비점수차가 보상된 Ar^+ 레이저로 펌핑하는 cw Ti:Sapphire 레이저

윤 태 현°, 김 규 욱, 조 재 흥, 원 종 욱+
레 이 저 연 구 실
+한 국 표 준 연 구 소

Astigmatically compensated cw Ti:Sapphire laser pumped by Ar^+ laser

Tai Hyun Yoon, Gyu Ug Kim, Jae Heung Jo, and Jong Wook Won
Laser Laboratory
Korea Standards Research Institute

Abstract

Room temperature cw operations of a standing wave and a unidirectional Ti:Sapphire laser pumped by a Ar^+ laser have been demonstrated in the same pumping cavity configuration. Laser emission at 790 nm was excited with all-line Ar^+ laser pump for both cavities. The maximum output power was found to be 600 mW in the standing wave cavity and 210 mW in the ring cavity. Values of (83 ± 10) % for the internal quantum efficiency and (3.0 ± 0.5) % for the round-trip cavity loss for standing wave cavity are obtained from the thresholds and slope efficiencies measured with 2.4 and 11.2 % optput couplers. The measured cavity-loss value at 790 nm gives a meterial figure of merit (FOM) to be 146. Unidirectional operation of the ring Ti:Sapphire laser will be discussed.

1. 서 론

파장가변 레이저는 물리 화학등의 여러 분야에서 매우 유용한 레이저로써 주파수 공간에서의 고분해 분광학이나 1) 시 공간에서의 극초단 펄스 레이저 분광학 2) 연구에 많이 사용되어 왔다. 이러한 연구분야에 새롭게 응용할 수 있는 $Ti:Al_2O_3$ (Sapphire) 레이저가 최근에 개발되었다. Ti:Sapphire 고체 레이저는 근적외선 영역인 680 nm ~ 1020 nm 사이에서 발진 파장을 가지며 3) 상온에서 펄스 및 cw 동작이 가능하다. 4) 근적외선 영역에서 파장을 가변할 수 있는 레이저로는 적외선 색소 레이저와 반도체 레이저 그리고 최근에 개발된 Alexandrite 레이저 등이 있다. 그러나 Ti:Sapphire 레이저는 이들 레이저 보다 여러면에서 우수한 레이저 특성을 갖고 있다. Ti:Sapphire 레이저의 주파수 가변 영역은 3 개의 적외선 색소 레이저 파장가변 범위를 포함하며 색소 레이저의 효율이 낮은 장파장 (~ 1 μm) 에서 고출력 발진을 할 수 있다. 또한 Ti:Sapphire 레이저의 흡수 band 가 400 ~ 600 nm 사이에 광대역으로 있어 상용의 Ar^+ 레이저로 직접 광펌핑이 가능한 반면 색소 레이저는 효율이 낮은 Kr^+ 레이저나 Ar^+ 레이저로 펌핑하는 색소 레이저로 다시 펌핑해야 한다. Ti:Sapphire 레이저는 또한 출력의 감소없이 고출력 장시간 동작이 가능하나 색소레이저는 색소를 주기적으로 교환해야한다. 각종 레이저 분광학에 레이저를 사용하려면 레이저의 발진 주파수를 안정화해야 하는데 주파수 안정도 면에서도 Ti:Sapphire 레이저는 레이저 매질이 고체이기 때문에 색소 레이저에서 심각한 주파수 흔들림을 주는 (~10 MHz) 색소 jet 에 의한 hydrodynamical frequency jitter 가 없어 수백 kHz 이하의 intrinsic 주파수 흔들림을 갖는다. 또한 단일 종모드 발진을 얻기위하여 Ti:Sapphire ring 레이저는 하나의 Lyot filter 와 하나의 etalon 으로 발진이 가능하나 5) 색소 레이저의 경우에는 etalon 이 하나 더 필요하다. 6) 반도체 레이저나 Alexandrite 레이저와의 비교는 Ti:Sapphire 레이저가 넓은 파장 가변 영역 (약 300 nm) 과 좁은 선폭을 갖는다. 따라서 앞으로는 Ti:Sapphire 레이저를 이용한 고분해 분광학, 시분해 분광학 등의 연구가 매우 활성화될 전망이다.

본 논문에서는 Ar^+ 레이저로 종 펌핑하는 cw Ti:Sapphire 레이저의 제작과 정상파 Ti:Sapphire 레이저 및 unidirectional ring Ti:Sapphire 레이저의 동작특성에 대하여 기술한다. 2 절 에서는 종 펌핑하는 cw Ti:Sapphire 레이저 공진기에 대하여, 3 절 및 4 절 에서는 상온에서 cw Ti:Sapphire 레이저의 동작특성을 그리고 5 절에서 논의 및 결론을 맺는다.

2. 종 펌핑 cw Ti:Sapphire 레이저 공진기

Ti:Sapphire 레이저의 공진기는 우선 그림 1 과 같이 정상파 발진을 할 수 있도록 4 개의 거울로

+ Permanent Address : Wondar Laser Co., 17 - 44, Domadong, Suhku, Taejon, 302-160, Korea

이루어 졌다. 3 절에서 설명하겠지만 ring 레이저를 만들기 위하여는 그림 1 에서 공진기 거울 M_3 과 M_4 를 마주보게 정열하고 외부에 retro-mirror 를 설치하여 unidirectional ring 레이저를 구성하였다.

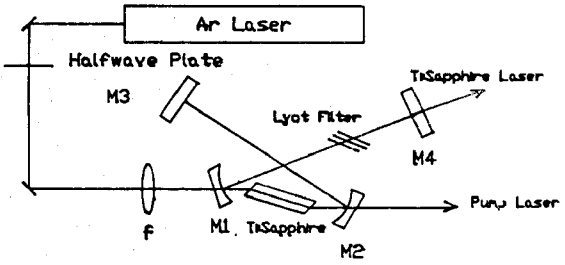

Fig. 1 A schematic diagram of the standing wave Ti:Al_2O_3 laser.

Ti:Sapphire 봉은 크기가 ϕ5 x 30 mm 이고 양끝이 Brewster 각 60° 로 절단되어 있으며 무반사 코팅은 하지 않았고 Ti^{3+} 농도는 0.005 wt.% 인 것을 사용하였다. Ti:Sapphire 봉은 수도물로 냉각하는 알루미늄 마운트에 고정하여 냉각및 정열을 동시에 할 수 있게 하고 곡율반경 20 cm 인 공진기 거울 M_1 및 M_2 중앙에 설치하였다. 정상파 공진기를 구성하는 거울 M_1 과 M_2 는 펌프광인 Ar^+ 레이저는 투과하고 공진기 모드는 전반사 할 수 있도록 700 ~ 850 nm 에서는 고반사 코팅을 Ar^+ 레이저 파장에서는 무반사 코팅된 (R < 10 %) dichroic 거울로 되어 있다. 한편 평면 공진기 거울 M_3 는 700 ~ 850 nm 사이에서 전반사 코팅을 하고, 평면 출력경 M_4 는 750 nm가 코팅의 중심 주파수가 되게하여 광대역 코팅을 하고 투과율이 1, 1.3, 2.7, 9.7 % 인 4 개를 준비하여 실험하였다.

그림 1 에서 $\lambda/2$ 판은 수직 편광된 Ar^+ 레이저 편광을 Brewster 각으로 된 Ti:Sapphire 결정의 c 축에 평행하게 입사하도록 수평 편광으로 바꾸어 준다. 초점거리 15 cm 인 볼록렌즈로 Ar^+ 레이저 빔을 레이저 봉의 중심에 focus 되게 하였고 공진기 거울 M_1 과 M_4 를 연결하는 축과 이루는 각 α 가 약 10 ° 가 되게 펌핑 빔을 입사 하였다. 공진기 거울 M_1 에 입사하는 펌핑 레이저의 입사각 α = 10° 와 레이저 봉과 공진기 거울 M_2 그리고 M_3 가 이루는 각 β = 35° 는 Brewster 각으로 된 레이저 봉에 기인한 비점수차 (astigmatism) 를 보상할 수 있도록 실험적으로 Ti:Sapphire 형광을 이용하여 결정한 값이다. 그리고 공진기 거울 M_1 과 M_2 는 레이저 봉에서 각각 8 cm 떨어져 있으며 M_3 과 M_4 는 공진기 거울 M_2 와 M_1 으로부터 각각 40 cm 떨어져 있다.

실험에 사용한 Ar^+ 레이저는 all-line 에서 최고 6 W 까지 얻을 수 있는 Spectra Physics 사의 SP 2020 을 사용하였으며 Ti:Sapphire 레이저 펌핑에도 all-line 을 이용하였다. Ar^+ 레이저 빔을 레이저 봉에 입사시킨후 나오는 형광을 이용하여 비점수차를 보상하는 공진기를 구성한후 정렬하면 Ti:Sapphire 레이저가 발진하게 된다. 종펌핑 공진구조에서는 펌핑빔과 공진모드가 레이저 봉에서 잘 겹쳐야 threshold 를 낮게 할수 있다. 초점거리 15 cm 인 focus 렌즈에의하여 집속된 Ar^+ 레이저의 빔 반경은 약 60 μm 정도이며 따라서 공진모드가 펌핑 빔에서 30 μm 이내로 전열되어야 레이저 발진이 일어난다. 공진기 구조를 최적화한후에 펌핑빔의 전달효율을 측정하면 $\lambda/2$ 판, focus 렌즈 및 공진기 거울 M_1 에서 반사되는 펌핑 빔의 손실은 약 20 % 정도이며 이는 광학부품의 적절한 무반사 코팅으로 5 % 이하로 줄일 수 있으며 레이저 봉 자체에서는 입사된 빔의 75 % 가 흡수 되었다.

Ring Ti:Sapphire 레이저 공진기는 정상파 공진기 구조에서 공진기 거울 M_3 과 M_4 를 마주보게 정열함으로써 bidirectional ring Ti:Sapphire 레이저를 만들 수 있으며 공진기 외부에 retro-mirror 를 설치하여 unidirectional ring Ti:Sapphire 레이저를 구성하였다. 실험에 사용한 상온에서 연속발진하는 unidirectional ring Ti:Sapphire 레이저 공진기 구조를 그림 2 에 나타내었다.

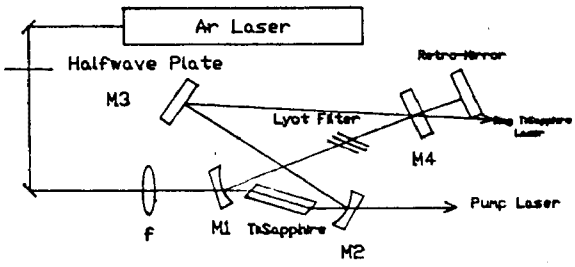

Fig. 2 A schematic diagram of the unidirectional ring Ti:Sapphire laser resonator.

3. Standing Wave cw Ti:Sapphire 레이저 동작 특성

그림 3 에는 standing wave Ti:Sapphire 레이저의 출력 Pout 과 출력경의 투과율 T 에관한 실험결과를 펌핑 power 에 대한 관계로 나타내었다. 실험에서는 레이저 파장을 가변할 수 있는 3 plate birefringent filter 를 공진기에 설치하지 않았을 때의 결과이며 레이저의 발진 파장은 초점거리 32 cm 인 J/Y HR320 monochrometer로 확인한 결과 790 nm 에서 발진하며 레이저 공진기의 정열에 따라 발진 파장이 변하는것이 관측되었다. 출력경의 투과율 T 가 750 nm 에서 T = 1, 1.3, 2.7 및 9.7 % 인 4 개를 준비하여 실험하였다. 한편 정상파 Ti:Sapphire 레이저의 발진 모드는 약간의 잔류 비점수차가 있었으나 TEMoo 모드로 발진하였다. 그리고 Ti:Sapphire 레이저의 빔 반경은 1.3 mm 그리고

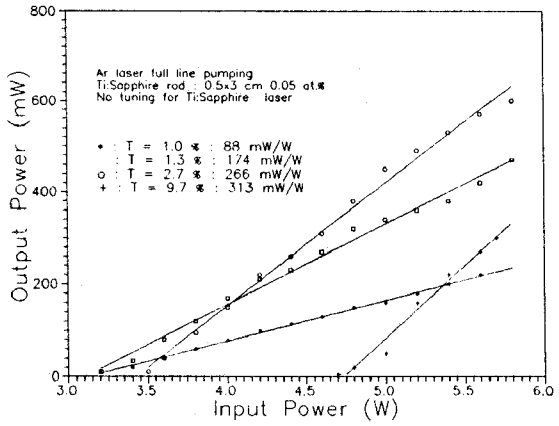

Fig. 3 Standing wave cw Ti:Sapphire laser output at 790 nm versus incident pump power with four outcouplers of T = 1, 1.3, 2.7, and 9.7 %.

빔 발산각은 0.5 mrad 이고 공진기의 FSR = 150 MHz 이다. 표 1 에는 정상파 Ti:Sapphire 레이저의 규격을 보여준다.

표 1 Specifications of the Ar pumped standing wave Ti : Sapphire laser.

Specification	Ti : Sapphire laser
pumping laser	Spectra-Physics 2020 A_r^+ laser
rod	ϕ 0.5 × 3 cm, 0.05 wt % Ti
outpower	600 mw at 790 nm
	(T = 2.7 % wt 750 nm, 5.8 W pumping)
beam divergence	0.5 mrad
beam diameter	1.3 mm
Free Spectral Range	150 MHz

실험 결과는 선형 최소자승법으로 fitting 하였으며 fitting 결과로 부터 레이저의 thershold P_{th} 와 slope efficiency η 를 구할 수 있었다. 출력경의 코팅이 전체 레이저 발진파장에서 일정하지 않아 레이저 발진파장인 790 nm 에서는 1.3 %, 9.7 % 인 투과 효율이 2.4 % 와 11.2 % 이되었다. 그림 3 에서 T = 2.4 %, 11.2 % 인 두 결과로 부터 구한 threshold P_{th} 는 3.2 W 와 4.4 W 이고 slope efficiency η 는 17.4 % 와 31.3 % 이었다. 각각의 출력경에 대하여 투과효율 T 가 높아지면 threshold P_{th} 와 slope efficiency η 모두 증가함을 알 수 있다.

Slope 양자효율 η_Q 에관한 관계식은 (1) 과 같이 주어진다.

$$\eta_Q = \eta \frac{\lambda_L}{A\,\lambda_P} \qquad (1)$$

여기서 λ_L 은 Ti:Sapphire 레이저 파장이고 λ_P 는 펌핑 레이저 파장이고, A 는 레이저 봉에서 흡수되는 펌핑레이저의 비이다. 실험에서 λ_L = 790 nm, 편균 펌핑파장 λ_P = 500 nm 그리고 A = 0.75 이었다. 따라서 출력 효율이 2.4 % 와 11.2 % 인 두 출력경을 통하여 얻은 threshold 와 slope efficiency 로 부터 구한 η_Q 는 각각 36.7 % 와 65.9 % 이었다. 여기서 구한 η_Q 값을 이용하여 잘알려진 internal 양자효율 η_Q^i 와 왕복 internal 손실 L 을 구할 수 있다. 즉 식

$$\eta_Q = \eta_Q^i \frac{T}{L + T} \qquad (2)$$

로 부터 우리는 η_Q^i = 83 ± 10 % 그리고 L = 3 ± 0.5 % 를 구할 수 있었다. η_Q^i 와 L 값의 오차는 앞에서 설명한 출력경의 투과비율의 부정확도가 가장 큰 원인이다. 한편 threshold P_{th} 와 공진기 손실에 관한 독립적인 관계식으로 부터 왕복 internal 손실 L 을 구할 수 있다. 즉

$$P_{th} = C\,(L + T) \qquad (3)$$

으로 부터 L = 2.9 % 를 얻는다. 식 (3) 에서 C 는 비례상수이다. 식 (2) 에서 구한 L 값 과 식 (3) 에서 구한 L 값 이 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 우리는 실험에 사용한 l = 3 cm 인 레이저 봉에 대하여 왕복 internal 손실 L 은 π 편광 ($E \| c$) 된 펌핑 레이저에대한 Ti:Sapphire 레이저 파장에서의 흡수계수 상한선 $\alpha = L/2l = 0.005\ cm^{-1}$ 를 준다. 이것으로 부터 Ti:Sapphire 봉의 FOM 을 계산할 수 있는데 FOM = $\alpha_{500}/\alpha_{790}$ = 146 이 된다.

4. Unidirectional cw ring Ti:Sapphire 레이저

그림 2 와 2 절에서 설명한 것처럼 정상파 cw Ti:Sapphire 레이저 공진기 구조에서 ring Ti:Sapphire 공진기를 만들기 위해서는 그림 1 의 공진기 거울 M_3 과 M_4 를 마주보게 정열하면 된다. 그러나 ring 공진기에서는 출력경을 기준으로 하여 시계방향 (c.w.) 과 반시계 방향 (c.c.w.) 의 레이저가 모두 발진하게 된다. 보통의 ring 색소 레이저에서는 두방향의 출력이 같으나 7) Ti:Sapphire 레이저에서는 c.w. 출력과 c.c.w. 출력의 비가 7 대 1 이었는데 이는 공진기 구조가 레이저 봉을 중심으로 완전한 대칭이 아니어서 생기는 것으로 이해할 수 있으나 종펌핑 Ti:Sapphire 레이저 모델로 설명하려는 연구가 진행중이다. 그림 4 에는 T = 4.2 % 인 출력경을 사용한 경우 양방향 발진하는 ring Ti:Sapphire 레이저의 c.w. 방향의 출력과 입력 과의 실험 결과를 보여준다.

그림 4 로부터 ring Ti:Sapphire 레이저의 slope efficiency 는 22 % 이고 threshold 는 4.2 W 임을 알 수 있고 정상파 Ti:Sapphire 레이저보다 높은 threshold 를 가지며 slope efficiency 도 약간 작음을 알 수 있다. 한편 unidirectional 발진하는 Ti:Sapphire 레이저를 만드는 방법으로는 공진기 내

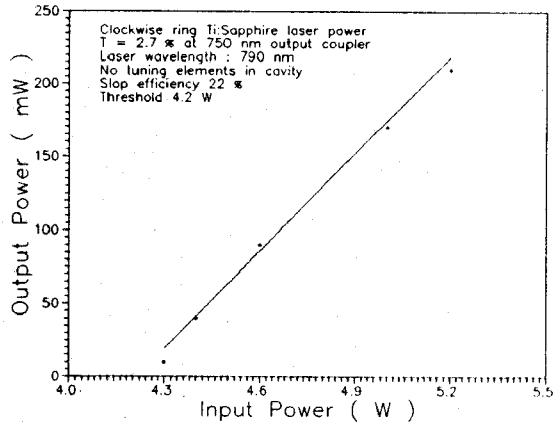

Fig. 4 Clockwise output power of the bidirectional ring Ti:Al_2O_3 laser with T = 4.2 % output coupler at 790 nm.

부에 광 다이오드를 삽입하여 한방향 발진을 얻는 방법과 실험에서 사용한 것과 같이 공진기 외부에 retro-mirror 를 설치하여 한방향으로 발진하는 Ti:Sapphire 레이저를 만들 수 있다. 그림 2 에서처럼 c.c.w. 방향의 출력쪽에 retro-mirror 를 설치하여 공진기로 다시 injection 시켰으며 injection 시킨결과 시키기 전보다 c.c.w. 방향의 출력은 1/100 이하로 떨어져 우리는 unidirectional ring Ti:Sapphire 레이저를 구성할 수 있었다.

5. 논의 및 결론

본 논문에서는 Ar^+ 레이저로 종펌핑하는 Ti:Sapphire 레이저 개발에 대해 기술하였다. Ti:Sapphire 레이저 공진기는 4 개의 거울로 구성되었다. 이중 M_1 과 M_2 는 곡률 반경이 20 cm 인 folded cavity 를 구성하였다. 그런데 펌핑 빔과 공진기 빔이 일직선상에 있는 종펌핑의 경우 focus 렌즈로부터 레이저 봉까지의 거리가 짧아야 즉 focus 렌즈의 초점거리가 짧아야 효율적인 펌핑되어 레이저 threshold 가 낮아질 것이다. 따라서 앞으로는 정열에 영향을 주지않고 효율적인 펌핑을 할 수 있도록 곡률 반경이 10 cm 인 거울로 folded 공진기를 구성할 예정이다. 또한 레이저 봉도 실험에서 구한 FOM 과 왕복 내부손실 등을 고려할 때 2 cm 정도인 것을 사용하는 것이 보다 낮은 threshold 와 고 출력을 얻을 수 있다. 또한 펌핑 레이저의 광학부품 에의한 손실을 막기위하여는 λ/2 판, focus 렌즈,그리고 공진기 거울 M_1 등에 적절한 무반사 코팅이 필요하며, 레이저 파장에서 공진기 거울의 광대역 uniform 코팅이 또한 필 수 적이다. 현재 종펌핑하는 Ti:Sapphire 레이저 이론적 모델을 사용하여 정상파 공진기와 ring 공진기에 대한 최적 구조와 봉의 크기, Ti^{3+} 농도, FOM 그리고 펌핑 빔 waist 등에 대한 최적 조건을 찾는 연구가 진행중이며 결과는 다른 논문에 발표할 예정이다.

5 W Ar^+ 레이저로 펌핑하여 상온에서 연속발진하는 Ti:Sapphire 레이저를 정상파 공진기 구조와 ring 공진기 구조에서 개발하였다. 790 nm 에서 발진하는 정상파 Ti:Sapphire 레이저는 출력효율이 4.2 % 일때 5.8 W 의 펌핑으로 600 mW 의 레이저 출력을 얻었다. 출력 효율이다른 두개의 출력경에대한 실험 결과로부터 internal 양자 효율 η_Q^i = (83 ± 10) % 를 구하였고 왕복 internal 손실 L = (3 ± 0.5) % 를 얻었다. 위의 결과에서 레이저 봉의 레이저 특성을 결정하는 "figure of merit" 이 Ti^{3+} 농도가 0.005 wt.% 이고 크기가 φ0.5 x 3 cm 인 Ti:Sapphire 봉에대하여 FOM = 146 임을 알 수 있었다. 정상파 공진기 구조에서 간단히 unidirectional ring Ti:Sapphire 레이저를 만들 수 있었으며 T = 4.2 % 인 출력경을 사용한 실험에서 c.w. 방향의 출력 200 mW 를 얻을 수 있었다. 이 때 레이저의 slope efficiency 는 22 % 이고 threshold 는 4.2 W 이었다.

References

1) V. Vassen, C. Zimmermann, R. Kallenbach, and T.W. Hänsch, Opt. Comm., 75(5,6), 435 - 440 (1990)
2) J. Goodberlet, J. Wang, and J.G. Fujimoto, Opt. Lett., 14(20), 1125 - 1127 (1989)
3) P.F. Moulton, J. Opt. Soc. Am. B, 3(1), 125 - 132 (1986)
4) A.Sanchez, R.E. Fahey, A.J. Strauss, and R.L. Aggarwal, OPt. Lett., 11(6), 363 - 364 (1986)
5) C.S. Adams and A.I. Ferguson, Opt. Comm., 75(5,6), 419 - 424 (1990)
6) C.E. Wagstaff and M.H. Dunn, J. Phys. D, Appl. Phys., 12, 335 - 368 (1979)
7) J.S. Kim, Private Communication

본 연구는 과기처의 특정연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.