

# 비축형 불안정공진기를이용한 구리증기레이저의 출력특성 Output Characteristics of the Copper Vapor Laser with Off-axis Unstable Resonator

임 창환, 차 병현, 김 성호, 최 화립, 이 중민  
한국원자력연구소 원자분광학연구실

## 초 록

방전가열형 구리증기레이저에서 비축형 불안정공진기를 사용하여 레이저의 빔 발산각을 안정공진기의 경우에 비해 25배( $200 \mu\text{rad}$ ) 까지 줄였다. 이때 불안정공진기의 배율  $M$  은 50 이었으며, 평균출력은 안정공진기를 사용할 경우에 비해 53 % 를 얻었다. 또한,  $M$  이 8.5 일때 ( $750 \mu\text{rad}$ ) 평균출력은 안정공진기의 94 % 까지 도달하였다.

## 1. 서 론

1966년 Walter 등에 의하여 개발된 구리증기레이저는 Isaev, Petrash, Anderson 등에 의하여 레이저 효율 및 안정성이 크게 증대되었으며 그 활용범위도 다양해졌다.[1] 원자의 분광학적 구조에서 공명준위에서 준안정준위의 전이를 이용하는 구리, 금, 납 등의 금속증기레이저들은 레이저 매질의 이득이 높은 반면 반전시간이 매우 짧은 것으로 알려져있다.[2] 이들 레이저의 펄스폭은 통상 20-30 nsec 정도로 1-2 m 의 공진기를 사용할 경우 원자나 분자의 반전시간 동안 수회 밖에 왕복할 수 없다. 이와같이 짧은 왕복회수로는 공진기의 모드를 형성할 수 없게 되어 레이저의 빔특성이 나빠지게 된다. 실제 이들 레이저는 매질의 이득이 높고 원자의 짧은 반전시간 때문에 높은 반사율의 출력경을 사용하지 않고 수 % 의 반사율의 거울이나 맨유리를 출력경으로 사용한다. 따라서 이와같이 반전시간이 짧고 이득이 큰 레이저에서 통상의 안정공진기 구조로는 작은 빔 발산각을 기대할 수 없다.

불안정공진기는 높은 이득과 고출력 레이저에서 발산각이 작은 레이저를 얻는데 가장 적합한 것으로 알려져 있다.[3] 본 연구에서는 중방전가열형 구리증기레이저에서 비축형 불안정공진기에 대하여 정성적으로 해석하였으며 이 공진기를 사용할 때 빔 발산각과 출력과의 관계를 조사하였다.

## 2. 이 론

불안정공진기는 높은 이득의 고출력 레이저에서 큰 모드체적과 작은 빔 발산각의 레이저 빔을 얻는데 적합한 것으로 알려져 있다. 안정공진기와는 달리 불안정공진기에는 두 종류의 빛이 존재하는데, 그림 1. 에서와 같이 하나는 공진기에서 빠져나오는 발산광이고 나머지는 그와 반대방향으로 움직이는 수렴광이다.[4] 레이저 출력은 공진기로부터 나오는 발산광이기 때문에 레이저 빔 형성이 공진기 내에서 발산광에 의하여 형성되는 것처럼 보이지만, 실제 레이저 빔은 수렴광에 의해 형성되며 공진기내에서 빔 직경의 크기가 수렴에

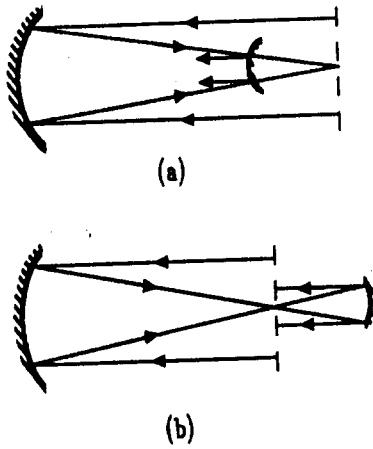


Fig.1 망원형 불안정공진기 (a) 갈릴리안형, (b) 케플러형.

외에 작아지면서 회절의 영향을 받아 발산광으로 전환되어 공진기로부터 빠져나오게 된다. 수렴광은 발산광에 비하여 빔 직경의 크기가 작아지고 기하학적인 손실이 없어 빨리 증폭될 수 있으므로 많은 유도방출을 기대할 수 있다. 여러 수렴광 중에서 가장 손실 없이 많은 왕복운동을 할 수 있는 빛은 공진기의 축을 따라 평행하게 들어 오는 빛이다. 이와 같은 빛의 왕복회수는 다음과 같다.

$$n = 1 + \ln(M_0)/\ln(M) \quad (1)$$

이때, 배율  $M$ 은 두거울의 곡률비( $R_1/R_2$ )이며  $M_0$ 는 Fresnel number ( $D_1^2/\lambda R_1$ ) 이고  $D_1$ 은 오목거울의 직경,  $\lambda$ 은 레이저 광의 파장이다. 레이저 매질에서 자발방출에 의한 전방향의 빛중 공진기에 평행한 빛이 가장 크게 증폭( $\exp(2\alpha n L_m)$ )되고 나머지 방향의 빛은 증폭될 수 없다. 여기서  $\alpha$ 는 이득이고  $L_m$ 는 레이저 매질의 길이이다. 이와같이 형성된 회절한계치의 평행광은 공진기의 기하학적인 손실(레이저 출력)로 단일왕복당 ( $1-1/M^2$ ) 만큼 공진기에서 빠져나오게 된다. 만일 레이저매질의 이득이 기하학적인 손실을 극복할 수

있고 레이저 상준위의 수명이 길면  $n+1$ 번 왕복한 빛들이  $n$ 번 왕복한 빛들에 비하여 그 세기가 증폭되어 불안정공진기의 정상상태모드 발진이 가능하게 된다. 레이저 매질의 이득과 기하학적 손실에 의한 정상상태의 레이저 발진은 다음의 수식을 만족할 경우 가능하다.

$$\exp(\alpha_{\text{eff}} n L_m) = M^2 \quad (2)$$

반면 이득이 공진기의 기하학적 손실보다 작을 경우  $n+1$ 번 왕복한 빛이  $n$ 번 왕복한 빛에 비해 그 강도가 줄어든다. 이때 레이저 출력은 증폭된 빛과 각기 다른 시간에 방출되는 평행한 자발방출 빛이 더해진 것이어서 공간적으로는 균일한 출력을 주고 있으나 시간적으로는 매우 복잡한 모습을 나타내며, 레이저의 세기는  $n$ 번 왕복에 의하여 증폭되는 양에 크게 의존하게 된다.

한편,  $\alpha L_m$  값이 충분히 커서 레이저 빔 형성시간( $2nL/c$ ,  $c$ :광속) 이전에 이득의 포화가 이루어지면 이때의 빔에는 회절한계치의 광이 대부분을 차지하게 된다. 여기서 포화는 레이저상준위의 이완확률과 유도 방출의 확률이 같을 때를 의미하며 이 포화 조건을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\exp(2\alpha L_m n_0) = 4\pi/\Omega \quad (3)$$

이때  $n_0$ 은 포화가 일어날 때까지 공진기에서의 왕복회수이고  $\Omega(\pi \lambda^2/D^2)$ 는 레이저 매질에서 유도방출에 의하여 증폭되는 입체각이다. 레이저상준위의 이완은 주로 자발방출에 의하여 일어나므로 식 (3)은  $4\pi$  방향으로 복사하는 자발 방출광과 입체각  $\Omega$ 안에서 일어나는 유도 방출광의 양이 같을 때를 의미한다. 따라서 시간 및 공간적으로 간섭성이 좋은 레이저를 얻기 위해서는 매질의 이득이 손실을  $1-1/M^2$  보다 커야하며 왕복회수가 포화가 일어나는 왕복회수  $n_0$  보다는 작아야 한다. 또한 레이저의 최대출력을 얻기 위해서는 왕복회수를  $n_0$ 에 가깝게 하여야한다.

레이저의 매질에서  $D_2$ 보다 크고  $D_1$ 보다 작은

부분에서 광축에 평행한 자발방출광은  $n-1/2$ 번을 출력경  $D_2$ 의 안쪽에서 움직일 것이므로 회절한계치 빔의 형성은 출력경  $D_2$ 의 안쪽에서 일어난다고 할 수 있다. 중방전형 구리증기레이저는 레이저관 내부의 고전압 방전이 레이저관 벽으로부터 시작하여 관 중심부로 진행하므로, 배질의 밀도 반전도 역시 레이저 관 벽쪽에서 먼저 이루어 지고 레이저관 중심부는 이보다 지연되게 된다. 이 지연시간은 레이저관의 직경에 따라 다르나 보통 수 - 수십 nsec 정도 이다. 따라서 레이저 공진기를 그림 2.와 같이 비축으로 구성하면, 밀도 반전이 먼저 이루어지는 레이저관 벽쪽에서 충분한 증폭된 빛이 시간지연을 갖고 밀도 반전이 나중에 이루어지는 레이저관 중앙부를 통과하여 빔 발산각을 줄일 수 있을 뿐더러 효율적인 레이저 동작을 기대할 수 있다.

### 3. 실험 및 결과

본 실험에 사용된 방전가열형 구리증기레이저는 20 W급[5] 이며, 사용된 불안정공진기는 촛점공유 갈릴레이형으로서 그림 2.와 같이 구성하였다. 출력특성 측정시, 레이저 충전축전기(6nF)의 충전전압은 11.5 kV, 완충기체(Ne)의 압력은 50 mbar, 레이저관의 온도는 1470 °C였다. 그림 3.은 불안정공진기의 배율(M)에 따른 레이저 평균출력 및 발산각을 나타낸 것이다.

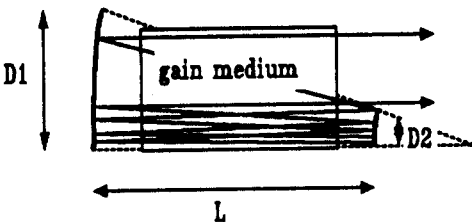


Fig.2 구리증기레이저의 비축형 불안정공진기.

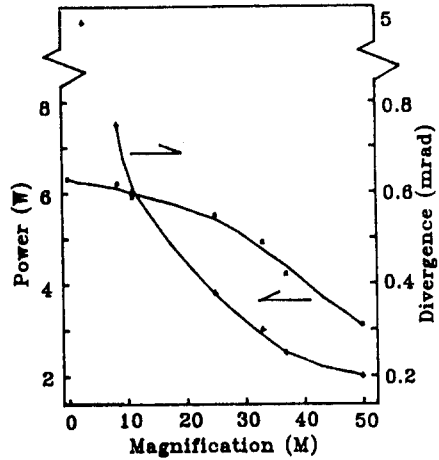


Fig. 3 비축형 불안정공진기를 이용한 구리증기레이저의 배율에 따른 출력 및 빔 발산각.

레이저의 평균출력은 Scientek energy meter (model 365)를 사용하여 측정하였다. 레이저 빔 발산각은 공진기의 출력경에서 5 M 떨어진 지점에서 촛점거리 1M 렌즈를 사용하여 레이저 빔을 집속시켜 촛점에서 빔직경을 측정하여 계산한 것이다. 그림 3에서는 M이 증가함에 따라 레이저 평균출력과 레이저의 발산각이 감소함을 볼 수 있다. 그림 4.는 안정공진기와 불안정공진기의 펄스모양을 레이저의 중앙부분과 벽쪽에서 발진하는 레이저를 oscilloscope(Lecroy 9450)로 관측한 것이다. 평면-평면경을 사용한 안정공진기에서는 벽쪽에서 발진하는 광이 중앙의 것보다 7 nsec 정도 앞서 있으나 불안정공진기의 경우는 펄스모양과 그 시간차이가 거의 없음을 알 수 있다. 그림 3.에서 출력은  $M = 15$  가 될 때 까지 크게 변하지 않으나 빔 발산각은 급격하게 줄어들음을 볼 수 있다. 이는 레이저관의 벽쪽에서 먼저 형성되는 회절한계치 빔이 레이저관 중앙에서 충분한 밀도 반전이 이루어 진후 이를 통과하기 때문에 출력 손실이 적게 나타난 것이다. M이 25보다 크게 되면 빔 발산각은 크게 줄지않지만 레이저의 출력은 선형적으로 감소함을 볼 수 있다. 이때에는 불안정공진기의 정상상태 발진이 이루어지지 않아

레이저 출력이 빔 형성시간에 비례하기 때문에 해석 된다.

#### 4. 결 론

비축형 불안정공진기를 이용하여 구리증기레이저의 발산각을 최대 200  $\mu\text{rad}$  까지 줄였으며 평균출력은 범발산각을 750  $\mu\text{rad}$ 로 할 경우 안정공진기를 사용할 때의 94%에 도달하였다. 이와같이 작은 발산각의 레이저는 구리증기레이저의 증폭계열 구성, 색소레이저 여기, 원격측정 및 탐사, 해저통신 등에 응용될 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- [1] 차병현, 박사학위 청구논문, "고출력 구리증기레이저에 관한 연구", (1987).
- [2] G.G. Petrash, Usp. Fiz. Nauk, 105, 645 (1971).
- [3] A.E. Siegman, Pro. IEEE, 53, 277 (1965).
- [4] A.A. Isaev, M.A. Kazaryan, G.G. Petrash, and S.G. Rautian Sov. J. Quant. Electron. 4, 761 (1974).
- [5] 임창환, 차병현, 성낙진, 이종민, 한국광학회지, 1, 28 (1990).
- [6] Lang Peihui, Sun Xiaoxiang, Zhang Shaofeng, Wo Minzheng, Ren Hong, Wang Shanghai, Chin. J. Laser, 15, 197 (1988).

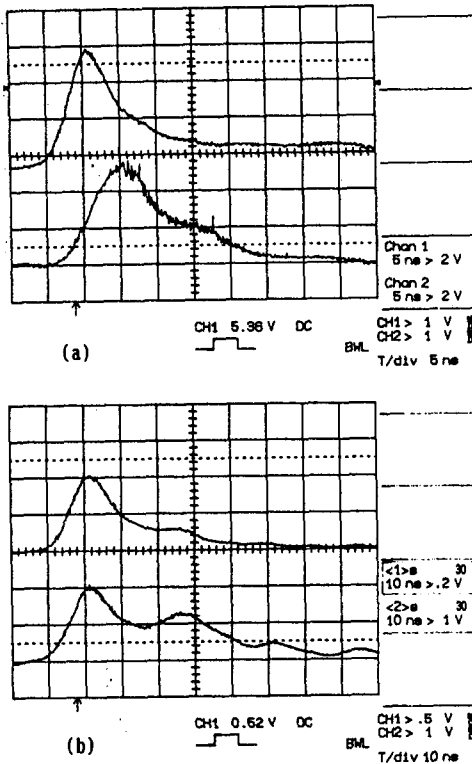


Fig.4 구리증기레이저 출력의 oscillograms  
(a) 안정공진기, (b) 불안정공진기.