

구리증기레이저의 방전전류에 따른 출력특성

Influence of the discharge current on the output power of a copper vapor laser

남 성 모*, 이 상 문
 경북대학교 자연과학대학 물리학과
 오 철 한
 경북대학교 사범대학 물리학과

구리증기레이저의 효과적인 펌핑을 하기 위하여 충전전압과 방전관의 온도에 따른 전류와 레이저출력을 조사하였다.

I. 서론

1970년대에 들어와서 특히 우리나라 같은 상업적 가치가 높은 동위원소를 레이저를 이용하여 분리(LIS: Laser Isotope Separation)할 목적으로 공명광이온화분광학(Resonance Photoionization Spectroscopy)에 관한 연구가 활발해졌다^[1]. 동위원소들은 Isotope shift에 의해 광흡수스펙트럼이 서로 다르므로 선택적인 광흡수가 가능하다. 다단계광이온화(multistep photoionization)를 가능하게 하기 위해서는 중간단계의 이완시간(relaxation time)이 매우 짧으므로 강한 강도의 단색광이 필요하다. 따라서 선풍이 좁고 출력이 강한 펄스형 색소레이저가 그 도구로 이용된다. 표 1은 색소레이저 펌핑에 사용되는 대표적인 레이저들의 출력 특성이다. 공명이온화분광학에 적합한 펌프레이저는 레이저의 수명이 길고 펄스반복률과 효율이 높아야 한다. 따라서 가장 적합한 펌프광원으로서 구리증기레이저가 주목받게 되었다.

laser type	wavelength (nm)	pulse length (ns)	pulse energy (mJ)	pulse rate (Hz)
nitrogen	337	1~10	1~10	1~200
excimer		10~30		1~100
XeCl	308		5~1000	
XeF	315 + 353	30	5~100	
copper	510 + 578	30	1~10	5000
gold	628		0.4	5000
Nd:YAG				
doubled	532		100~200	
			average power(W)	
argon ion	all lines	CW	1~20	
	351 + 364		0.04~3	
	488		0.7~6	
	515		1~8	

표 1. 색소레이저 펌핑에 사용되는 레이저들의 출력특성.

본고에서는 구리증기레이저의 효율을 개선하기 위해 외부가열형 구리증기레이저를 사용하여 방전조건에 따른 전류의 변화를 측정하고 레이저

출력과의 관계를 조사하였다.

II. 동작원리

구리원자는 원자번호가 29로서 그 기저상태는 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^1 4s$ 즉 $3d^1 4s$ 로 표시되는 전자분포를 가진다. 따라서 기저상태는 $L=0, S=1/2$ 이므로 $J=1/2$ 이 되고 준위는 $2S_{1/2}(g=2)$ 가 된다. 레이저천이의 하준위인 첫번째 여기 상태는 $3d^9 4s^2$ 이며 $L=2, S=1/2$ 이므로 J 는 $3/2$ 또는 $5/2$ 가 되고 준위는 $2D_{5/2}(g=6)$ 와 $2D_{3/2}(g=4)$ 로 나뉘어진다. 레이저천이의 상준위인 두번째 여기 상태는 $3d^{10} 4p$ 이며 $L=1, S=1/2$ 이므로 $J=1/2$ 또는 $3/2$ 이

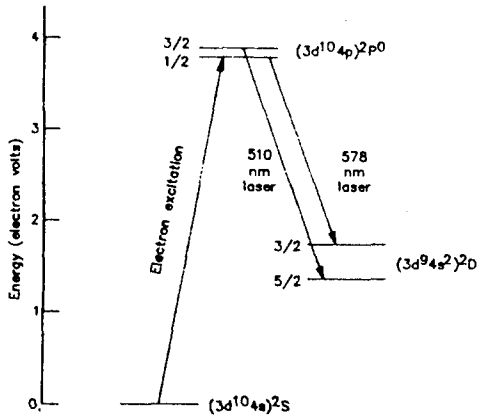


그림 1. 구리중기레이저의 에너지준위도.

되고 준위는 $2P_{1/2}$ 과 $2P_{3/2}$ 으로 나뉘어진다.

복사천이(radiative transition)에서 $\Delta L=0, \pm 1$ 만 허용되므로 기저상태($L=0$)와 $2D$ 상태($L=2$)간의 천이는 금지되어 $2D$ 상태는 metastable이다. 녹색선(510.6nm)은 $2P_{3/2} \rightarrow 2D_{5/2}(19,582\text{cm}^{-1} = 2.43\text{eV})$ 천이에 해당되고 황색선(578.2nm)은 $2P_{1/2} \rightarrow 2D_{3/2}(17,290\text{cm}^{-1} = 2.13\text{eV})$ 천이에 해당된다. 이 두 천이에 대한 각각의 Einstein coefficient(gA)는 $0.051 \times 10^8, 0.054 \times 10^8$ 이다.

$2P_{3/2} \rightarrow 2D_{3/2}$ 의 천이(570nm)도 가능하나 $gA=$

0.014×10^8 이어서 레이저발진은 관측되지 않는다. $2P$ 상태는 기저상태와 결합(coupling)이 강하여 ($2P_{1/2}$ 에 대해 $gA=1.9 \times 10^8$, $2P_{3/2}$ 에 대해 $gA=4.1 \times 10^8$) 효과적으로 선택적 펌핑을 할 수 있다. Born approximation에 의하면 전자충돌에 의한 여기확률은 광흡수에 의한 여기확률에 비해하므로 따라서 전기방전에 의한 $2P$ 상태와 기저상태간의 천이확률이 다른 준위에 비해 크므로 펌핑에너지의 흡수가 집중적이고 효과적이 된다.

구리중기레이저의 효율은 바람직한 주기인 $2S \rightarrow 2P \rightarrow 2D \rightarrow 2S$ 와 경쟁적 관계에 있는 보다 높은 에너지준위의 흡수에 의해 제한된다. 펌핑에 있어서 전자에너지는 통계역학적으로 넓은 분포를 가지며 이를 제한하여 선택할 수는 없다. 특히 $2D$ 상태와 결합이 강한 보다 높은 준위로 천이된 전자들은 metastable 상태이면서 레이저 천이의 하준위인 $2D$ 상태로 형광을 방출하며 천이하기 때문에 밀도반전을 저해한다. 또 레이저천이의 상준위인 $2P$ 상태도 보다 높은 상태들과 결합되어 있어서 그 일부가 전자충돌에 의해 재여기되어 유도방출(stimulated emission)에 기여하지 못하게 된다. 또 구리원자가 이온화(이온화에너지; $62,317\text{cm}^{-1} = 7.724\text{eV}$)되면서 전자의 운동에너지를 흡수하여 레이저발진을 방해하기도 한다. 따라서 구리중기레이저를 설계함에 있어서 레이저효율을 높이기 위해서는 이런 장애요인들을 고려하여야 한다. 레이저방전관내의 구리중기압은 온도에 따라 결정된다. 열역학법칙에 의하면 $N=0.966 \times 10^{19} \times P/T$ ($N:\text{cm}^{-3}, P:\text{torr}, T:\text{K}$)로 주어지나 실험식은 다음과 같다[2].

$$N=1.23 \times 10^7 \times e^{0.124T} \quad (N:\text{cm}^{-3}, t:\text{C})$$

따라서 1550C 의 동작온도에서는 $3 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 로 주어진다.

일반적으로 구리중기레이저의 방전전극 간격은

0.5~1.5m이고 인가전압은 10~20kV이며 완충기체의 압력은 10~20torr이다. 따라서 E/N은 1~10Vcm⁻¹ torr⁻¹로 주어진다. 전기방전은 구리 원자와 완충기체의 이온화로 시작되며 전자밀도는 1×10¹⁴~3×10¹⁵cm⁻³ (평균 침투 에너지는 3~10eV)가 되고 이 때 발생한 전자들이 비탄성 충돌에 의해 중성 구리원자들을 여기시킨다. 2P상태는 기저상태와 결합이 매우 강하여 이론적인 수명이 ~10nsec에 불과하다. 2P→2S천이로 발생하는 형광은 기저상태의 원자들에 의하여 흡수가 많이 일어나고 기저상태의 밀도가 충분히 높다면 다시 2P상태로 여기되기도 한다. 이런 현상을 radiation trapping이라고 부르며 그 효과로 말미암아 2P상태의 수명을 충분히 연장시켜 2D상태에 대해 밀도반전을 이루어 레이저발진을 가능케 한다^[3]. Radiation trapping은 구리원자의 밀도가 10¹³cm⁻³ 이상에서 그 효과가 나타나며 1500℃(구리원자의 밀도; 2×10¹⁵cm⁻³)에서는 2P상태의 수명이 약 500nsec에 달해 2P→2S천이에 의한 형광손실은 거의 무시할 수 있다^[4].

Ⅲ. 실험장치

레이저발진기는 레이저 동작에 관계되는 각종 매개변수들의 본리가 가능한 외부가열형을 사용하였다. Ne을 완충기체로 사용하였고 방전전극간의 거리는 70cm이며 알루미늄방전관의 내경은 18mm이다. 방전스위치는 thyatron(CX1154, EEV)을 사용하였고 방전축전기 용량은 2nF이며 peaking 축전기는 필요하지 않았다.

방전전압은 P6015 (Tektronix, USA)를 방전음극과 bellow의 flange에 연결하여 측정하였고, 방전전류는 toroid형태의 ferrite core로 제작한 current transformer를 사용하여 방전음극을 지

나는 전류를 측정하였다.

Ⅳ. 실험 및 결과

구리중기레이저의 출력과 효율을 높이기 위해서는 전기방전을 통해 활성매질내에 전달되는 전력과 레이저출력과의 관계를 조사할 필요가 있다. 방전전류의 최대치(I_p)와 상승시간(t_r)을 충전전압(V₀), 온도에 따라 측정하고 레이저출력에 미치는 영향을 조사하였다.

그림2에 의하면 I_p는 V₀에 대해 거의 선형적인 증가를 보이고 있다. RLC방전회로에서 I_p는 V₀에 1차비례하므로 쉽게 설명된다. 그런데 그림3에 따르면 t_r은 V₀가 9kV가 넘어가면서 급격히 감소

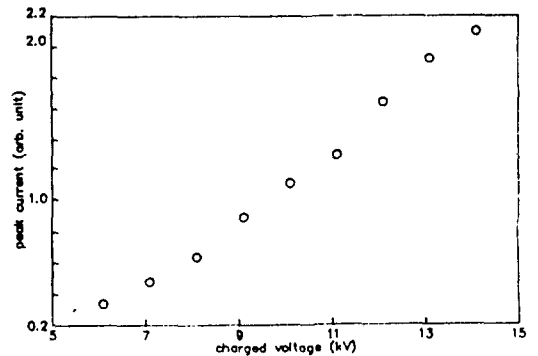


그림 2. 충전전압에 따른 방전전류의 최대값 (압력:18torr, 온도:1510℃, 펄스반복률:3kHz).

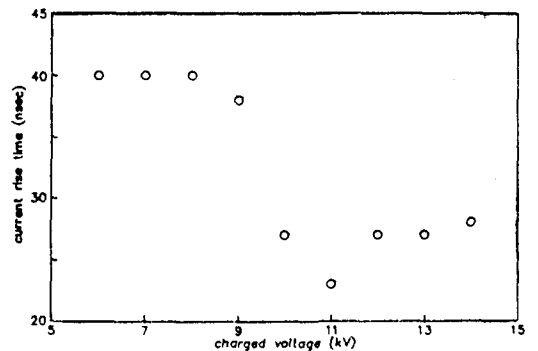


그림 3. 충전전압에 따른 방전전류의 상승시간.

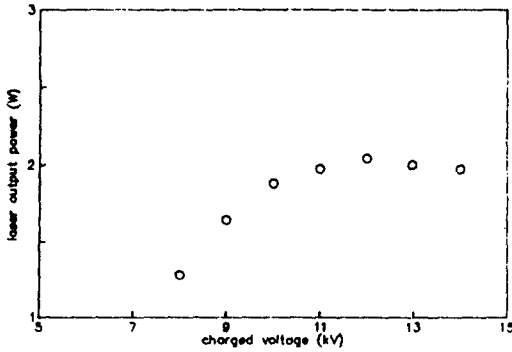


그림 4. 충전전압에 따른 레이저의 출력.

한다. 9kV에서부터 Paschen curve의 Pd 값이 만족되면서 impedance matching이 되므로 방전이 짧아지며 이 때의 방전전류는 방전회로의 수동요소애 따른 전형적인 LCR방전이다. 11kV이상에서 t_r 이 더 이상 줄어들지 않는 것은 thyatron 용량의 제한에 따른 부하효과로 기인된다. 그림4에서 레이저 출력은 V_s 가 증가함에 따라 포화됨을 보여주고 있다. Thyatron이 장애 요인으로 작용하지 않는다면 충전전압이 높을수록 I_p 가 증가하고 t_r 이 감소하여 단위시간당 투입되는 에너지가 커질것 이라는 예측이 가능하다. 레이저 효율을 증가시키기 위해서는 가능한 높은 V_s 에서 방전하는 것이 유리하나 지나치게 높은전압은 오히려 구리원자를 이온화시켜 손실을 초래한다고 알려져있다. 따라서 일반적으로 10~20kV의 V_s 에서 최적치가 존재한다.

방전관의 온도는 구리증기의 밀도를 결정하여 방전시 플라즈마의 온도는 방전관의 온도보다 훨씬 높다. 따라서 방전관의 중심으로 갈수록 기체온도도 상승한다. I_p 는 온도가 상승할 수록 증가하다가 1520°C를 넘어가면 오히려 감소가 일어난다(그림5). 구리원자의 밀도가 지나치게 증가하면 플라즈마저항이 방전관 외부의 저항보다 작

게되어 방전이 낮은 전압에서 일어나므로 I_p 가 감소하고 I_p 에 도달하는 시간도 줄어들어 t_r 도

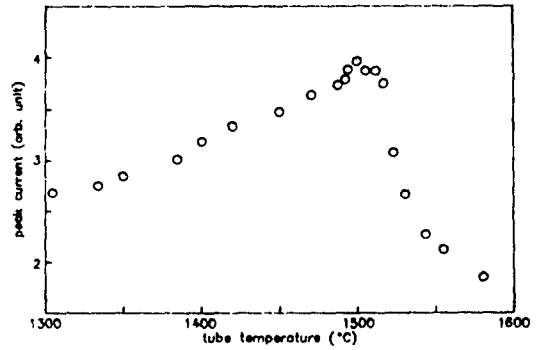


그림 5. 방전관의 온도에 따른 방전전류의 최대값(충전전압:10kV, 압력:18torr, 펄스반복률:3 kHz).

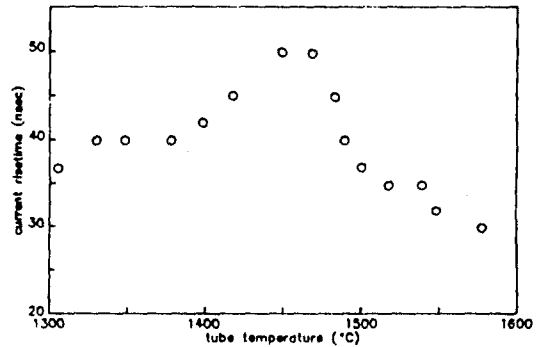


그림 6. 방전관의 온도에 따른 방전전류의 상승 시간.

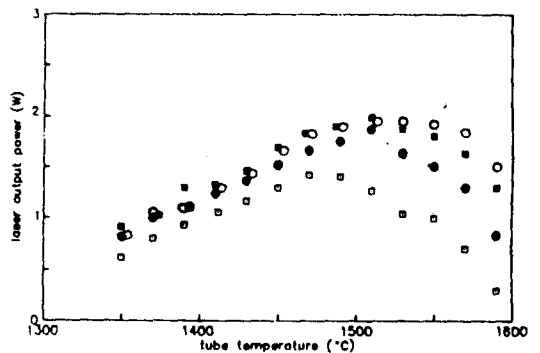


그림 7. 방전관의 온도에 따른 서로 다른 충전전압에 대한 레이저의 출력 (○:14kV, ■:12kV, ●:10kV, □:8kV).

감소한다(그림6). 그리고 I_p 는 충전전압을 높일 수록 온도에 대한 변화폭이 증가하였다. 높은 전압에서 방전할 경우 기저상태의 구리원자가 방전에 모두 가담하기때문에 온도가 증가하면 구리원자수가 증가하고 따라서 방전전류의 상승률을 높이므로 충전전압이 높을 수록 온도에 민감하다.

그림7은 서로 다른 충전전압에 대해 각각의 온도변화에 대한 출력을 측정한 것이다. 온도가 너무 낮을 경우 레이저 매질인 구리원자가 부족하여 이득이 적어지므로 레이저 발진이 어렵다. 온도가 증가함에 따라 레이저 출력이 증가하다가 최적치를 넘으면 출력이 감소한다. 구리원자의 밀도가 증가하면 방전에 의해 2차전자의 방전이 증가하고 발생한 2차전자는 구리원자와 비탄성충돌을 통해 운동에너지가 손실되어 전자온도가 감소되어 펌핑효율이 나빠진다. 그 뿐만 아니라 구리원자는 낮은 전자온도의 전자들과 충돌을 통해 레이저 하준위인 2d상태로 여기되어 밀도 반전을 어렵게한다. 또한 아래의 Saha방정식의 의하면 방전초기전자밀도가 온도에 따라 증가하여 상대적으로 같은 수의 구리원자의 이온화를 초래한다.

$$N_{e0} = 2.4 \times 10^{15} T^{3/2} N_{Cu} \exp(-E_i/kT)$$

(N_{e0} :초기전자밀도, N_{Cu} :구리전자밀도, T:

구리증기온도, E_i :구리원자의 이온화에너지

$$= 7.7eV)$$

이온화된 구리는 펌핑에너지를 흡수하여 레이저 효율을 떨어뜨린다. 그런데 앞에서 조사한 방전전류의 온도의존성을 살펴보면 위에서 언급한 원인들보다도 플라즈마저항이 구리증기압의 증가에 따라 줄어들어서 thyatron에서의 전압강하가 증가하여 방전전류의 에너지가 thyatron에서 많이 소모되어 효율을 떨어뜨리는 것이 가장

큰 원인으로 여겨진다.

V. 결론

구리증기레이저의 펌핑을 효과적으로 하기 위하여 방전전류가 레이저 출력에 미치는 효과를 조사하였다. 구리증기레이저는 레이저 하준위가 metastable상태이므로 짧은시간 내에 펌핑이 일어나야 하므로 di/dt를 크게하여 레이저 효율을 증가시키기 위해 다음과 같은 방법들이 사용된다.

1) 인가전압을 증가시키는 방법 : breakdown전압에 비해 너무 지나치게 높으면 회로의 다른 소자들의 연결단자들에 의한 전압강하가 많아져 손실이 커지므로 전압증가의 한계성이 있다.

2) 회로의 인덕턴스를 줄이는 방법 : 레이저 작동에 직접적인 영향을 미치지 않고 효율을 증가시키므로 바람직하다. 레이저 효율이 $1/\sqrt{L}$ 에 비례한다는 실험결과가 있다. 횡방향방전(transverse discharge)방식은 특히 회로의 인덕턴스가 적어진다 [5].

3) Magnetic pulse compressor를 사용하여 방전관과 thyatron을 분리하는 방법 : thyatron 자체의 di/dt가 한계성이 있어서 방전전류상승을 억제하므로 thyatron을 최종방전시의 회로에 포함시키지 않으므로 해서 보다 높은 di/dt를 얻는다 [6].

레이저의 임피던스를 줄이기위해 전류복귀는 외부덕트를 통해 동축회로를 구성한다. 동축구조의 인덕턴스는 다음과 같다.

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \log \frac{r_2}{r_1}$$

(r_1 =방전관의 내반경, r_2 =동축복귀의 반경)

따라서 가능한한 r_1, r_2 의 차이를 줄여 r_2/r_1 이 1

에 근접하게 하여서 인덕턴스를 줄여야한다. 또한 방전스위치 회로의 인덕턴스도 소자들을 잘 배치하여 최소화 하도록 해야한다.

- [1] Radziemski, "Laser Spectroscopy and Its Application" Marcell Decker inc. Newyork, (1987).
- [2] M. J. Kushner, IEEE J. of Quantum Electron., QE-17, 1555 (1981).
- [3] T. S. Fahien, J. of Appl. Phys., 45, 4132 (1974).
- [4] G. G. Petrash, Sov. Phys. USPEKHI, 747, 14 (1972).
- [5] P. A. Bokhan, V. A. Gerasomov, V. I. Solomonov and V. B. Shcheslov, Sov. J. of Quantum Electron., 8, 1220 (1978).
- [6] M. Nehmadi, Z. Kramer, Y. Ifrash, and E. Miron, J. of Phys. D : Appl. Phys., 22, 29 (1989).