

관통형 속 빈 음극관 글로우 방전에서 다양한 음극관 디자인에 따른 구리방출선 세기 증가에 대한 연구

우정수 · 박현국[†] · 김용성 · 최규성 · 이상천*

경남대학교 화학과

[†]일본동북대학교 금속재료연구소

(2003. 7. 22 접수)

Various Cathode Design for Cu Emission Line In See-through Hollow Cathode Glow Discharge (st-HCGD)

Jeongsoo Woo, Hyun-Kook Park[†], Yongseong Kim, Kyuseong Choi, and Sang Chun Lee*

Department of Chemistry, Kyungnam University, Masan 631-701, Korea

[†]Institute for Material Research (IMR) in Tohoku University, Japan

(Received July 22, 2004)

요 약. 의료용 구리증기 레이저 개발의 일환으로 관통형 속 빈 음극관 글로우 방전(see-through Hollow Cathode Glow Discharge; st-HCGD)을 이용하여 Cu 510.6 nm 방출선의 세기 증가를 조사하였다. 높은 전류에서도 매우 안정한 플라즈마가 생성될 수 있도록 여러 가지 요인들 - 작동 전압 및 전류, 음극관의 길이와 내경 및 내부 형태, 음극관의 sputtering range 등 - 에 따른 최적조건을 찾기 위해 실험을 수행하였다. 그 결과, 최종적으로 디자인된 글로우 방전셀에서는 앞서 여러 가지 실험으로 최적화된 조건을 적용하였다. 이들 최적화된 조건으로는 방전셀 내부에 아르곤 가스를 100 SCCM(standard cubic centimeter)으로 일정하게 흘려주었을 때의 방전셀 압력은 2.3 Torr 이며, 방전 전압 및 전류는 600 V, 700 mA(420 W), 음극관의 형태는 4-11-4 mm, 음극관의 길이는 40 mm 등이다. 한편, 700 mA 이상의 고전류에서 녹은 구리 음극관을 관찰함으로써 음극 sputtering으로 인한 플라즈마의 온도가 최소 1,000 °C 이상에 이르렀음을 확인할 수 있었다(구리의 녹는점, 1084 °C).

주제어: 글로우 방전, 구리 속 빈 음극관

ABSTRACT. We have investigated the intensity of Cu 510.6 nm emission line in see-through hollow cathode glow discharge (st-HCGD) for the development of medical Cu vapor laser. In order to acquire the stable plasma in st-HCGD cell at high current, several factors such as current, the length and the inner diameter of cathode tube, the shape of the tube, and the range of the sputtering range were tested. An optimum condition in our st-HCGD cell was obtained at 600 V, 700 mA, 2.3 Torr of Ar gas (100 SCCM), and 40 mm of tube with 4-11-4 mm type cathode design. Also, it was indirectly observed that temperature in the cell could reach more than 1000 °C since Cu cathode was melt at the current more than 700 mA (melting point of Cu, 1084 °C).

Keywords: Glow Discharge, Copper See-through Hollow Cathode

서 론

1966년 미국의 Walter와 Piltch 등에 의해 처음으로 녹색(510.6 nm)과 황색(578.2 nm)의 구리 증기 레이저

가 개발된 것을 시작으로,^{1,2} 이후 여러 연구자들에 의해 고출력 파장 가변 레이저의 여기광원이나 반도체 연구, 의학 및 법의학 분야, 투영 현미경, 고속사진 촬영 등의 분야에서 활발한 연구가 진행되어 왔다.^{1,3} 현재 의료용

레이저는 대부분 수입에 의존하고 있기 때문에 장비가 고가이고, 시스템 업그레이드에 있어서 많은 시간과 비용이 소요된다. 국내 순수 기술에 의한 구리증기 레이저의 개발은 아직까지 연구가 많이 진행되지 않은 분야로서, 이에 대한 기초연구가 시급한 실정이다. 글로우 방전을 이용한 구리증기 레이저는 기존 장치의 1/10 크기로 제작이 가능하므로 휴대용 의료 레이저 개발에 유리하다.

글로우 방전을 이용한 분석장치의 개발 가능성은 1902년 독일의 Paschen이 속 빈 음극 방전법(Hollow Cathode Discharge) 복사 광원의 특성을 처음으로 설명한 이후 많은 연구자들에 의해 발전되어 왔다.⁹ 그러나 플라즈마 내부의 밝혀지지 않은 복잡한 메카니즘과 압력, 온도 등 아직도 많은 요소가 밝혀지지 않아서 안정하고 신뢰성 있는 장치를 개발하는데 문제점으로 지적되어 왔다. 연구자들은 제작 및 유지가 용이하고, 소형화가 가능하며, 극미량 분석 및 현장분석의 응용 등의 장점을 지닌 글로우 방전을 분석장치 개발에 많이 사용하고 있다.⁹⁻²⁰ 본 연구에서는 구리증기 레이저 개발을 위한 전 단계로서 의료용으로 널리 사용되는 파장인 Cu 510.6 nm 방출선에 대해 조사하였다. 휴대용 원자방출 분광기용으로 본 연구실에서 제작한 원통형 속 빈 음극관 글로우 방전셀(see-through Hollow Cathode Glow Discharge Cell)^{21,22} 이용하여 방전에 영향을 미치는 여러 가지 요인들 - 음극관의 길이, 내경 및 형태와 sputtering range 등 - 에 대해 Cu 510.6 nm 방출선을 최대한 증가시키면서 안정한 방전 조건을 조사하여 보았다.^{23,26} 일반적인 방전에서는 음극관이 구리인 경우 Cu 324.8 nm, Cu 327.4 nm 방출선이 주로 관찰된다. 그러나 특정 방전가스 환경에서 속 빈 음극관 글로우 방전을 이용하게 되면 Cu 510.6 nm 방출선이 가장 강하게 발생하게 된다.²⁷ 본 논문에서는 Cu 510.6 nm 방출선과 Cu 521.8 nm 방출선을 비교하였는데, Cu 521.8 nm 방출선은 여러 구리 방출선들(Cu 510.6 nm, Cu 515.3 nm, Cu 521.8 nm, Cu 578.2 nm 등) 중에 Cu 510.6 nm 방출선 다음으로 강하게 방출되는 선이므로 요인의 변화에 따른 Cu 510.6 nm 방출선의 증가가 다른 구리 방출선에 비해 어떠한 변화를 가져오는지 관찰하기 위해 이용되었다.

실 험

Fig. 1(a)는 본 연구에서 사용한 방전셀의 모형도이다. 이 방전셀은 앞선 실험들을 전제로 하여 고전류에서의

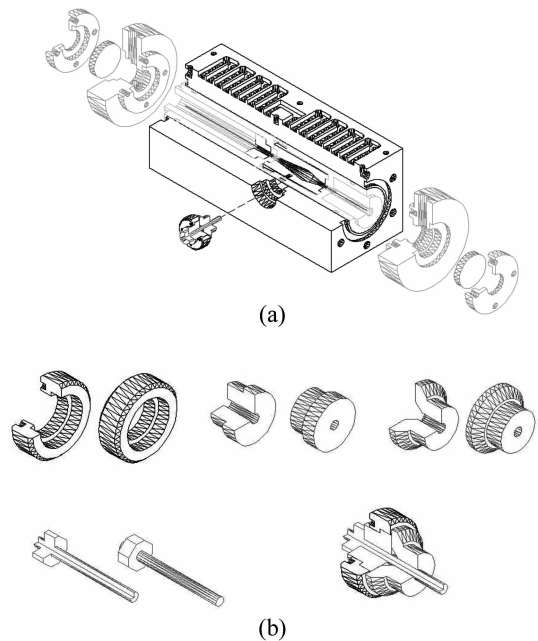


Fig. 1. HCGD cell. (a) 3-D diagram of HCGD cell, (b) Home-made electrical feed-through.

안정한 방전을 목적으로 새로 제작하였으며,²³ 냉각시스템에 중점을 두어 설계하였다. 또한 방전셀 전체에 최대의 냉각효율을 내도록 설계하였는데, 위에서부터 총 122개의 구멍을 뚫었으며, 챔버 내부의 상대를 고려하여 최대한 많은 표면적을 차지하도록 하였다. 음극을 알루미늄이나 세라믹을 사용하여 방전 불특과 분리 시켜놓음으로 해서 직접적인 방전블록으로의 열 전달을 피할 수 있도록 하였다. 방전셀 내부를 진공상태로 만들기 위해서 환풍기체가 들어가는 부분과 나오는 부분, 즉 진공펌프와 연결되는 부분을 제외하고 모든 연결부분은 O-ring를 이용하여, 외부 공기의 유입이 없도록 하였다. 본 실험에서는 효과적인 스퍼터링을 위하여 음극관 전체를 순도 99.96%의 구리로 만들었고, 그 구조는 원통형 관으로서 외경이 20 mm, 내경이 4.0 mm, 길이가 50 mm이 되도록 디자인하였다. 음극에 대응하는 전극인 양극도 음극관과 동일한 재질인 구리로 만들었으며, 구조는 외경 20 mm, 내경 2.0 mm, 길이 5.0 mm의 원통형 관 형태이다. 방전 블록의 재질은 SUS 304를 사용하였으며, 구리의 방출선을 관찰하기 위하여 방전셀의 양면에 Quartz viewport를 위치시켰다.

전원 공급장치로는 2 kV/1A(KSC DC power supply)와 2 kV/2A(KSC DC power supply)의 출력을 가진 두

종류의 power supply를 사용하였으며, 높은 전압을 이용함으로 인해 300 W/1 kΩ의 저항 4개를 병렬로 연결하였다. 전원공급장치를 연결에 있어, 이전에는 MDC 사(Hayward, USA)의 feedthrough를 사용하였으나, 본 연구에서는 실험실에서 고전압배전류에서도 안정하게 전원을 공급하기 위하여 Fig. 1(b)과 같이 전극연결부를 자체 제작하여 사용하였다. N.V.F.I.N.O.R MOTORS(Elnor, Belgium)의 Rotary vacuum pump(B-3150-HAACHT)를 사용하여 방전셀 내부를 1.0~5.0 Torr로 유지하였으며, GRANVILLE-PHILLIPS(Altamonte Springs, USA)의 압력 게이지(275 MINI CONVECTRON)로 방전셀 내부의 압력을 측정하였다. 완충기체는 프레스에이코리아(주)의 Ar(99.9999%), He(99.99%), Ne(99.999%)등을 사용하였으며, 이들 완충기체를 Brooks사(Hatfield, USA)의 MFC (Mass Flow Controller)를 이용하여 방전셀 내부로 유입되는 완충기체의 양을 조절함으로써 안정한 방전을 유지하였다. Princeton Instruments(Trenton, USA)의 CCD(Charge Coupled Device)에 입사시켜 구리의 방출선을 관찰하였다.

이와 같은 시스템을 이용하여 방전 기체의 종류에 따른 특성과 압력 및 전류, 음극의 길이 및 내경, 음극과 양극사이의 거리등에 따른 특성을 조사하여 보았다. 또한 이전의 실험에서는 최대 출력이 0.2 A, 1 kV인 power supply를 사용하였는데, 이 실험에서는 보다 더 높은 전류와 전압에서 실험하기 위하여, 최대 출력이 1 A, 2 kV인 power supply를 사용하였다. 보다 많은 구리 원자를 발생시키기 위해서 예열 시간을 약 1시간동안 50~70 mA의 방전을 유지하였고, 모든 데이터는 예열 1시간 이후부터 얻어서 기록하였다.

결과 및 고찰

음극관의 길이변화에 따른 구리방출선의 관찰

글로우 방전에서 음극관 형태의 변화는 방전셀 내부의 구피 변화를 초래하므로 구리원자의 밀도 변화와 깊은 관련이 있다. 이 실험에서는 아르곤과 네온 환경에서 음극관의 길이를 30 mm에서부터 70 mm 까지 변화시켜 구리의 방출선을 관찰하였다.

Fig. 2(a)는 아르곤 (Ar)을 완충기체로 하고, 음극관의 길이를 30 mm에서부터 70 mm까지 변화시켰을 때의 전류에 따른 방출선의 변화를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보는 바와 같이 300 mA에서 Cu 510.6 nm의

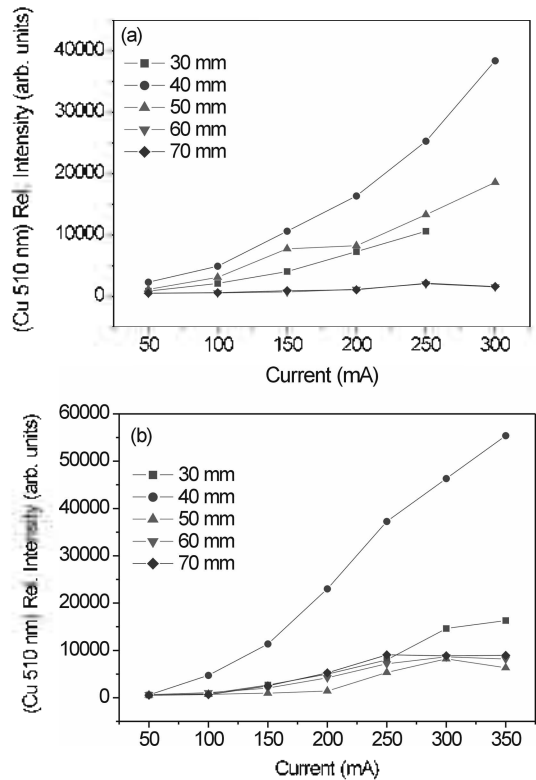


Fig. 2. Intensity line change in Cu 510.6 nm according to cathode length. (a) When Ar is used as buffer gas, (b) When Ne is used as buffer gas.

세기는 음극관의 길이가 40 mm일 때 가장 높았으며, 음극관의 길이가 60 mm 이상일 때는 플라즈마가 매우 불안했을 뿐만 아니라 Cu 510.6 nm의 세기가 매우 낮았다.

Fig. 2(b)는 네온 (Ne)을 완충기체로 사용하여 길이 변화를 실험한 결과이다. 아르곤을 사용했을 때와 마찬가지로 음극관의 길이를 30 mm에서 70 mm까지 변화시켜 관찰하였으며, 350 mA에서의 Cu 510.6 nm 방출선의 세기는 음극관 길이 40 mm에서 가장 높음을 알 수 있었다. 네온을 방전가스로 사용하였을 경우에도 길이가 50 mm 이상에서는 플라즈마가 불안하였고, 50, 60, 70 mm일 경우에 길이 40 mm를 사용하였을 때보다 Cu 510.6 nm 방출선의 세기가 크게 낮았다.

위의 결과로부터 아르곤의 경우에는 음극관의 길이가 60 mm 이상일 때, 네온의 경우는 50 mm 이상이 되면 음극관의 길이가 길어질수록 sputtering이 약해져 Cu 510.6 nm 방출선의 세기가 더 이상 증가하지 않는다는 것을 알 수 있었으며, 아르곤 (Ar)과 네온 (Ne)의 경우

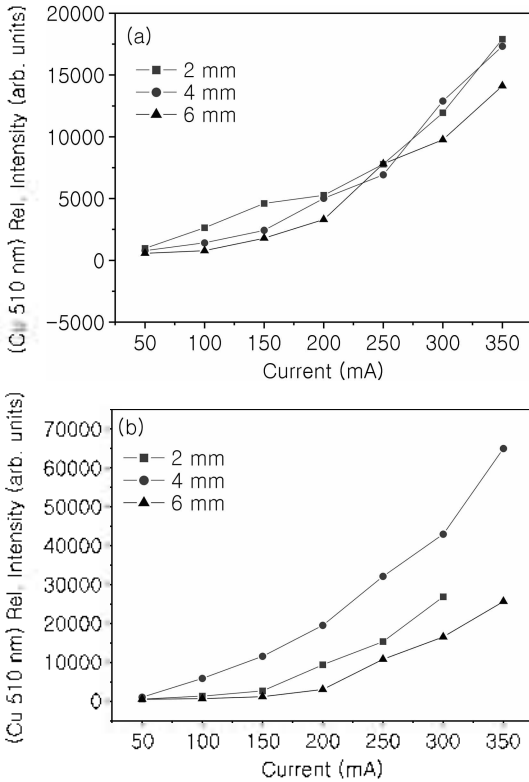


Fig. 3. Intensity line change in Cu 510.6 nm according to cathode diameter. (a) When Ar is used as buffer gas, (b) When Ne is used as buffer gas.

최적의 음극관 길이는 약 40 mm가 적당하다는 결론을 얻을 수 있었다.

음극관의 내경변화에 따른 구리방출선의 관찰

한편, 음극관의 내경변화도 구리 방출선의 크기에 영향을 주는 요인임을 확인하였다. 음극관의 내경을 양극관의 내경과 같은 2.0 mm에서부터 6.0 mm까지 변화시켜 관찰하였다. Fig. 3와 4에는 아르곤(Ar)과 네온(Ne)을 각각 방전가스로 하여, 음극관의 내경변화에 따른 구리방출선의 변화를 나타내었다. 아르곤을 방전가스로 350 mA의 전류를 흘려준 결과, 음극관의 내경이 양극관의 내경과 같은 2.0 mm일 경우 Cu 510.6 nm 방출선의 세기가 가장 큰 값을 나타내었다. 내경을 4.0 mm로 하였을 경우 Cu 510.6 nm 방출선의 세기가 내경 2.0 mm를 사용하였을 경우와 비슷함을 알 수 있으나, Cu 521.8 nm 방출선 세기를 비교해보면 내경 2.0 mm를 사용하였을 때 더욱 큰 값을 알 수 있다. 네온을 방전가스로 사용하여 실험하였을 때는 300 mA의 전류에서 음극관의 내경이

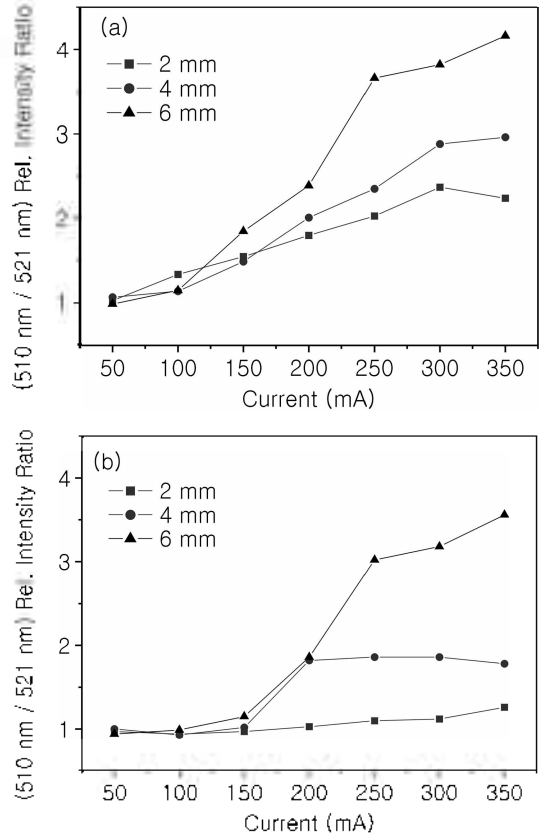


Fig. 4. Intensity ratio change in Cu 510.6 nm and Cu 521.8 nm according to cathode diameter. (a) When Ar is used as buffer gas, (b) When Ne is used as buffer gas.

4.0 mm일 때 Cu 510.6 nm 방출선의 세기가 가장 컸으며, 또한 Cu 521.8 nm의 비율도 가장 높음을 알 수 있었다.

이처럼 음극관 내경의 최적조건은 방전가스의 종류에 따라 다른 결과를 나타내었으며, 아르곤을 방전가스로 사용하였을 때는 2.0 mm, 네온을 사용하였을 경우에는 4.0 mm일 때 가장 효과적인 sputtering을 일으킬 수 있었다. 이것은 방전가스 원자들의 크기가 클수록 음극관 내경은 작아야 더욱 효율적인 sputtering을 일으킨다는 것을 의미한다.

음극관 길이 및 내경 실험의 결과, 아르곤(Ar) 완충기체를 사용했을 경우 최적화된 전류 값은 250 mA였고, 네온(Ne)을 사용했을 경우에는 320 mA였다. 그런데 네온(Ne)의 경우 이보다 높은 전류를 흘려주었을 때 플라즈마가 불안해지는 현상을 나타내어, 이후의 실험에서는 아르곤 (Ar) 만을 완충기체로 하여 실험하였다.

음극관의 형태변화에 따른 특성관찰. 앞선 실험들의 결과를 토대로, 음극관 내부의 부피의 증가는 음극관 내부에 더 많은 수의 구리원자를 제공하고 이에 따라 구리 510.6 nm 방출선의 세기가 증가할 것이라는 가정이 가능하다. 따라서 내부 부피를 늘린 여러 가지 형태의 음극관을 제작하여 각각의 특징에 관하여 조사하였다. 기존의 음극관은 내부가 직선적으로 평행하게 뚫린 형태였으나 음극관의 내부 부피를 크게 하기 위해 Fig. 5와 같이 제작하여 보았다. 2-6-2 등과 같이 표시된 것은 mm의 길이 단위로 음극관의 내경 크기를 왼쪽에서부터 순서대로 적은 것이다. 참고로 좌측에 양극이 위치하며, 2-6-2 타입의 경우 좌측 끝부분부터 평행한 구간의 내경이 2.0 mm - 가운데 내경이 증가하는 부분에서 가장 큰 내경이 6.0 mm - 우측 끝부분까지 평행한 구간의 내경이 2.0 mm임을 표시하였다. 동일 형태인 음극관 중앙부분의 내경을 변화시켜 보았고, 좌우 끝부분의 내경도 변화시켜 실험해 보았으며, 좌우 끝부분의 내경을 각각 다르게 하여서도 실험하였다. 그 중에서 그림에 나타난 4-11-2는 구리원자를 더 오래 동안 음극관 내부에 머물도록 디자인한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 좌우 대칭형의 음극관도 제작하였으며, 비대칭형의 전극은 좌우를 바꾸어서 실험하였다. 그 결과 Fig. 5의 상단에 나타난 것과 같은 비대칭형이면서 좌측으로 완만한 경사의 음극관이 가장 효율적인 것을 알아낼 수 있었다(Table 1 참조).

음극관의 형태에 따른 실험결과를 Table 1에 나타내었다. 이상적인 형태의 음극관을 사용하였을 경우 Cu 510.6 nm 방출선의 세기가 커야하고, Cu 510.6 nm 방출선과 Ar 방출선의 세기비가 커져야한다.

2-11-2 모양의 음극관을 이용하여 실험하였을 경우에 2-6-2 모양의 음극관을 사용하였을 때보다 Cu 510.6 nm 방출선 세기, Cu510.6/Cu521.8, Cu510.6/Ar749.8 모든 값이 증가함을 알 수 있었고, 이는 4-11-4와 4-6-4의 경우에도 동일함을 확인하였다. Table 1의 결과에서 알 수

Table 1. Comparison results of various cathode types

Type (비대칭형)	Cu510 Intensity	Cu510/Cu521 Intensity	Cu510/Ar749
2-6-2	36000	2.40	6.18
2-11-2	45000	2.46	7.33
4-6-4	43000	2.90	7.04
4-11-4	48000	3.22	7.15
4-6-2	43000	2.57	6.34

Table 2. The optimal conditions of HCGD from experiments

방전 요인	최적 조건
방전 가스	이르곤 가스 (99.9999 %)
가스 유입량	100 SCCM
방전 압력	2.3 Torr
입력 파워	420 W (600 V / 700 mA)
*음극관 형태	내경 4-11-4 mm 길이 15-20-5 mm

*앞에서부터(sputtering 구간)-(내부부피 증가구간)-(구리원자 트랩구간)

있듯이 4-11-4를 사용하였을 경우, Cu 510.6 nm 방출선 세기와 Cu510.6/Cu521.8 값이 다른 형태의 음극관의 결과에 비해 상당히 높았으며, Cu510.6/Ar749.8 값은 2-11-2 형태의 음극관의 결과와 유사하였다.

좌우 대칭형 음극관의 경우, Table 1에 나타난 5가지 모양의 음극관에 비해 Cu 510.6 nm 방출선의 세기가 너무 낮거나 방전이 불안한 등 그 결과가 미미하여 결과에 포함시키지는 않았다.

따라서 음극관 내부 부피가 증가함에 따라 Cu510.6/Ar749.8의 크기가 증가한다는 사실을 알아내었고, 본 실험에 사용된 방전셀 디자인에서는 4-11-4 형태의 음극관이 다른 경우에 비하여 이상적인 형태임을 확인할 수 있었다.

Sputtering range 변화에 따른 구리방출선의 관찰 본 연구의 이상적인 모델인 4-11-4 형태의 음극관으로

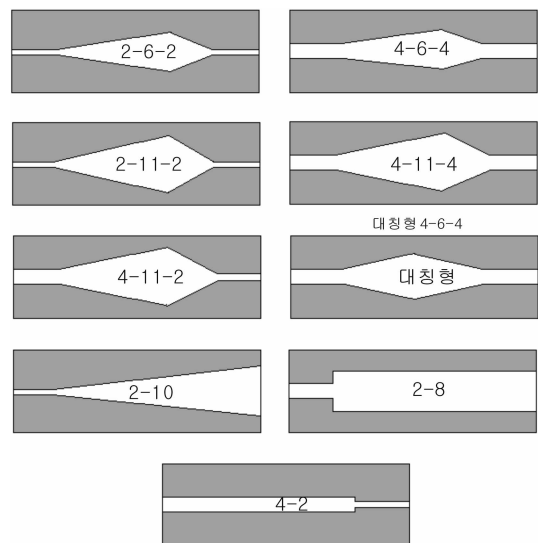


Fig. 5. Various cathode types used in experiments.

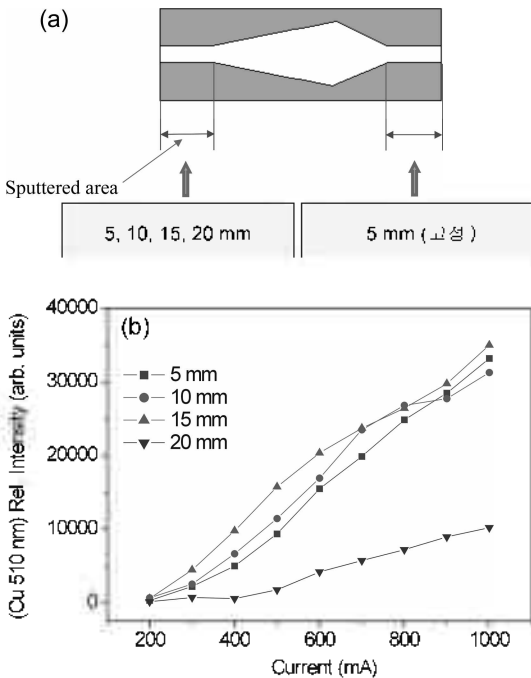


Fig. 6. Sputtering range test. (a) Diagram of copper cathode. (b) Intensity change of Cu 510.6 nm.

Cu 510.6 nm의 방출선 세기가 더욱 효과적으로 증가하는 sputtering range를 조사하여 보았다. Fig. 6(a)에서 나타난 것처럼, 양극쪽을 향해 있는 음극관의 평행한 끝부분을 5.0, 10, 15, 20 mm로 변화시켜 테스트하여 보았다. Fig. 6(b)는 그 결과를 나타내는 그래프이다. Sputtering range를 20 mm로 하였을 경우 방전은 매우 안정하였으나 Cu 510.6 nm 방출선의 세기가 가장 낮음을 알 수 있다. 또한 Sputtering range를 5.0, 10, 15 mm로 했을 경우에 Cu 510.6 nm 방출선 세기가 비교적 크다는 것을 알 수 있었다. 그러나 Sputtering range가 15 mm인 음극관을 사용하였을 경우 Cu 510.6 nm 방출선의 세기의 증가가 Cu 521.8 nm 방출선 및 Ar 방출선들의 세기의 증가에 비해 상당히 커지는 것이 관찰되었다. 따라서 효율적인 Sputtering이 일어나는 범위는 15 mm인 것을 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

본 실험에서는 수냉식 냉각 시스템을 적용하였으나 GD Power supply의 전류가 800~1,400 mA일 경우 sputtering이 일어나는 구리 음극관의 좌측부분이 거의 녹아내려 집진기로 빛이 전달되지 않는 현상이 발견되었다. 한가지 흥미로운 사실은, 일반적으로 고순도의 구리 녹는점은 1,084.5 °C 이므로 이러한 현상으로 방전

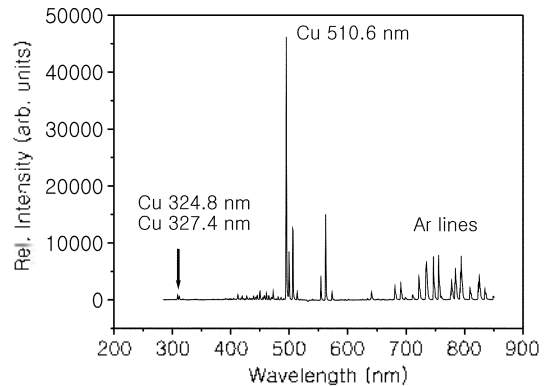


Fig. 7. A spectrum under optimal conditions.

셀 내부의 온도가 최소한 1,000 °C 이상에 도달한 것을 간접적으로 관찰할 수 있었다는 것이다. Fig. 7은 본 연구에서 적용된 실험조건을 최적화하였을 때의 플라즈마를 찍어 놓은 스펙트럼이다. 최적조건에서 행해진 실험에서는 이전에는 관찰할 수 없었던 진한 녹색 빛이 관찰되었고, Fig. 7에서는 방전가스인 아르곤 (Ar) 방출선들은 약하게 보이나 구리 510.6 nm 방출선의 세기가 커졌음을 관찰할 수 있었다.

결론

본 연구에서 이용한 관통형의 축 번 음극관 글로우 방전은 음극관의 형태가 관통형의 실린더 모양이며, 이로 인해 구리를 방전시킬 때 음극 sputtering을 이용하여 방전셀 내부에 매우 균일한 플라즈마를 생성하므로 고선압/세진류에서도 안정한 플라즈마를 생성함을 알 수 있었다.²⁸⁾

본 연구에서는 수냉식 글로우 방전셀을 제작하여 방전에 영향을 미치는 여러 가지 변수들 - 방전 전압 및 전류, 음극관의 길이, 내경 및 내부형태, 음극관의 sputtering range 등 - 에 대하여 최적화를 시도하였다. 그 결과, 최종적으로 디자인된 글로우 방전셀에서는 앞서 여러 가지 실험으로 최적화된 조건을 적용하였다. 최적화된 조건으로는 방전가스로 아르곤을 사용하고, 방전셀 내부에 아르곤 가스를 100 SCCM으로 일정하게 흘려주었을 때의 방전셀 압력은 2.3 Torr이며, 방전 전압 및 전류는 600 V, 700 mA(420 W), 음극관의 형태는 4-11-4 mm(sputtering 되는 구간의 내경: 4.0 mm, 음극관 내부부피 증가 구간의 내경: 11 mm, 구리 원자

트랩 구간의 내경: 4.0 mm), 음극관의 길이는 40 mm (sputtering 피크는 구간의 길이: 15 mm, 음극관 내부부피 증가 구간의 길이: 20 mm. 구리 원자 트랩 구간의 길이: 5.0 mm) 등이다.

위에서 열거한 최적의 조건에서 Cu 510.6 nm의 녹색 빛을 육안으로 관찰할 수 있었으며, 구리 음극관의 내부의 온도가 최소한 1,000 °C 이상일 것임을 간접적으로 확인하였다. 따라서 본 실험의 결과는 글로우 방전 구리증기 레이저 개발을 위한 기초 연구로서, 소형 구리증기 레이저 개발에 필요한 데이터를 제공할 것으로 기대된다.

본 연구는 경남대학교 학술논문 연구비 지원에 의하여 이루어져 이에 감사하길 바입니다.

인 용 문 헌

1. W. T. Walter, N. Solimene, M. Pilch, and G. Gould, *IEEE J. Quant. Elect.*, **1966**, *QE-2*, 474.
2. W. T. Walter, M. Pilch, N. Solimene, and G. Gould, *Bull. Am. Phys. Soc.*, **1966**, *11*, 113.
3. M. Pilch and G. Gould, *Rev. Sci. Instrum.*, **1966**, *37*, 925.
4. K. I. Zemskov, A. A. Isaev, M. A. Karzaryan, G. G. Petrash, A. V. Adamushko, M. V. Belokon, A. N. Rubinov, and P. G. Ebytkhovich, *Sov. J. Quantum Electron.*, **1979**, *6*, 727.
5. R. S. Hargrove and Tehmau Kan, *IEEE J. Quant. Elect.*, **1980**, *QE-16*, 1108.
6. J. I. Davis and E. B. Rockower, *IEEE J. Quant. Elect.*, **1982**, *QE-18*, 233.
7. M. A. Kazaryan, V. M. Matveev, and G. G. Petrash, *Sov. J. Quantum Electron.*, **1984**, *14*, 631.
8. A. Kearsley, SPIE Advent Technology Series, Vol. AT, **1991**, *1*, 68.
9. F. Paschen, *Ann. Phys.*, **1916**, *50*, 901.
10. M. R. Winchester and R. K. J. *J. Anal. At. Spectrom.*, **1990**, *5*, 9.
11. D. S. Gough, P. Hannaford, and R. M. Lowe, *Anal. Chem.*, **1989**, *61*, 1652.
12. M. R. Winchester, S. M. Hayes, and R. K. Marcus, *Spectrochim. Acta*, **1991**, *46B*, 615.
13. P. W. J. M. Boumans, *Anal. Chem.*, **1972**, *44*, 1219.
14. C. J. Belle and J. D. Johnson, *App. Spectrosc.*, **1973**, *27*, 118.
15. H. Bubert, *Spectrochim. Acta*, **1984**, *39B*, 1377.
16. B. M. Patel and J. D. Winefordner, *Appl. Spectrosc.*, **1986**, *40*, 667.
17. B. M. Patel and J. D. Winefordner, *Spectrochim. Acta*, **1986**, *41B*, 469.
18. W. W. Harrison, and B. L. Bentz, *Prog. Analyt. Spectrosc.*, **1988**, *11*, 53.
19. E. H. Daughtrey, D. L. Donohue, D. J. Slevin, and W. W. Harrison, *Anal. Chem.*, **1975**, *47*, 683.
20. W. Vieth and J. C. Huncke, *Spectrochim. Acta*, **1990**, *45B*, 941.
21. S. C. Lee, J. S. Sin, M. R. Kang, *J. Kor. Chem. Soc.*, **1995**, *39*.
22. S. C. Lee and J. S. Lee, *Anal. Sci. & Tech.*, **1998**, *1*, 11.
23. S. C. Lee and J. Y. Choi, *Journal of the Korean Chemical Society.*, **1999**, *43*, 358.
24. S. H. Lee, W. B. Cho, J. P. Jeong, W. C. Choi, S. Borden, K. W. Kim, C. S. Lee, S. C. Lee, *Anal. Sci. & Tech.*, **2002**, *15*, 6.
25. P. D. Mixon and S. T. Griffin, *Applied Spectroscopy*, **1993**, *47*, 1705.
26. J. C. Williams, J. Y. Kung, *Appl. Spectrosc.*, **1995**, *49*, 1705.
27. J. S. Woo, H. K. Park, Y. S. Kim, K. S. Choi, S. C. Lee, Kyungnam University, manuscript in preparation.
28. B. Chapman, "Glow Discharge Processes", Wiley Interscience, New York, 1980.
29. W. Grimm, *Z. Naturwissensch.*, **1967**, *54*, 586.