Fig. 2 Schematic diagram of the hollow cathode and two intermediate electrodes for ion plating system

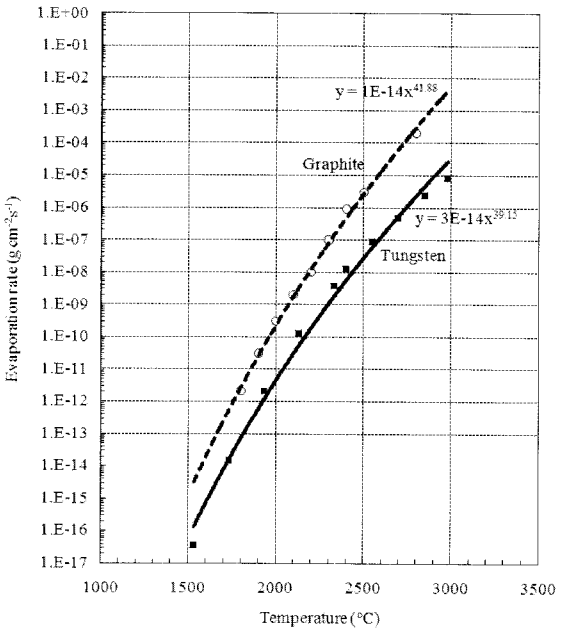

그림 3 탄소(흑연)과 텅스텐의 재료 증발률의 비교

Fig. 3 Comparison of the evaporation rates of the graphite and the tungsten [2,10]

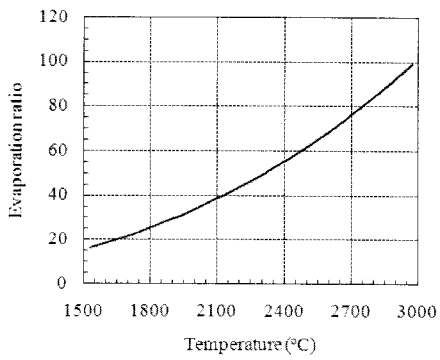

그림 4 온도에 따른 탄소(흑연)과 텅스텐의 재료 증발률의 비교

Fig. 4 Comparison of the evaporation ratio between graphite and tungsten according to the temperature

탄소보다 매우 적은 것을 알 수 있다. 구체적으로 그림 4는 그림 3으로부터 계산한 결과를 보였다. 이로부터 탄소의 증발률은 텅스텐보다 온도 1500~3000 ℃ 에서 20~100배가 더 큰 것을 알 수 있다. 그러므로 이러한 근거로 중공 음극과 중간전극이 조합된 이온 플레이팅 장치의 장시간 사용수명이 가능한 설계를 할 수 있음을 알 수 있다.

4. 실 험

그림 5에 중공 음극(plasma gun)을 실험하기 위한 장치를 보였다. 진공체임버는 높이 1 m, 길이 5 m, 폭 0.3 m이다. 플라즈마 건은 체임버 위에 중간 전극과 함께 조립하여 장착하였다. 방전의 개시를 용이하게 하는 부하저항은 그리드 1에 20 Ω, 그리드 2에 10 Ω을 연결하였다. 음극과 양극의 간격은 0.7 m이다. 실험 압력은 2~10 mTorr로 하였고 가스는 아르곤을 사용하였다. 체임버 위 아래에 설치한 전자석은 외경 0.62 m, 내경 0.48 m, 높이 0.2 m이다. 권선은 두께 1 mm, 폭 10 mm의 동으로 309번 권선하였다. 코일에 흐르는 전류는 각각 최대 100 암페어를 흘릴 수 있도록 하였다. 음극과 양극사이에는 직류 전원을 연결하였다. 플라즈마 건을 가동하기 위해 먼저 텅스텐 열 필라멘트에 70 암페어를 흘리면서 LaB_6를 1800 ℃로 가열 후 아르곤 가스를 흘리며 400 V의 트리거 전압을 인가하면서 그 후 주 전원을 투입하여 플라즈마 빔을 발생시켰다. 주 전원으로 실험 전류는 최대 300 암페어까지 인가하였다.

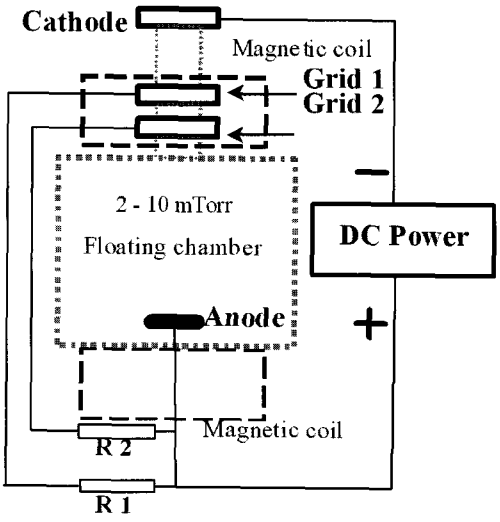

그림 5 중공 음극과 중간전극 실험장치

Fig. 5 Schematic diagram for the test of the hollow cathode and intermediate electrodes (grids)

5. 실험결과 및 고찰

본 플라즈마 건은 이온 플레이팅 장치에 적용하여 500 시간 이상 연속 운전을 하였다. 500 시간 연속운전 후 중공 음극과 중간전극에 거의 손상이 발생하지 않았다. 이러한 결과로부터 본 장치는 장시간 연속사용하는 이온 플레이팅 장치에 적용할 수 있다고 판단된다. 연속운전에 대해 자세히 설명하면 일단 LaB_6가 1개 일 때보다 2 개일때 초기 방전에서 훨씬 안정되었고 이는 분리된 방전 공간과 LaB_6의 표면적이 커진 영향 때문으로 사료된다. 두 개의 LaB_6를 사용하는 경우 방전 표면적은 56.4 cm^2로 계산된다. 이 때 두 번째 LaB_6는 한 쪽만 방전하도록 텅스텐 필라멘트가 있는 쪽을 몰리브덴 디스크로 덮어 가렸다. 이 표면적으로부터 전류밀도를 300 암페어가 흐를 때 계산하면 5.3 A/cm^2로 된다. 이 상태에서 Lafferty's의 상수[1]로부터 LaB_6의 증발률이 $4.5x10^{-9}$ (g/cm^2s)임을 알 수 있다. 이 증발률로부터 500시간 동안 실험 후 눈으로 보아서는 알 수 없지만 0.24 g의 LaB_6가 증발됨을 추정할 수 있다. LaB_6의 무게는 72 g임을 미루어 볼 때 매우 작은 양이 증발되었고 계산하면 0.3 %로 된다. 그러므로 실험 결과는 이상과 같은 근거[1]로 계산한 결과와 일치함을 알 수 있다. 실험은 500 시간까지 진행하였지만 더 이상도 연속운전이 가능하고 1달도 (720시간) 가능함을 추정 할 수 있다.

중간전극의 고온의 플라즈마 빔이 통과하는 텅스텐 부품도 거의 증발되지 않았다. 이는 수냉각 때문으로 사료되며 실험시 텅스텐 부품의 온도는 직접 측정 할 수 없지만 그림 3으로부터 약 2200 ℃ 로 추정 할 수 있다. 그림 4로부터는 온도가 1500~3000 ℃에서 재료의 증발비가 약 20~100 배로 나타난 것이 실제의 실험에서 타당함을 알 수 있었다. 그러므로 텅스텐을 사용한 결과 최소한 탄소를 사용할 때보다 20 배 이상의 수명을 가지는 것을 알 수 있다.

이상의 실험 결과로부터 중공 음극과 중간전극은 고온에서 잘 사용할 수 있도록 설계 및 제작되었음을 알 수 있었으며 바이어스 전압 100 V, 출력전류 300 암페어 즉, 30 kW의 출력을 가지는 반 영구적인 플라즈마 건 시스템을 이온플레이팅 장치로 적용이 가능한 것을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 대면적 고속 증착이 가능한 이온 플레이팅 장치에 적용하기 위해 중공 음극형 플라즈마 건과 중간전극을 30 kW급에서 사용할 수 있도록 관련기술 재료의 기초적 자료를 활용하여 설계 및 제작하고 500 시간을 운전 후 상태를 점검한 결과 거의 손상이 없는 결과를 얻었다. 그러므로 본 개발연구에서는 기존의 탄소를 사용한 플라즈마 건 시스템의 수명의 한계를 극복하고 기존보다 최소한 20배의 수명이 향상된 이온 플레이팅 장치의 기술 발전에 일조를 하였다고 사료된다.

참 고 문 헌

[1] J. M. Lafferty, "Boride Cathodes," J. Appl. Phys., vol. 22, no. 3, pp. 299-309, 1951.

[2] A. N. Broers, "Some experimental and estimated characteristics of the lanthanum hexaboride rod cathode electron gun," J. Phys. E2, vol. 2, pp. 273-276, 1969.

[3] D. M. Goebel, J. T. Crow, and A. T. Forrester, "Lanthanum hexaboride hollow cathode for dense plasma production," Rev. Sci. Instrum., vol. 49, no. 4,

pp. 469-472, 1978.
[4] D. M. Goebel, Y. Hirooka, and T. A. Sketchley, "Large-area lanthanum hexaboride electron emitter," Rev. Sci. Instrum., vol. 56, no. 9, pp. 1717-1722, 1985.
[5] Barankova, H., Bardos, L., "Hollow cathode and hybrid plasma processing," Vacuum, vol. 80, no. 7, pp. 688-692, 2006
[6] Barankova, H., Bardos, L., "Hollow cathode cold atmospheric plasma source with monoatomic and molecular gases," Surface & coatings technology, vol. 163/164, pp. 649-653, 2003
[7] Mattox, D.M., "Ion plating-past, present and future," Surface & coatings technology, vol. 133/134, pp. 517-521, 2000
[8] Yagodkin, Y.D., Pastuhov, K.M., Muboyadjyan, S.A., "Electron-beam and ion-beam treatment of protective coatings produced by ion plating," Surface & coatings technology, vol. 93, no. 2/3, pp. 327-330, 1997
[9] J. R. Pierce, "Theory and Design of ELECTRON BEAMS," D. VAN NOSTRAND COMPANY, INC., Chapter 4, 1949.
[10] The Industrial Graphite Engineering Handbook, Union Carbide Corporation, 1969.

저 자 소 개

최 영 욱 (崔 永 旭)

1960년 6월 26일생.
1984년 한양대 공대 전기공학과 졸업
1994년 九州大學大學院 總合理工學硏究科 에너지변환공학과 졸업 (석사)
1997년 동대학원 졸업 (박사)
1984년 3월 - 1991년 10월 한국전기연구소 연구원
1997년 4월 - 현재, 한국전기연구원 책임연구원
주관심분야 : 생체질병 바이오센서 개발, 레이저·광 응용계측 (LIF), 전자빔/플라즈마응용, PDP MgO박막 제조장비, 고전압 전원기술
Tel : (031) 8040-4167
Fax : (031) 8040-4109
E-mail : ywchoi@keri.re.kr