

방전가열형 구리증기레이저의 개발

임창환 · 차병헌 · 성낙진 · 이종민
한국원자력연구소

(1990년 2월 7일 받음)

방전가열형 구리증기레이저를 제작하였으며 그 동작특성을 조사하였다. 레이저관으로는 내경 25mm, 길이 106cm 인 고순도(99.8%) 알루미늄관을 사용하였다. 방전전극은 molybdenum 튜브로 제작하였으며 전극간의 거리는 108cm 이었다. Ne 가스압력 40mbar, 충전전압 10kV, 반복률 5kHz, 레이저관 내부온도 1500°C일 때 평균출력 10W 를 얻었다.

1. 서 론

구리증기레이저는 1966년 W.T. Walter 등⁽¹⁾에 의해 첫 발전이 보고되었다. 구리증기레이저는 발전파장이 510.6nm 와 578.2nm 로 가시영역이고 수 10ns 의 짧은 펄스폭과 5-30kHz 의 높은 반복률, 고효율 및 고출력이 가능하여 고출력 색소레이저의 펌프광원, 고속촬영용 광원, 영상증폭, 고속반도체 개발연구, 해저탐사 및 통시, 의학연구 등 매우 다양한 분야에 응용되고 있다.⁽²⁻⁶⁾ 그러나 구리증기레이저는 그 동작온도가 1500°C 정도의 고온이기 때문에 내열, 단열 및 진공기밀을 하여야 하며, 또한 효율적인 펌핑을 위해서 고반복률의 초단 고전압 펄스방전을 필요로 하는 등 여러 가지 기술적인 난점을 포함하고 있다. 따라서 레이저의 안정성과 고출력화를 위한 많은 연구가 수행되어 왔다.⁽⁷⁻⁹⁾

구리증기레이저는 레이저 동작에 필요한 중성 구리원자 증기를 얻는 방법에 따라 외부가열방식,⁽¹⁾ 방전가열방식,⁽⁷⁾ 구리화합물(CuCl, CuI, CuBr)을 이용한 구리-할로젠 방식,⁽¹⁰⁾ 이중방전을 이용한 상온동작 방식⁽¹¹⁾ 등으로 대별할 수 있다. 외부가열방식은 레이저 출력에 영향을 미치는 여러 변수에 따른 출력 특성을 조사하기에는 적합하나 외부가열기를 설치하여야 하기 때문에 장치가 복잡하고 내구성이 떨어지는 단점이 있다. 구리-할로젠 레이저는 동작온도가 500°C 정도로 비교적 낮은 장치 제작에는 이점이 있지만 방전시 분해된 할로젠들이 레이저관을 부식시키고 방전을 방해하기 때문에 큰 규모의 레이저 장치 개발에는 부적합하다. 또한 상온동작 이중방전 방식의 레이저는 상온에서 동작시킬 수 있는 장

점이 있지만 고출력화에는 난점이 많다. 반면 방전가열방식의 구리증기레이저는 고전압 방전에너지가 구리원자를 여기시키는 것과 동시에 레이저관을 가열하기 때문에 장치의 구조를 비교적 간단하게 할 수 있고 내구성이 높으며 고출력화가 용이하다. 따라서 본 연구에서는 방전가열방식의 구리증기레이저를 제작하고 제작된 레이저 장치의 동작특성을 조사하였다.

2. 구리증기레이저 장치의 제작

본 연구에서 제작된 구리증기레이저 장치는 가스방전관(레이저관), 고전압 충전 및 방전회로, thyatron trigger 펄스발생기, 직류고전압 전원장치, 완충기체공급 및 배기장치, 냉각장치 등으로 구성되어 있다.

제작된 가스방전관의 단면도는 그림 1과 같다. 레이저관으로는 내경이 25mm 이고 길이가 106cm 인 재결정화된 고순도(99.8%) 알루미늄관(McDanel Co. 998A-3111)을 사용하였다. 알루미늄 재질은 용융점(1800°C)이 높을 뿐 아니라 고순도로 제작가능하고 열충격에 강하기 때문에 금속증기레이저관으로 널리 사용된다. 레이저관을 단열하기 위하여 레이저관 주위에 고온단열특성이 우수한 원통형의 다공질 알루미늄을 설치하였다. 진공기밀을 위하여 레이저관과 단열재를 대구경(내경 127mm, 길이 122cm)의 재결정화된 알루미늄관의 내부에 공심으로 설치하였다.

알루미늄관의 열팽창계수는 1500°C에서 $9.8 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 정도이므로 레이저의 동작온도에서 알루미늄관은 16mm 정도 늘어나게 된다. 따라서 위와 같이 설계함으로써 레

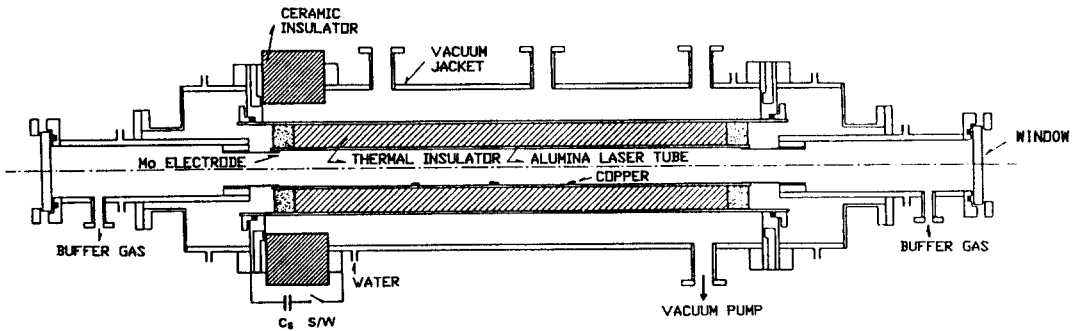


Fig. 1. Schematic diagram of the discharge tube of the copper vapor laser.

이러한 단열재 내부에서 자유로이 팽창, 수축할 수 있게 하였다. 또한 진공기밀용 대구경 알루미늄관을 stainless steel로 만들어진 진공통(vacuum jacket) 내부에 설치하여 대류 및 전도도에 의한 열손실을 최소화시켰으며 복사에 의한 진공통의 온도상승을 막기 위하여 진공통 외부에 냉각수를 흘려 냉각시켰다. 진공통과 대구경 알루미늄관(진공기밀용) 사이의 진공기밀에는 silicone rubber 재질의 o-ring을 사용하였다. 한편 진공통을 여기용 고전압 방전회로의 일부로 사용하여 방전회로의 인덕턴스를 최소화하였으며 진공통의 한쪽 끝에는 세라믹절연체를 설치하여 두 방전전극간의 고전압 절연을 하였다.

고온에서 사용할 수 있는 전극재료로는 tungsten, tantalum, molybdenum 등이 있으나 본 실험에서는 가공이 용이하고 가격이 저렴한 molybdenum을 사용하였으며 이 전극의 크기는 길이 50mm, 내경이 30mm이었다. 두 방전전극간의 간격은 108cm로 하여 레이저 매질의 길이를 최대한 이용할 수 있게 하였다. 레이저창으로는 두께 6mm 용융석영판을 사용하였으며 두 레이저창간의 거리는 152cm이다. 두 개의 평면거울로 레이저 공진기를 구성하였으며 전반사경 및 출력경은 해당 파장에 대한 반사율이 각각 99.8%, 25.0%인 다중박막증착된 평면경을 사용하였다. 구리증기레이저를 효율적으로 펌핑하기 위해서는 매우 짧은 상승시간을 갖는 고전압 방전펄스가 요구되며 높은 평균출력을 위해서는 고반복률이 필요하다. 따라서 고반복률에서도 안정된 동작이 가능한 고전압 충전방전회로가 필수적이다. 본 실험에서 제작된 충전 및 방전회로는 그림 2와 같다. 고전압은 고전압 직류전원장치로부터 인덕터 L_c 와 blocking 다이오드 D 를 거쳐 에너지 저장 축전기 C_s 에 충전하게 된다. 이 때 충전전압은 $L-C$ 공진에 의해 고전압 전원전압의

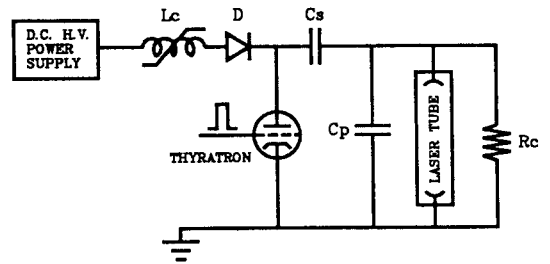


Fig. 2. Diagram of the modulator circuit. $C_s = 8 \text{ nF}$, $C_p = 2 \text{ nF}$, $R = 100 \text{ Ohm}$.

약 2배로 되며 다이오드 D 는 C_s 에서 고전압 전원으로 역류하는 전류를 차단하게 된다. 이와 같은 충전방식을 resonant charging 방식 또는 choke-diode charging 방식이라 한다.⁽¹²⁾ 인덕터 L_c 는 thyatron으로 하여금 충분한 회복시간을 갖게 하기 위하여 큰 인덕턴스 값을 가져야 하나 큰 인덕턴스는 C_s 의 충전시간을 길게 하여 펄스 반복률을 제한하게 된다. 따라서 고반복률의 충전회로에서는 L_c 값을 줄이기 위하여 triggered resonant charging 방식을 사용하나 이는 또다른 스위치를 사용해야 하므로 장치가 복잡해지고 제작비용이 크게 상승하게 된다. 제작된 고전압 충전회로에서는 L_c 를 가포화 인덕터로 사용하여 충분한 회복시간과 고반복률이 동시에 가능하게 하였다. 가포화 인덕터 제작에 사용된 core는 ferrite 재질(H7Cl, TDK Co.)이며 인덕터의 초기 인덕턴스는 3H, 포화 인덕턴스는 30mH이었다. 그림 3은 가포화 인덕터를 통하여 충전되는 C_s 의 양단 전압을 LeCroy 9450과 Tektronix P6015 probe를 사용하여 관측한 것이다. 그림에서와 같이 초기에는 큰 인덕턴스에 의해 전류가 억제되며, 전류가 점차 상승하여 포화자기장(510mT)에 도달하면 전류가 급격히 상승함을 알 수 있다. 따라서 가포화 인덕터는 스위치와 같은 역할을

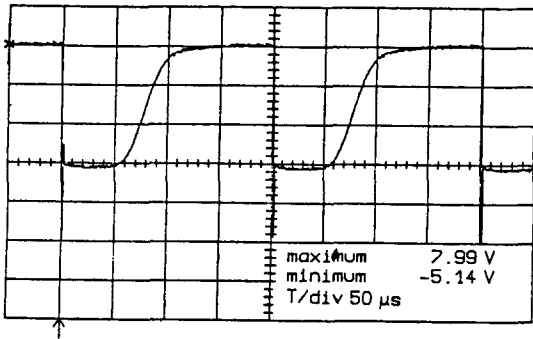


Fig. 3. Time dependence of charging voltage at capacitor Cs. Charging voltage is 8 kV.

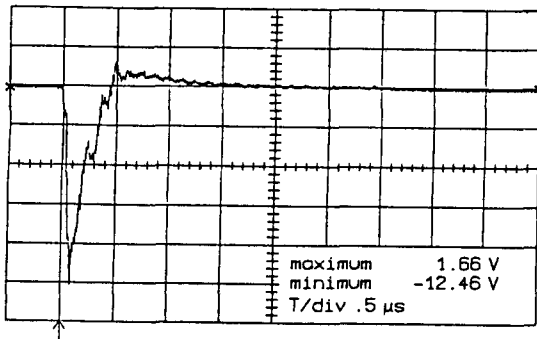


Fig. 4. Time dependence of discharge voltage used to excite laser tube. Minimum discharge voltage is 12.5 kV.

하게 된다. 또 그림으로부터 전류억제시간이 약 $60 \mu\text{s}$ 정도임을 알 수 있으며 이는 본 실험에 사용한 thyatron(회복시간 약 $40 \mu\text{s}$)이 회복되기에 충분한 시간이다. 한편 C_s 에 충전이 끝난 후 thyatron의 grid에 trigger 펄스가 인가되면 C_s 에 충전된 고전압은 가스방전관 내부로 방전하게 된다. 이 때 레이저관과 병렬로 연결된 C_p 는 Peaking 축전기로 이는 방전전류의 상승시간을 줄이는 역할을 한다. 그림 4는 LeCroy 9450 oscilloscope를 사용하여 관측한 방전펄스 모양을 나타낸 것이다. 본 실험에서 사용된 thyatron은 EG & G사의 LS4011이며 C_s 및 C_p 는 각각 용량이 8nF , 2nF 의 세라믹 축전지(UHV-9A, TDK Co.), 충전저항 R_c 는 100 Ohm (200 W) 권선저항을 각각 사용하였다.

3. 레이저 동작특성

방전관 내부에 단열재로 사용된 다공질의 알루미늄 및 재결정화된 알루미늄관은 사용초기에 많은 불순물을 배

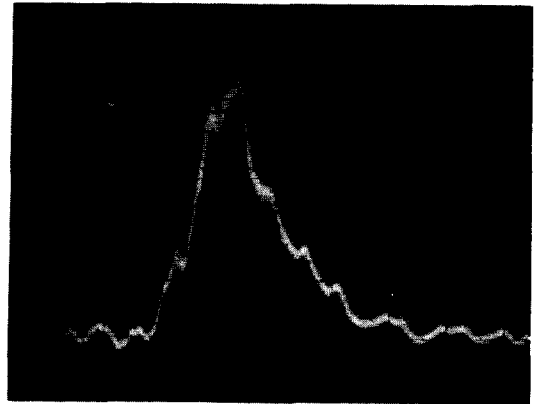


Fig. 5. Oscillogram of laser output pulse. Time scale is 20 ns/division. Relative unit is used for vertical scale.

출하게 된다. 이들 불순물 중 특히 산소나 수증기는 전자친화력이 크므로 방전시 발생하는 전자를 얻어 음이온화 하기 때문에 방전전류의 상승을 방해하게 된다. 따라서 새로 조립한 레이저장치는 레이저 동작에 앞서 반드시 preconditioning을 해야 한다. 본 실험에서는 preconditioning을 위하여 고전압 교류방전 가열방법을 사용하였으며 그 과정은 다음과 같다. 먼저 가스방전관 내부에 약 50 mbar 정도의 Ne 완충기체를 채운 다음 교류변압기를 사용하여 1600°C 이상의 고온에서 10시간 이상 가열하였다. 이 때 가스방전관에 투입된 전력은 약 3 kW 이었으며 가열시키는 동안 완충기체를 계속 흘러 ($1 \text{ l} \cdot \text{atm/h}$) 가열시 발생하는 불순물을 제거하였다. 일차 가열이 끝난 다음 가스방전관을 냉각시키고 레이저관 내부에 약 10 g 의 구리(순도 99.9999%)를 10 cm 간격으로 5곳에 나눠 투입한 후 위의 과정을 다시 반복하였다. 위와 같은 과정으로 가스방전관을 preconditioning한 후, 에너지장축전기 C_s 의 충전전압을 10 kV 로 하고 5 kHz 의 반복률로 약 90분간 고전압 펄스방전을 시키면 레이저관 내부의 온도가 1350°C 로 상승하여 도우넛 형태의 녹색광(510.6 nm)이 방출되기 시작하였다. 온도가 상승할수록 녹색광이 도우넛 모양의 중심부를 채우게 되고 결국 균일한 원형의 패턴이 나타나는 것을 관측하였다. 온도가 상승할수록 레이저빔은 황색을 띠기 시작하였고 레이저관의 온도가 1500°C 일 때 녹색광과 황색광의 강도비는 $3:1$ 로 나타났다. 이것은 온도가 상승함에 따라 기저상태의 구리원자밀도가 증가하여 이득이 작은 황색광이 뒤늦게 방출하기 때문이다. 이 때 레이저 내부 완충기체(Ne)의 압력은 40 mbar 로 고정하였으며 방전시 완충기체를 계속해서 $1 \text{ l} \cdot \text{atm/h}$ 의 율로 흘렸다.

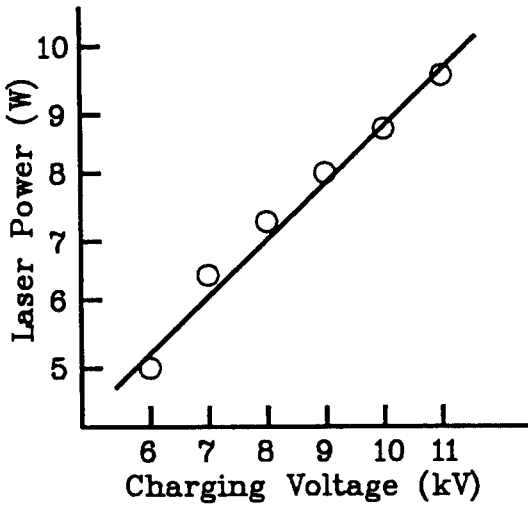


Fig. 6. Voltage dependence of laser power. Pulse repetition rate = 5 kHz, Ne pressure = 40 mbar, Cs = 8 nF, temperature of the laser tube = 1480°C.

그림 5는 레이저 출력을 PIN photodiode (EG & G, FND-100Q)와 oscilloscope (Tek 2465)를 사용하여 관측한 것이며 레이저 펄스의 FWHM은 약 30 ns이다. 이 사진은 레이저 펄스가 약 3만개가 중첩된 것인데도 선명하며 이로부터 레이저가 안정하게 동작함을 알 수 있다. 그림 6은 C_s 의 충전전압과 평균출력과의 관계를 나타낸 것이다. 이 때 레이저관의 중심부 온도는 1480°C이었으며 원충기체의 압력은 40 mbar, 펄스반복률은 5 kHz이었다. 이 그림에서 레이저의 평균출력은 충전전압에 거의 선형적으로 비례하고 있다. 레이저의 펄스폭은 충전전압에 거의 무관하였으므로 이로부터 레이저 침투출력은 방전전류의 침투값에 비례함을 알 수 있다. 이는 방전회로를 LRC 회로로 근사할 경우 방전전류의 침투치는 충전전압의 거의 비례하기 때문이다.^(13,14)

4. 결 론

본 연구에서는 방전가열형 구리증기레이저를 제작하여 순수한 방전가열에 의해 레이저관 내부의 온도를 1500°C 이상 가열시킬 수 있었다. 반복률 5 kHz, 충전전압 10 kV에서 10 W의 평균출력을 얻었으며, 이 때 레이저펄스의 FWHM은 30 ns, 침투출력 70 kW이었다.

레이저관 내부의 단열재로는 다공질의 알루미늄이나 재결정화된 고순도의 알루미늄관을 사용하였고 레이저를

동작시키기 전에 10시간 이상 고압교류방전을 하여 다공질의 단열재로부터 배출되는 불순물을 제거하였다. 충전전압을 변화시키며 레이저 평균출력을 측정할 결과 충전전압에 거의 선형적으로 비례하였고 레이저 펄스폭은 충전전압에 무관하였으므로 침투출력 역시 충전전압에 비례함을 알 수 있었다.

제작된 레이저장치는 100시간 이상 동작시킨 결과 출력에 별다른 이상이 없었다. 그러나 출력의 보다 높은 안정성을 위하여 고안정 전원장치의 개발이 필수적이다. 또한 현재까지 대부분의 구리증기레이저에서 사용 중인 thyratron은 가격이 매우 고가이고 그 수명이 제한(1000 시간)되어 있으므로 이를 대체하기 위하여 고전압 펄스장치의 고체소자화에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구실에서는 구리증기레이저의 고출력화, 고안정화, 장수명화를 위한 연구가 계속 진행 중에 있다.

참고문헌

- [1] W. T. Walter, M. Piltch, N. Solimene, and G. Gould, *Bull. Am. Phys. Soc.* **11**, 113 (1966).
- [2] R.S. Hargrove and T. Kan, *IEEE J. Quant. Elect.* **QE-16**, 1108 (1980).
- [3] R. E. Grove, *Laser Focus* **18**, 45 (1982).
- [4] P. Pubinowitz and R. Chimenti, *J. Opt. Sci. Am.* **60**, 1577 (1970).
- [5] T. J. Pivrotto and N. M. Nerheim, *Proc. of AIAA 16th Fluid and Plasma Dynamics Conference*, July, 1983.
- [6] O. V. Kopelevich, *Opt. Spectrosc.* **41**, 391 (1976).
- [7] A. A. Isaev, M. A. Kazaryan, and L. A. Levin, *Opt. Comm.* **25**, 79 (1978).
- [8] I. Smilanski, G. Eretz, A. Kerman, and L. A. Levin, *Opt. Comm.* **30**, 70 (1979).
- [9] R. S. Anderson, B. E. Warner, C. Larson Sr., and R. E. Grove, *Conference of Lasers and Electro-optics*, Washington D. C., 10-12 June 1981.
- [10] M. Piltch and G. Gould, *Rev. Sci. Instrum.* **37**, 925 (1966).
- [11] J. F. Asmus and N. K. Moncur, *Appl. Phys. Lett.* **13**, 384 (1968).
- [12] G. N. Glasoe and J. V. Lebacoz, "Pulse Generators", McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, 1948.
- [13] 차병현, 남성모, 황인현, *새물리*, **27**, 220(1987).
- [14] 남성모, 이상윤, 오철한, 제 5회 파동 및 레이저 학술발표회 논문집, p.22(1990. 2. 서울대학교).

Development of the Discharge Heated Copper Vapor Laser

Changhwan Lim, Byunghoon Cha, Nackchin Sung and Jongmin Lee
Korea Atomic Energy Research Institute

(Received; February 7, 1990)

We have constructed and operated a discharge heated copper vapor laser which generated green (510.6 nm) and yellow (578.2 nm) light. The plasma tube was made of high purity (99.8%) alumina tube which has an inner diameter 25 mm and a length 106 cm. The electrodes, made of molybdenum sheet, were separated 108 cm apart. The laser gave an average power of 10 W at repetition rate of 5 kHz, charging voltage of 10 kV, Ne buffer gas pressure of 40 mbar, and the laser tube temperature of 1500 °C.