

티타늄 사파이어 레이저의 자체모드록킹에 의한 극초단 펄스의 발생*

박종대 · 이일형 · 조창호

배재대학교 이공대학 물리학과

임용식 · 이재형 · 장준성

서울대학교 자연대학 물리학과

(1994년 6월 9일 받음)

아르곤 레이저에 의해 광펌핑 되는 티타늄 사파이어 레이저를 제작하고 이를 자체 모드록킹 시켰다. 모드록킹은 볼 슬라이더 위에 장착된 공진기 거울의 이동에 의해 시작되었으며 티타늄 사파이어 결정내의 자체 집속 효과와 공진기내에 설치된 조리개에 의해 모드록킹이 유지 되었다. 공진기내의 균속도를 보상하기 위하여 프리즘쌍을 사용하였으며, 모드록킹된 펄스의 대역폭은 11 nm, 펄스폭은 100 ± 20 fs였다.

I. 서 론

최근 수동적 모드록킹에 의해 고체 레이저에서 극초단 펄스를 발생시키는 연구가 급격히 진행되었다.^[1] 수동적 모드 록킹 방법은 펄스폭이 짧아지고 침투 출력이 증가함에 따라 모드록킹이 잘되기 때문에 능동적 방법에 비해 더 짧은 펄스를 만들 수 있다. 반면 능동적 방법은 전자회로에 의해 구동되므로, 얻을 수 있는 최소펄스폭에 한계가 생기게 된다. 종전에는 주로 포화흡수체를 사용하여 수동적 모드록킹을 얻었으나 최근에는 펄스 덧셈형 모드록킹과(Additive Pulse Mode Locking, APM)과 Kerr Lens Mode Locking(KLM) 방법으로 모드록킹을 하고 있다. 이들 방법은 공진기내의 비선형 굴절률의 변화 또는 자체 위상 변조를 이용하는 것으로서, 포화 흡수체와 같은 역할을 한다. 그런데 APM과 KLM은 매질을 실제로 여기하지 않기 때문에 매우 빠르며, 포화 흡수체와 같이 공명 흡수를 이용하지 않기 때문에 넓은 파장대역에서 이용될 수 있다. 이러한 기술은 최근에 개발된 광대역 주파수 가변 고체레이저의 개발과 접목 되어 많은 극초단파 레이저가 개발되고 있다. APM 방식에서는 외부 공진기나 간섭계식 공진기로부터 비선형 광학현에 의해서 펄스를 coherent 하게 더해서 펄스폭을

줄인다. Ti:Sapphire,^[2] Nd:YAG, Nd:YLF, Nd:Glass 레이저 등^[3,5]이 이 방법에 의하여 모드록킹되었다. APM 방식은 Kerr 효과에 의한 위상변화를 이용하여 빛이 강해지면 생성 간섭이되고 빛이 약할때는 소멸 간섭이 되도록하여 빠른 포화 흡수체를 흥내내게 된다. APM에서의 문제점은 공진기의 길이를 아주 잘 안정화 시켜야 한다는 점이다. KLM 방식에서는 비선형 굴절에 의한 자체 집속과 조리개에 의해서 빠른 포화 흡수체를 시 능하게 된다. Ti:Sapphire,^[6] Nd:YLF,^[7] Cr:LiSAF,^[8] Cr:LiCAF,^[9] Cr:Fosterite^[10] 레이저 등이 이 방법에 의해 모드록킹되었다. KLM은 고출력의 고체레이저를 모드록킹하는데 적합하고 APM은 광섬유 레이저에서와 같이 저출력의 레이저에 적합하다.

Ti:Sapphire 레이저에서 극초단 펄스 발생에 관한 연구를 살펴보면 다음과 같다. J. Goodberlet 등^[2]은 광섬유를 이용한 비선형 외부공진기를 결합하여 자발적(Self-starting)이고, 지속성(self-sustaining) 있는 모드록킹을 하였으며 이때 펄스폭은 1.4 ps였으며, pulse compressor를 이용하여 200 fs로 펄스폭을 감소 시켰다. 외부 공진기에 사용한 광섬유의 길이는 5~50 cm인 것을 사용하였고, 외부 공진기 길이의 변화는 한 파장의 길이 보다 작도록 제어되었다. 두 공진기 길이의 차이는 2 μ m 이내가 되도록 하였다. D. E. Spence 등^[6]은 균속도 보상용 프리즘을 레이저 공진기 안에 넣어 60 fs의 극초단 펄스를 얻었다. 프리즘으로는 SF14를 사용하였으며, 모

*이 논문은 1992년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비와 1993년도 교육부 기초 과학 육성 연구 지원에 의하여 연구 되었음.

드록킹은 TEM₀₀ 모드와 TEM₀₆ 모드의 beating에 의해 시작되었다. N. H. Rizvi 등^[13]은 균속도 보상용 프리즘을 공진기안에 넣고, 외부 공진기와 결합시킨다음 외부 공진기의 거울을 진동자(shaker)로 흔들어 줌으로써 47 fs의 극초단 펄스를 얻었다. 이때 티타늄 사파이어 결정의 길이는 20 mm였고, 프리즘으로는 SF10을 사용하였다. 외부거울의 진동 주파수는 25 Hz, 진폭은 0.5 mm 이하였고, 외부공진기와 주공진기의 길이 부정합은 크게 문제되지 않았으며, 1 mm 이내였다. 이때 외부공진기는 모드록킹을 시작시켜주는 역할을 하였다. Y. M. Liu 등^[14]은 외부 공진기를 사용하지 않고, 직접 공진기의 한쪽 거울을 진동자로 흔들어서 43 fs의 극초단 펄스를 얻었다. 사용한 프리즘의 재질은 SF14였으며, 프리즘간 거리는 14 cm였다. SF14나 SF10 등의 프리즘쌍은 분산이 크기때문에 프리즘간의 간격이 크지 않아도 Ti:Sapphire에 의한 균속도 분산을 할 수 있지만, 3차 위상 미분항이 커서 50 fs이하의 펄스폭을 얻는데 제한을 주게 된다. B. Proctor 등^[15]은 공진기내의 3차 위상 미분항을 감소시키기 위해 4개의 용융 석영 프리즘을 사용하여 33 fs의 극초단 펄스를 발생시켰다. F. Krausz 등^[16]은 짧은 길이 (8 mm)의 Ti:Sapphire 결정을 사용하여, 보상되어야 할 균속도 분산을 줄인 다음, 공진기 내에 F2 프리즘을 사용하여 33 fs의 극초단 펄스를 얻었다. 이때 프리즘간의 간격은 45 cm였으며, 프리즘내 광로의 길이는 5 mm였다. J. P. Likforman 등^[17]은 100 fs의 레이저 출력을 광섬유와 프리즘 압축기를 사용하여 27 fs의 극초단 펄스를 얻었다. 사용한 프리즘은 SF10이었고, 프리즘간격은 42 cm였다. B. E. Lemoff 등^[18]은 길이가 20 mm인 Ti:Sapphire 결정을 사용하고, 3차 위상 미분항이 F2 보다 작은 LaK31을 사용하여 20 fs 이하의 펄스폭을 얻었다. 프리즘 간의 거리는 64 cm로 레이저의 출력을 증가시켜줌에 따라 펄스폭이 감소하는 것을 관측하였다. C-P Huang 등^[19]은 9 mm인 Ti:Sapphire 결정을 사용하고, LaKL21 프리즘을 사용하여 17 fs의 극초단 펄스를 얻었다. B. Proctor 등^[20]은 4개의 용융 석영 프리즘을 사용하여 13 fs를 얻었고, P. F. Curley 등^[21]은 4 mm 결정과 용융 실리카 프리즘을 사용하여 13 fs의 펄스를 얻었다. M. T. Asaki 등^[22]은 농도 0.15%, 길이 4.5 mm의 결정과 용융 실리카 프리즘을 사용하여 11 fs의 극초단 펄스를 얻었다. 한편 국내에서는 추한태^[23] 등이 티타늄 사파이어 레이저를 자체 모드록킹시켜 1 ps의 펄스폭을 얻은 바 있다. 이와 같은 발전의 방향은 균속도 분산을 보상하면서 펄스폭의 축소에 영향을 주는 3차 위상 미분항이 최소가 되도록 하는데 있다. Ti:Sapphire 결정의

길이가 짧은 것을 사용해야 3차 위상미분이 작은 프리즘 쌍으로 균속도 분산을 보상할 수 있다.

II. 레이저 공진기의 설계

레이저에 의해 펌핑되는 레이저에 주로 사용되는 공진기의 구조는 그림 1과 같은데, tight focusing을 얻고, 마운트하기에 여유가 있도록 설계되어야 한다. 오목 거울의 초점거리를 f_1, f_2 라고 하고 오목거울에서 평면거울까지의 거리를 d_1, d_2 ($d_1 < d_2$) 두 오목 거울 사이의 거리를 $d_f = f_1 + f_2 + \delta$ 라 하자. 이 공진기는 두개의 거울로 구성된 공진기와 동등하며, 이때 유효공진기 거울의 곡률 반경 R_1, R_2 및 거울사이의 거리 l 는 다음과 같다.^[24]

$$R_1 = -\frac{f_1^2}{(d_1 - f_1)}, \quad R_2 = -\frac{f_2^2}{(d_2 - f_2)}, \quad t = R_1 + R_2 + \delta \quad (4)$$

레이저가 안정할 조건은 $0 < \delta < -R_2, -R_1 < \delta < -R_1 - R_2$ 인데,^[24] $\delta \approx -R_2$ 로 하면 short arm쪽에서의 빔의 크기는 크고, 자체 집속에 의한 펄스의 이득은 증가하게 된다.

공진기 내의 균속도 분산의 보상을 위해서는 파장에 따른 티타늄 사파이어 결정 및 프리즘의 재질의 굴절률을 알아야 한다. Ti:Sapphire의 파장에 따른 굴절률 분산 방정식은

$$n^2(\lambda) = \sum_i \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2} + 1 \quad (5)$$

로 주어진다.^[25] 여기서 $\lambda_1^2 = 3.77588 \times 10^{-3}, \lambda_2^2 = 1.22544 \times 10^{-2}, \lambda_3^2 = 3.213616 \times 10^{-3}$ 이고 $A_1 = 1.023798, A_2 = 1.058264, A_3 = 5.280792$ 이며, 파장의 단위는 μm 이다. 본 연구에 사용된 프리즘의 재질은 SF10으로 굴절률 분산 방정식은

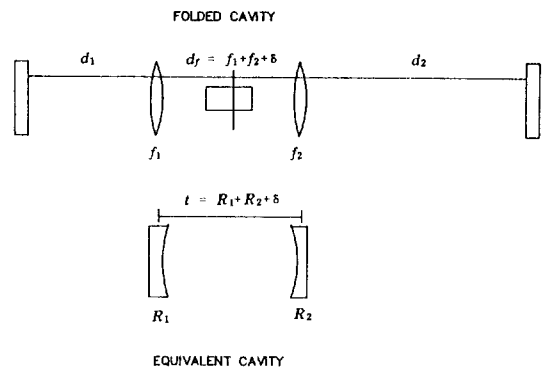


그림 1. 레이저에 의해 펌핑되는 레이저의 공진기 구조.

$$n^2(\lambda) = A_0 + A_1 \lambda^2 + A_2 \lambda^{-2} + A_3 \lambda^{-4} + A_4 \lambda^{-6} + A_5 \lambda^{-8} \quad (6)$$

이때, $A_0 = 2.8784725$, $A_1 = -1.0565453 \times 10^{-2}$, $A_2 = 3.3279420 \times 10^{-2}$, $A_3 = 2.0551378 \times 10^{-3}$, $A_4 = -1.1396226 \times 10^{-4}$, $A_5 = 1.6340021 \times 10^{-5}$ 이다.^[26]

굴절률 n , 길이 l 인 재질 내에서 위상의 2차미분 및 3차미분은 각각

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \phi_m}{d\omega^2} &= \frac{\lambda^3 l_m}{2\pi c^2} \frac{d^2 n_m}{d\lambda^2}, \\ \frac{d^3 \phi_m}{d\omega^3} &= -\frac{\lambda^4 l_m}{4\pi^2 c^3} \left(3 \frac{d^2 n_m}{d\lambda^2} + \lambda \frac{d^3 n_m}{d\lambda^3} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

로 주어지며,^[27] 프리즘 사이의 거리가 l_p 인 프리즘 쌍에 의한 위상의 2차 미분 및 3차미분은 각각

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \phi_p}{d\omega^2} &= \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \frac{d^2 P}{d\lambda^2}, \\ \frac{d^3 \phi_p}{d\omega^3} &= -\frac{\lambda^4}{4\pi^2 c^3} \left(3 \frac{d^2 P}{d\lambda^2} + \lambda \frac{d^3 P}{d\lambda^3} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

로 주어지며, 경로에 관한 2차미분 및 3차미분은 각각

$$\begin{aligned} \frac{d^2 P}{d\lambda^2} &= 4 \left[\frac{d^2 n}{d\lambda^2} + (2n - n^{-3}) \left(\frac{dn}{d\lambda} \right)^2 \right] l_p \sin\beta \\ &\quad - 8 \left(\frac{dn}{d\lambda} \right)^2 l_p \cos\beta \\ \frac{d^3 P}{d\lambda^3} &\approx 4 \frac{d^3 n}{d\lambda^3} l_p \sin\beta - 24 \frac{dn}{d\lambda} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} l_p \cos\beta \end{aligned} \quad (9)$$

으로 주어진다.^[27] 여기서 $l_p \sin\beta$ 는 보통 빔의 크기 정도로 백하게 되는데 모드록킹된 빔의 밴드폭에 따라 사실상 달라지나 보통 2mm의 값을 사용한다. 레이저 공진기에서의 총 군속도 지연분산을 계산할때는 식 (7)을 이용하여 프리즘의 통과 및 레이저 결정을 왕복하여 통과할 때 생기는 값에 식 (8)~(9)로부터 주어지는 프리즘쌍에 의한 값을 더하면 된다. 군속도지연분산이 음이고($\phi''(\omega) < 0$), Kerr 효과에 의한 자체 위상 변조효과(Self Phase Modulation)가 있으며, 위상의 3차 미분항에 의한 효과나 기타 다른 효과들을 무시할 수 있을 때 모드록킹된 펄스폭은^[28]

$$\tau_s = \frac{3.53 |\phi''|}{\gamma W} \quad (10)$$

로 근사할 수 있다. 여기서 W 는 공진기 내에서 펄스 에너지이고, γ 는 Kerr 효과에 관련되는 비례상수이며 Ti:Sapphire의 경우 $\gamma \approx 10^{-6} \text{W}^{-1}$ 이다. 모드록킹 펄스폭을

줄이려면 군속도 지연 분산을 감소하거나 레이저의 출력을 증가시켜야 한다. 군속도 지연분산의 감소에 따라 펄스폭이 100 fs 이하로 감소하면 위상을 유도하는 과정에서 무시했던 위상의 3차 미분항과 공진기내의 각 부품들의 개별적 효과가 중요하여 위 식은 더 이상 사용할 수 없게 된다. 더욱 짧은 펄스를 얻기 위해서는 2차 위상미분이 거의 0에 가까운 음이 되도록하고, 3차 위상미분을 최소로 하는것이 필요한데, 이를 위해서는 Ti:Sapphire 결정의 길이가 작은것을 사용하고, 프리즘도 분산이 작은 것을 사용하여야 한다.

III. 실험 및 결과

티타늄 사파이어 레이저에서 자체모드 록킹에 의해 극초단 펄스를 발생시키는 장치의 개략도는 그림 2와 같다. 티타늄 사파이어 레이저 봉의 직경은 5mm 길이는 20mm, Ti 이온의 몰 농도는 0.1%인 것을 사용하였다. 레이저봉은 구리 블록에 구멍을 만든 다음 열전도성 접착제를 사용하여 장착하였다. 구리블록은 4A까지 구동가능한 열전소자에 의해서 온도가 조절되도록 하였는데, 구리 블록의 온도가 낮으면 결정에 이슬이 맺혀서 발전하는데 어려움이 있었다. 보통 섭씨 22도 근방에 맞추어 사용하였다. 레이저 공진기 내의 거울은 단층 박막으로 되어 군속도 분산 및 3차 위상 미분항이 작은 제품을 사용하였다.

그림 3은 아르곤 레이저의 펄핑 출력에 대한 cw의 Ti:Sapphire의 출력을 보여준다. 문턱 펄핑 출력은 1W였고, 최대 출력은 7.2 W 펄핑에서 650 mW를 얻을 수 있었다. 레이저의 출력은 거울의 정렬에 의해 많이 좌우되었는데, Ti:Sapphire 레이저빔의 결정내 경로와 펄핑된 영역이 얼마나 잘 겹쳐져 있는지가 중요한 변수였다. 오목거울간의 거리 및 결정의 위치를 부착되어 있는 마운트에 부착되어 있는 이동대로 이동하여 보았는데

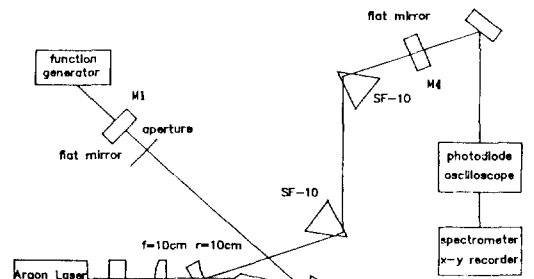


그림 2. 모드록킹을 위한 레이저 공진기의 개략도.

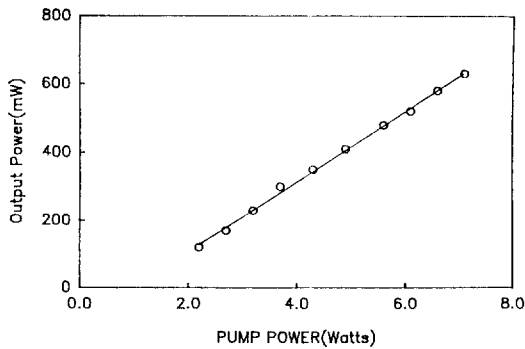


그림 3. 아르곤레이저의 펌핑 출력에 대한 Ti:Sapphire의 출력.

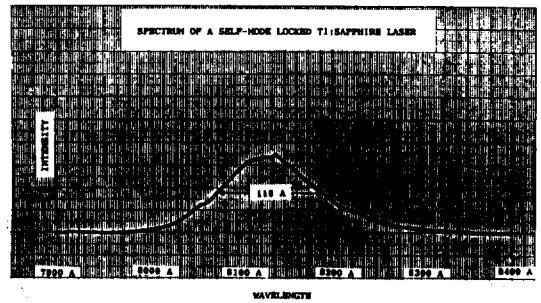


그림 4. 모드록킹 상태의 스펙트럼.

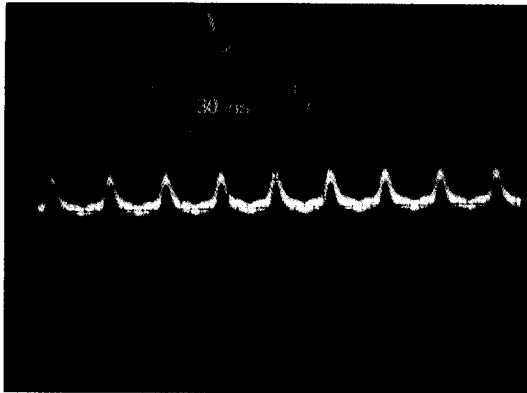


사진 1. 광검출기로 얻은 모드록킹 펄스.

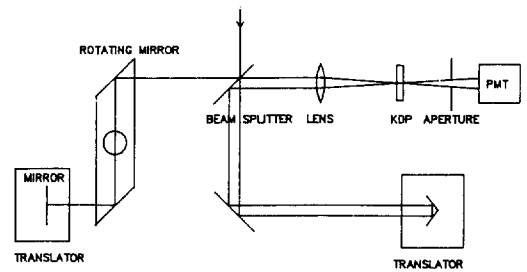


그림 5. 자체 상관기의 개략도.

출력의 변화는 심하지 않았고, 단지 이동대의 backlash에 의한 정렬의 틀어짐으로 인하여 출력의 변화가 심하였다. 광학계를 레일위에 설치하여 정밀한 이동대를 사용한다면 최적의 동작 조건을 찾을 수 있으리라 생각한다. 티타늄 사파이어 레이저 중심 파장은 스펙트로미터(SPEX 1704)로 측정된 결과 813.3 nm였다. 또한 CCD 카메라를 스펙트로미터에 부착하여 본 결과 레이저의 주파수가 흔들리는 것을 관찰 할 수 있었다. 이는 실험실내의 공기의 요동 및 테이블 및 마운트가 불안하여 발생하는 것으로 생각되어진다.

티타늄 사파이어 레이저의 자체 모드록킹은 자발적으로는 되지 않기 때문에 모드록킹을 시작시켜 주는 장치가 필요하다. 주로 사용되는 방법은 광음향 변조기를 공진기내에 설치하여 능동적으로 모드록킹하는 방법, 공진기내에 포화흡수체를 사용하는 방법, 주공진기와 거의 같은 길이의 비선형 외부 공진기를 사용하는 방법, 공진기의 한쪽 거울을 진동자를 이용하여 공진기의 길이를 낮은 주파수로 변조시키는 방법 등이 있다. 본 연구에

서는 볼슬라이더(ball slider, THK) 위에 거울 M1을 설치하고, 슬라이더에 스피커의 병진 진동을 인가시켜 모드록킹을 시작시켰다. 모드록킹의 확인은 빠른 광검출기를 이용하여 행해졌다. 군속도 분산 보상을 위한 프리즘쌍의 거리는 37 cm로 하였고, 프리즘내 광로의 길이는 5 mm가 되도록 하였다. 이때 레이저의 출력을 광검출기로 잡으면 불안한 mode beating 신호를 얻을 수 있는데 불완전한 모드록킹 때문으로 해석된다. 이때 short arm쪽에 조리개를 설치하여 조리개 폭을 서서히 줄여가면서 광 검출기의 신호가 정지한 것처럼 보일때를 찾는다. 이때는 레이저가 모드록킹이 되어 펄스가 규칙적으로 나와 오실로스코프상에는 정지한 것처럼 보인다. 일단 모드록킹이 되면 거울을 움직이지 않아도 모드록킹 상태는 당분간 지속되었다. 모드록킹 레이저의 출력은 6 W 펌핑에 대해 350 mW의 출력을 얻었다. 사진 1은 광 검출기로 잡은 모드록킹 펄스들이다. 이때 광 검출기로는 EO-Tek사의 ET-2000과 오실로스코프는 Tektronics 2465A였다. 모드록킹 상태의 스펙트럼을 스펙트로미터(SPEX1704)로 측정된 결과는 그림 4와 같다. 밴드폭이 11 nm이었는데 transform-limited된 sech^2 펄스라 가정하면($\Delta\nu\tau \approx 0.32$) 모드록킹 펄스의 펄스폭은 약 60 fs로 추정되었다. 그러나 실제 모드록킹 펄스에는 self-phase modulation과 불완전한 군속도 분산의 보상으로

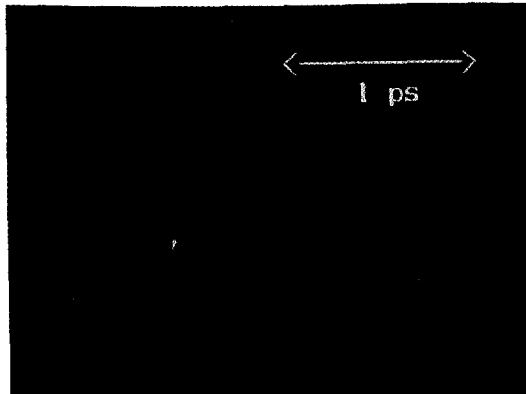
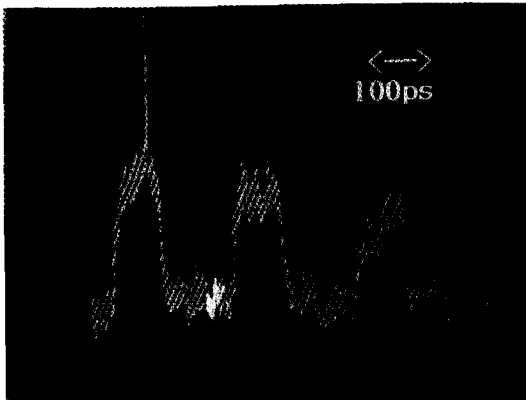


사진 2. 자체 상관기로 측정된 모드록킹 펄스.

인하여 chirp이 있게 되어 펄스폭은 60 fs 이상이 된다. 물론 레이저 공진기 외부에 펄스 압축기를 놓아 펄스폭을 줄일 수는 있다. 프리즘쌍의 거리가 37 cm, 프리즘내 광로의 길이가 5 mm, Ti:Sapphire 결정의 길이가 2 cm, 모드록킹의 중심파장 813.3 nm일때 위상의 2차미분 및 3차 미분을 구하면 각각 -883 fs^2 와 -11612 fs^3 이다. 식 (10)을 사용하여 레이저 출력이 180 mW, 펄스의 반복율이 83 MHz 일때 모드록킹 펄스폭을 이론적으로 구하면 약 43 fs가 된다. 본 연구에서는 펄스폭을 측정하기 위하여 그림 5와 같이 자체 상관기를 제작하였다. 자체 상관기내에서 추가될 수 있는 균속도 분산을 줄이기 위해서 은 코팅된 거울과 2 mm 용융 실리카 빔 스플리터, 두께가 얇은 렌즈를 사용하였다. 제 2 고조파 발생을 위한 결정으로는 KDP를 사용하였으며, 1 mm 이하로 얇게 연마해 사용하였다. 제 2 고조파 신호는 1P28(Hamamatsu사) photo-multiplier tube를 사용하여 측정하였다. KDP 결정의 면이 고르지 못해 산란이 되어 제 2 고조파가 아닌 fundamental wave가 광 검출기로 입사

하는 것을 막기 위하여 칼라필터 2개(BG39,CVI사)를 사용하여 fundamental wave를 차단하였다. 자체 상관기의 한쪽 팔은 회전하는 날개위에 거울을 부착하여 길이를 변화 할수 있게 하였다. 이때 스캔 시간은 100 ps였다.

사진 2는 자체 상관기를 이용하여 측정된 모드록킹 펄스이다. fundamental wave에 의한 배경이 보이고 그 중앙에 뾰족하게 나와 있는 것이 모드록킹 펄스이다. 자체 상관기의 신뢰도가 나빠서 단언하기는 어렵지만 오실로스코프의 시간 스케일을 확대하여본 결과 $100 \pm 20 \text{ fs}$ 정도의 펄스폭을 가짐을 추정할 수 있었다. 프리즘간의 간격 및 프리즘내 광로의 길이를 적절히 조절해 주면 펄스폭은 50 fs 이하로 줄어들 것으로 생각된다. 자체 상관기의 성능을 향상시키기 위한 작업이 현재 진행되고 있으며 50 fs 이하의 극초단 펄스를 얻기 위해서 LaKL21 프리즘을 사용할 예정이다.

IV. 결 론

아르곤 레이저에 의해 펄핑되는 티타늄 사파이어 레이저를 제작하고, 이를 자체 모드록킹 시켰다. 모드록킹은 이동하는 거울에 의해 시작되었으며, 티타늄 사파이어 어안에서의 Kerr 효과와 조리개가 빠른 포화 흡수체 역할을 하였다. 공진기 내의 균속도 분산을 보상하기 위하여 SF10 재질의 프리즘 쌍을 사용하였다. 펄스의 대역폭은 11 nm였으며, 자체 상관기로 펄스폭을 측정할 결과 $100 \pm 20 \text{ fs}$ 정도인 것을 알 수 있었다. 펄스폭을 더 줄이기 위해서는 짧은 길이의 Ti:Sapphire 결정과 3차 위상 미분항이 작은 재질의 프리즘을 사용하여야 한다. 본 연구에서 제작된 티타늄 사파이어 레이저는 제 2 고조파 발생을 통하여 극초단 펄스의 380~500 nm 대역에 파장 가변 레이저 광을 얻는데 이용될 수 있고, LiSAF 등의 증폭기를 통한 고출력의 발생, Optical Parametric Oscillator를 이용한 파장가변 적외선의 발생 등에 이용될 수 있다. 또한 펄프광-조사광 방법에 의해 매질의 빠른 반응을 연구하는데도 이용될 수 있다.

참 고 문 헌

[1] F. Krausz, M. E. Fermann, T. Brabec, P. F. Curley, M. Hofer, M. H. Ober, C. Spielmann, E. Wintner and A. J. Schmidt, *IEEE J. Quantum Electron.*, **28**, 2079(1992).
 [2] J. Goodberlet, J. Wang, J. G. Fujimoto and P. A. Schulz, *Optics Lett.*, **14**, 1125(1989).

- [3] L. Y. Liu, J. M. Huxley, E. P. Ippen and H. A. Haus, *Optics Lett.*, **15**, 553(1990).
- [4] J. M. Liu and J. K. Chee, *Optics Lett.*, **15**, 685 (1990).
- [5] F. Krausz, Ch. Spielmann, T. Brabec, E. Wintner, and A. J. Schmidt, *Optics Lett.*, **15**, 737(1990).
- [6] D. E. Spence, P. N. Keen and W. Sibbet, *Optics Lett.*, **16**, 42(1991).
- [7] G. P. A. Malcolm and A. I. Ferguson, *Optics Lett.*, **16**, 967(1991).
- [8] P. M. W. French, R. Mellish, J. R. Taylor, P. J. Delfyett and L. T. Florez, *Optics Lett.*, **18**, 1934 (1993). F. Balembos, P. Georges, and A. Brun, *Optics Lett.*, **18**, 1730(1993). F. Balembos, P. Georges, F. Salin and A. Brun, *Optics Lett.*, **18**, 1250 (1993). P. Beaud, M. Richardson, E. J. Miesak, and B. H. T. Chai, *Optics Lett.*, **18**, 1550(1993). N. H. Rizvi, P. M. W. French, J.R. Taylor, P. J. Delfyett, and I. T. Florez, *Optics Lett.*, **18**, 983 (1993).
- [9] P. LiKamWa, B. H. T. Chai and A. Miller, *Optics Lett.*, **17**, 438(1992).
- [10] A. Seas, P. Petricevic and R. R. Alfano, *Optics Lett.*, **18**, 891(1993). Y. Pang, V. Yanovsky, F. Wise, and B. I. Minkov, *Optics Lett.*, **18**, 1168 (1993). A. Sennaroglu, C. R. Pollack, H. Nathel, *Optics Lett.*, **18**, 826(1993). A. Seas, P. Petricevic, and R. R. Alfano, *Optics Lett.*, **17**, 937(1992). Y. Yanovsky, Y. Pang, F. Wise, and B. I. Minkov, *Optics Lett.*, **18**, 1541(1993).
- [11] M. R. X. de Barros and P. C. Becker, *Optics Lett.*, **18**, 631(1993). D. R. Dykaar and S. B. Darack, *Optics Lett.*, **18**, 634(1993).
- [12] J. M. Evans, D. E. Spence, D. Burns and W. Sibbet, *Optics Lett.*, **18**, 1074(1993).
- [13] N. H. Rizvi, P. M. W. French, and J. R. Taylor, *Optics Lett.*, **17**, 279(1992).
- [14] Y. M. Liu, K. W. Sun, P. R. Prucnal and S. A. Lyon, *Optics Lett.*, **17**, 1219(1992).
- [15] B. Proctor and F. Wise, *Optics Lett.*, **17**, 1295 (1992).
- [16] F. Krausz, Ch. Spielmann, T. Brabec, E. Wintner and A. J. Schmidt, *Optics Lett.*, **17**, 204(1992).
- [17] J. P. Likforman, G. Grillon, M. Joffre, C. Le Blanc, A. Migus, and A. Antonetti, *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 2061(1991).
- [18] B. E. Lemoff and C. P. J. Barty, *Optics Lett.*, **17**, 1367(1992).
- [19] C-P. Huang, M. Asaki, S. Backus, M. M. Murnane, and H. C. Kapteyn, *Optics Lett.*, **17**, 1289 (1992).
- [20] B. Proctor and F. Wise, *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 470 (1993).
- [21] P. F. Curley, Ch. Spielmann, T. Brabec, F. Krausz, E. Wintner and A. J. Schmidt, *Optics Lett.*, **18**, 54(1993).
- [22] M. Asaki, C-P. Huang, D. Garvey, J. Zhou, H. C. Kapteyn and M. M. Murnane, *Optics Lett.*, **15**, 977(1993).
- [23] 추한태, 김규욱, 김용평, 새물리, **33**, 536(1993).
- [24] T. Brabec, Ch. Spielmann, P. F. Curley and F. Krausz, *Optics Lett.*, **17**, 1292(1992). T. Brabec, P. F. Curley, Ch. Spielmann, E. Wintner and A. J. Schmidt, *J. Opt. Soc. Am.*, **10**, 1029(1993). T. Brabec, Ch. Spielmann and F. Krausz, *Optics Lett.*, **16**, 1961(1991).
- [25] I. H. Malitson, *J. Opt. Soc. Am.*, **52**, 1377(1962).
- [26] Optical Glass Catalog, Ohara Inc, 1990.
- [27] R. L. Fork, C. H. B. Cruz, P. C. Becker and C. V. Shank, *Optics Lett.*, **12**, 483(1987).
- [28] C. Spielmann, P. F. Curley, T. Brabec and F. Krausz, *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, 1106 (1994).

**Ultrashort Pulse Generation by self-mode-locking of
a Ti:Sapphire Laser**

Jong-Dae Park, Il-Hyung Lee and Chang-Ho Cho
Department of Physics, Pai-Chai University, Taejon 302-735, Korea

Yong-Sik Lim, Jai-Hyung Lee and Joon-Sung Chang
Department of Physics, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received: June 9, 1994)

An Argon laser pumped Ti:Sapphire laser has been constructed and self-mode locked. Mode-locking was initiated by a moving mirror mounted on the ball slider and maintained by the self-focusing in the laser crystal and an aperture inside the resonator. A prism pair was used to reduce group velocity dispersion. The bandwidth and the pulse width of the mode-locked pulse were 11 nm, 100 ± 20 fs, respectively.