

# 플라즈마 진단용 소형 루비레이저의 제작과 동작특성에 관한 연구

진윤식<sup>o</sup> 김희재  
한국전기연구소

## Fabrication of Compact Ruby Laser and its Operation Characteristics

Jin Yun-Sik<sup>o</sup>, Kim Hee-Je  
KOREA ELECTROTECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE

### Abstract

In this paper, design feature and operation characteristics of compact Ruby laser for plasma diagnostics are described. A linear Xe flashlamp and a single elliptical cavity are adopted as optical pumping system.

With charging energy of 484J, the maximum output energy of 170mJ, laser pulse width 110us, and slope efficiency 0.09% were obtained. If Q-switch system is added to this laser, we suppose this laser will be quite enough for diagnosing plasma.

### 1. 서론

루비레이저는 1960년 마이만(T.H. Maiman)에 의해 처음으로 발전에 성공한 레이저이다. 루비레이저는 MW급의 펄스출력이 용이하게 얻어지므로 고출력을 요하는 비선형광학 등의 응용에 폭넓게 사용되며, 그 발전과장이 대부분의 고체레이저에서 발생하는 근적외선보다 짧은 가시광 영역이므로 광검출기나 사진 유액 등에 민감하게 반응한다.

본 연구에서는 방전플라즈마 진단을 위한 광원으로써 소형 루비레이저 공진기 및 전원을 설계, 제작하고 그 전기적 특성 및 레이저 발전특성을 조사하였다.

### 2. 루비레이저의 개요

루비는 화학적으로 사파이어 ( $Al_2O_3$ )에  $Cr_2O_3$  를 소량 첨가함으로써  $Al^{3+}$  이온중 일부(무게비 0.05%)를  $Cr^{3+}$  이온으로 대체시킨 것이다. 루비레이저에서의 활성매질은  $Cr^{3+}$  이온으로서 이 이온은 채워지지 않은 d 셸(d-shell) 속에 3개의 전자를 가진다. 기저상태의 자유이온은 분광학 기호  $^4A$ 로 기술된다.

루비의 에너지 준위도는 그림 1과 같다. 루비 레이저에서는 소위  $^2E$  준위에 대한 밀도반전은  $Cr^{3+}$  이온을 기저상태인  $^4A_2$  준위에서 주 여기대역인  $^4F_2$  과  $^4F_1$ 으로 광여기에 의하여 얻어진다. 여기대역은 각각 1000Å 정도의 폭을 가지고 있으며, 녹색 ( $18,000\text{ cm}^{-1}$ ) 과 보라색 ( $25,000\text{ cm}^{-1}$ )에 중심을 두고 위치하며, 이 여기대역에서의 수명은 극히 짧

아( $\sim 10^{-7}\text{ sec}$ ) 이온들은 준안정상태인  $^2E$  상태로 천이한다. 이 준안정상태는  $\Delta E = 29\text{ cm}^{-1}$ 의 간격을 가진 2개의 부준위로 나누어진다. 위쪽 것이  $2\bar{A}$ 이고 아래쪽 것이  $\bar{E}$ 이다. 2개의 천이 ( $\bar{E} \rightarrow ^4A_2$  와  $2\bar{A} \rightarrow ^4A_2$ ) 는  $R_1$  과  $R_2$  선으로 주어진다. 이들 선은 각각 실온에서 약 5 Å의 폭을 가지고 있으며, 가시광선의 끝쪽인 6943 과 6929Å의 천이를 가진다.

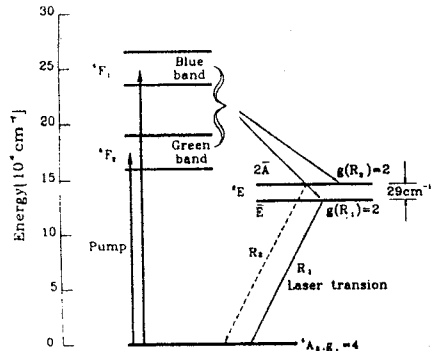


그림 1. 루비레이저의 에너지 준위도

이들 천이선 중에서 레이저 동작은  $R_1$ 선, 즉,  $\bar{E}$  와  $^4A_2$  준위사이에서만 일어난다. 이것은  $R_1$  선의 높은 밀도반전때문에  $R_2$  선 이전에  $R_1$  선이 먼저 레이저 문턱치에 도달한다. 일단  $R_1$  선에서 레이저동작이 시작되면,  $\bar{E}$  준위가 비게 되고, 가까이 있는  $2\bar{A}$  준위로부터 밀도의 이동이 매우 빨리 ( $< 1\text{ ns}$ ) 일어나게 되므로,  $R_2$  선은 결코 레이저 문턱치에 도달하지 못한다. 이와같은  $2\bar{A}$  에서  $\bar{E}$ 로의 빠른 밀도의 이동으로 인하여 두 상태가 가진 초기밀도의 거의 전부가  $R_1$  방사를 통하여 감쇄된다.

### 3. 루비레이저의 설계 및 제작

루비레이저 시스템의 전체구성은 크게 레이저 공진기 헤드 부분과 전원장치, 냉각장치로 이루어진다.

### 3.1 레이저 헤드부

광공진기는 안정된 빔모드를 유지하고 발진된 빔의 발산각이 작으며, 정렬을 용이하게 할수 있는 구조로 하기 위하여 광학소자(전반사경, 반투과경, 루비로드, 여기공동)를 광학 벤치 위에 설치된 레일(rail)위에 설치하여 광공진기를 구성하였다. 전반사 및 반투과경은 안정형 공진기를 구성할 수 있도록, 반투과경은 평면이며, 전반사경은 곡률반경이 2m이다. 또한 반사율은 전반사경은 루비레이저의 발진파장인 694.3nm에서 99.5% 이상이며, 반투과경은 40%이며 재질은 용융실리카(fused silica)이다.

플래쉬램프는 필요로하는 레이저 출력, 루비로드의 길이와 직경, 수명 등을 고려하여 ILC 사의 6F3 제는(Xc) 플래쉬램프를 선택하였다. 사용된 루비로드는 직경 6mm, 길이 3.5" 이며 Cr 도핑율은 0.05%이다.

반사체 공동은 내부단면이 타원이 되도록 가공하였고, 타원의 형태는 단일타원(Single Ellipse) 구조로서 이심률(eccentricity)은 0.46이 되도록 하였다. 반사체 공동은 황동으로 타원원통을 가공한 다음 내부를 알루미늄(Al)코팅을 함으로서 루비레이저 여기과정에서의 반사율을 높이도록 하였고, 광축방향의 길이는 플래쉬램프의 아크길이와 일치시킴으로서 플래쉬램프로부터 루비로드에로의 에너지 전달이 최대가 되도록 하였다.

루비결정의 온도상승은 루비레이저의 발진문턱치를 올리고, 또한 밀도반진에도 악영향을 미치므로 안정된 동작을 위하여 루비로드 주위에 파이렉스(Pyrex) 판으로 냉각수의 유로를 형성하고 냉각수를 순환(유량 8 l/min)시키는 구조로 하였다.

그림 2. (a), (b) 는 실제, 제작한 반사체 공동의 모습을 보인다.

### 3.2. 전원장치

플래쉬램프를 점등시키기 위한 전원장치는 플래쉬램프 주전원과 트리거를 위한 시머(simmer) 보조전원으로 구성된다. 주전원의 설계에 있어서는 다음과 같은 사항을 고려하였다.

- (1) 레이저 문턱치에 도달하기 위해 필요한 입력에너지(충전전압, 커패시턴스)
- (2) 플래쉬램프의 점등시간(주전류 펄스폭, 인덕턴스)
- (3) 사용하는 플래쉬램프의 광출력의 최적화(커패시턴스, 인덕턴스의 재조정) 및 안정적인 동작(램프의 최대 허용전류, 최대입력에너지)

위와같은 사항을 유의하여회로의 충전전압, 펄스폭, 인덕턴스, 커패시턴스 등을 변수로 최적의 회로를 구성하기 위한 계산을 행하였고, 이 계산 결과로부터 펄스폭을 200  $\mu$ s - 250 $\mu$ s 로하고, 플래쉬램프의 입력에너지를 약 400J 정도로 예상하여 C = 200  $\mu$ F, L = 30  $\mu$ H 로 정하였다.

이 때 예상되는 각종 파라메타는 아래와 같다.

$$\text{펄스폭 } t_p = 3\sqrt{LC} = 232\mu\text{s}$$

$$\text{특성임피던스 } Z_0 = \sqrt{L/C} = 0.39$$

$$\text{damping 파라메타 } \alpha = K_0 / (V_0 Z_0)^{1/2} = 0.7 \sim 0.54$$

$$(V_0 = 1500 \sim 2500V)$$

$$\text{전류최대치 } i_p = (0.5 V_0) / Z_0 = 1923 \sim 3205 A$$

$$(V_0 = 1500 \sim 2500V)$$

$$\text{입력에너지 } E_0 = 225 \sim 625 J (V_0 = 1500 \sim 2500V)$$

트리거 방식은 비교적 동작이 안정하며, 램프의 수명도 연장할 수 있으며, 램프의 주전원에 고전압이 인가되는 것을 피할 수 있는 simmer 운전 방식을 채택하였다. 본 연구에서는 램프에 흐르는 simmer 전류는 20mA, 방전개시전 전극에 인가전압 900V 정도가 되도록 하였다. 그림 3.은 전원장치의 주요부를 보여준다.

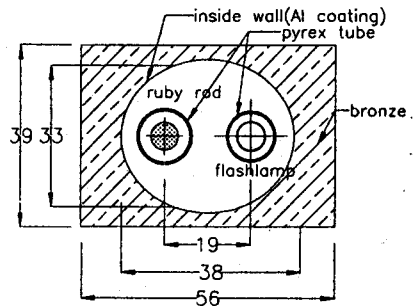


그림 2. (a) 반사체공동의 모습(단면도)

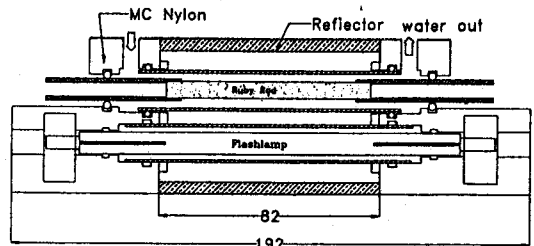


그림 2. (b) 반사체공동의 모습(측면도)

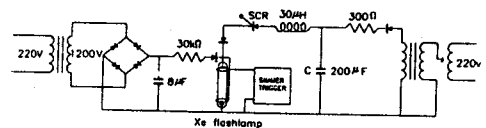


그림 3. 루비레이저의 전원회로도

## 4. 특성실험 및 논의

루비레이저의 특성 실험은 먼저 플래쉬램프의 점등특성을 파악하기 위하여 플래쉬램프에 대한 simmer 방전특성, 플래쉬램프에 흐르는 전류 및 전압특성을 조사하였다.

플래쉬램프의 simmer 방전을 위하여 전극양단에 인가되는 전압은 800V 이상이 되어야 함을 알 수 있었고,

simmer 방전이 유지되었을 때, 플래쉬램프에 흐르는 전류는 20 - 50mA, 방전유지 전압은 120V - 300V 정도임을 알 수 있었다.

그림 4는 충전커패시터 충전전압에 따른 플래쉬램프 통전 전류파형을 보인다. 전류측정에 사용한 CT (Pearson Electronics 사)는 0.01V/A의 응답특성을 가지고 있다.

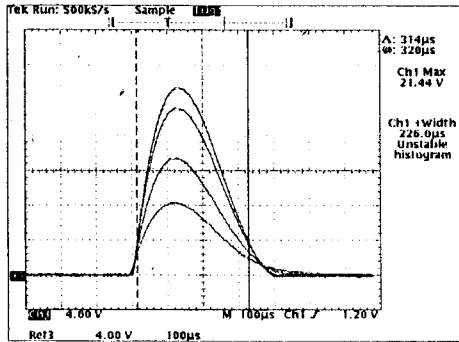


그림 4. 충전전압에 따른 램프통전 전류파형 (충전전압 : 아래로부터 1000V, 1500V, 2000V, 2200V)

그림에서 측정된 전류펄스폭은 310 µs 정도로서 계산치인  $3\sqrt{LC}$  (232µs)보다는 약간 큰 값을 나타내며, 전류 피크치는 800A에서 2250A로서 계산치(1250A - 2750A)보다 약간 적게 나옴을 알 수 있었다. 이는 계산상의 펄스폭과 최대전류치는 회로에 내재하는 저항성분을 무시한 임계감쇄(critical damping,  $\alpha = 0.8$ )의 경우이나, 실제 회로에서는 상당한 회로의 저항성분이 존재하기 때문으로 생각된다.

그림 5는 충전전압 2000V에서 점등시의 플래쉬램프 양단의 전압 전류 파형을 동시에 측정한 파형이며, 전압 측정에는 1000:1 고압 프루브를 이용하였다. 그림 6에서 CH1이 전류파형이며, CH2가 전압파형으로서 플래쉬램프의 전형적인 전압, 전류파형을 볼 수 있다.

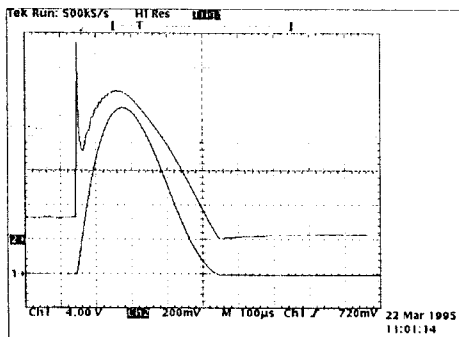


그림 5. 플래쉬램프의 전압 및 전류파형 (충전전압 : 2 kV, C = 200 µF)

그림 6에 플래쉬램프 전류와 레이저 발진펄스의 펄스 폭을 동시에 측정한 파형을 보인다. 레이저 빔의 펄스폭을 측정하기 위한 센서는 Antel Optronics사의 Model No AR-S1 실리콘 PIN 광다이오드이다. 그림에서 CH1이 전류파형이고, CH2가 레이저 펄스 파형이다. 플래쉬램프의 점등후 약 200µs 후에 레이저 발진이 시작되고, 전류가 0으로 떨어지면서 레이저 발진도 멈추는 것을 알 수 있다. 이 지연시간은 광펌핑에 의해 루비결정이 레이저 발진을 위한 임계밀도반전을 이루기 위해 필요한 시간으로서, 임계치가 높은 루비의 경우가 Nd:YAG의 경우(약 50µs)보다 훨씬 길어짐을 알 수 있으며 또한 이 지연시간은 입력에너지가 증가할수록 짧아짐도 확인할 수 있었다. 측정된 레이저 펄스의 폭은 플래쉬램프 입력에너지에 따라 약간의 차이가 있으며, 약 110µs에서 130µs로 측정되었다.

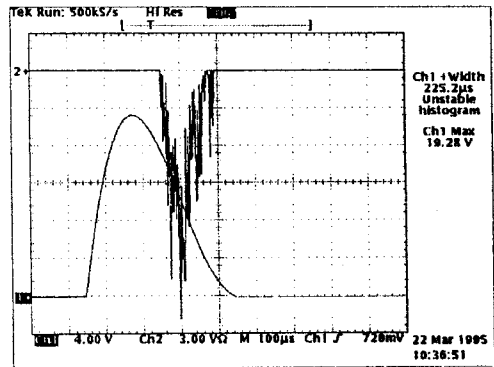


그림 6. 플래쉬램프의 전류파형과 레이저 발진파형

레이저의 출력에너지 특성은 충전커패시터의 전압(입력 에너지)의 변화에 따른 출력특성을 조사하였다. 출력에너지의 측정은 Vector P25 Pyroelectric Detector로 수광하여 출력에너지 메타(Scientech Model No. S200)으로 측정하였다. 그림 7은 충전전압에 따른 출력에너지를 보인다. 이때 냉각수의 온도(루비표면의 온도)는 18°C를 유지하였다. 레이저 발진을 위한 임계치는 약 1750V(에너지 306J)로 조사되었는데, 이는 루비결정 단위부피당 플래쉬램프 전기입력 122.4J/cm<sup>3</sup>에 해당하고 비교적 낮은 에너지에서 발진이 이루어져(전형적인 임계에너지 100 - 320J/cm<sup>3</sup>), 효율적인 광전달이 됨을 알 수 있다. 램프 최대입력에너지에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

단위체적당 입력에너지

$$= (\text{lamp input})/(\text{Rod volume}) = 193 \text{ J/cm}^3$$

단위체적당출력에너지

$$= (\text{laser output})/(\text{Rod volume}) = 68\text{mJ/cm}^3$$

전체효율 = 0.035%

루비 체적 : 2.5cm<sup>3</sup>

또한 다음식으로 정의되는 경사효율은

$$\text{경사효율(slope efficiency)} : \sigma_s = P_{out} / (P_{in} - P_{th}) \\ = 0.09(\%)$$

로 나타났다. 따라서 본 시스템에서 입력을 더욱 증가시켰을 때의 예상출력은 다음식으로 표현가능하다.

$$P_{out} (J) \approx 0.0009P_{in} (J) - 306J$$

최대입력에너지에서 전체효율이 낮은 것은(전형적인 값 0.1 - 1%) 램프의 전기적 입력에너지가 충분하지 못하기 때문에 입력에너지를 증가시키면 전체효율은 증가할 것으로 예상된다. 측정용 레이저의 개발을 목적으로하고 있는 본 연구에서는 정상발전일 때 100mJ 이상이면 에너지는 충분할 것으로 생각되며, Q-스위치를 채용할 경우의 Q-스위치 효율을 60%정도로 가정할 때, 본 시스템은 Q-스위치 최대출력 약 110mJ 이 가능할 것으로 예상되어 플라즈마 측정용으로서 사용가능할 것으로 판단된다.

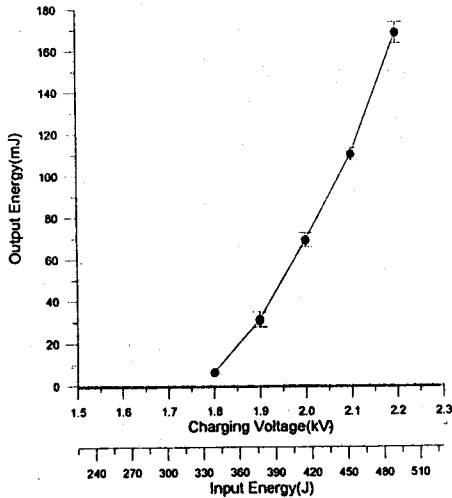


그림 7. 충전전압에 따른 출력에너지

## 5. 결 론

플라즈마의 진단을 위한 측정용 레이저로서 소형의 루비 레이저를 설계, 제작하고 그 동작특성을 조사하였다.

제작된 레이저는 임계 플래시램프 입력은 306J (루비결정 단위부피당 전기입력 122.4 J/cm<sup>3</sup>) 으로서 비교적 낮은 에너지에서 발진이 이루어졌으며, 램프 최대입력에너지 (484J)에서 레이저 출력 170mJ, 경사효율 0.09%를 달성하였다. 본 시스템은 Q 스위치 발진을 시키는 경우에도 100mJ 이상의 에너지를 기대할 수 있기 때문에 측정용 레이저로서 충분하게 활용가능할 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- [1] Orazio Svelto, Principles of Laser, Plenum Press(1982)
- [2] ILC Company "A Guide To Flashlamps For Pulsed Solid State Lasers", Technical Bulletin 2
- [3] W. Koechner, "Solid-State Laser Engineering", Springer-Verlag, New York, Heidelberg, 1976
- [4] R.H.Dishington, W.R.Hook, and R.P.Hilberg, "Flashlamp Discharge and Laser Efficiency", Appl. Optics, Vol.13, No. 10, 1974, pp 2300 - 2312

본 논문은 '94년 과학기술처에서 시행한 특정연구개발 사업의 연구결과의 일부입니다.