

금속증기레이저 연구 II.

— 공냉식 구리증기레이저장치의 개발 —

이재경 · 정환재 · 임기건 · 이형종 · 정창섭

전남대학교 물리학과

김 진 승

전북대학교 물리학과

(1992년 6월 5일 받음)

내경 1.6 cm, 길이 50 cm의 알루미늄 세라믹 방전관을 사용하여 방전전극간의 거리가 45 cm인 공냉식 방전가열형 구리증기레이저를 제작하였다. 방전가열 및 여기를 위한 6 kV, 500 mA 정격의 직류 고전압 전원장치, 1.8 H의 충전 인더티와 5 nF의 에너지저장 캐패시터를 포함하는 resonant charging 방식의 고전압 충전회로와 1~7 kHz 범위의 펄스반복률로 동작하는 thyratron 구동회로가 각각 설계 제작되었다. 개발된 레이저장치는 방전관의 온도 1350°C 부근에서 발진을 시작하였고, 충전전압 12 kV, 펄스반복률 4.5 kHz, 네온원총기체압력 50 mbar, 동작온도 1460°C 일 때 0.7 W의 최대평균 출력을 얻었다.

I. 서 론

구리증기레이저(CVL; Copper Vapor Laser)는 증기화된 구리원자를 레이저매질로 하는 고출력, 고효율의 레이저로, 색소레이저의 펌핑을 통한 동위원소의 분리, 극초단펄스의 발생 등에 응용되고 있다.

구리증기레이저는 중성 구리원자의 첫번째 공명준위인 2P 상태를 높은 레이저준위로 하고 기저상태 2S 준위와 전기쌍극자전이가 금지된 준안정 준위 2D 상태를 낮은 레이저준위로 하여 510.6 nm와 578.2 nm의 두 파장에서 발진한다(그림 1). 다른 종류의 금속증기레이저(Au, Pb, Ba 등)와 같이 중성원자의 에너지상태를 레이저준위로 사용하고, 또한 첫번째 공명준위가 높은 레이저준위가 됨으로써, 구리증기레이저는 높은 양자효율을 갖는다. 특히, 구리증기레이저는 레이저준위에 인접한 다른에너지상태가 없기 때문에 전기방전 여기방식으로 높은 펌핑효율을 얻을 수 있다. 높은 레이저준위에서 기저상태로의 전이수명은 약 10 ns 정도로서 낮은 레이저준위로의 전이보다 약 10^2 배 가량 짧으나, 레이저 동작온도(1400~1600°C)에서 구리증기의 충분한 원자밀도는 radiation trapping 효과를 일으키게 되고, 높은 레이저준위로 여기된 구리원자는 대부분이 레이저동작에 참여하

게 된다.

다른 종류의 금속증기레이저와 마찬가지로, 구리증기레이저는 낮은 레이저준위가 준안정 상태이기 때문에 보고되어진 레이저발진은 주로 수십 ns 정도의 펄스형태이다. 2D 준위의 이완시간은 내경이 작은 플라즈마관의 경우 플라즈마 경계로의 확산시간과 같게 되고, 일차적

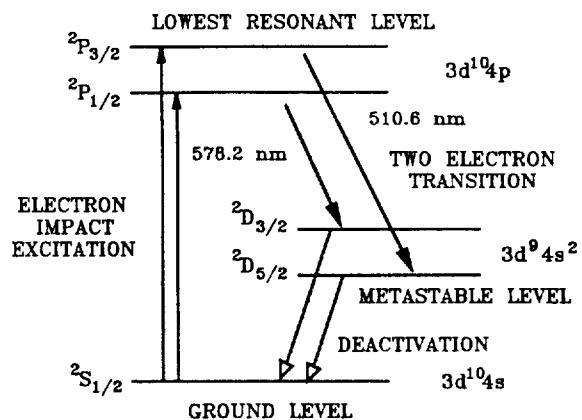


그림 1. 구리증기레이저의 동작에 관한 구리원자의 에너지준위표.

으로 플라즈마관의 지름과 완충기체의 압력에 의존하게 되지만, 내경이 수 inch 정도 되는 대부분의 레이저에 있어서는 방전 후 미처 재결합되지 못한 낮은 에너지를 가진 전자와의 충돌에 의해 이완효과에 따라 결정되며,^[1] 고효율동작을 위한 펄스반복률은 수 또는 수십 kHz로 제한된다.

초기의 실험에서는 구리증기를 얻기 위하여 방전관의 외부에 전기로를 설치하는 방법을 사용하였고,^[2] 레이저의 총효율(wall-plug efficiency)은 대단히 낮았다. 1972년에 A. A. Isaev 등이 발표한 방전가열형 방식에서는 10 kHz 정도의 고반복률의 레이저 작동이 가능하고, 방전에 따른 플라즈마의 가열을 방전관 자체의 온도를 높이는 방법으로 이용함으로서 1% 정도의 높은 효율을 얻을 수 있었다.^[3] 할로겐화구리의 분자기체로부터 구리원자를 분해하여 사용함으로서 낮은 온도에서 동작하는 할로겐 구리증기레이저는^[4,5] 고가의 고온재료를 사용하지 않고 비교적 용이하게 레이저장치를 구성할 수 있는 장점이 있으나, 효율 및 내구성이 방전가열형 방식의 레이저장치에 비하여 좋지 않은 단점이 있다.

방전관 내부에서 발생하는 고온으로부터 방전전극 및 진공기밀 부품을 보호하기 위한 냉각방식으로는 수냉식이 주로 사용되며, 최근 국내에서 개발되어 동작이 보고된 바 있는 레이저장치에서도 수냉식이 이용되었다.^[6] 본 연구에서는 수냉식 레이저장치가 갖는 대형화와 이동설치가 곤란한 단점을 극복하기 위하여 소형 fan을 사용한 공냉식의 방전가열형 장치를 제작함으로서, 비교적 간단하고 이동 설치가 용이한 레이저장치를 제작하였다.

II. 실험장치

방전가열형 구리증기레이저는 여기 효율을 높이기 위해 상승시간이 매우 짧은 고전압 방전이 필요하며, 또한 평균출력을 높이기 위해 수 kHz의 높은 펄스반복률의 전기방전 동작이 요구된다. 이러한 동작요건은 내열성의 방전관, ripple이 작고 안정하게 동작하는 직류 고전압 전원장치, 고전압 및 고전류의 스위치인 thyratron의 구동회로, 고전압 충전 및 방전회로 등을 구성요건으로 한다.

그림 2는 설계 제작된 레이저장치의 방전관부분의 단면도이다. 방전관은 내경 1.6 cm, 길이 50 cm이며 순도 99.7%의 원통형 알루미나관을 이용하여 제작하였다. 방전관의 양 끝에 설치된 전극은 Tantalum foil을 원통형으로 성형 제작하여 외부 원통의 양 옆판에 연결된 stain-

less steel의 동심 원통들 사이에 끼워 설치하였다. 방전전극 사이의 길이는 약 45 cm이다. 방전관과 stainless steel 외부 원통 사이에 단열을 위하여 열전도도가 1650 °C에서 0.23 W/m·K인 두께 1.5 inch의 원통형 다공질 알루미나관을 설치하였으며, 외부 원통의 일부는 고전압 절연 및 진공기밀을 위해 두께 3 mm, 길이 110 mm의 원통형 pyrex glass로 구성하였다.

공진기에 사용한 반사경은 발진파장에서의 반사율이 약 95%인 평면경이며, 출력측은 부분 반사경을 별도로 사용하지 않고 용융석영 재질의 평면유리인 window를 출력경으로 이용하였다. 반사경과 출력측 window 사이의 거리는 약 95 cm이다. 다른 window인 반사경 쪽의 window는 레이저광의 궤환을 방지하기 위하여 광축과 5°의 경사를 갖도록 하였다.

방전관 외부의 냉각을 돋기 위하여, 원통형 외관의 양단에는 공기의 흐름의 방향과 나란하게 heat sink를 부착하였고, 풍량이 약 2 m³/min인 소형 fan(13 W) 5개를 옆면에 설치하였다.

이 실험에서 사용한 충전 및 방전회로가 그림 3에 개략적으로 도시되어 있다. 그림에서 1.8 H의 충전 인덕터(L)와 고압다이오드(D₁), 그리고 5 nF의 에너지저장 캐패시터(C₁)로 구성되는 충전회로는 구리증기레이저에서 주로 사용되는 resonant charging 방식이며, 에너지저장 캐패시터에 충전되는 전압은 전원장치의 출력전압의 2배에 가까운 값이 되기 때문에 전원장치에 요구되는 고전압 규격을 완화할 수 있다. 그림 4는 충전전압과

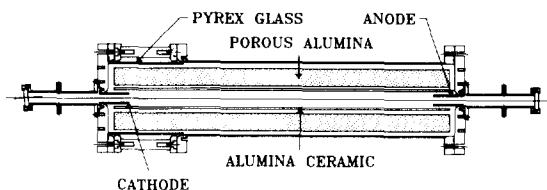


그림 2 공냉식 구리증기레이저의 발진장치 단면도.

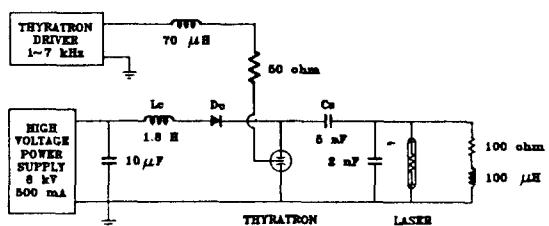


그림 3. 구리증기레이저의 충전 및 방전 전기회로.



그림 4. 충전 전압(위) 및 전류(아래) 펄스 파형. 충전전압 12 kV, 방전관의 내부온도 1460°C, 펄스반복률 2 kHz, 네온완충기체압력 50 mbar.

충전전류 펄스를 보여준다. 이 실험에서 충전전압은 thyratron과 병렬로 연결된 1000:1 진압 분할기를 이용하여 측정하였고, 충전전류는 방전관속에 병렬로 연결된 100:1의 분류저항을 이용하여 측정하였다. 사용된 오실로스코프는 Tektronix 7704A이다. 충전전류는 레이저 방전 전극의 양단에 병렬로 연결된 100Ω 의 저전 저항과 0.1 mH의 공심코일 인터터를 통과함으로서 폐회로를 구성하게 된다. 충전인더티로서는 동일한 4개의 사십인더터를 적리어 결합하여 사용했으며, 각 인더티는 한 쌍의 U형 인더티를 toroid형으로 결합하여 사용했다.

이 실험에서 고전압, 고전류 스위치로서 사용한 hydrogen thyratron은 EG & G 사의 HY3001이며, 상승시간은 대략 10 ns이다. Thyratron 구동회로는 고속 고전력 FET를 이용한 스위칭 방식을 채택하여 제작하였으며, 트리거 펄스의 폭은 최대 1 μ s, 펄스반복률의 가변범위는 1~7 kHz이고, 부하가 없을 때 펄스의 최대 전압이 1.2 kV가 되도록 설계 제작되었다. Thyratron이 전도상태가 될 때 그리드(grid)로부터 약 20 ns 후에 가진 고전압 펄스가 충전전압으로 인하여 발생되어 구동회로쪽으로 인가되는 것이 확인되었고, 구동회로내의 소자를 보호하기 위하여 thyratron의 그리드 가까이에 50Ω 의 저항과 70 μ H의 공심인더터를 직렬로 연결 설치하여 역류하는 펄스의 전압강하를 도모하였다.

III. 실험 결과 및 검토

방전관으로 사용한 알루미나 세라믹관의 사용가능한

온도는 1650°C로서, 이보다 낮은 구리증기레이저의 동작온도에서도 알루미나 불순물등에 의해 Ca, K 등의 증기가 발생하는 것으로 알려져 있으며 예비가열(preconditioning)에 의하여 이러한 불순물의 증기압을 미리 낮추는 것이 필요하다. 이 실험에서는 상온에서 방전관내의 잔여기체의 압력을 수 mTorr까지 내린 후, 헬륨 기체를 흐르게 하며 1400°C의 온도에서 약 10시간 동안 알루미나 투브의 예비가열(preconditioning)을 시행하였으나, 레이저의 출력특성을 검토한 결과 충분하지 않은 것으로 나타났다. 여기에 대한 논의는 뒤에서 다시 언급하게 된다. 알루미나관의 예비가열이 끝난 후, 방전관내부에 3.3 g의 구리박판 (Aldrich, 99.999%)을 5 cm 간격으로 5곳에 고루 배치하고, 헬륨기체를 흐르게 하며 900°C의 온도에서 20시간 동안 다시 예비가열을 시행하였다. 구리증기레이저의 동작에 있어서 전기방전 플라즈마의 특성을 조절하고, 구리증기의 확산을 저지하는 완충기체로서는 헬륨, 네온, 아르곤 등의 불활성기체를 사용할 수 있고, 이 중에서 레이저 출력을 최대로 하는 기체는 네온인 것으로 알려져 있다. 이 실험에서 네온기체를 완충기체로 사용하여 실제 레이저를 동작할 때는 약 21 atm/h의 유효로 계속 흐르도록 조정하였다. 레이저 발진실험을 위한 방전가열은 충전전압 및 펄스반복률을 서서히 높임으로서 시행되었으며, 내체로 30분 내외의 시간 동안에 레이저발진에 필요한 1350°C 이상의 온도까지 가열할 수 있었다.

네온완충기체압력 50 mbar, 충전전압 12 kV, 펄스반복률 2 kHz로 레이저를 동작시켰을 때의 578.2 nm 레이저펄스의 파형이 그림 5에 나타나 있다. 이 때의 방전관의 내부온도는 1460°C였다. 레이저펄스는 역바이어스가 걸린 pin photodiode를 사용하여 측정하였으며, 펄스의 FWHM은 약 40 ns이었다.

충전전압의 변화에 따른 레이저 출력의 변화가 그림 6에 그려져 있다. 이 실험에서 제작 사용한 전원장치가 허용하는 최대 충전전압인 12 kV까지 출력은 전압의 증가에 따라 대체로 선형적으로 증가하고 있다. 최근에 행하여진 실험^[6] 및 이론연구^[7]가 대략 10 kV/m의 전기장의 세기에서 출력이 포화되는 결과를 보여준 것과 비교하여 볼 때, 이러한 선형성은 이 장치의 고유한 특성이 아니고, 예비가열의 불충분에 기인한다고 판단된다. 즉, 현재의 레이저장치는 아직 최적화 되지 않았으며, Cu-Ne 혼합기체는 위에서 언급한 바와 같이 고온에서 생성된 상당히 양의 불순기체를 포함하고 있어서, 전기방전 에너지의 많은 분량이 이를 기체원자를 통하여 소모되는 것으로 판단된다. 충분한 예비가열이 이루어진

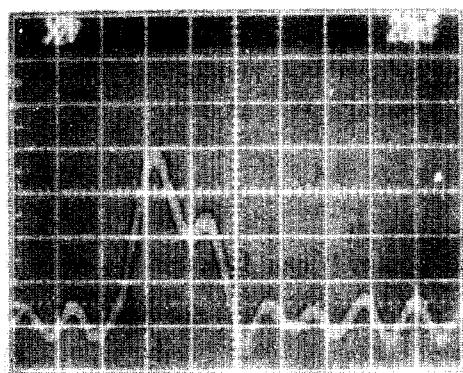


그림 5. 578.2 nm 레이저펄스 파형. 충전전압 12 kV, 방전관의 내부온도 1460°C, 펄스반복률 2 kHz, 네온완충기체압력 50 mbar.

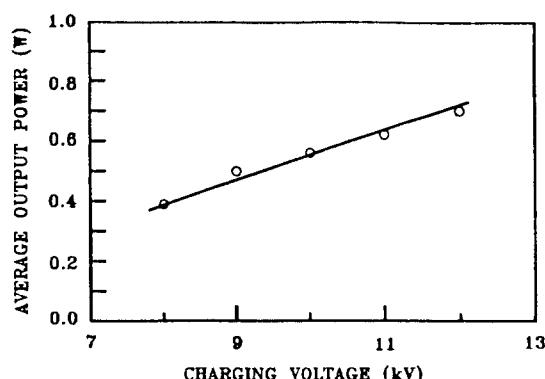


그림 6. 충전전압의 변화에 따른 레이저출력. 방전관의 내부온도 1460°C, 펄스반복률 4.5 kHz, 네온완충기체압력 50 mbar.

방전관을 사용할 경우, 전반적인 출력은 증가하고, 전압의 상승에 따른 출력의 증가는 단화될 것으로 예상된다.

따라서, 레이저장치의 보다 정확한 출력특성 파악을 기하기 설치된 방전관으로서는 이루어지지 않을 것으로 판단된다. 지금까지의 측정결과, 레이저출력을 실험장치가 허용하는 한계 내에서 펄스반복률에 거의 선형적으로 비례하였으며, 대략 50 mbar 의 네온완충기체압력까지는 출력이 증가하고, 그 이상의 압력에서는 대체적으로 출력이 감소하였다. 다만, 압력의 변화에 따른 레이저출력의 의존성은 때로 불규칙한 변화를 보여주었으며, 이 현상 또한 현재의 장치가 예비가열의 불충분과 관련하여 최적의 작동이 이루어지지 않고 있음을 반영하고 있다고 판단된다. 레이저 방전관의 내부온도는 광학고온계를

이용하여 측정하였으며, 대략 1350°C 부근에서 발진이 시작되었고, 1500°C 이상의 온도에서는 출력이 감소하는 현상을 보여주었다.

현재의 장치를 충전전압이 12 kV, 펄스반복율이 4.5 kHz, 네온완충기체압력이 50 mbar, 방전관의 내부온도 1460°C에서 동작시켰을 때, 0.7 W의 최대평균출력을 얻었고, 이 때 510.6 nm 출력과 578.2 nm 출력의 비는 약 3 : 1이었다. 레이저출력의 측정에는 Spectra Physics 사의 404 power meter를 사용하였다.

IV. 결 론

방전가열형 구리증기레이저장치가 설계, 제작되었으며, 그 발진특성이 분석되었다. 냉각을 위해 사용되는 fan의 전력소모는 65 W 정도이었으며, 공냉식을 채택함으로써 레이저발진부는 보다 간단한 구조를 갖게 되었고, 레이저동작온도까지 가열하는 데 소요되는 방전시간 또한 단축할 수 있었다. 현재까지의 실험에서 측정된 최대평균출력은 0.7 W이며, 이 때의 작동조건은 충전전압 12 kV, 펄스반복율 4.5 kHz, 네온완충기체압력 50 mbar, 그리고 방전관의 내부온도는 1460°C로 각각 측정되었다. 현재의 장치는 최적 동작을 보여주지는 않았는데 이는 예비가열의 불충분으로 판단된다. 따라서, 충분한 예비가열 후 최적 동작조건을 찾게 되면 현재보다는 높은 출력의 레이저발진이 예상되며, 보다 정확한 출력특성도 밝혀질 것으로 기대된다.

감사의 글

본 저자들은 여러 유익한 견토로 이 연구에 도움을 준 한국원자력연구소의 이종민 박사, 차명현 박사에게 감사를 드린다. 이 연구는 교육부 기초과학 학술연구조성비의 지원하에 수행되었다.

참 고 문 현

- [1] P. A. Bokhan, V. A. Gerasimov, V. I. Solomonov and V. B. Shcheglov, Sov. J. Quant. Electr. **8**, 1220 (1978).
- [2] W. T. Walter, N. Solimene, M. M. Pillich and G. Gould, IEEE J. Quant. Electr. **QE-2**, 474 (1966).
- [3] A. A. Isaev, M. A. Kazaryan and G. G. Petrush, JETP Lett. **16**, 27 (1972).
- [4] C. S. Liu, E. W. Sucov, and L. A. Weaver, Appl.

- Phys. Lett. **23**, 92 (1973).
- [5] C. J. Chen, N. M. Nerheim and G. R. Russell, Appl. Phys. Lett. **23**, 514 (1973).
- [6] 임창환, 차병현, 성나진, 이종민, 한국광학회지, **1**, 28 (1990).
- 임창환, 차병현, 성나진, 이종민, 새물리 **31**, 154 (1991).
- [7] K. Im, S. H. Kim, Y. Gong, C. S. Chung and H. J. Lee, JKPS **24**(1), 19 (1991).

Metal Vapor Laser Research II.

—The Development of the Air-Cooled Copper Vapor Laser—

Jaekyung Lee, Hwanjae Jung, Kiegon Im, Hyung-Jong Lee and Chang-Sub Chung

Department of Physics, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

Jin-Seung Kim

Department of Physics, Jeonbug National University, Chonju 560-756, Korea

(Received: June 5, 1992)

An air-cooled discharge-heated copper-vapor laser system with its inter-electrode distance of 45 cm has been developed by utilizing an alumina ceramic plasma tube of 1.6 cm in diameter and 50 cm in length. For operating the laser, a dc high voltage power supply with output rating of 6 kV and 500 mA, a resonant charging circuitry consisting partly of an 1.8 H inductor assembly and a 5 nF storage capacitor, and a thyratron driver operating up to 7 kHz have also been developed. The present laser system starts lasing at the tube temperature of about 1350°C and an maximum average output power of 0.7 W has been obtained at 12 kV, 4.5 kHz, 50 mbar of Ne buffer gas pressure, and at the tube temperature of 1460°C.