

A 30 W Copper Vapor Laser Using a Vacuum Tube Based Pulse Generator

陳 珽 泰* · 車 秉 憲** · 金 哲 中*** · 李 興 浩§

(Jeong Tae Jin · Byung Heon Cha · Cheol Jung Kim · Heung Ho Lee)

Abstract - A longitudinal discharge heated copper vapor laser with internal diameter 28 mm and discharge length 1.3 m has been constructed and tested. At the discharging voltage 15.2 kV, pulse repetition rate 10 kHz, buffer gas pressure 40 mbar, and internal temperature of the laser plasma tube 1520°C, it delivers more than 30 W average laser outputs.

Key Words : Copper vapor laser, Metal vapor laser, Pulse generator

1. 서 론

510.6 nm 및 578.2 nm 의 가시광 영역 파장을 가지는 구리증기 레이저는 정밀 기계부품 가공, 반도체 제조, 열유동 연구, 해저 통신 및 탐사, 의료기기 및 법의학 분야 등에서 다양하게 활용되고 있다[1,2,3,4].

구리증기 레이저용 방전관 즉 레이저 플라즈마관은 구리 원자의 증기를 발생시키는 방식에 따라서 외부가열방식, 방전가열방식, 이중가열방식(double discharge type) 등으로 분류할 수 있으며 여기(excitation) 방식에 따라 종방전 여기방식(longitudinal discharge excitation type), 횡방전 여기방식(transverse discharge excitation type), 광 여기방식(optical excitation type) 등으로 분류할 수 있다. 그중 방전가열형 종방전 여기방식의 레이저 플라즈마관은 구조가 간단하고 내구성이 뛰어나며 대규모 장치 제작에 유리하므로 현재 가장 많이 사용되고 있다[5,6,7].

방전 가열형 종방전 방식 레이저 플라즈마관에 사용되는 고전압 펄스 전원은 차단 전압 수 10 kV, 통전 전류 수 100 A, 펄스 폭 수 10 ns, 펄스 반복율 수 kHz ~ 수 10 kHz의 정격을 만족하는 펄스를 레이저 플라즈마관에 공급할 수 있어야 한다[8,9]. 이와 같은 고전압, 대전류의 고반복 초단 펄스를 얻기 위해서는 사이라트론(thyratron)이나 전력 반도체 또는 진공관과 같은 스위치들이 필수적이다. 그 중 사이라트론은 전압, 전류 및 전압 상승율 등이 다른 스위치에 비하여 비교적 우수하지만 도통(turn-on)된 이후에는 스위치

자체로는 차단(turn-off)이 불가능하므로 스위칭 동작을 자유롭게 제어하는데 다소 문제가 있다. 또한 전력 반도체 소자는 개별 소자로서는 전기적인 정격이 레이저의 발진조건을 충족시키기 어려우므로 다수의 소자를 직렬 및 병렬로 연결하거나 별도의 승압 변압기나 자기 스위치(magnetic switch)를 추가로 사용해야하는 어려움이 있다. 그 밖에도 레이저 방전관의 급격한 임피던스 변동에 따른 임피던스 부정합으로 인한 반사전력에 대한 내구력이 다른 종류의 스위치에 비하여 취약하다는 단점이 있다. 이에 반해서 진공관 스위치는 사이라트론에 비견되는 우수한 펄스 스위칭 능력을 갖추고 있을 뿐 아니라 스위칭 전압 진폭, 전류 진폭 및 펄스 폭 등을 쉽게 제어할 수 있으므로 새로운 레이저 제작 및 연구에 적합한 스위치라고 할 수 있다[10,11,12,13,14,15].

2. 구리증기 레이저 구성

2.1 레이저 플라즈마관

실험에 사용한 방전가열형 종방전 방식 레이저 플라즈마관의 구조는 그림 1과 같다. 그림 1에서 내부의 세라믹 튜브는 구경 28 mm, 길이 1296 mm, 두께 3 mm이며 그 내부에 20 cm 간격으로 각각 4g 씩의 구리를 배치하였다. 세라믹 튜브 외부에는 고온 단열용 다공질의 고순도 알루미늄관이 위치하며 이 알루미늄관을 용융석영관이 감싸는 구조로 되어있다. 용융 석영관의 외부는 2중 구조의 알루미늄 원통관(water jacket)이 감싸고 있으며 이 알루미늄 원통관 사이로 냉각수를 순환시켜 효과적인 냉각이 이루어지도록 하였다. 레이저 플라즈마관의 양단에 부착된 레이저 창(window)은 두께 13 mm의 용융석영판으로 되어 있으며 레이저 빔에 대하여 5° 경사지게 설치하여 레이저창의 표면반사에 의한 기생발진을 방지하였다. 방전 전극은 길이 42 mm, 직경 3.3 mm의 구리 봉이 환형으로 배열되어 있는 구조로 제작하여 방전이 균일하게 이루어지도록 하였다.

* 正 會 員 : 韓國原子力研究所 先任研究員

** 正 會 員 : 韓國原子力研究所 責任研究員

*** 正 會 員 : 韓國原子力研究所 責任研究員

§ 正 會 員 : 忠南大學 電氣工學科 教授

接受日字 : 2003年 5月 16日

最終完了 : 2003年 9月 20日

2.2 진공관식 펄스 전원

실험에 사용된 진공관식 펄스 전원장치는 에너지 저장 커패시터에 고전압으로 충전된 전하를 진공관 스위치를 사용하여 짧은 시간동안(수 10 ns)씩 고반복율(10 kHz)로 방전시키는 방식으로 설계, 제작되었다. 그림 2는 펄스 전원장치의 구성도이다.

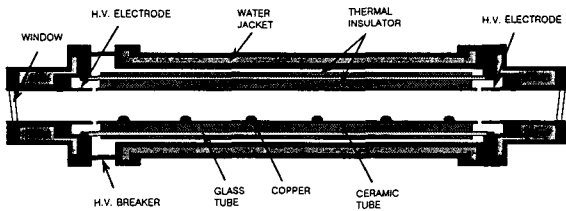


그림 1 레이저 플라즈마관 구조
Fig. 1 Cross sectional diagram of the laser plasma tube

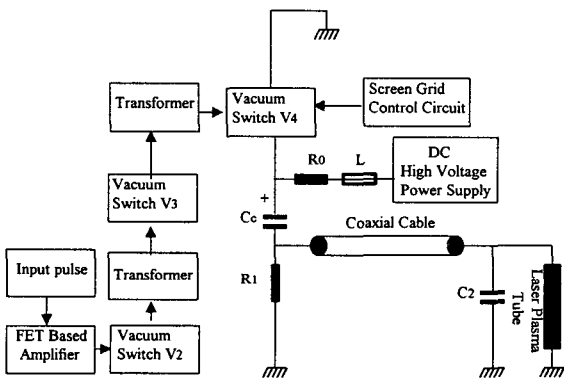


그림 2 진공관식 펄스전원 구성
Fig. 2 Block diagram of the vacuum tube based pulse generator

그림 2에서 에너지 저장 커패시터 C_c 는 직류 고전압 전원으로부터 인덕터 L , 저항 R_0 , C_c , 및 저항 R_1 의 경로를 거쳐 고전압이 충전된다. C_c 가 충전된 후 진공관 스위치 V_4 가 도통(turn-on)되면 전하는 C_2 를 충전시켜 레이저 플라즈마관에서 방전이 일어나도록 한다. 그림 3은 펄스 전원장치의 출력 전압 파형의 모습이고 그림 4, 그림 5는 레이저 플라즈마관에 인가되는 전압 및 전류 파형이다.

3. 실험 및 출력 특성

구리증기 레이저의 출력은 레이저 플라즈마관 내부 온도, 방전 전압, 펄스 반복율, 완충기체 압력, 완충기체의 종류 및 조성비, 완충기체 유속 (flow rate) 등 수 많은 변수에 의하여 영향을 받는다. 본 연구에서는 진공관식 고전압 펄스 전원을 사용하여 레이저 출력에 가장 큰 영향을 미치는 온도, 전압, 펄스 반복율 및 완충기체 압력에 따른 레이저 출력 특성을 살펴보고 그 결과를 고찰하였다. 실험에서 사용된 완

충기체는 네온 99%와 수소 1%가 혼합된 혼합기체이며 완충기체의 유속은 30 cc.atm /min.의 비율로 하였다. 플라즈마관의 내부 온도는 적외선 온도계(mikron M90R)를 사용하여 측정하였고 레이저 출력은 레이저 전력계(ophir laserstar and FL250A)를 사용하여 측정하였다. 고전압 펄스 전원장치 및 레이저 플라즈마관에 인가되는 전압 및 전류는 고전압 프로브(Tektronix P6015A) 및 전류 센스(Pearson 110)와 디지털 오실로스코프(Tektronix DSA602A)를 사용하여 측정하였다. 또한 완충기체의 압력은 절대 압력을 측정할 수 있는 진공계(Balzers TPG252 and APR260)를 사용하여 측정하였으며 레이저 플라즈마관의 완충기체 출구쪽에 위치한 니들 밸브를 사용하여 압력을 변화시켰다.

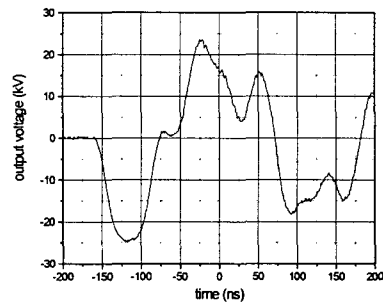


그림 3 펄스 전원장치의 출력 전압 파형
Fig. 3 Voltage waveform of the pulse generator output

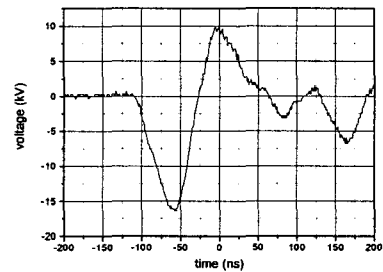


그림 4 레이저 플라즈마관 인가 전압 파형
Fig. 4 Voltage waveform on the laser plasma tube head

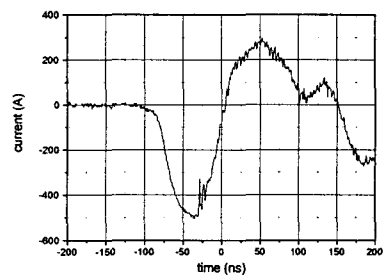


그림 5 레이저 플라즈마관 인가 전류 파형
Fig. 5 Current waveform on the laser plasma tube head

앞에서 언급된 구리증기레이저의 출력에 영향을 주는 변수들은 서로 연계되어 있으므로 어느 한 변수의 변화에 따른 레이저 출력특성을 조사하기 위해서는 항상 기준 조건을 유지하는 것이 중요하다. 일례로 방전 전압과 레이저 출력

과의 관계를 조사하기 위해서 방전 전압을 변화 시키면 시간이 경과함에 따라 방전 전압과 연계하여 레이저 플라즈마관 내부 온도도 함께 변화될 수 있다. 따라서 기준 조건에서 1회의 전압을 변화시키고 레이저 출력을 조사한 다음에는 신속하게 기준 조건으로 돌아와서 모든 레이저 출력 변수가 기준 조건으로 되돌아 온 것을 확인한 후 또 다른 전압에 대한 레이저 출력을 조사하는 방식으로 실험을 진행하였다. 이는 다른 모든 변수들과 레이저 출력과의 관계를 조사하는 데에도 똑같이 적용되는 사항이다.

3.1 레이저 플라즈마관 내부 온도에 따른 레이저 출력 특성

그림 6은 완충기체 압력 40.8 mbar, 방전 침두 전압 15.2 kV, 방전 침두 전류 516 A, 펄스 반복율 10 kHz 인 조건에서의 레이저 플라즈마관 내부 온도와 레이저 출력특성과의 관계를 조사한 그래프이다. 그림 6에서 알 수 있듯이 레이저의 평균 출력은 레이저 온도가 상승함에 따라 증가하다가 1530℃ 근처에서 최대값을 나타내고 1530℃ 이상에서는 감소함을 볼 수 있다. 고온에서 레이저 출력이 감소하는 주된 이유는 고온으로 인하여 구리 증기의 원자 밀도가 증가하게 되고 따라서 전자 (secondary electron)의 발생 개수가 증가했기 때문이다. 전자의 개수가 많아지면 전자 온도가 낮아져서 레이저 발생 효율이 감소하게 된다. 또한 전자의 개수가 많아지면 레이저 플라즈마관의 임피던스가 감소하여 레이저 플라즈마관과 레이저 전원 사이의 임피던스 정합 문제가 심화되어 투입되는 에너지가 감소되어서 레이저 출력이 떨어진다.

3.2 방전 전압에 따른 레이저 출력 특성

그림 7은 완충기체 압력 40.8 mbar, 레이저 플라즈마 내부 온도 1500℃, 펄스 반복율 10 kHz 인 조건일 때의 방전 전압에 따른 레이저 출력특성이다. 그림 7에서 레이저 평균 출력은 방전 전압이 증가함에 따라 거의 선형적으로 비례하여 증가함을 알 수 있다. 그 이유는 전압이 증가함에 따라 전자 온도가 증가하고 따라서 레이저 발생 효율이 증가하기 때문이다.

3.3 펄스 반복율에 따른 레이저 출력 특성

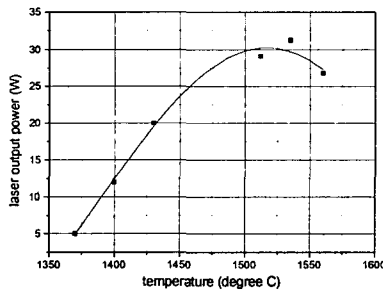


그림 6 레이저 플라즈마관 내부 온도에 따른 레이저 출력 특성

Fig. 6 Laser output characteristics with laser plasma tube inner temperature

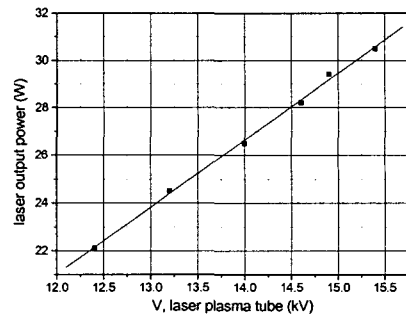


그림 7 방전 전압에 따른 레이저 출력 특성

Fig. 7 Laser output characteristics with discharge voltage

구리증기레이저는 일반적으로 펄스 반복율을 높이면 단위 시간당 레이저 발진 회수가 많아져서 레이저 출력은 펄스 반복율에 비례하여 증가한다. 그러나 펄스 반복율을 점진적으로 증가시켜 레이저 하준위 이완율보다 반복율이 더 빠르게 되면 레이저 하준위에 축적되는 구리 원자의 수가 증가하여 레이저 출력이 억제된다. 그림 8은 완충기체 압력 40.8 mbar, 레이저 플라즈마 내부 온도 1520℃, 방전 침두 전압 15.2 kV, 방전 침두 전류 516 A인 조건일 때의 펄스 반복율에 따른 레이저 출력특성이다. 그림 8에서 펄스 반복율 9 kHz까지는 레이저 출력이 펄스 반복율에 선형적으로 비례하며 11 kHz부터 레이저 출력이 감소하기 시작함을 알 수 있다.

3.4 완충기체 압력에 따른 레이저 출력 특성

레이저 방전관 내부의 완충기체는 레이저 매질인 구리증기가 레이저 창 (window) 쪽으로 확산되어 레이저 창이 구리에 의하여 오염되는 것을 막아줌과 동시에 레이저 플라즈마관 양단에 펄스 전압이 인가되었을 때 방전 전류를 흘려주는 역할을 한다. 완충기체로는 He, Ar, Ne, Xe, 등의 불활성 기체가 사용될 수 있으나 본 실험에서는 네온 99%와 수소 1%가 혼합된 기체를 완충기체로 사용하였다[16]. 그 이유는 Ne이 다른 불활성 기체에 비하여 고전압 펄스 방전때 발생되어서 구리를 이온화시키는 역할을 하는 전자와의 탄성 및 비탄성 충돌 단면적이 가장 작고 따라서 레이저 매질이 되는 구리원자의 여기에 가장 효율적이기 때문이다. 일반적으로 기체방전에서 완충기체의 압력이 너무 낮으면 전자 온도가 지나치게 높게되고 또한 방전 전류의 진행 경로가 완충기체가 아닌 구리 증기가 되므로 많은 수의 구리 원자를 이온화 시켜 레이저 평균 출력이 감소하게 된다. 반면에 완충기체의 압력이 지나치게 높으면 전자와 완충기체 사이의 충돌 횟수가 증가하여 전자 온도를 떨어뜨리므로 역시 레이저 평균 출력이 감소한다고 알려져 있다. 압력이 높은 경우는 방전 전압을 상승시키면 전자 온도가 상승하여 레이저 출력이 증가된다[17]. 그림 9는 레이저 플라즈마 내부 온도 1520℃, 펄스 반복율 10 kHz, 방전 침두 전압 15.2 kV, 방전 침두 전류 516 A인 조건일 때의 완충기체 압력에 따른 레이저 출력특성이다. 그림 9에서 완충기체 압력이 40 mbar ~ 130 mbar 에서 레이저 평균 출력은 최대를 유지함을 알 수 있다.

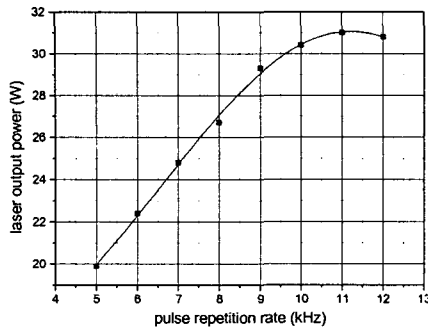


그림 8 펄스 반복율에 따른 레이저 출력 특성
 Fig. 8 Laser output characteristics with pulse repetition rate

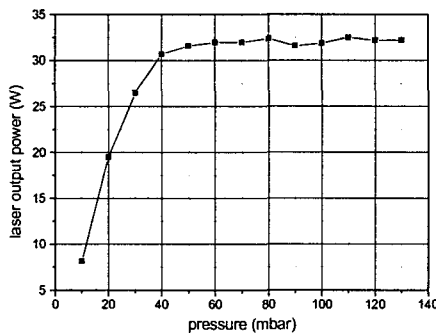


그림 9 완충기체 압력에 따른 레이저 출력 특성
 Fig. 9 Laser output characteristics with buffer gas pressure

4. 결 론

구경 28 mm, 방전거리 1.3 m 인 방전가열형 중방전 방식 레이저 플라즈마관과 최대 출력 전압 25 kV, 전류 300 A, 펄스 반복율 10 kHz 인 진공관식 펄스 전원으로 이루어진 구리증기레이저를 제작하였다. 제작된 레이저 플라즈마관은 진공관식 펄스전원을 사용하여 레이저 빔 출력에 큰 영향을 미치는 방전 전압, 펄스 반복율 등의 주요 변수들을 변화시키면서 특성을 조사하였다. 실험 결과 제작된 레이저 플라즈마관은 내부 온도 1520°C, 방전 전압 15.2 kV, 펄스 반복율 10 kHz, 완충기체 압력 40 mbar 일 때 최대 32 W의 레이저 출력을 유지하였다.

참 고 문 헌

[1] B. E. Warner, P.D. Weber, "High-power copper vapor lasers and their application to precision drilling and cutting", Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, 1993. LEOS '93 Conference Proceedings. IEEE, Pages: 782 -783, 1993 .
 [2] Y. Sano, N. Mukai, N. Aoki, C. Konagai, "Laser processing to improve residual surface stress of metal components", Advanced Applications of Lasers in Materials Processing/Broadband Optical Networks/Smart Pixels/Optical MEMs and Their Applications.

IEEE/LEOS 1996 Summer Topical Meetings: , Pages: 30 -31, 1996
 [3] N.A. Lyabin, et al., "Development of industrial copper vapor lasers and their applications in techniques", International Conference on Lasers Proceedings, pages: 359-366, 1997.
 [4] R. Farlow, et al., "Micromachining of a piezocomposite transducer using a copper vapor laser", Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on, Volume: 48 Issue: 3, Pages: 639 -640, May 2001.
 [5] T.C. Wang, C.Y. Yang, et al., "A 25 W longitudinal, discharge-heated copper vapor laser", Rev. Sci. Instrum. 60 (10), pp.3351-3352, October 1989.
 [6] M. J. Withford, D. J. W.Brown, "A 60-W high-beam-quality single-oscillator copper vapor laser", IEEE Journal of Quantum Electronics, Volume 35 Issue 7 , pp.997 -1003 July 1999.
 [7] C. E. Little, "Metal vapour lasers", Jone Wiley & Sons, 1999.
 [8] H. Seki, et al., "Development of a pulsed power supply for a large-bore copper vapor laser", Rev. Sci. Instrum, 65(2), pp.323-326, February 1994.
 [9] Akira Ohzu, et al., "Efficient discharge pumping of a copper vapor laser using a cylindrical grid electrode", Review of Scientific Instruments, Vol.71, No.6, pp.2288-2291, June 2000.
 [10] Varian Eimac, "EIMAC power grid tubes and accessories", Quick Reference Catalog 489.
 [11] English Electric Valve Co., "EEV/M-OV Electron Tubes", Product Data.
 [12] English Electric Valve Co., "Hydrogen Thyratrons Preamble".
 [13] EG&G, "Users Guide to Thyratrons for Laser Applications".
 [14] Eupec GmbH+Co., "IGBT Application Notes", 1995.
 [15] Mitsubishi Data Sheet (IGBT & Hybrid IC), 1998.
 [16] Michael J. Withford, Daniel J. W. Brown, James A. Piper, "Optimization of H2-Ne Buffer Gas Mixtures for Copper Vapor Lasers", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.32, No.8, pages : 1310-1315, August 1996.
 [17] Jim J. Chang, "Pressure dependence of copper laser output characteristics", Applied Optics, Vol.32, No.27, pages : 5230-5235, September 1993.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 2003년도 원자력연구개발사업과제의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

저 자 소 개



진 정 태 (陳 埕 泰)

1961년 2월 15일 생. 1986년 경북대 전자 공학과 졸업. 2000년 충남대 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 현재 한국원자력연구소 양자광학기술개발부 선임연구원.



김 철 중 (金 哲 中)

1951년 11월 16일 생. 1974년 서울대학교 졸업. 1982년 University of Arizona 졸업(박사). 현재 한국원자력연구소 미래원자력기술개발단장.



차 병 현 (車 秉 憲)

1957년 8월 18일 생. 1981년 경북대 물리학과 졸업. 1983년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 물리학과 졸업 (박사). 현재 한국원자력연구소 양자광학기술개발부 책임연구원.



이 흥 호 (李 興 浩)

1950년 10월 28일 생. 1973년 서울대 공업교육과(전기전공) 졸업. 1977년 동대학원 공업교육과 졸업(석사). 1994년 동대학원 컴퓨터공학과 졸업(박사). 현재 충남 대학교 전기공학과 교수.