

Slot형 구리 이온 레이저

송순달 · 홍남관

한서 대학교 물리학과

(1997년 5월 2일 받음)

Slot형의 구리 이온 레이저를 제작하여, 780 nm 레이저 동작을 위한 장치구조의 안정성과 특성을 조사했다. 구리 이온 레이저의 최대 출력을 다양한 동작조건 범위에서 측정했다. IR-레이저의 출력은 음극의 기하학적 구조, 방전전압, 그리고 기체압력에 주로 의존했다. 네온의 부분압력이 60%에 이르면 출력이 감소 하였으며, 그 이유 중에 하나는 높은 레이저 준위의 Population이 감소했기 때문이다. 파장 780 nm는 레이저 전이가 구리 이온의 5p 준위에서 일어난다. 통형음극을 사용하는 본 실험의 레이저 장치는 헬륨과 네온 혼합기체 방전에서 동작되고, 100시간 동안의 방전시간 후에 출력감소가 35%이었다(활성길이 9.6 cm에 대한 출력은 2.8 mW).

I. 서 론

1974년에 처음으로 IR 영역의 파장 780 nm에서 구리 이온 레이저의 발진이 통형음극방전(Hollow cathode discharge : HCD)에 의하여 이루어 졌다.^[1] 이 방법은 오래 전부터 가스레이저 종류에서 많은 장점을 나타내는 특별한 모형의 방전이 었다.^[2,3] 구리 이온 레이저는 구리 원자 레이저와는 달리 금속 이온 레이저 종류에 속하는데, 동작원리가 완전히 다른 여기 된 구리 이온이 레이저의 활동 매질이 된다.

쉽게 증발시킬 수 없는 물질 즉, Cu, Ag, An, Al, Ni등은 금속증기를 만들기 위해서 때려내기(sputtering)효과를 이용한다. 즉, 불활성기체 이온과의 충돌로 금속원자가 음극의 표면에서 분리 되어 나와 이온화 되고 여기된다. 이 방법이 본 논문에서 구리 이온을 생산하는 기법으로 사용되었다. 일반적으로 구리 이온 레이저는 비교적 낮은 수 암페어의 전류가 요구되는 아주 간단하고, 값싼 광원으로 알려져 있다. 구리 이온 레이저의 특별한 흥미는 cw로 UV영역(248-270 nm)에서 출력 1 W, 그리고 IR영역(740-200 nm)에서 출력 3.4 W 이며, 오늘날 까지 58개의 레이저전이가 발견되었다.^[4-6] Brunner 와 Junge 가 cw의 He-Cd-Laser로 325nm 파장을 발견한 것이 상업적인 레이저로서는 가장 짧은 파장이었다.^[7] 구리 이온 레이저의 장점은 다음과 같이 요약할 수 있다.

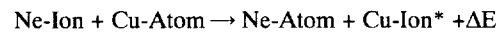
- 1) cw 동작(UV or IR 영역)
 - 2) 좋은 빔질(균질의 빛)
 - 3) 간단하고 저렴한 제작비
 - 4) 다양한 응용 가능성(의학, 분광학)
- 몇 가지 주요한 응용 가능성은
- 1) cw 색소레이저의 펌핑광원^[8-11]
 - 2) DNS분자의 조사연구^[12]
 - 3) 광전자 방출 현미경^[13,14]
 - 4) 광 Lithography^[15,16]
 - 5) CO₂-TEA-Laser의 사전이온^[17]등 이다.
- 구리 이온 레이저의 동작시 일어날 수 있는 문제점들 중에

는 방전시간이 경과 됨에 따라 변형되는 음극이 가장 해결하기 어려운 문제점이다. 또 다른 문제점은 빔질의 향상을 위해 균일한 방전조건을 갖추는 점, 특히 UV 발진시에 이온확산에 의해 레이저 거울의 더러워짐과, 기체의 불결함, 그리고 비교적 아주 낮은 효율 0.2_{0/00}^[18]등이 되겠다. 기체문제는 액체질소 냉각으로 해결이 가능하며, 거울문제는 가열된 거울을 사용 함으로써 해결이 가능하다.^[19,20] 음극의 변형문제는 요구조건에 맞는 모형을 찾아 지속적인 연구가 필요한 분야이고, 본 논문에서는 slot형 음극에 대해 동작특성을 연구하고자 한다.

II. 구리이온 레이저

2.1 에너지 준위

그림 1에 구리, 네온 그리고 헬륨 이온의 에너지 준위가 나타나 있다. 구리 이온 레이저는 불활성기체를 사용하여 통형음극 방전으로 동작되며 구리증기는 때려내기(Sputtering)를 통해서 생산할 수 있다. 전하전달 충격(Charge transfer impact)은 불활성기체 이온과 구리 원자 사이에서 일어나며, 여기된 구리 이온과 불활성 기체원자가 결과적으로 생성된다.



위의 과정을 위한 반응 단면적은 충분히 크므로, 이 반응에서 에너지 손실(ΔE)은 0.1에서 0.4 eV에 속한다.^[21] 5S 준위의 구리 이온은 네온 이온의 준위보다 조금 낮으므로 전하전달 충격을 통해 여기가 이루어 지며 250 nm의 UV를 방출하고, 헬륨과 구리 이온 충돌에서는 구리 이온의 준위를 6S 까지 여기시키고, IR영역의 780 nm를 방출한다. 5P 준위는 특별한 의미는 없으며, 4P준위는 전자충격에 의해 4S 준위, 즉 준안정상태로 떨어진다. 이 준위는 레이저 출력을 감소시키는 원인이 되며, 공명기 벽으로의 확산을 통해 또는 낮은 이온화 에너지를 가진 불활성 기체와의 충돌로 준위가 비워 지게 된다. 5S 와 4P 준위의 수명이 상대적으로 짧으므로 구리 이온

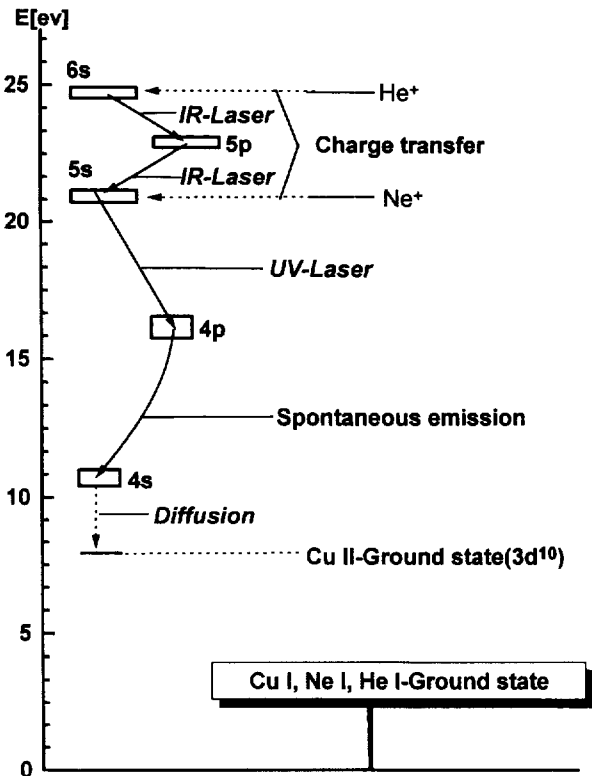


그림 1. 구리이온 레이저의 에너지 준위

레이저는 cw 나 펄스 동작이 모두 가능하다.

2.2 구리증기의 생산

레이저 발진에 요구되는 구리 기체수(10^{14} 원자/cm³)를 생산하는 방법으로는 3가지 종류의 기법이 일반적으로 사용되고 있다.

1) 열적증발 : 쉽게 증발하는 금속(Cd, Se, Zn, Hg, As, Ti) 등은 기체방전이나 혹은 외 부에서 열을 가해서 이루어진다. 구리 원자 레이저는 구리의 높은 용융점 때문에 진공 장치 부분에 파손을 일으킬 수 있으므로, 이런 방법으로는 해결 해야 될 문 제점이 아직 남아 있다. 그러나 He-Cd-Laser 에서는 이 방법이 큰 효과를 얻고 있다.^[22]

2) 때려내기법 : 비교적 쉽게 증발되지 않는 금속 (Cu, Ag, Au, Al, Ni)들은 기체방전 동안 기체 이온의 충돌로 인해 금속 원자가 음극 표면에서 분리 되어 나와 이온화가 이루어지고, 불활성기체의 전하전달 충격으로 이온화된 금속원자는 또다시 여기된다. 구리 이온 레이저에서는 이 방법을 이용하고 있다.

3) 전자충격으로 인한 할로겐화 구리의 분리 : CuCl, CuBr 혹은 CuI와 같은 화합물은 약 400°C에서 기체화 되고 구리 원자의 분리가 이루어 진다. 이 방법도 해결해야 될 불순물 제거등 많은 장치 제작상의 문제가 포함되어 있다.

그림 2는 구리기체 발생을 위한 통형음극방전(HCD)의 모 형도를 간단히 나타낸 그림이다. HCD는 오래 전부터 가간섭 성이 아닌 광원의 금속 스펙트럼 연구에 사용되어 왔다.

모형에서 처럼 음극 면을 알맞은 간격으로 서로 마주보게 하여 기체방전을 일으켜, 희미한 빛이 서로 중복되면서 강하 게 빛 나는 영역 그림 2 (a)이 형성되면 HCD가 된다.

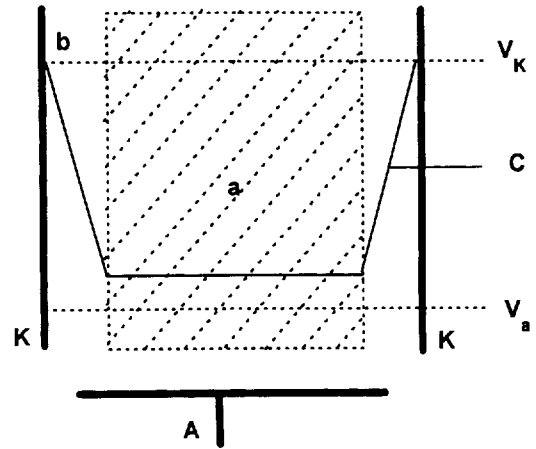


그림 2. 통형음극방전(HCD) 모형 V_k-음극전위, V_a-양극전위 a-(음극)희미한 영역, b-(음극)어두운 영역 c-전위선, K-음극, A-양극

HCD는 음극면을 충분히 가까이 하여, 기체압력(P)과 음극사이 간격(D)의 곱이 아래 식의 범위 내에 오도록 이 값 들을 정한다.

$$P \cdot D = 0.5 - 5.0 \text{ mbar} \cdot \text{cm}$$

일반적인 기체방전에 비해서 HCD의 독특한 장점은 전자 들의 에너지 분포인데, 맥스웰 분포가 아닌 에너지 값이 높은 전자수가 많은데 있다. 이 고에너지 전자는 기체이온이나 금속속이온 발생에 아주 적합하여, 불활성 기체 금속속이온 레이저 종류에 이 방법이 많이 사용된다.

2.3 가로 방전 모형

HCD로 동작되는 구리이온 레이저는 그림 3과 같이 간단한 모양으로 제작할 수 있다. 가로 방전과 세로방전의 모형을 선택할 수 있으며, IR발진을 위해선 적어도 수 cm 의, UV 영역 발진은 IR 의 수 십배의 활성 길이가 요구된다.

이 구조장치는 두 개의 구리 전극과, 두개의 레이저 거울 ($\lambda=780 \text{ nm}$ 에서 $R_1=99.75\%$, $R_2=75\%$ 그리고 $r=1 \text{ m}$), 그리고

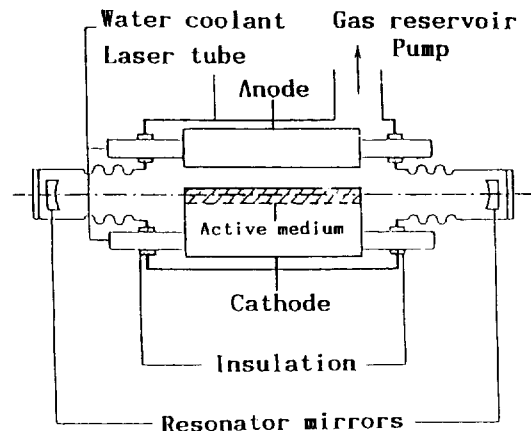


그림 3. 가로방전 모형

펌프와 기체통으로 연결된 진공챔버로 이루어 졌으며, 유연성 있는 실린더 모양의 관 사용은 광축 정열시 공명기 내부에 장치된 레이저 거울을 쉽게 조절가능 하게 한다.

버퍼 기체는 순도 높은 헬륨, 아르곤 그리고 네온이 사용되고, 진공 챔버에는 0-30 mbar기체를 채운다. 열 발생이 높은 두 전극은 물을 사용하여 효과적으로 냉각시켜야 하며, 두 전극 사이에 250 V 이상의 전압을 걸면 기체방전이 일어난다. 공명기 속에 장치된 레이저 거울의 정열은 외부에서 가능하도록 되었는데, 이는 UV 에서와 같이 증폭계수가 아주 낮은 장점을 가지며, 또는 부르스터 창을 장치할 경우처럼 많은 공명기손실이 일어나는 한 내부에 장치 하여야만 한다.

UV 영역 발진에서는 증폭율이 m 에 수 %이지만 IR 영역 발진은 10%/m에 달한다.^[23] 구리이온 레이저의 실질적인 제작을 위한 요구조건은 다음과 같다.

- 1) 높은 출력
- 2) 적은 입력전류
- 3) 긴 수명
- 4) 간편한 제작
- 5) 안정된 동작조건
- 6) 질 좋은 빔

III. 실험장치 및 방법

사용한 전원은 0 V 에서 580 V 까지 조절 가능한 직류전원으로 최대 100 A 까지 전류를 높일 수 있다. 전해질 축전기의 전체 용량을 3650 μ F가 되게 병렬로 연결하여 출력을 높였다. 음극의 표면을 깨끗이 하고, HCD를 쉽게 일어나게 하기 위해 여러 가지 다양한 제작방법이 있지만 구리통형음극(Copper hollow cathode)을 극대화 하기 위해선 긴 원통형의 모형을 사용한다. 방전수명을 길게 하기 위하여는 여러 가지 모양의 음극이 개발되어 왔지만, 방전시 일어나는 문제점들을 이상적으로 해결해 주는 모델은 아직 없으며, 현재까지 사용 되어온 여러 가지 변천모양을 그림 4에서 보여 주고 있다. 처음 시도된 a, b)모형에서 c, d, e, f)모형으로 변형되고, 다시 h)도 최근에 연구되었다. 이 과정들은 P와 D의 값이 HCD의 구비조건이 되도록 하여, 음극에서 이탈된 구리 원자가 가능한 원래구조에서 벗어나지 않게 하기 위해 시도된 모형으로, 동작시간이 경과되면서 각 모델들은 예측하지 못한 문제점들이 발생하였다.

본 연구에서는 모델 e)에서 개선된 g)의 Slot형 음극으로 가로방전 모형에서 각각의 음극을 서로 비교하여 가능한 한 효과 높은 안정된 방전방법을 찾으려고 새로운 공명기 구성을 하였다. 진공은 10^{-5} mbar에 도달하고 사용한 기체의 순도는 헬륨(99.999%), 네온(99.99%)이었다.

레이저빔의 측정은 광전지로 오실로스코프에 연결해 상대적인 강도를, 레이저 출력은 Thermopile(Modell175, Ser.N0. 309, Laser instrumentation LTD)을 사용하여 측정했다.

통형음극의 방전조건을 기술하기 위해선 UV 보다는 증폭률이 높은 IR 발진을 측정하는게 보다 손쉬운 관계로 레이저 매질의 길이도 UV 보다 짧은 구조를 택했으며, 일반적으로는

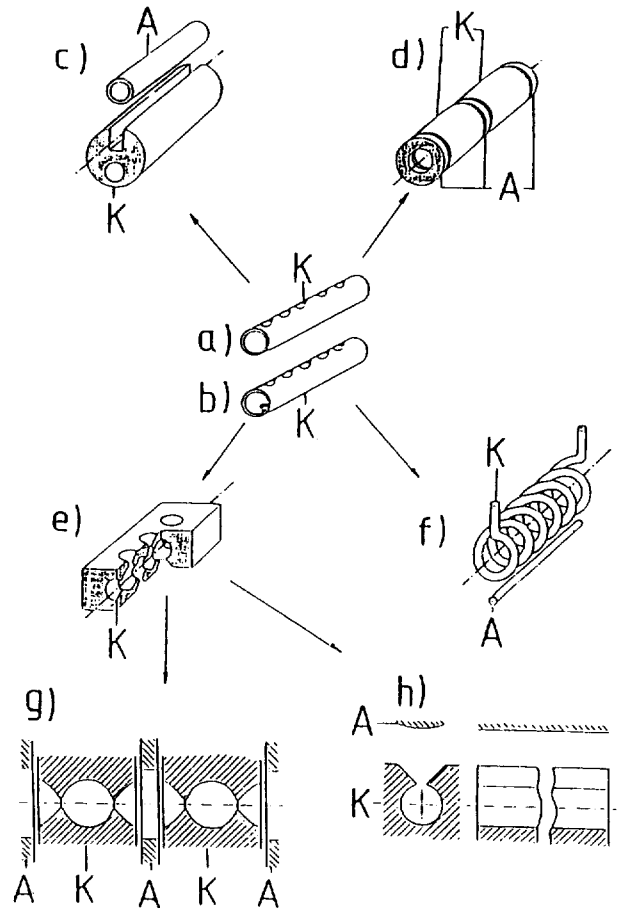


그림 4. 통형음극의 모형 발전과정

IR 발진이 만족되면 활성길이를 길게 하여주고, 실험 변수들을 적당히 선택하면 UV 발진도 가능하다. 실험 값의 정리는 전기적 특성곡선및 출력을 먼저 조사하고, 방전 전압과 주어진 전류 값으로 음극의 특성과 수명을 조사한다.

IV. 실험결과

이상적으로는 6 개의 각 Slot형 음극이 동일한 방전특성을 가져야 하지만, 실제로는 각 음극의 전압전류특성이 서로 조금씩 다른 이유는 눈으로 확인 안되는 음극간의 미소간격(D) 차이 때문에 일어난다. 이 전압특성 곡선은 방전이 용이한가, 아니한가를 구별할 수 있는 변수가 되며, 구리표면의 깨끗한 정도에 따라 다르며, 방전시 일어나는 표면의 기름막, 먼지, 물피막등이 특성곡선에 영향을 미친다. 전류 값은 직접 전류 계로 읽으며, 균일한 방전을 위해선 낮은 전류값 으로부터 방전을 하면서 음극 표면의 불필요한 이 물질들을 열 증발시켜 제거해 주어야 한다. 전기적인 변수가 발진에 근본적인 영향을 끼친다. 이유는 방전전압이 음극 표면에서 이온의 운동에너지를 직접적인 영향을 주기 때문이다. 그림 5는 Slot형 음극의 방전전류에 따른 IR-레이저 출력을 나타내고 있다. 네온의 부분압력은 0.2 mbar로 고정하고, 헬륨압력을 9 에서 27 mbar 사이에서 변화해 가면서 측정하였다. 음극에 흐르는 전류와 레

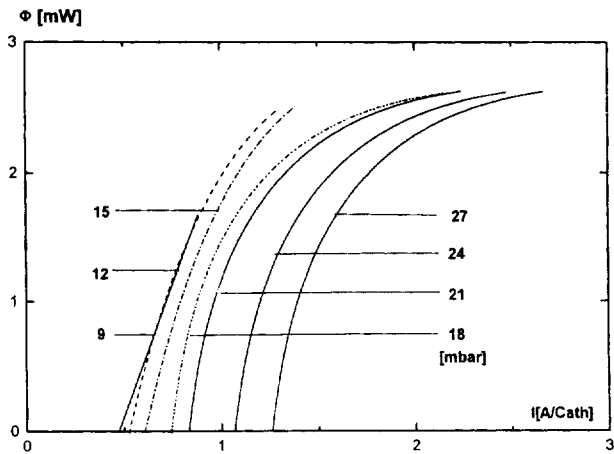


그림 5. IR-레이저 출력의 전류 의존성, 네온부분압력(0.2mbar) 헬륨부분압력(9-18mbar)

이러한 출력사이의 관계는 전류 값의 증가에 따라 레이저 출력이 계속 증가하며, 전류가 2 A/Cath. 이상이 되면 출력이 거의 포화치가 됨을 알 수 있고, 감소되는 헬륨 압력에선 낮은 방전 전류가 요구됨을 알 수 있다.

그림 6에서는 일정한 네온 압력하에 헬륨기체 압력을 변화시키면서 방전전류와 전압과의 관계를 나타내었다. 측정된 기체압력 9-27 mbar사이에서는 레이저 출력이 일정할 때 음극에 흐르는 전류는 전압에 비례함을 알 수 있다. 네온 기체의 양이 일정치(약 60%)를 넘으면 출력이 급격히 저하됨을 알 수 있는데, 이유는 높은 이온화 에너지인 헬륨의 전하전달 충격이 상대적으로 감소하여 일어나는 현상으로 볼 수 있다.

그림 7은 일정한 네온 부분압력(0-0.6 mbar)에서 음극 전류에 대한 방전전압과의 관계를 나타내며, 여기서 변수는 네온 기체압력이며, 전체 기체압력은 27 mbar이다. 음극 No.1에서 No.6까지의 각각의 전압전류 특성은 무시할 수 있을 정도로 미소하며, 네온 기체의 양에 따른 차이는 작은 전류에서 낮은 전압이 요구되고, 전압은 각 음극에서 전류에 비례하는 양임을 알 수 있다.

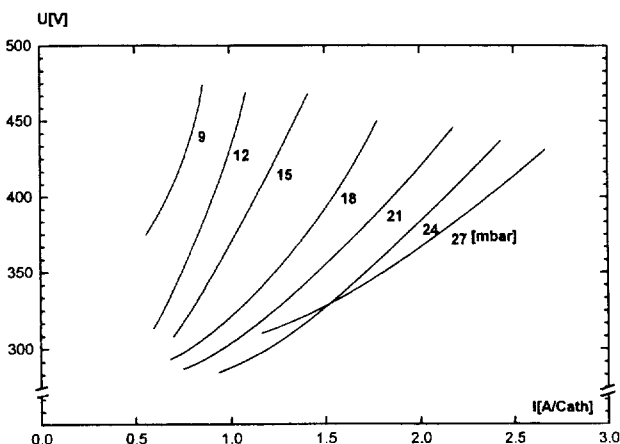


그림 6. 일정한 네온압력(0.2mbar)하에서 전류값에 대한 방전전압의 관계

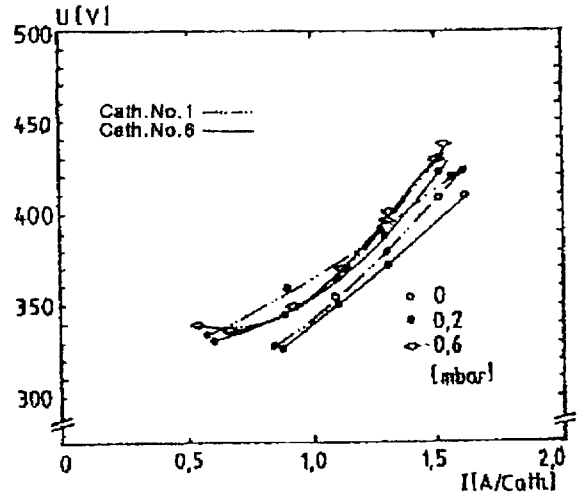


그림 7. 네온의 부분압력을 변화(0 - 0.6mbar)할 경우 전류전압 특성곡선(slot형 음극, 전체 기체압력; 27mbar)

방전시간이 경과함에 따라 각 음극의 구조변경을 눈으로도 충분히 구별할 수 있는데, 기체이온의 충돌로 떨어져 나온 구리원자가 원래 제자리에 흡착되지 않고, 전장에 의해 다른 곳으로 이동되어 흡착되므로, 시간이 경과되면 출력의 감소가 일어나고, 이 모형에서는 100시간 방전 이후에 35%

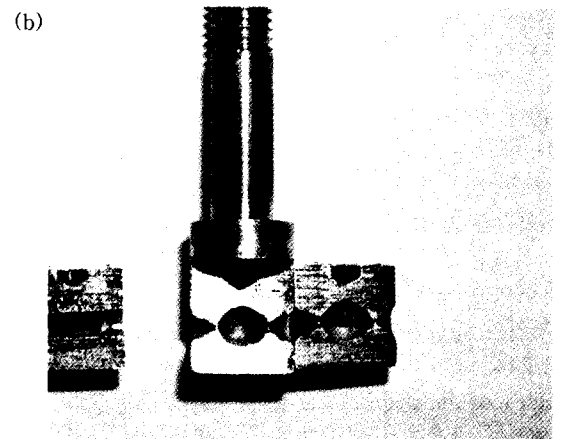
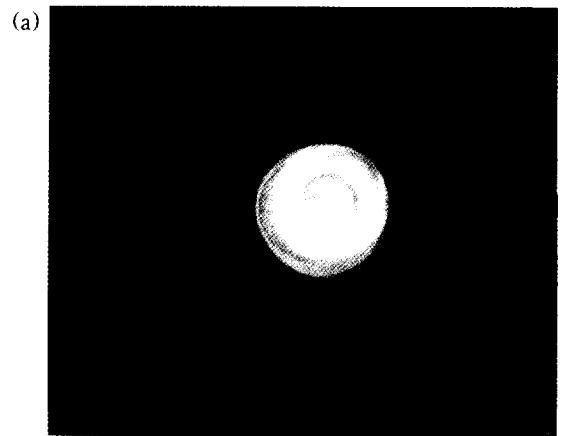


그림 8. (a) 30 시간 방전후에 찍은 빔사진 (b) 200시간 방전후에 침식이 일어난 음극

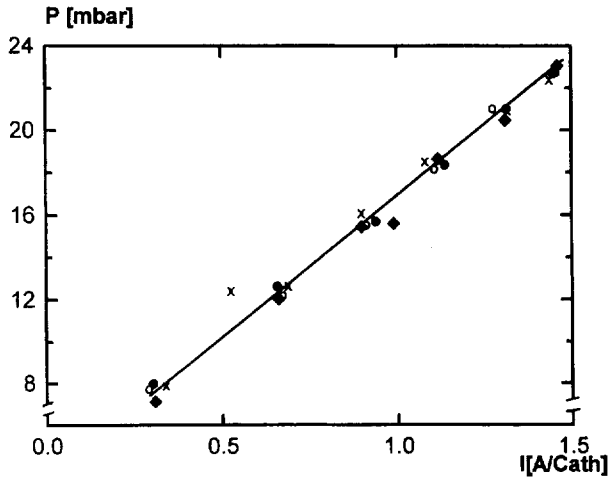


그림 9. 일정한 레이저 출력에서 전류에 대한 전체 기체압력과
의 관계

의 출력 감소가 있었다. 레이저 출력의 감소이후에는 계속해서 200시간의 방전동안 음극의 구조변화를 관찰했으며, 광 축쪽으로 음극입구가 현저히 좁아져서 레이저 출력측정은 의미가 없었다. 음극의 질량감소를 측정 한 결과 각각 (No.1-No.6) 0.2 g에서 0.3 g의 감소가 있었다. 질량감소 (Δm)의 평균값은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta m = 1 / 100 \text{ (g/hr.A.)}$$

그림 8 (a)의 사진에서 처럼 레이저 빔은 동심원처럼 나타났는데, 원인은 1.6 cm 길이 6개의 slot형 음극을 광축 정렬 하는 데서 생기는 오차 및 회절현상에서 온 것이며, 30여 시간의 방전 후에 찍은 사진이다. (b)는 발진이 더이상 일어나지 않는 상태로 200시간 동안 방전한 후에 음극을 광축방향으로 자른 것으로 원래 모양에서 많이 변형되었고, 질량감소도 0.2 g 일어났다.

Slot형 음극에서 출력을 일정하게 고정하고, 전류와 기체 압력과의 관계를 그림 9에 나타 내었다. 네온기체 압력을 0, 0.2 그리고 0.6 mbar로 변화시켜도 전류에 대한 압력과의 관계에서 변화를 찾을 수 없고 비례하는 특성곡선을 나타내고 있다. 낮은 기체 압력에선 0.3 A의 작은 전류 값에서도 방전이 순조로와 출력을 유지할 수 있었다.

V. 결 론

구리 이온 레이저의 기본원리, 그리고 통형음극방전(HCD)에 대한 장점 및 이를 금속 레이저에서 사용하는 점에 대해 논의 하였다. 새로운 구조의 Slot형 음극을 제작하고, 가로방전형으로 공명기를 제작하여 동작 특성곡선에 대해 조사하였다. 이 장치구조의 방전에 대한 전기적 특성 및 레이저의 동작특성을

비교하여 출력의 최적 조건을 찾았으며, 최대 출력은 음극 길이 9.6 cm에서 2.8 mW이었다. 이 값은 음극의 변형이 많이 일어나지 않은 초기상태의 출력이었으며 방전시간이 경과함에 따라 음극의 변형 즉 침식이 현저하게 일어났다. 전류와 시간에 대한 침식비율 및 기하학적 구조 변형등은 계속적인 연구가 필요한 분야이다. 본 연구에서 이 구조에 대한 방전의 안전성은 비교적 저전류값(1.5 A/Cath.)에서 최적상태로 질량감소율 $\Delta m = 1/100 \text{ (g/hr.A.)}$ 이 일반적인 HCD보다 적었다.

참 고 문 헌

- [1] L. Csillag, M. Janossy, K. Roesza and Salamon, Phys. Lett. **50A**, 13 (1974).
- [2] W.K. Schuebel, Proc.Int. Conf. Laser'79, STS Press Mclean, 431 (1980).
- [3] K. Roesza, Z. Naturforsch. **35a**, 649 (1980).
- [4] H. Koch, Dissertation, Technische Universitaet Berlin (1982).
- [5] H.J. Eichler, H. Koch, R. Molt, J.L. Qiu, W. Martin, Appl.Phys. **B26**, 49 (1981).
- [6] G.J. Collins, IEEE,J.Quantum Electron. QE-16. No.12. 1292 (1980).
- [7] D.C. Gerstenberger, R. Solanki and G.J. Collins,IEEE, J. Quantum Electron, QE-16. 820 (1980).
- [8] B.E. Warner, D.C. Gerstenberger, R.D. Reid, J.R. Mcneil, R. Solanki, K.B. Persson and G.J. Collins, IEEE, J.Quan. Electron, QE-14 568 (1978).
- [9] Prospekt, Fa. Lamda Physik
- [10] H. Pummer, U. Sowada, P. Oesterlin, U. Rebhan, D.Basting, Laser and Optoelektronic **2**, 141 (1985).
- [11] B. Godard, D.de.Witte, Opt.Comm.,Vol.19. No.3, 325 (1976).
- [12] D.C. Gerstenberger, R. Solanki and G.J. Collins, IEEE, J. Quantum Electron, QE-16. 820 (1980).
- [13] E. Endruschat, Diplomarbeit, TU-Berlin(1982)
- [14] E. Endruschat, J. Hamisch, H. Koch, H. Niedrieg, W. Tornow, Proc. 6th. Int. Congr. Laser **83**, 19 (1984).
- [15] R. Srinivasan, J.of Radiation Curing, Oct. (1983).
- [16] J.E. Bjorkholm, etal. J.Appl.Phys.**58**, 2098 (1985).
- [17] N.S. Kopeika, A.P. Kusehevsky, IEEE, J.Quantum Electron, QE-13, 968 (1977).
- [18] H. Koch, Diplomarbeit, TU-Berlin (1978).
- [19] M. Yang, Diss.Ludwig-Maximilian Uni. Muenchen (1981).
- [20] R. Tornow, Diplomarbeit, TU-Berlin (1981/82).
- [21] B.E. Warner, K.B. Person, G.J. Collins, J.Appl.Phys, 50, 5694 (1979).
- [22] K.G. Hernquist, IEEE.J.Quantum Electron, QE-14, 129 (1978).
- [23] R. Solanki, W.M. Fairbank, G.J. Collins, IEEE. J. Quantum Electron, QE-16, 1292 (1980).

Slotted type copper ion laser

Sun-dal Song and Nam-kwan Hong

Department of Physics, Hanseo University, Seosan 356-820, Korea

(Received : May 2, 1997)

The slotted type of hollow copper cathode was constructed and tested for its geometric stability and usability for laser operation at 780 nm. The peak output power of copper ion laser emission was measured for different operating conditions. The IR-laser power was dependent on the parameters of the geometry of the hollow cathodes, discharge current and gas fillings. The peak power decreased with increasing neon pressure over 60%. One reason for this decrease in output power may be conjectured as hier due to the decreasing population of the upper laser level. The copper ion laser transition at 780 nm populated at the 5p level. The hollow cathode copper ion laser is operated in He and Ne mixture by electric discharge excitation and could be operated for more than 100 hours with only a 35% drop in the output power(2.8 mW cw for 9.6 cm active length).