

펄스동작 Ti : sapphire 레이저의 출력특성*

김병태 · 이형권

청주대학교 이공대학 광학공학과

(1996년 4월 15일 받음)

Nd : YAG 레이저 제 2고조파로 여기되는 Z자형 공진기 구조의 펄스동작 Ti : sapphire 레이저가 개발되었다. 반사율 18%의 출력거울을 사용하여 중심파장 790 nm에서 27.4%의 발진효율로 822 μ J의 레이저 출력에너지에 5 ns의 펄스폭을 얻었다. 기울기 효율은 35%에 달하였다. 레이저빔살의 직경은 0.9 mm, 발산각은 1.8 mrad을 나타내었다. 반사율 18%의 출력거울과 3 mJ의 여기에너지에서 출력스펙트럼은 90 nm의 반치폭을 갖고, 740 nm에서 860 nm의 파장영역에 걸쳐 레이저가 출력되어 약 120 nm에 이르는 파장 가변특성을 보였다.

I. 서 론

Ti : sapphire 레이저는 1982년 P. F. Moulton에 의해 개발된 진동전자천이(phonon terminated; 포논 종단)형 파장가변 고체레이저이다.^[1] Ti : sapphire 레이저는 넓은 파장 가변영역과 높은 발진효율을 갖고 있고, 이득 대역폭이 넓어 초단펄스를 발생시킬 수 있기 때문에 새로운 파장가변형 초단펄스 레이저 광원으로 현재 가장 활발히 연구가 진행되고 있는 레이저 중의 하나이다.

현재 파장가변 레이저로는 색소레이저를 주로 사용하고 있는데 레이저매질로 액체를 사용하기 때문에 매질의 물리·화학적 특성에서 매질을 사용함에 따라 일어날 수 있는 성능저하 등의 문제가 있어 발진스펙트럼이나 출력파워 등 레이저빔살(beam)의 특성을 장기적으로 안정하게 제어하기가 어렵다. 또한 유지·보수가 어렵다는 운영상의 문제점도 있다. 이에 비해 물리·화학적으로 안정하고 레이저매질의 성능저하 등에서 문제가 없는 Ti : sapphire 레이저는 유지·보수 등의 관리가 용이하고, 신뢰성이 높으며, 출력, 파장가변성 및 스펙트럼 안정성 등의 성능 면에서도 색소레이저보다 우수한 광원으로 주목받고 있다.

최근의 레이저 응용에서는 가능하다면 넓은 파장가변 영역과 초단펄스에 고효율을 낼 수 있는 광원을 요구하는데 이 같은 출력특성을 갖춘 상태에서 직접 발진이

가능한 고체레이저로는 Ti : sapphire 레이저를 제외하면 그다지 실용화되어 있는 것이 없다. 녹색의 흡수파장 영역을 갖고 있는 Ti : sapphire(Ti : Al₂O₃) 결정은 Nd : YAG 레이저의 제 2고조파, 구리증기레이저, Ar⁺ 레이저 및 플래시램프 등을 여기원으로 하여 650 nm에서 1150 nm에 걸친 넓은 파장가변 영역과 200 nm나 되는 넓은 이득 대역폭에서 고효율의 레이저출력을 낼 수 있다는 것이 지금까지 확인되었다.^[2-5] 이것은 그 어떤 단일 색소를 사용하는 레이저의 발진에서보다도 파장 가변영역이 넓은 것이다. 일반적으로 기본파의 발진에서는 펄스동작 Ti : sapphire 레이저의 파장 가변영역이 연속발진되는 레이저에 비해 좁은 것으로 알려져 있다.^[6] 그러나 이 점에 관해서는 높은 첨두출력을 낼 수 있는 펄스동작 Nd : YAG 레이저 제 2고조파 등의 여기광원에 의한 Ti : sapphire 레이저가 고효율의 발진으로 파장가변 가능 영역을 확대시킬 수 있기 때문에 충분히 극복할 수 있을 것으로 기대된다. Ti : sapphire 레이저의 파장 가변영역은 700 nm 이상의 근적외선 영역에 집중되어 있지만, 높은 첨두출력을 갖는 펄스동작 레이저 여기에서 높은 출력을 얻을 수 있기 때문에 비선형 광학효과를 이용한 고조파 발생으로 파장 가변영역을 자외광에서 적외광 영역에 이르기까지 확장시킬 수 있다는 장점도 갖고 있다. Ti : sapphire 레이저에서 또 하나의 커다란 특징은 매질의 이득 대역폭이 상당히 넓기 때문에 모드동기법을 이용하면 펌프초 영역에 이르는 극초단펄스의 발진이 가능하다는 것이다.^[7-10] 특히 펌프초 영역의 극초단펄스에 고효율을 낼 수 있는 Ti : sapphire 레이저

*본 연구는 한국원자력연구소 원자력연구개발 중장기계획사업의 연구비지원으로 수행된 것임.

시스템은 초고속 레이저 분광학, 초정밀 계측, 첨단 소재의 광특성 분석은 물론 초고속 광통신 소재의 광특성 평가, XUV나 X-선 발생용 광원 등에 이르기까지 널리 이용될 전망이며, 기초과학뿐만 아니라 첨단 과학 산업 분야에까지 그 응용성이 매우 높은 것으로 평가된다.

본 논문은 소형 고강도 고체레이저 시스템을 개발하기 위한 초기 연구 단계로 Nd : YAG 레이저의 제2고조파로 여기되는 펄스형 Ti : sapphire 레이저를 제작하여 극초단펄스 발생에 이용하기 위한 공진기의 안정성 등의 동작특성을 평가 분석한 것이다. 특히 일반적으로 발전시키기 어렵다고 생각하는 18%의 아주 낮은 반사율을 갖는 출력거울을 사용하여 고효율의 레이저 출력을 얻은 것과 넓은 파장영역에 걸쳐 비교적 고른 출력으로 안정스럽게 발전하는 동작특성 등을 기술한다. 본 실험은 반도체레이저 여기 Nd : YAG 레이저의 제 2고조파를 여기원으로 하는 Ti : sapphire 레이저의 가능성을 타진하기 위한 것이기도 하다.

II. 레이저 공진기 구성

레이저 공진기의 구성은 기본적으로 Kerr 렌즈 자기 모드동기법(KLM)을 이용하여 초단펄스 발생할 수 있도록 Z자형으로 하였다.^[7-10] 그림 1에 본 실험에서 제작된 레이저 공진기의 구성과 출력특성을 측정하기 위한 계

측기기의 배치도를 나타낸다. 그림 1에서와 같이 Z자형 공진기는 두 장의 평면거울과 두 장의 오목거울로 구성되어 강한 집속 모드를 레이저매질 내에 형성시키도록 되어 있다. 두 장의 오목거울 사이에서 강한 집속 모드가 형성되므로 비선형 레이저매질인 Ti : sapphire 결정은 두 오목거울 사이에 놓게 된다. 일반적으로 공진기의 구성은 X자형이나 Z자형을 선택하게 되는데 이러한 구조에서는 필연적으로 발생하게 되는 비점수차를 보정하기 위해 광경로의 세심한 조정이 필요하다. 그림 1에서 점선 안의 프리즘 쌍은 균속도 분산을 보정시켜 주기 위한 광학소자로 KLM에 의한 초단펄스 발생 실험에서 사용될 것이다.

본 실험에서 구성된 공진기는 두 장의 오목거울 사이의 거리, 오목거울과 평면거울 사이의 거리에 따라 레이저가 발전 가능한 공진기의 안정조건을 형성하게 된다. 그림 1의 공진기에서 두 장의 오목거울을 블록렌즈로 바꾸어 생각하면 결상법칙에 따라 두 장의 렌즈와 두 장의 평면거울로 구성되는 등가공진기를 구성할 수 있게 된다.^[11,12] 이렇게 구성되는 등가공진기에서 렌즈와 평면거울 사이의 거리, 렌즈의 초점거리에 의해 구해지는 오목거울의 곡률 반지름을 R_1, R_2 라 하고, 레이저를 발전시키기 위해 그림 1의 두 오목거울 사이에서 조정해야 하는 미소 길이를 δ 라 하자. Z자형 공진기에서 두 오목거울 사이에 형성되는 집속 모드의 크기 W_0 와 δ 의 관

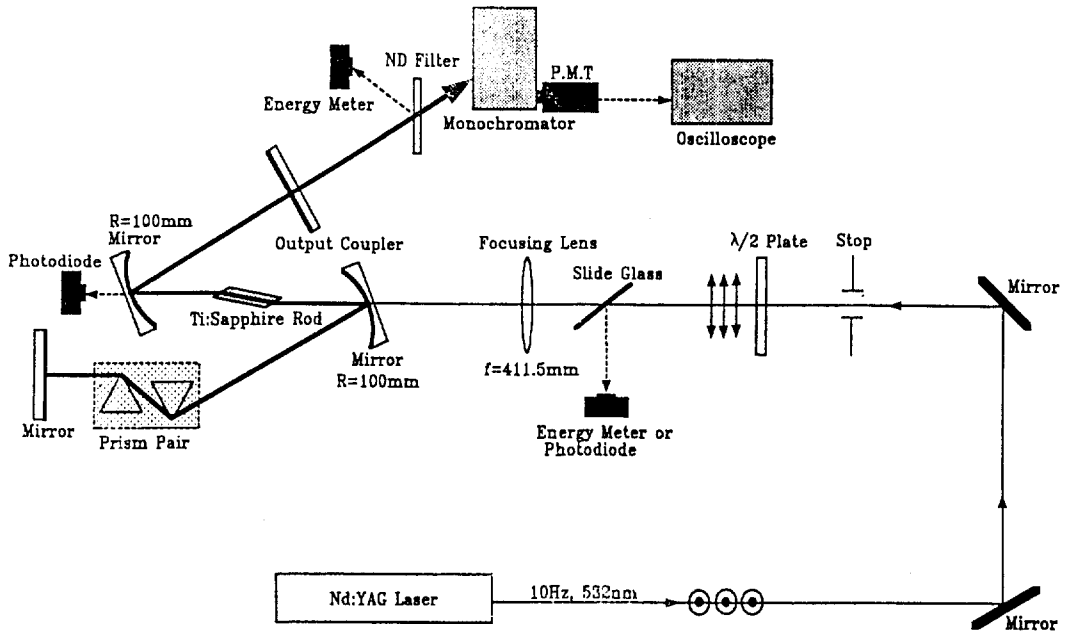


그림 1. 펄스동작 Ti : sapphire 레이저의 공진기 구성과 출력특성 측정기기 배치도.

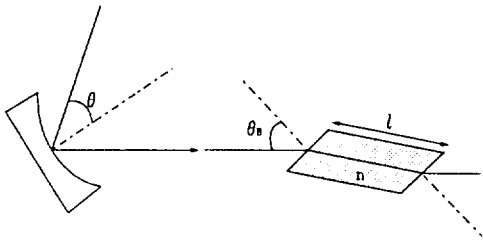


그림 2. 오목 거울면과 레이저매질에서의 레이저빔살 입사각.

계를 다음의 식으로부터 구할 수 있게 된다.^[13]

$$W_0 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^{1/2} \frac{[-(R_1 + R_2 + \delta)(R_1 + \delta)(R_2 + \delta)]^{1/4}}{|R_1 + R_2 + 2\delta|^{1/2}} \quad (1)$$

여기서 $|R_1| > |R_2|$ 라고 가정하면 이 등가공진기가 안정 조건을 만족시키기 위해서는 $0 < \delta < -R_2$, $-R_1 < \delta < -R_1 - R_2$ 의 상태를 유지해야 한다.^[11] 식 (1)에서 λ 를 Ti : sapphire 레이저 빔살의 중심파장인 800 nm로 $R_1 = -5$ cm와 $R_2 = -1.67$ cm로 계산된 곡률 반지름을 대입하여 계산한 결과, δ 의 변화에 따라 집속된 빔살의 크기는 최대 46 μ m 정도밖에 되지 않아 기본적으로 KLM을 이용한 초단펄스 생성을 위해 설계 제작된 공진기에서 커다란 비선형효과를 기대할 수 있을 것으로 보인다.

등가공진기에서와 같이 공진기 내에 렌즈가 사용되는 경우에는 레이저빔살을 입사각이 0°가 되도록 렌즈에 입사시킬 수 있으나, 실제 Z자형 공진기와 같은 형태에서는 오목거울이 어떤 각도를 유지하게 되므로 공진기 내에서 레이저빔살은 그림 2에서와 같이 입사각 θ 로 오목거울에 입사하게 된다. 이 경우 구결면(sagittal plane)과 자오면(tangential plane)에서 레이저빔살이 느끼는 오목거울의 초점거리가 서로 다르게 되어 비점수차가 발생한다.^[13,14] 레이저매질은 편광된 레이저빔살을 발진시킬 수 있고, 여기광의 손실을 줄이기 위한 양면의 무반사 코팅이 필요 없으며, 매질의 표면 손상의 염려를 덜기 위하여 양 단면을 브루스터 각 θ_B 로 가공하여 사용한다. 그러나 이렇게 브루스터 각으로 가공된 이득매질에서도 구결면과 자오면에서 레이저빔살이 통과하는 광학적 길이가 달라져 레이저매질에서 수차가 발생하게 된다. 레이저매질의 굴절률을 n , 레이저빔살이 통과하는 길이를 l 이라 하자. 그림에서와 같이 레이저빔살이 브루스터 각으로 입사하여 공진기를 한 번 통과할 때, 초점거리 f 인 오목거울에서는 두 번 반사되고, 레이저매질을 통과하여 생기는 수차는

$$l \cos \theta_B (n^2 - 1) \frac{\sqrt{n^2 + 1}}{n^4} = 2f \sin \theta \tan \theta \quad (2)$$

로 표현되는 수식에 의해 공진기의 오목거울에 레이저 빔살이 입사하는 각도 θ 를 조정함으로써 보정할 수 있게 된다.^[13,14] 입사각 θ 는 레이저매질의 길이(두께), 굴절률 및 오목거울의 초점거리 등에 의해 결정된다. 레이저빔살이 통과하는 Ti : sapphire 결정의 길이가 10 mm, 굴절률이 1.76이고, 오목거울의 초점거리가 50 mm일 때 식 (2)를 이용하여 오목거울로 입사하는 레이저빔살의 수차를 보정할 수 있는 입사 각도를 계산해 보면 θ 는 8.46°가 된다. 따라서 공진기의 오목거울에서 레이저빔살의 입사각과 반사각, 즉 접힌 각도 2θ 를 약 17°로 하였을 때 수차가 보정되어 높은 여기효율에서 안정된 공진기를 형성하며 레이저매질 내에 강한 집속 모드를 형성할 수 있을 것으로 보인다. 실제 실험에서는 약 21°로 하였을 때 가장 좋은 결과를 보였다.

III. 레이저 출력특성 해석

레이저매질로는 양 단면을 브루스터 각으로 가공한 5 mm ϕ ×10 mm의 크기에 Ti³⁺이 0.15 wt% 첨가되고, FOM(ratio of absorptions 820 : 514 nm)이 200인 Ti : sapphire 결정(Union Carbide Inc.)을 사용하였다. 레이저 공진기는 $R = \infty$ 이고 610~860 nm 파장영역에서 전반사 특성을 갖는 거울(Melles Griot Inc.), $R = 100$ mm이고 760~830 nm 파장영역에서 전반사 특성을 갖는 두 장의 오목거울(개풍광학)과 $R = \infty$ 인 출력거울(개풍광학)로 구성되어 레이저매질에서 유효한 비선형성을 유발시킬 수 있도록 수차가 보정된 Z자 형태를 취하였다. 한 장의 오목거울은 여기를 위하여 반대쪽 면에 532 nm의 파장에 대해서 무반사 코팅된 이색성 거울이다.

제작한 Ti : sapphire 레이저 공진기의 최적 조건을 찾기 위한 기본 동작특성들을 측정·분석하였다. 레이저 빔살의 출력특성들을 모두 동시에 측정할 수 있도록 측정기기들을 구성하여 측정 데이터들의 비교에 있어 신뢰성을 갖도록 하였다.

Ti : sapphire 레이저의 여기원으로는 10 Hz까지 동작할 수 있는 Nd : YAG 레이저(Continuum Inc., NY-81)의 제 2고조파를 사용하였다. 이 레이저는 532 nm의 파장에서 펄스당 최대 460 mJ의 에너지에 펄스폭이 7 ns인 Q-스위칭된 펄스가 출력된다. Ti : Al₂O₃ 결정은 여기광의 편광상태에 따라 흡수율이 다른 특성을 갖고 있다. 여

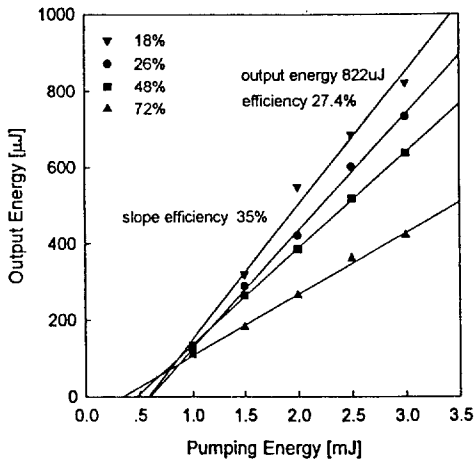


그림 3. 출력거울의 반사율과 여기에너지에 따른 Ti : sapphire 레이저의 출력에너지.

기용 Nd : YAG 레이저의 빛살은 선형 편광된 것이며, 레이저매질에 입사하는 편광방향을 제어하기 위하여 $\lambda/2$ 판과 편광성분을 걸러내기 위해 편광자 대신 슬라이드 글라스를 브루스터 각으로 설치하여 사용하였다. 여기 에너지는 Nd : YAG 레이저의 제2고조파인 532 nm에 대해 무반사 코팅된 초점거리 411.5 mm의 볼록렌즈에 의해 레이저매질 중심에 집중되도록 하였으며, 레이저매질의 손상을 고려하여 펄스당 3 mJ까지만 사용하였다. 실측한 여기광의 빛살 직경은 초점에서 약 147 μm 를 보였다. 실제 레이저매질에 집중되었을 때 여기광의 강도는 약 $2.53 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 에 달하였다. 레이저매질에서의 투과율을 에너지메터로 측정된 결과 여기에너지의 흡수는 약 90%가 되었다. 측정시 매질의 표면에서 일어날 수 있는 산란 등에 의한 에너지 손실량은 미량으로 판단되어 고려하지 않았다.

본 실험에서는 레이저의 여기 및 출력에너지 측정을 위해 에너지메터로 Scientech Inc.의 제품(AC2501)과 Melles Griot의 제품(13PEM001)을 사용하였다. 그림 1에서 여기 에너지는 집광렌즈 앞에서 측정하였고, 출력 에너지는 분광기 앞에 놓인 ND 필터에서 반사되는 레이저빛살의 에너지를 측정하여 투과량과 반사량의 비율로서 환산하여 제작한 레이저의 효율 등을 계산하였다. 출력되는 레이저빛살의 펄스형상을 측정하기 위해 Tecktronix의 TDS350(200 MHz) 오실로스코프와 Electro-Optics Tech.의 T2000(200 ps) 실리콘 포토다이오드가 사용되었다. 레이저펄스 형상은 오목거울을 투과해서 나오는 것을 측정하였다.

그림 3은 제작된 레이저의 최적화된 공진조건을 찾기

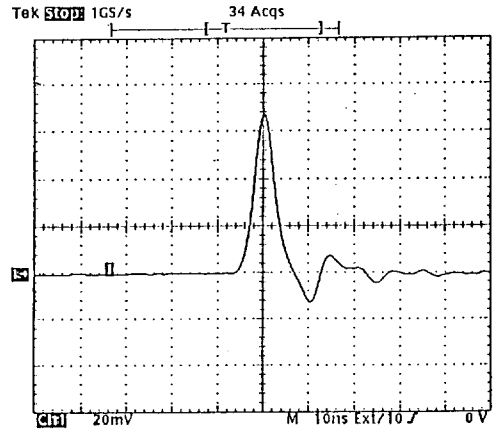


그림 4. Ti : sapphire 레이저의 출력펄스 형상.

위해 출력거울의 반사율에 따른 Ti : sapphire 레이저의 출력에너지를 측정된 결과이다. 레이저 공진기의 출력 거울을 750 nm에서 850 nm에 걸쳐 평균 반사율이 72%, 48%, 26% 및 18%인 것을 사용하여 레이저의 출력특성을 측정하였다. 반사율 18%의 출력거울에서 27.4%의 발진 효율로 822 μJ 의 레이저 출력에너지를 얻었고, 이 때의 출력 중심파장은 790 nm, 기율기 효율은 35%에 달하였다. 일반적으로 펄스형 레이저에서는, 고출력에서도, 반사율 30% 이상의 출력거울을 사용하는 것으로 인식되어 왔으나 실험 결과에서도 알 수 있듯이 18%라는 아주 낮은 반사율을 갖는 출력거울로 구성된 손실이 큰 공진기에서도 고효율의 레이저광을 얻을 수 있다는 것을 보여주고 있다. 이런 결과는 강도 높은 펄스형 레이저 광에 의해 효율 좋게 여기되고, Ti : sapphire 결정이 형광수명 동안 에너지를 레이저 상준위에 충분히 효과적으로 축적하였다가 일시에 방사하기 때문이 아닌가 생각된다. 그림 3에서 출력거울의 반사율과 출력에너지 관계로부터 현재 구성된 레이저 공진기에서 출력거울의 반사율을 좀더 내린다면 발진효율이 30%를 상회하는 고효율의 동작특성을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 4는 Ti : sapphire 레이저의 출력펄스 형상으로 5 ns의 반치폭을 갖으며 비교적 깨끗한 형태를 보이고 있다. 펄스폭 5ns는 Ti : sapphire 레이저의 자유발진 (free running) 상태에서 얻을 수 있는 가장 짧은 값에 근접하는 것이라고 할 수 있다.^[15] 출력되는 레이저펄스의 형상은 여기광의 모드 형상에 관계없이 그림 4의 상태와 거의 비슷하게 깨끗한 형태를 유지하는 것으로 관측되어 Ti : sapphire 레이저에서 여기광의 모드 상태가 출력펄스에 그다지 영향을 미치지 않고 있음을 알

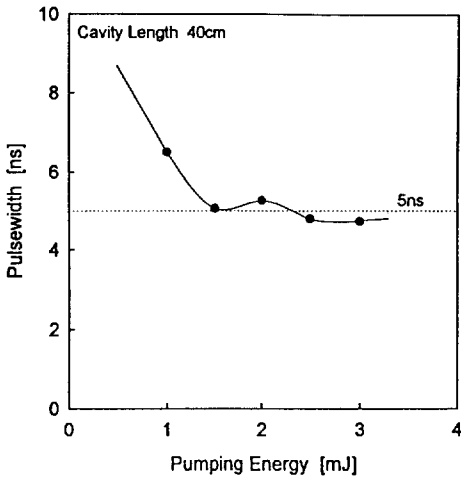


그림 5. 40 cm의 레이저 공진기 길이에서 여기에너지 변화에 따른 펄스폭의 변화.

수 있었다. 그림 5는 공진기 길이를 40 cm로 고정된 상태에서 여기에너지에 따른 펄스폭의 변화를 측정한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 여기 에너지를 증가시키에 따라 펄스폭이 조금씩 줄어들다가 1.5 mJ 이상의 여기 에너지에서는 펄스폭이 안정되는 현상을 보여 있어 공진기의 구성도 상당히 안정된 상태인 것으로 판단된다. 한편, 펄스폭은 공진기 길이에 선형적으로 의존하는 경향을 보이고 있다. 공진기 길이가 40 cm일 때 펄스폭은 약 5 ns, 150 cm 일 때 40 ns로 공진기의 길이가 길어짐에 따라 펄스폭도 넓어지는데 이는 공진기 안에서 포톤의 왕복시간과 펄스의 생성(build up)시간이 더 걸리기 때문인 것으로 생각된다. 발진된 Ti : sapphire 레이저 빛살의 직경은 약 0.9 mm이고, 발산각은 약 1.8 mrad으로 측정되었다.

제작된 Ti : sapphire 레이저에서의 출력스펙트럼 분포는 분광기를 이용하여 측정하였다. 출력되는 레이저 빛살을 분광기에 입사시키고, 분광되어 나온 레이저 빛살을 P. M. Tube로 증폭시켜 오실로스코프에서 파장에 따른 상대적인 강도를 측정하여 스펙트럼 분포를 조사하였다. 레이저의 출력스펙트럼을 측정하기 위해 사용된 분광기(McPherson Inc., 270)는 600 g/mm의 회절격자에 35 cm의 초점거리를 갖는 것이고, P. M. Tube는 Hamamatsu의 R406을 사용하였다. 그림 6은 여기에너지 3 mJ에서 48%, 26% 및 18%의 평균 반사율을 갖는 출력 거울에 따른 상대적인 출력스펙트럼 특성을 나타내고 있다. 그림 7은 반사율이 18%인 출력 거울에서 여기 에너지에 따른 상대적인 출력스펙트럼 특성을 조사한 것

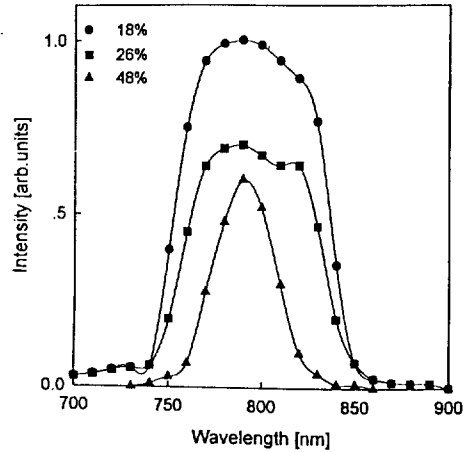


그림 6. 3 mJ의 여기에너지에서 출력거울의 반사율에 따른 Ti : sapphire 레이저의 출력스펙트럼

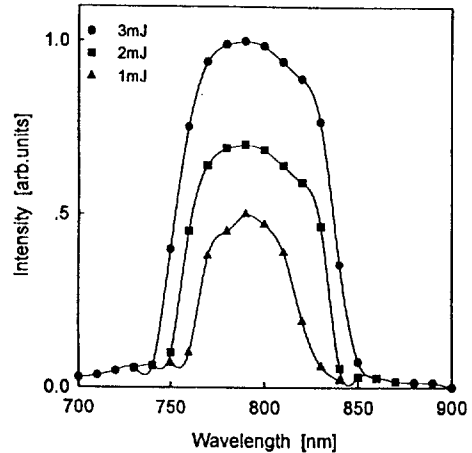


그림 7. 반사율 18%인 출력거울에서 여기에너지에 따른 Ti : sapphire 레이저의 출력스펙트럼.

이다. 그림 6과 7에서 볼 수 있듯이 출력스펙트럼은 90 nm의 반치폭을 갖고, 740 nm에서 860 nm의 파장영역에 걸쳐 레이저 빛살이 출력되어 약 120 nm에 이르는 파장 가변특성을 보였다. 레이저출력이 750 nm와 850 nm 부근에서 급격하게 떨어지는 것은 공진기를 구성하고 있는 두 장의 오목거울과 출력거울이 760 nm에서 830 nm 정도까지만 평탄한 반사특성을 갖고 있어 이것이 레이저 발진에 직접적인 영향을 미쳤기 때문인 것으로 판단된다. 낮은 반사율을 갖는 출력거울로 공진기를 구성하였을 때 파장에 따른 레이저의 에너지가 발진 중심파장인 790 nm를 전후해서 비교적 넓고 고르게 출력되어 일반적으로 첨두출력을 중심으로 산모양을 형성하는 것을

크게 개선시키는 결과를 가져오게 하였다. 이 결과는 펄스형이 연속형 여기보다 발진과장에 따른 레이저 출력에너지의 변동폭이 작은 상태에서 파장 가변영역을 넓힐 수 있음을 단적으로 보여주는 것이기도 하다. 이와 같은 결과로 현재 구성된 레이저 공진기에서 출력거울의 반사율을 좀더 낮추고, 공진기를 구성하는 거울들이 700 nm에서 900 nm에 걸쳐 평탄한 반사특성을 갖는 것으로 교환한다면 30%가 넘는 높은 발진효율에 펄스동작에서도 150 nm를 상회하는 스펙트럼 반치폭을 갖는 출력특성을 나타내리라 보여진다. 현재 세계적으로는 고출력에서도 600 nm에서 900 nm에 걸쳐 일정한 반사특성을 갖는 거울이 제작되고 있어 거울을 교환하지 않고서도 Ti : sapphire 레이저의 출력과장 전영역을 발진시킬 수 있게 되어 가고 있다. 한편 레이저 출력과장의 선택을 용이하게 하고, 파장 가변특성을 좀더 개선하기 위하여 공진기 내부에 복굴절필터를 삽입하여 실시한 실험결과를 분석중이다.

IV. 결 론

소형 고강도 고체레이저 시스템에 사용될 Nd : YAG 레이저의 제2고조파로 여기되는 펄스형 Ti : sapphire 레이저가 개발되었다. Z자형 공진기를 구성하여 반사율 18%의 출력거울에서 27.4%의 발진효율로 822 μ J의 레이저 출력에너지를 얻었고, 이 때의 출력 중심파장은 790 nm, 기울기 효율은 35%에 달하였다. 이 결과는 통상적인 개념을 깨고 18%라는 아주 낮은 반사율을 갖는 출력거울에서도 고효율의 레이저출력을 얻을 수 있음을 보여주었다. 출력펄스는 Ti : sapphire 레이저가 자유발진에서 만들 수 있는 가장 짧은 것으로 보이는 5 ns의 반치폭을 형성하였고, 레이저빔살의 직경은 0.9 mm, 발산각은 1.8 mrad을 나타내었다.

출력스펙트럼은 90 nm의 반치폭을 갖고, 740 nm에서 860 nm의 파장영역에 걸쳐 레이저빔살이 출력되어 약 120 nm에 이르는 파장 가변특성을 보였다. 18%의 낮은 반사율을 갖는 출력거울을 사용하였을 때 파장에 따른 레이저의 에너지가 발진 중심파장을 전후해서 비교적 넓고 고르게 출력되어 일반적으로 산모양을 하는 출력스펙트럼의 형상을 크게 개선시킨 결과를 얻었다. 한편 공진기를 구성하고 있는 거울들의 반사특성이 레이저의 파장 가변영역을 제한하는 직접적인 원인이 됨을 알 수 있었다.

본 실험의 결과로부터 반도체레이저 여기 Nd : YAG 레이저에서 약 5 mJ 정도의 출력에너지를 얻는다면 이것의 제2고조파를 여기원으로 하는 Ti : sapphire 레이저가 충분히 가능하다는 것을 확인하였다. 이들을 연계시켜 전고체로 구성되는 Ti : sapphire 레이저에서 Kerr 렌즈 자기 모드동기법을 이용하여 초단펄스를 발생시켜 소형의 고강도 Ti : sapphire 레이저 시스템에 사용할 주발진기를 개발할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] P. F. Moulton, J. Opt. Soc. Am. **B3**, 125 (1986).
- [2] G. A. Rines, P. F. Moulton, Opt. Lett. **15**, 434 (1990).
- [3] M. G. Littman, Appl. Opt. **23**, 4465 (1984).
- [4] K. W. Kangas, D. D. Lowenthal, and C. H. Muller III, Opt. Lett. **14**, 21 (1989).
- [5] M. R. H. Knowles and C. E. Webb, Opt. Comm. **89**, 493 (1992).
- [6] M. Funayama, K. Mukaiyama, T. Okada, M. Maeda, N. Tomonaga, J. Izumi, K. Matsuda and Y. Hasegawa, Rev. Laser Eng. **20**, 752 (1992).
- [7] D. E. Spence, P. N. Kean, and W. Sibbett, Opt. Lett. **16**, 42 (1991).
- [8] G. Cerullo, S. De Silvestri, and V. Magni, Opt. Lett. **19**, 1040 (1994).
- [9] Y. M. Liu, and P. R. Prucnal, IEEE J. Quantum Electron. **QE-29**, 2663 (1993).
- [10] J. F. Pinto, L. Esterowitz, G. H. Rosenblatt, M. Kokta, and D. Peressini, IEEE J. Quantum Electron. **QE-30**, 2612 (1994).
- [11] T. Brabec, Ch. Spielmann, P. F. Curley, and F. Krautz, Opt. Lett. **17**, 1292 (1992).
- [12] T. Brabec, P. F. Curley, Ch. Spielmann, E. Wintner and A. J. Schmidt, J. Opt. Soc. Am. **B10**, 1029 (1993).
- [13] H. W. Kogelnik, P. I. Enrich, A. Dienes and C. V. Shank, IEEE J. Quantum Electron. **QE-8**, 373 (1972).
- [14] F. A. Jenkins and H. E. White, *Fundamentals of Optics*, (McGraw-Hill Inc., 1976).
- [15] J. M. Eggleston, L. G. DeShazer, and K. W. Kangas, IEEE J. Quantum Electron. **QE-24**, 1009 (1988).

Output Characteristics of a Pulsed Ti : sapphire Laser

Byung-Tai Kim and Hyoung-Kwon Lee

Department of Optical Engineering, Chongju University, Chongju 360-764, Korea

(Received April 15, 1996)

A pulsed Ti : sapphire laser with a Z-folded cavity, which was pumped by a frequency-doubled Nd : YAG laser, was developed. A laser output energy of 822 μJ with a pulsewidth of 5 ns and an output efficiency of 27.4% was obtained at a center wavelength of 790 nm using an output coupler of 18% reflectance. The slope efficiency was 35%. The output beam diameter was 0.9 mm, and the divergence angle was 1.8 mrad. The spectrum tunability was about 120 nm from 740 nm to 860 nm with a FWHM of 90 nm at an 18% output coupler and a pumping energy of 3 mJ.