

단일 종모드 Ti:Sapphire 링 레이저 제작과 동작특성

Operational Characteristics of a Single Longitudinal Mode

김용평, 조재홍, 윤대현

한국표준연구소 레이저연구실

Ti:Sapphire 레이저는 광대역 특성때문에 최근 색소레이저의 대체 레이저로서 활발히 연구되고 있다. 본 연구에서는 고분해 분광학의 광원으로 이용하기 위해 설계 제작한 단일 종모드로 동작하는 Ti:Sapphire 레이저의 특성에 대해 논한다.

1. 서론

레이저를 고분해 광원으로 이용하기 위하여는 단일 종모드 발진과 연속적인 주파수 tuning 그리고 레이저 주파수 안정화가 매우 중요한 요소이다.[1] 근적외선 영역에서부터 자외선 영역에 걸쳐 연속적인 파장 tuning을 할 수 있는 레이저로는 일반적으로 색소 레이저가 많이 이용된다.[2] 그러나 색소레이저는 색소 jet의 특성상 주파수 jitter가 고체 매질에 비하여 매우 커 고분해 분광용 광원으로 사용하려면 매우 복잡한 주파수 제어 방법이 필요하다.[3]

그런데 최근에 개발된 Ti:Al₂O₃ 레이저는 뛰어난 주파수 특성과 넓은 주파수 가변영역 (670~1,150 nm) 때문에 고분해 분광 광원과 모드록킹을 이용한 극초단 펄스 레이저 발생에 많이 이용되고 있다.[4,5] 특히 Ti:Al₂O₃ 링 레이저에서는 단일 종모드 발진이 Birefringent (Lyot) 필터와 하나의 thin etalon 만으로도

가능하고[3], 상용의 Ar⁺ 레이저로 고효율 펌핑이 가능하여 앞으로 근적외선 영역에서 초고분해 분광 광원으로 널리 쓰일 전망이다.[6]

또한 cw Ti:Al₂O₃ 레이저는 공진기 구조가 정상파 (standing-wave) 형태나 링 공진기 형태 모두 가능하다. 그러나 고분해 분광을 위하여는 단일 모드 발진이 용이해야 하는데 정상파 공진기는 레이저 매질에 강한 정상파 전사장을 형성하여 유도방출의 공간적 변화를 주는 spatial hole burning 현상이 생겨 다중 종모드 발진이 링 공진기에 비해 쉽게 이루어진다. 즉, 진행파(traveling-wave)인 펌핑광이 매질내에서 균일한 펌핑을 하므로 매질내에 균일한 이득이 존재하는 반면, 정상파의 nod 부근의 이득은 단일 모드발진에 기여하지 못한다. 이 여분의 이득은 다른 종모드 발진에 도움을 주고 따라서 서로다른 종모드가 동시에 발진하게 된다.[7] 이에따라 고분해 분광용 레이저 공진

기는 대부분 링 공진기 구조를 가진다.

Ar⁺ 레이저로 펌핑하는 정상파 Ti:Sapphire 레이저와 다중 종모드 Ti:Sapphire 링 레이저의 제작과 특성은 이미 저자들에 의해 보고된 바 있다.[8,9] 본고에서는 근적외선 영역인 730 nm와 830 nm 사이에서 고분해 분광용 레이저 분광기에 쓰일 단일 종모드로 발진하는 Ti:Al₂O₃ 링 레이저 제작과 동작특성에 대하여 기술하였다.

II. 단일 종모드 Ti:Al₂O₃ 링 레이저 제작

단일 종모드 Ti:Al₂O₃ 링 레이저 공진기는 저자들에 의해서 이미 발표된 정상파[8] 및 링[9] Ti:Al₂O₃ 레이저 공진기 구조와 같이 설계되었다. 그러나 참고 문헌[9]에서 지적하였듯이 두개의 folded 공진기 거울의 곡률 반경을 5 cm로 하여 레이저 threshold와 출력을 개선하였다. 리고 펌핑 레이저를 제외한 모든 부분 30x60 cm² stainless steel 광학 bread-board에 설치하여 역학적 안정성과 이동을 용이하게 하였다. 전체 공진기 길이는 L=120 cm이고 단일 종모드를 얻기 위하여 3 plate Lyot 필터와 thin etalon을 공진기 내부에 설치하였다. 또한 레이저 주파수 안정화시 공진기 길이를 제어하기 위해 직경 6 mm, 두께 3 mm인 평면거울을 고속 PZT(70 kHz 공명주파수, PI사 P-249.10)에 부착하였다. 그림 1에는 제작한 단일모드 Ti:Al₂O₃ 링 레이저의 구조를 보여준다.

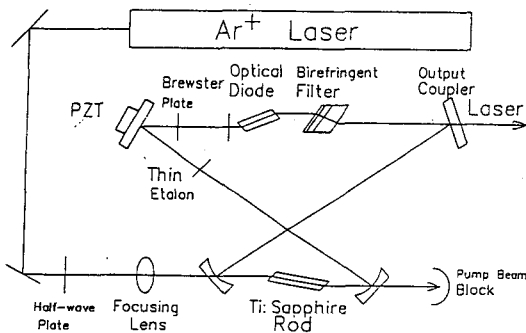


Fig. 1 A schematic diagram of the single mode Ti:Al₂O₃ ring laser.

한 방향으로 발진하는 링 Ti:Al₂O₃ 레이저는 광학 다이오드 (optical diode)를 사용하여 만들 수 있다. 광학 다이오드는 Faraday 및 광 rotator(Coherent사 7140)구성되어 있는데 이 광학 다이오드는 양방향으로 발진하는 공진기 모드에 방향성을 가진 광 손실을 주어 링 공진기에서 단일 방향 발진을 얻을 수 있게 한다. 즉 Faraday rotator는 양 방향발진 빔의 편광 성분 모두에게 회전을 두며, 광 rotator(quartz plate)는 진행방향에 의존하는 회전을 준다. 따라서 광 다이오드에서 편광의 회전이 있는 공진기모드는 공진기내의 다른 Brewster 광학 요소에서 손실이 커져 발진할 수 없고 광 다이오드에 의해서도 편광의 회전이 없는 공진기 모드만 발진하게 된다. 이 때 Faraday rotator의 자기장 방향에 따라 서로 반대 방향으로 발진하는 단일 방향 링 Ti:Al₂O₃ 레이저를 얻을 수 있다. 이 광 다이오드를 이용한 한방향 발진은 AOM 방법이나[10], retro-mirror 방법[9]과 비교하면 레이저의 threshold는 약간 높아지나 방향 변환이 간편하고 높은 선택효율을 갖는다.

한편 단일 방향 링 레이저에서 단일 종 모드 발진을 얻으려면 파장 선택소자가 필요하다. 일반적인 Ti:Al₂O₃ 레이저에서는 레이저 공진기의 특정 종모드 발진을 위해 2단계의 파장 선택소자가 쓰인다. 첫번째의 파장선택 소자는 파장 선택범위는 넓으나 선택도가 떨어지는 birefringent (Lyot 필터)가 사용된다. 이때 사용되는 Lyot 필터의 선폴은 3 plate 사용시 대개 1800 GHz(3.4 nm at 750 nm) 정도이다. 두번째의 파장 선택 소자는 단일 종모드 발진을 얻기 위한 FSR 150 GHz 정도인 thin etalon이 쓰인다. 본 실험에서는 그림 1에 있는 것처럼 첫번째 파장선택 소자로써 3 plate birefringent 필터 (Coherent사)를 사용하였고 thin etalon으로는 두께 1 mm (150 GHz)인 BK7 판의 양면에 720~840 nm에서 25 % 반사코팅을 하여 사용하였다. thin etalon은 파장 tuning과 공진기 빔 정렬을 위하여 정밀 2축 mount에 고정시켰다. 두 파장선택

소자의 부과곡선 peak가 중첩되는 부분이 전체 파장선택 소자의 부과곡이 되며, 하나의 공진기 종모드만 충분한 이득을 얻어 단일모드 발진을 가능하게 한다. 그림 1에는 또한 미세한 파장 tuning을 위한 quartz Brester plate (galvano plate)를 공진기에 설치하였다.

III. 단일 종모드 Ti:Al₂O₃ 링 레이저의 동작특성

단일 종모드 발진에 앞서 개선된 공진기 구조에서 광학 부품을 뺀 빈 공진기의 레이저 출력특성을 조사하였다. 이때 레이저 발진파장은 Ti:Al₂O₃ 레이저 이득의 peak 파장인 790 nm에서 발진한다.[9] 그림 2에 단일 종모드 출력과 함께 빈 공진기의 출력을 나타내었는데 레이저 threshold는 2.8 W, 그리고 한방향 출력효율이 15.6 %로써, 곡률 20 cm의 공진기 거울

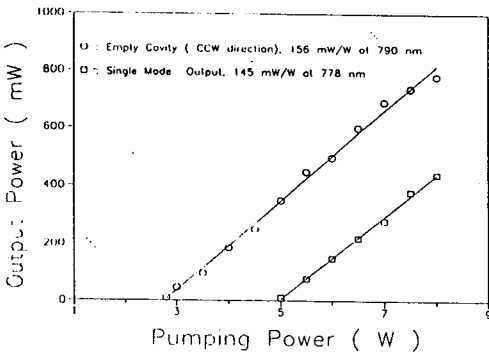


Fig. 2 Output power of the Ti:Al₂O₃ ring laser for empty and single longitudinal mode cavity. (see text)

사용시 보다 threshold는 1 W가 낮아졌고 레이저출력은 1.5배 증가하여 최대출력 800 nW를 얻을 수 있었다. 만일 retro-mirror로 한방향 발진을 얻으면 이 빈 공진기에서는 1.5 W 이상의 출력을 얻을 수 있다.[9]

단일모드 Ti:Al₂O₃ 링 레이저를 이동 가능한 30 cm x 60 cm² stainless steel 광 board에 설치하여 역학적 안정도를 높일 수 있게 하고 실험하였다. 그림 3에는 778 nm에서 광 스펙트럼 분석기로 관찰한

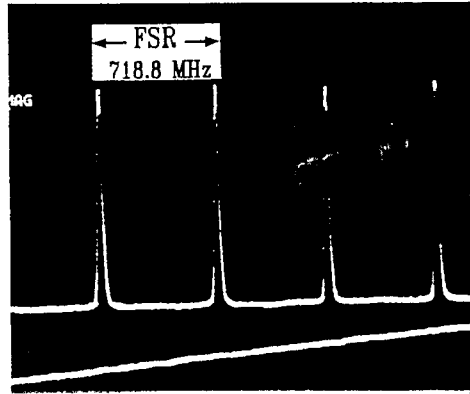


fig. 3 Optical spectrum of the single mode Ti:Al₂O₃ ring laser. (FSR = 718.8 MHz)

Ti:Al₂O₃ 링 레이저의 광 스펙트럼 사진이다. 이때 사용한 광스펙트럼 분석기는 FSR이 750 MHz이고 선포는 32 MHz이며, 720 nm ~ 840 nm 사이에서 동작한다.[11] 그림 3으로부터 제작한 Ti:Al₂O₃ 링 레이저는 종모드 간격이 약 250 MHz 이므로 단일 종모드로 발진함을 알 수 있다.

그림 3에는 또한 광 스펙트럼분석기의 PZT에 인가한 ramp 전압을 함께 보여준다. 한편 thin etalon을 광축에 대해 회전시키면 2개의 종모드를 발진시킬 수 있는데 이때 두 종모드간의 맥놀이 주파수를 rf 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정하였다.[11] 두종모드 간의 주파수 차이를 알면 공진기 내부에 설치된 광학부품 내에서의 광의 속도지연을 고려한 전체 유효 공진기 길이를 알 수 있다. 레이저의 발진모드는 $\nu_q = q \cdot \text{FSR}$ 로 주어지는데, 여기서 q는 매우 큰 정수이고 FSR은 링 레이저의 경우 c/L_{eff} 이 된다. 여기서 c는 광속이고 L_{eff}는 유효 공진기 길이이다. ν_q 와 ν_{q+1} 사이의 맥놀이 주파수 $\Delta\nu$ 는

$$\Delta\nu = |\nu_q - \nu_{q+1}| \text{FSR} = c/L_{\text{eff}} \quad (1)$$

이 된다. rf 스펙트럼 분석기로 측정한 두 모드간의 맥놀이 주파수는 244.6 MHz 이었는데 이로 부터 구한 링 레이저 공진기의 유효 공진기 길이는 L_{eff}=122.6cm 이었다.

광 스펙트럼 분석기를 이용하여 단일 종모드 발진을 확인하면서 파장 tuning 영역을 조사하였다. 이동 거리 25 mm인 micrometer에 부착된 Lyot 필터를 공진기 빔의 광축을 중심으로 회전하면 레이저 파장이 tuning 되는데, 이때 발진 파장은 초점거리 25 cm인 monochrometer (Thermo Jarrell 사 82-420)를 이용하여 측정하였는데, monochrometer에서 나온 신호는 Si 검출기로(EG&G FND100) 검출하여 오실로스코프로 확인하였다. 그림 4에는 발진파장에 대한 단일모드 출력 변화를 보여준다. 그림 4에서처럼 단일모드 발진은 730 nm~790 nm의 전영역에서 얻을 수 있었고, 이때의 펌핑 power는 7 W 이었다. 730 nm 이상의 단파장에서 레이저 공진기 광학부품이 720 nm~840 nm 사이에서 코팅되어 반사율의 감소에 의한 손실이 커져 레이저 threshold가 높아진 때문이고 780 nm 이하의 장파장에서 출력이 급격히 떨어지는 이유는 파장선택소자로 사용한 Lyot 필터의 birefringence order edge가 790 nm에서 끝나기 때문이다. 따라서 birefringence order를 830 nm 이상 tuning 할 수 있는것을 사용하면 730 nm~830 nm 사이에서 단일모드 발진을 얻을 수 있을 것이다.

한편 레이저 발진파장을 출력이 최대인 778 nm에 고정하고 펌프 power와 단일모드 레이저 출력과의 관계를 조사하였다. 그림 2에 단일모드 출력과 빈공진기의 한방향 출력을 같이 나타내었다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 단일모드 발진시 공진기내에 많은 광학부품이 있어 상대적으로 빈공진기보다 레이저 threshold가 높으나(4.9 W) 레이저 출력의 펌핑 power에 대한 효율은 14.5 %로써 빈공진기의 15.6 %와 거의 비슷하였다. 레이저의 기율기 효율 η 는 내부양자효율 η_0' , 출력 효율 T, 그리고 round-trip 공진기 손실 L과 다음과 같은 관계로 주어지며, 이로부터 단일모드 Ti:Al₂O₃ 링 레이저의 round-trip 손실 L을 구할 수 있다.[12]

$$\eta_0' \times A [T(T + L)] \quad (2)$$

여기서 X는 펌핑파장과 레이저 파장과의 비이고, A는

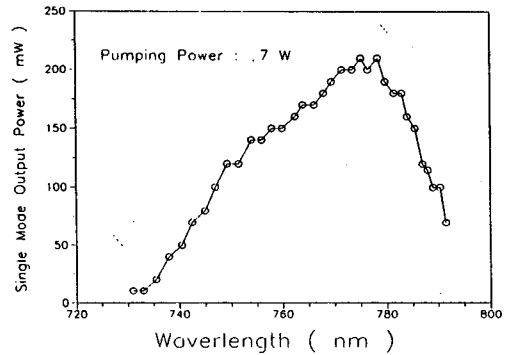


Fig. 4 Tuning curve of the single mode Ti:Al₂O₃ ring laser with 7 W pumping power of Ar⁺ laser.

레이저 rod에서 펌핑빔의 흡수율이다. 본 실험에 사용한 Ti:Al₂O₃ rod의 내부양자효율은 정상파 Ti:Al₂O₃ 레이저에서 구한 83 %를 사용하였으며, λ/2 plate, 펌핑 렌즈 및 입력 folded 공진기 거울에 의한 반사률 고려하면 A = 70 % 정도가 된다. 그림 2에서 빈공진기의 경우 참고문헌 [8]에서 구한 손실 L = 3 %를 이용하면 $\eta = 16.7$ %로 실험치인 15.6 %와 잘 일치한다. 반면 단일 모드 발진시는 공진기 내부에 많은 광학부품이 있어 빈 공진기보다 큰 round-trip 손실이 예상되며 이로인해 레이저 threshold가 높아진 것이다. 식(2)에 실험에서 구한 기율기 효율 14.5 %를 대입하면 단일모드 레이저의 round-trip 손실이 L = 3.7 % 로써 빈 공진기보다 약 1.3배 손실이 큼을 알 수 있다.

IV. 논의 및 결론

730 nm에서 790 nm 사이에서 연속적으로 파장 tuning이 가능한 단일 종모드 Ti:Al₂O₃ 링 레이저를 제작하였다. 레이저 출력은 779 nm에서 최대 440 mW를 얻었고 기율기 효율은 14.5 %로써 다중모드 Ti:Al₂O₃ 링 레이저와 비슷하였다. 제작한 링 레이저의 유효 공진기 길이는 rf 스펙트럼 분석기로 두 종모드간의 맥놀이 주파수로부터 알 수 있었는데 약 122.6 cm 이고

FSR은 244.6 MHz 이었다. 그리고 단일모드 Ti:Al₂O₃ 링 레이저의 round-trip 손실은 3.7 % 이었다.

Ti:Al₂O₃ 레이저의 발진파장은 670~1150 nm로 광 범위하나 본 연구에서는 유전체 코팅의 기술적 한계로 720 nm~840 nm 사이에서 광학부품을 코팅하여 사용하였다. Ti:Al₂O₃ 레이저 전체 발진파장에서 단일모드 출력을 얻기 위하여는 현재의 광학부품 코팅기술의 한계로 3 set의 광학 부품을 사용해야만 한다.

레이저의 출력과 threshold는 레이저 rod의 길이, FOM 및 folded 공진기 거울의 곡률반경과 매우 밀접한 관계가 있는데, 본 실험에서는 레이저 rod (FOM=146)는 참고문헌[8]과 같은것을 사용하였다. 다만 folded 공진기 거울의 곡률반경을 참고문헌 [9]의 계산결과에 따라 10 cm로 하여 실험한 결과 레이저 threshold는 1 W 정도 낮출수 있었고 레이저 출력은 1.5배 정도 향상시킬 수 있었다. 앞으로 길이가 1 cm이고 FOM이 200 인 레이저 rod를 이용하여 출력 및 레이저 threshold 개선에 대한 연구를 진행할 것이다.

한편, 단일모드 발진시 광스펙트럼 분광기로 확인 하면 레이저 발진모드의 hopping 현상이 관측되는데, 고분해 분광을 위해서는 이 주파수 hopping 현상없이 주파수를 tuning 할 수 있어야 한다. 주파수 hopping의 원인은 주로 레이저 공진기의 역학적 안정성과 관련이 있는데, 레이저의 주파수를 외부기준 공진기에 안정화하여 주파수 hopping 없이 주파수를 tuning할수 있는 Ti:Al₂O₃ 링 레이저 분광기 제작연구가 진행중에 있다.

참고문헌

- [1] M.W. Hamilton, Contemporary Physics, 30(1), 21 (1989).
 [2] T.F. Johnston, Jr., R.H. Brady, and W. Proffitt, Appl. Opts., 21(13), 2307 (1982).

- [3] P.A. Schultz, IEEE J. Quant. Elect., 24(6), 1039 (1988).
 [4] C.S. Adams and A.I. Ferguson, Opts. Comm., 75(5,6), 419 (1990).
 [5] N. Sarukura, Y. Ishida, and H. Nakano, Opts. Lett., 16(3), 153 (1991).
 [6] W. Vassen, C. Zimmermann, R. Kallenbach, and T.W. Hansch, Opts. Comm., 75(5,6), 435(1990).
 [7] L. Holberg, Dye Laser Principles: With Applications, Chapter 5, Springer-Verlag 1990.
 [8] 윤태현, 김규욱, 조재홍, 김용평, 원종욱, 새물리 30(5), 537 (1990).
 [9] T.H. Yoon, G.U. Kim, J.H. Jo, and Y.P. Kim, The Rev. Laser Eng., 19(2), 185 (1991).
 [10] R. Roy, P.A. Schultz, and A. Walter, Opts. Lett., 12(9), 672(1987).
 [11] 윤태현, 서호성, 조재홍, 김용평, 새물리 투고중
 [12] A. Sanchez, A.J. Strauss, R.L. Aggarwal, IEEE J. Quant. Elect., 24(6), 995 (1988).