

수동 모드 잠금된 100 MHz Cr⁴⁺:YAG 레이저에서의 펨토초 펄스 발생

조원배 · 이상민[†]

아주대학교 분자과학기술학과
Ⓣ 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산5번지

김종두 · 전민용

충남대학교 물리학과
Ⓣ 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220

서호성

한국표준과학연구원 길이그룹
Ⓣ 305-340 대전광역시 유성구 도룡동 1번지

(2005년 8월 15일 받음, 2005년 11월 4일 수정본 받음)

Cr:YAG 레이저 매질을 사용하여 실온영역에서 안정적으로 수동 모드 잠금된 근적외선 펨토초 레이저를 제작하고, 그 특성을 분석하였다. 공진기 내부에 설치된 프리즘의 조절만으로 손쉬운 파장 조절이 가능하였으며, 연속 발진시 1400 nm 부터 1510 nm 까지 110 nm 정도, 모드 잠금 경우 1500 nm 부근에서 30 nm 정도의 파장 조절이 가능함을 확인하였다. 1.5 %의 투과율을 지닌 출력거울을 사용하였으며, 연속 발진시 흡수 파워가 7.6 W 일 때 최대 810 mW 이상의 출력을 측정하였다. 공진기 내에서 발생된 분산을 보상하기 위하여 적외선용 프리즘 쌍을 사용하였으며, 100 MHz의 반복률에서 푸리에 변환 한계에 근접한 64 fs의 극초단 펄스 방출이 가능하였다. 레이저의 중심파장이 1510 nm 일 때 스펙트럼의 반치폭은 44 nm였다. 모드 잠금이 꺼지지 않고 장시간 안정적으로 작동이 가능한 레이저 제작을 위해 공진기 내부의 광 경로에 관을 설치하고 질소가스를 순환시켰으며, 평균출력 250 mW로 최적화하였다.

주제어 : Solid-state lasers, Laser materials, Ultrafast lasers, Femtosecond phenomena.

I. 서 론

루비 레이저 개발 이후로 각종 새로운 레이저 개발과 그에 따른 응용 연구가 활발히 지속되어 왔으며, 기초 과학 분야인 물리, 화학, 생물 분야에서는 물론 의료 및 산업 분야에서 없어서는 안 될 중요한 도구로 자리 잡았다. 1964년 중 모드들 간의 잠금 현상이 발견된 이후, 모드 잠금(mode-locking)이라 불리는 이 방법은 레이저 펄스를 생성하기 위한 기술로 널리 이용되어 왔다.^[1] 이러한 모드 잠금 현상을 이용하여 루비 등의 고체 레이저에서 최초로 펄스폭이 수 ns인 펄스를 생성하였으며,^[2] 극초단 펄스를 방출하기 위한 방법으로 1980년도 이후 실현되어 활발히 응용되고 있는, 레이저 매질의 커 렌즈 효과에 의한 모드 잠금(Kerr lens mode-locking)법이 사용되고 있다. 현재에는 이를 통해 5 fs 이하의 근적외선 펄스 방출도 시도되고 있다.^[3] 극초단 펄스 방출이 가능한 고체 레이저 매질로는 Ti:sapphire(Ti³⁺:Al₂O₃), Alexandrite (Cr³⁺:BeAl₂O₄), Cr:LiSAF(Cr³⁺:LiSrAlF₆), Cr:forsterite(Cr⁴⁺:Mg₂SiO₄), Cr:YAG (Cr⁴⁺:Y₃Al₅O₁₂)등이 사용되며, 결정의 특성에 따라 근적외선 영역 700 nm 과 1600 nm 사이에서 레이저 광을 방출한

다.^[4-8] 오늘날에는 극초단 펄스의 응용 범위가 점점 확대되고 따라서 그에 필요한 펄스 에너지를 높이는 방안으로 처프 펄스를 이용한 재생 증폭(regenerative amplification) 및 다중 통과 증폭(multi-pass amplification)등의 다양한 기술이 개발되어 응용되고 있다.^[9,10]

다양한 파장영역 중에서 특히 1500 nm 부근에서 작동하는 펨토초 레이저는 생체 이미지 기술 중 하나인 결맞음 광영상법(optical coherence tomography; OCT)에 응용 가능하며, 광통신용으로 사용하기 위한 고반복률 펨토초 레이저의 경우 광 시분할 다중화(optical time division multiplexing; OTDM) 및 파장 분할 다중화(wavelength division multiplexing; WDM)의 광원으로^[11] 사용 가능하다. 또한 시분해 분광학(time-resolved spectroscopy) 및 광통신 파장영역에서 펄스 간격이 균일한 광빔(optical comb)을 발생시킴으로써 광통신 대역에서의 광주파수 절대측정 등^[12] 광범위한 분야에 응용되고 있다. Cr:YAG는 넓은 발진 파장대(1450-1650 nm)를 지니며 상온에서 극초단 펄스 방출을 가능하게 하므로 1500 nm 영역의 레이저 이득매질로 많이 사용되고 있다. Cr:YAG의 경우 1988년에 최초 레이저 발진 현상이 보고된 이후,^[13] 1997년에는 커 렌즈를 이용한 수동 모드 잠금법을 이용하여 43 fs의 짧은 펄스를 얻었으며,^[14] 2002년에는 프리즘 쌍을

[†] E-mail: rotermun@ajou.ac.kr

이중 처프 거울(double-chirped mirror)로 대체하여 20 fs의 더욱 짧은 펄스를 방출한 연구가 보고되었다.^[15]

국제전기통신연합(international telecommunication union; ITU)에서는 광통신을 위한 광주파수를 193.1 THz(~1552 nm)로 지정하고 채널 간 간격을 다양화하였다. 이러한 광통신 대역에서의 광주파수 측정을 위한 1500 nm 대역의 극초단 펄스 발생 레이저는 아직 상용화 되지 않아 광빗살 발생기(optical comb generator)를 이용한 광주파수 절대측정에 유리한 100 MHz 이상의 고반복률 레이저 개발이 필요하다. 레이저 시스템의 반복률은 광빔의 채널 간 간격을 결정하므로 이 채널 간격을 국제전기통신연합 광통신 규격(ITU telecommunication standardization)의 격자 간격과 맞추기 위해서 레이저 반복률이 100 MHz가 되도록 공진기 길이를 설정하였다.^[16,17] 본 연구에서는 1500 nm 영역에서 파장 가변의 연속 발진 및 커 렌즈 효과를 이용한 수동 모드 잠금을 통해 극초단 펄스 방출이 가능한 레이저 공진기를 제작하고, 그 특성을 분석하였다. 광대역 거울과 적외선용 프리즘 쌍을 설치하여 분산을 보정하고, 100 MHz의 반복률에서 70 fs 이하의 펄스폭을 지닌 레이저 펄스를 방출하는 공진기를 제작하였다. 특히 제작된 레이저는 열전 냉각기(thermoelectric cooler) 없이 물 순환만을 이용하여 레이저 발진을 최적화하여 작동을 간편화하고, 실온영역에서 장시간 모드 잠금의 꺼짐 없이 안정적으로 발진되도록 하였다.

II. 프리즘 쌍을 이용한 분산 보정

극초단 펄스 방출시 공진기 내의 이득매질, 거울 그리고 공기 등에 의해 발생하는 양의 군속도 분산 때문에 펄스폭이 한정된다. 이러한 분산을 보정하여 극초단 펄스를 얻기 위한 방법으로 프리즘 쌍을 공진기 내에 설치해 음의 군속도 분산을 유도 할 수 있다.

본 연구에서 레이저 매질로 길이 20 mm, 직경 6 mm, 그리고 양면이 브루스터(Brewster)각으로 연마된 원형막대 형태의 Cr:YAG(Union Carbide사)를 사용하였으며, 이 때 Cr⁴⁺이온의 첨가율은 0.15 wt. % 이다. 공진기 구성시, 1400 nm 영역에서 흡수가 없는 용융 석영계(IR graded fused silica) 프리즘 쌍을 내부에 설치해 레이저를 제작하였다. 각 매질의 분산 특성을 계산하면 그림 1과 같다.^[18,19] 그림에서 Cr:YAG는 레이저 매질에 의한 분산값을 나타내고 prism pair으로 표현된 수치는 프리즘 쌍에 의해 유도된 분산값이며, 이때 프리즘의 간격은 실험상의 길이인 140 mm로 하여 계산되었다.

그림 2는 프리즘 쌍의 간격을 변화시켜 그에 따라 계산된 분산값을 보여준다. 프리즘 간격이 각각 100 mm, 140 mm, 그리고 170 mm 일 때 레이저 공진기 내부의 총 군속도 지연에 의한 분산(group delay dispersion: GDD)값을 그래프로 나타낸 것으로서 계산되어진 총 GDD 값에는 공기에 의한 분산이나 공진기를 구성하는 거울 등의 광학계에 의하여 발생하는 양분산값은 고려되지 않았다.

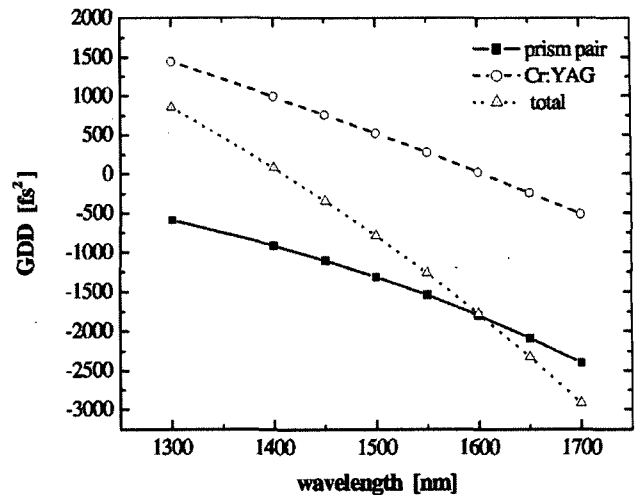


그림 1. 파장에 따른 공진기내 이득매질과 프리즘 쌍의 분산 특성.(여기서 프리즘 쌍의 거리를 140 mm로 설정하여 계산하였다.)

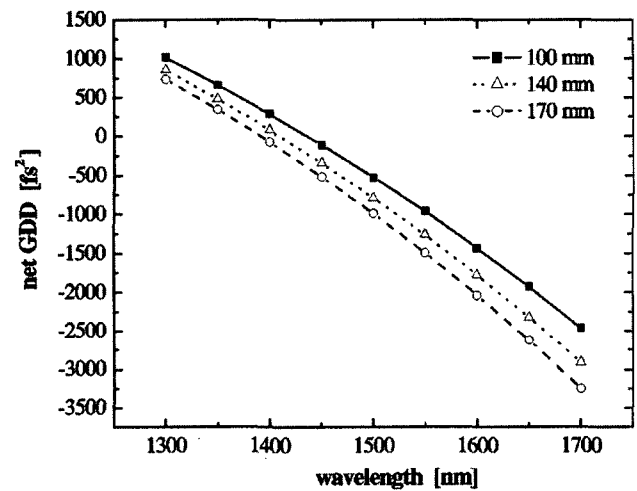


그림 2. 프리즘 쌍 거리 변화에 따른 공진기내의 분산 보정 및 GDD.

본 연구에서는 중심파장 1500 nm 영역에서 분산이 보정 되도록 프리즘 간격을 조정하여 극초단 펄스 방출을 시도하였다. 프리즘 간격을 변화시키며 분산에 따른 펄스 특성을 확인한 결과 최적조건의 프리즘 간격이 140 mm임을 확인하였다. 이론적으로 분산이 잘 보상된 중심 파장값에 비하여 실험상에서 장파장 영역으로 중심 파장영역이 이동한 이유는 공진기 내의 완전히 보상되지 않은 높은 차수의 분산(higher-order dispersion) 및 방출 파장영역에서 물 흡수에 의한 영향이라 예측할 수 있다.^[20]

III. 실험 장치 구성

본 연구에서는 극초단 펄스 레이저 제작시 많이 사용되는

접힌 공진기 형태 중에서 X-형을 선택하여 그림 3과 같이 공진기를 제작하였다. 각 팔의 길이는 비대칭 구조로 약 3:2의 비율로 구성하였으며, 펄핑 광원으로는 파장 1064 nm에서 최대 출력 10 W까지 연속 발진되는 다이오드로 펄핑된 Spectra Physics사의 Nd:YVO₄ 레이저를 사용하였다.

펌프빔이 레이저 공진기에 입사되기 전에 λ/2-편광판을 이용하여 S 편광된 광을 P 편광으로 바꾸고, 효율적인 집속을 위해서 양면이 1064 nm 영역에서 반사방지(anti-reflection) 코팅된 초점거리 100 mm의 볼록렌즈를 사용하였다. 이득매질은 앞에서 언급된 바와 같이 양면이 브루스터각으로 연마된 길이 20 mm, 직경 6 mm의 원형막대 형태의 Cr:YAG를 사용하였다. 펄핑 광으로 인한 매질의 내부열을 효율적으로 외부로 빼내고 레이저 발진 시 열렌즈(thermal lensing) 효과로 인한 불안정한 레이저빔 모드 및 출력 저하를 최소화하기 위해 열전도성이 좋은 인듐으로 매질을 싼 후 구리로 제작된 지지대에 설치하였다. 온도를 실내 온도 영역에서 유지하며 안정적이고 작동 간편한 레이저 시스템을 제작하는 방안으로 지지대를 물로 순환시켜 냉각하였으며, 이로써 열전 냉각기 사용을 통한 온도 유지 및 낮은 온도 설정에 의한 물기 맺힘 등의 문제를 해결하고 공진기 구성을 단순화 할 수 있었다. 실험에서 사용된 모든 거울은 1064 nm 영역에서 높은 투과율을 지니고 레이저 작동 파장영역에서 고반사율을 갖도록 광대역 코팅된 Layertec 제품을 사용하였다. 공진기 내의 두 개의 오목 거울 M1 과 M2 의 곡률 반경은 100 mm이며, 1380 nm와 1620 nm 사이에서 99.9 % 이상 반사되도록 코팅되었다. 출력거울 OC는 동일한 광대역 파장영역에서 투과율 1.5 %를 지니도록 코팅, 설계되었으며, 고반사 거울 HR은 99.9 % 이상의 반사율을 지니는 고반사율 평면거울을 사용하였다. 공진기 내부에서 이득매질의 투과와 오목거울의 반사를 통해 발생된 비점수차가 서로 보상되도록 공진기의 양쪽 팔을 34°로 접어 구성하였으며, 공진기 길이는 1.5 m

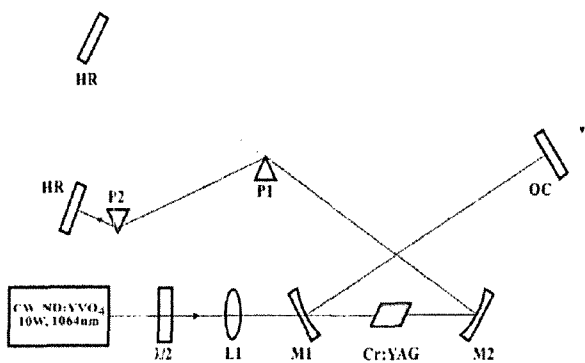


그림 3. X-형 비대칭 Cr:YAG 레이저 공진기 구성도. λ/2: λ/2 파장판, L1: 집속렌즈(f=10 cm), M1, M2: 1380- 1620 nm 영역 고반사 거울(ROC=10 cm), Cr:YAG: 브루스터각으로 연마된 20 mm Cr:YAG 결정, P1, P2: 적외선용 프리즘, HR: 1380-1620 nm영역 고반사 평면거울, OC: 1.5 % 출력 거울.

로 반복률이 100 MHz가 되도록 레이저 공진기 길이를 조절하였다. 레이저 발진 후 펄프 빔 모드와 레이저 빔 모드의 이상적인 정합을 위해 집속렌즈와 레이저 매질의 위치를 조절하여 최적화하였다. 모드 잠금 현상을 확인하기 위해서 출력 거울을 통해 나온 레이저 광을 광 분할기(beam-splitter)를 통해 4 %정도 반사시켜 광 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer; Advantest사의 model Q8384)를 이용하여 스펙트럼을 측정하였으며, 동시에 35 ps의 반응시간을 지닌 초고속 광 검출기(ultrafast photodetector; EOT 사의 ET-3500)와 고주파 스펙트럼 검출기(HP 사의 HP 8566B spectrum analyzer 100 Hz-2.5 GHz)를 통해 펄스열을 관찰하고 안정성 여부를 확인하였다. 또한 자체상관계(auto-correlator)를 이용하여 펄스 길이도 측정하였다.

IV. 실험 결과 및 분석

펄토초 펄스 방출에 앞서 1차적으로 Cr:YAG 레이저를 연속 발진시켜 그 특성을 분석하였다. 비대칭 구조로 제작된 공진기는 두개의 안정영역을 지니며 그 영역에서만 발진이 가능함을 확인하였다. 그림 4는 공진기내 오목거울 M1와 M2 간격의 변화에 따라 각 안정영역에서 측정된 레이저 출력을 규격화하여 나타내었다. 측정된 영역은 ABCD 광 경로 추적법을 통해 이론적으로 계산한 결과와 잘 일치하였으며, M1과 M2 의 거리가 약 110 mm와 120 mm 정도 떨어진 곳에서 레이저 발진을 관찰 할 수 있었다. 각 영역에서 레이저 출력의 최대값 크기는 레이저 매질이 설치된 각도에 따라 민감하게 변하여 큰 차이를 보이므로 레이저 매질을 브루스터각으로 정확히 설치되도록 조정하여 최적화하였다.

연속 발진의 경우, 흡수된 펄프 레이저 출력에 따라 측정된 Cr:YAG 레이저의 표준화된 평균출력은 그림 5에서 보여 준다. 두 개의 안정영역에서 출력 특성이 가장 좋은 지점을

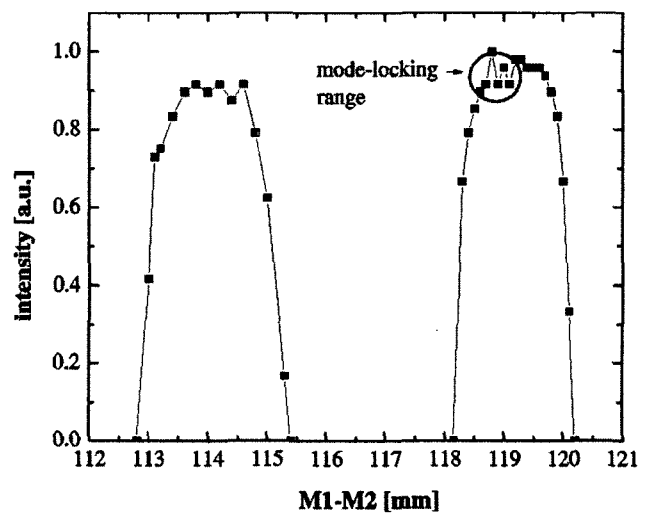


그림 4. 내부 집속거울 M1-M2 간격 변화에 따라 측정된 안정영역.

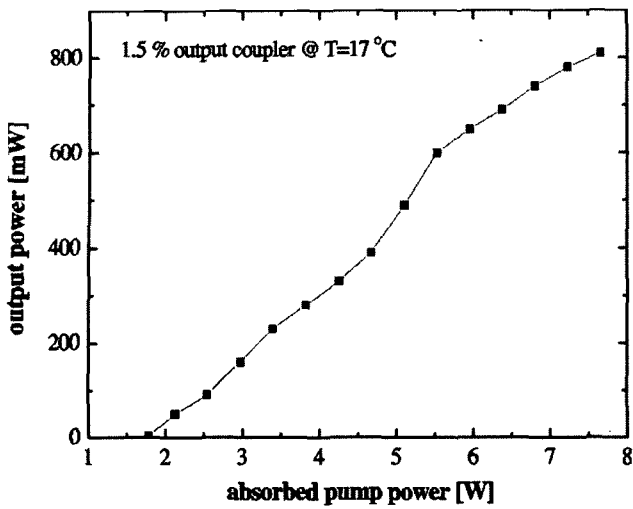


그림 5. 흡수된 펌프레이저 출력에 따른 연속 Cr:YAG 레이저의 출력.

찾아서 흡수 펌프 출력이 7.6 W 일 때 810 mW 이상의 레이저 출력을 측정 할 수 있었다. 흡수된 펌프 레이저 출력이 6 W 이상이 되면 열렌즈 효과로 인해 출력이 다소 감소하는 현상을 관찰하였으나 냉각 온도를 낮추어 레이저 출력을 안정화시킬 수 있었으며, 펌프 출력과 냉각 온도의 조정으로 1 W 이상의 출력 방출도 가능하리라 예측되었다. 흡수된 펌프 레이저 출력이 1.7 W부터 레이저가 발진되어 레이저 발진 문턱도 측정 할 수 있었다. 그림 6은 연속 Cr:YAG 레이저의 파장 가변 영역을 확인하기 위해 측정한 스펙트럼을 나타낸다. 복굴절 필터를 사용하면 더 넓은 파장영역에서 파장 가변이 가능하지만, 본 연구에서는 공진기 구성 자체 광학 부품인 프리즘 쌍만을 이용해 1400 nm에서 1510 nm 까지 손쉽게 파장 조절이 가능함을 확인하였다. 각 안정영역에서 수동 모드 잠금을 이용한 펄초 펄스 방출을 시도한 결과, 그림 4에서 볼 수 있듯이 두 번째 안정영역에서 연속 발진 시 최대출력을 얻은 지점에서 조금 벗어난 위치에서 모드 잠금이 잘 이루어짐을 확인 할 수 있었으며, 이 지점에서 레이저 발진을 최적화하였다.

커 렌즈 효과에 의해 자체 위상 변조가 일어나 스펙트럼은 넓어지지만 극초단 펄스를 얻기 위해서는 레이저가 발진되어 공진하면서 이득매질이나 프리즘, 공기 등을 통과하고 거울에 반사되면서 발생된 양분산이 보상되어야 한다. 공진기 내에 군속도 음분산을 첨가하는 방법으로 본 연구에서 적외선용 프리즘 쌍 P1과 P2를 공진기 내에 설치하였다. 필요한 양의 음분산은 두 번째 프리즘 P2의 위치를 조절하여 첨가하고, 공진기를 최적화하여 P1 또는 P2를 흔들어 줌으로써 처음 모드 잠금을 유도하였다. 모드 잠금이 가장 안정적으로 작동하는 지점에서 레이저 펄스의 중심파장은 1510 nm이며, 프리즘 조절로 30 nm 정도의 파장변환이 가능함을 확인하였다. 흡수 파워가 4.8 W, 매질 지지대의 온도가 17 °C 일 때 연속성 레이저에서의 평균출력은 300 mW이다. 모드 잠금이

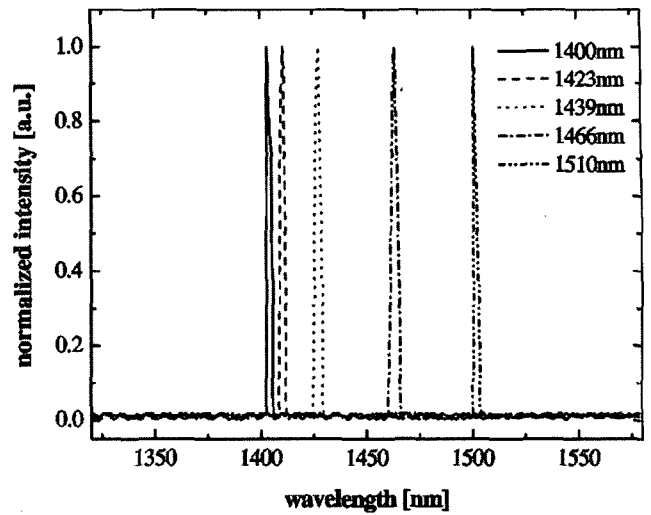


그림 6. 연속 Cr:YAG 레이저의 파장 가변 영역.

되었을 때 평균출력 300 mW 이상의 펄초 펄스 방출이 가능하였으나, 레이저가 열렌즈 효과에 의한 방해받지 않고 안정적 발진될 수 있도록 250 mW의 출력으로 최적화 하였다. 모드 잠금이 되었을 때 측정된 반복률이 100 MHz 인 것은 그림 7의 측정된 신호를 통하여 확인 할 수 있었다.

모드 잠금 되었을 때 자체상관계로 측정된 펄스는 그림 8에서 볼 수 있듯이 반치폭(full width at half maximum) $\Delta\tau = 99$ fs를 지니며, 측정된 곡선 형태를 sech^2 -펄스로 가정하였을 때 잘 일치되었다. 펄스의 길이로 환산하여 64 fs를 얻을 수 있었으며, 측정된 값을 기반으로 시간폭과 스펙트럼 선폭의 곱(time-bandwidth product)을 계산하면 약 0.37로 방출된 펄스는 푸리에 변환 한계에 근접함을 확인할 수 있었다.

레이저 발진시 Cr:YAG의 방출 영역이 물 흡수 영역(1400

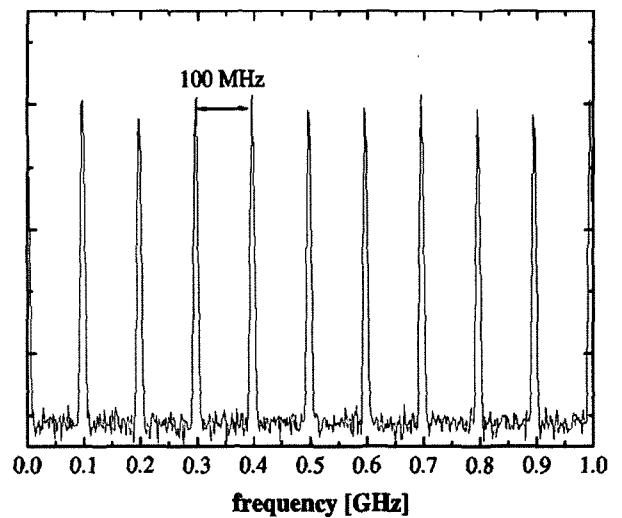


그림 7. 100 MHz로 발진되는 펄초 Cr:YAG 레이저 펄스의 반복률.

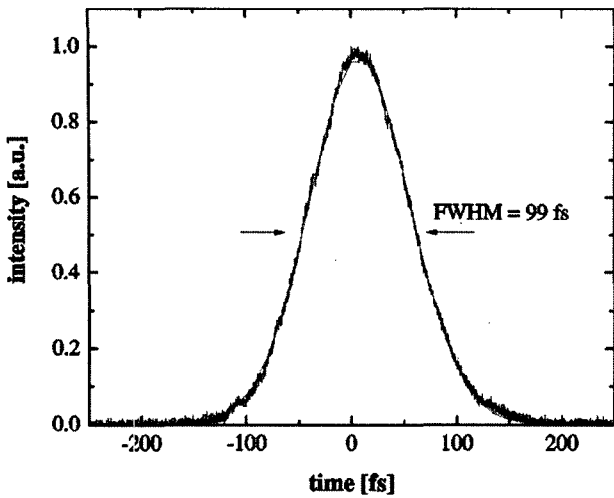


그림 8. 자체상관계로 측정된 레이저 펄스의 폭.(sech2-펄스형태를 가정할 경우, 이 반치폭은 펄스 길이 64 fs에 해당한다.)

-1500 nm)에 걸쳐 있기 때문에 이로 인하여 모드 잠금시 스펙트럼의 상태가 변조되고, 레이저 발진 역시 불안정한 것을 확인 할 수 있었다. 물 흡수 영역을 피하기 위해서 복굴절 필터를 이용하여 레이저 작동 중심파장을 1500 nm 이상으로 이동시켜 모드 잠금을 시도하는 방법도 가능하지만, 모드 잠금이 되어 넓어진 스펙트럼 역시 물 흡수 영역에 걸쳐 있으므로 물 흡수에 의한 모드 잠금의 불안정한 요소를 근본적으로 해결해야 한다. 따라서 공진기 내부에 레이저가 발진되는 광로를 따라 관을 설치하고 질소가스로 씻어줌으로서 물 흡수 문제를 대부분 제거하였다. 그림 9에서 보여주듯이 물 흡수 문제가 전혀 해결되지 않은 경우에 펄스초 펄스의 스펙트럼을 보면 1450 nm 영역에서 물 흡수에 의한 스펙트럼 변조와 연속 스펙트럼 성분의 요동을 관찰 할 수 있었으며, 모드 잠금도 불안정하였다. 반면에 관을 설치하고 질소가스를 이용한 경우에 연속 스펙트럼 성분을 완전히 제거하지는 못했

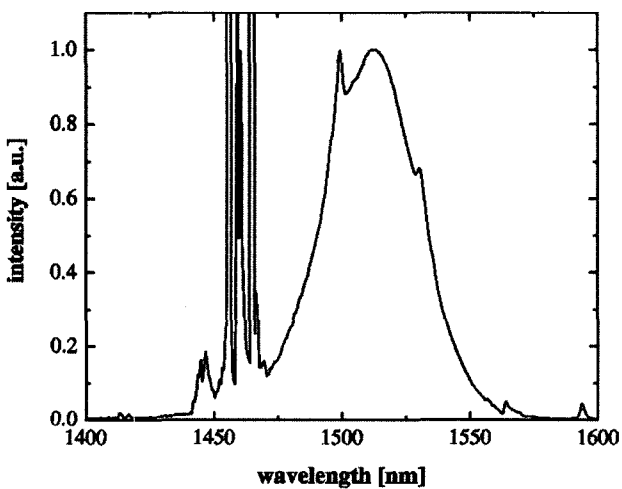


그림 9. 관 및 질소가스 사용 전 측정된 레이저 펄스의 스펙트럼.

으나 그림 10과 같이 상대적으로 깨끗한 스펙트럼을 얻을 수 있었으며, 스펙트럼 상에서의 요동도 거의 없어져 상당히 안정적으로 작동함을 확인하였다. 제작된 펄스초 Cr:YAG 레이저의 장시간 안정화 여부를 확인하기 위해 하루 이상 레이저를 작동시켜 관측한 결과, 모드 잠금의 꺼짐과 출력의 변화 없이 작동함을 확인하였다.

V. 결 론

본 연구에서는 실온영역에서 꺼짐 없이 안정적으로 작동하는 커 렌즈 모드 잠금된 펄스초 Cr:YAG 레이저 공진기를 제작하고 그 특성을 분석하였다. 펄스초 펄스 방출에 앞서 비대칭 연속 발진 공진기를 제작하여 레이저 발진 문턱값과 두 안정 영역을 측정하였다. 연속 발진의 경우, 810 mW 이상의 레이저 출력을 측정하였으며, 복굴절 필터의 투입 없이 단순히 공진기 내부의 프리즘 쌍의 조절로 파장영역 1450 nm 전후 110 nm 정도의 파장영역에서 조절이 가능함을 확인하였다. 특히 Cr:YAG 이득매질의 발진 스펙트럼이 물 흡수 파장영역과 겹쳐 있어서 모드 잠금이 될 때 상당히 불안정 하였으나, 공진기 내부의 빔 진행 경로를 따라 관을 설치하고 질소가스로 씻어줌으로서 이 문제점을 해결하고, 상온영역에서 장시간 동안 모드 잠금의 꺼짐 없이 작동하는 근적외선 펄스초 레이저를 제작하였다. 수동 모드 잠금 시, 펄스폭은 64 fs, 중심파장 1510 nm이며 발진 스펙트럼 폭 44 nm를 갖는 펄스초 펄스 방출이 가능하였으며, 100 MHz의 반복률로 작동하도록 공진기 길이를 조절해 최적화 하였으며, 공진기에서 방출된 평균출력은 250 mW였다. 제작된 레이저는 하루 이상 모드 잠금의 풀림 없는 작동이 가능하였다. Cr:YAG 레이저 시스템의 파장영역이 가지는 다양한 장점을 이용하여 차후 광통신 및 주파수 표준 등 다양한 분야에 응용 될 것을 기대하며, 또한 공진기 규모의 소형화를 위한 방안으로 프리즘 쌍 대신 처프 거울로 대체한 공진기 구성과 그에 따른 특

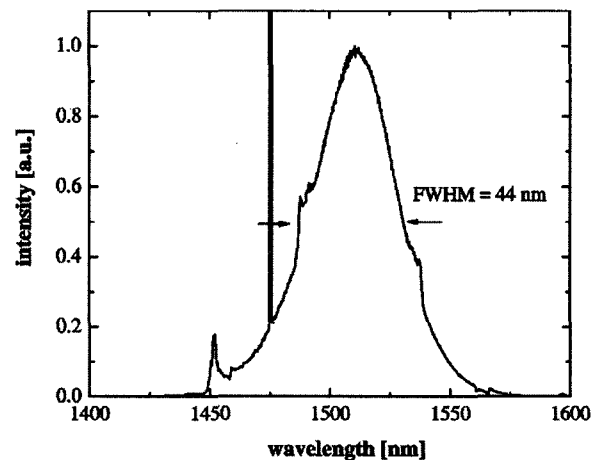


그림 10. 관 및 질소가스 사용 후 측정된 레이저 펄스의 스펙트럼.

성연구도 활성화 되리라 여겨진다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 광부품 시험 인증을 위한 소급체계 구축 사업비의 지원으로 표준과학연구원에서 수행되었습니다. 또한 자문을 해주신 충남대학교의 이봉연 박사, 공주대학교의 이치원 교수께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] L. E. Hargrove, R. L. Fork, and M. A. Pollack, "Locking of He-Ne laser modes induced by synchronous intracavity modulation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 5, no. 1, pp. 4-5, 1964.
- [2] T. Deutsch, "Mode-locking effects in an internally modulated ruby laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 7, no. 4, pp. 80-82, 1965.
- [3] U. Morgner, F. X. Kartner, S. H. Cho, Y. Chen, H. A. Haus, J. G. Fugimoto, E. P. Ippen, V. Scheuer, G. Angelow, and T. Tschudi, "Sub-two-cycle pulses from a Kerr-lens mode-locked," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 6, pp. 411-413, 1999.
- [4] D. E. Spance, P. N. Kean, and W. Sibbett, "60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser," *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 1, pp. 42-44, 1991.
- [5] A. Hariharan, M. E. Fermann, M. L. Stock, D. J. Harter, and Jeff Squier, "Alexandrite-pumped alexandrite regenerative amplifier for femtosecond pulse amplification," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 2, pp. 128-130, 1996.
- [6] A. Miller, P. LiKamWa, B. H. T. Chai, and E. W. Van Stryland, "Generation of 150-fs tunable pulses in Cr:LiSrAlF₆," *Opt. Lett.*, vol. 17, no. 3, pp. 195-197, 1992.
- [7] Y. Pang, V. Yanovsky, F. Wise, and B. I. Minkov, "Self-mode-locked Cr:forsterite laser," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 14, pp. 1168-1170, 1993.
- [8] P. J. Conlon, Y. P. Tong, P. M. W. French, J. R. Taylor, and A. V. Shestakov, "Passive mode locking and dispersion measurement of a sub-100-fs Cr⁴⁺:YAG laser," *Opt. Lett.*, vol. 19, no. 18, pp. 1468-1470, 1994.
- [9] J. V. Rudd, G. Korn, S. Kane, Jeff Squier, Gerard A. Mourou, and Philippe Bado, "Chirped-pulse amplification of 55-fs pulses at a 1-kHz repetition rate in a Ti:Al₂O₃ regenerative amplifier," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 23, pp. 2044-2046, 1993.
- [10] S. Backus, J. Peatross, C. P. Huang, M. M. Murnane, and H. C. Kapteyn, "Ti:sapphire amplifier producing millijoule-level, 21-fs pulses at 1 kHz," *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 19, pp. 2000-2002, 1995.
- [11] Y. J. Chai, C. G. Leburn, A. A. Lagatsky, C. T. A. Brown, R. V. Penty, I. H. White, and W. Sibbett, "1.36-Tb/s spectral slicing source based on a Cr⁴⁺:YAG femtosecond laser," *J. Lightwave Technol.*, vol. 23, no. 3, pp. 1319-1324, 2005.
- [12] J. L. Hall, Jun Ye, S. A. Diddams, Long-Sheng Ma, S. T. Cundiff, and D. J. Jones, "Ultrasensitive spectroscopy, the ultrastable lasers, the ultrafast lasers, and the seriously nonlinear fiber: a new alliance for physics and metrology," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 37, no. 12, pp. 1482-1492, 2001.
- [13] N. B. Angert, N. I. Borodin, V. M. Garmash, V. A. Zhitnyuk, A. G. Okhrimchuk, O. G. Siyuchenko, and A. V. Shestakov, "Lasing due to impurity color centers in yttrium aluminum garnet crystals at wavelengths in the range 1.35-1.45 μm," *Sov. J. Quantum Electron.*, vol. 18, pp. 73-74, 1988.
- [14] Y. P. Tong, P. M. W. French, J. R. Taylor, and J. G. Fugimoto, "All-solid-state femtosecond sources in the near infrared," *Opt. Commun.*, vol. 136, pp. 235-238, 1997.
- [15] D. J. Ripijn, C. Chudoba, J. T. Gopinath, J. G. Fugimoto, E. P. Ippen, U. Morgner, F. X. Kartner, V. Scheuer, G. Angelow, and T. Tschudi, "Generation of 20-fs pulses by a prismless Cr⁴⁺:YAG laser," *Opt. Lett.*, vol. 27, no. 1, pp. 61-63, 2002.
- [16] H. R. Telle, G. Steinmeyer, A. E. Dunlop, J. Stenger, D. H. Sutter, and U. Keller, "Carrier-envelope offset phase control: A novel concept for absolute optical frequency measurement and ultrashort pulse generation," *Appl. Phys. B*, vol. 69, pp. 327-332, 1999.
- [17] L. Hollberg, C. W. Oates, G. Wilpers, C. W. Hoyt, Z. W. Barber, S. A. Diddams, W. H. Oskay, and J. C. Bergquist, "Optical frequency/wavelength references," *J. Phys. B*, vol. 38, pp. S469-S495, 2005.
- [18] 이봉연, "적외선에서 광대역으로 파장 가변되는 연속 발진 및 극초단 펄스 Cr⁴⁺:YAG 레이저의 개발," 박사학위논문, 충남대학교, 1999.
- [19] S. Naumov, E. Sorokin, V. L. Kalashnikov, G. Tempea, and I. T. Sorokina, "Self-starting five optical cycle pulse generation in Cr⁴⁺:YAG laser," *Appl. Phys. B*, vol. 76, pp. 1-11, 2003.
- [20] V. L. Kalashnikov, E. Sorokin, E. Wintner, A. Cassanho, H. P. Jenssen, and R. Szipocs, "Mechanisms of spectral shift in ultrashort-pulse laser oscillators," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 18, no. 11, pp. 1732-1741, 2001.

Generation of Femtosecond Pulses in a Passively Mode-Locked 100 MHz Cr⁴⁺:YAG Laser

Won-bae Cho and Fabian Rotermund[†]

*Department of Molecular Science & Technology
Ajou University, Suwon 443-749, KOREA*

Jong-Doo Kim and Min-Yong Jeon

*Department of Physics
Chungnam National University, Daejeon 305-764, KOREA*

Ho-Suhng Suh

*Length group, Division of Optical Metrology
Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340, KOREA*

[†]*E-mail: rotermun@ajou.ac.kr*

(Received August 19, 2005, Revised manuscript November 4, 2005)

We report on the development of a passively mode-locked near-infrared femtosecond laser with Cr:YAG crystal that operates near room temperature. The laser wavelength could easily be tuned by using only the internal prism pair over 110 nm from 1400 nm to 1510 nm in cw and over about 30 nm in mode-locked operation, respectively. Maximum cw output powers of 810 mW were obtained with 1.5 % output coupler for absorbed pump powers of 7.6 W. For compensation of the internal group velocity dispersion, an IR graded prism pair was used. The Cr:YAG laser delivered nearly Fourier-transform limited pulses with a pulse duration as short as 64 fs at 100 MHz repetition rate. In the mode-locked regime, the laser was operating at 1510 nm with a spectral bandwidth of 44 nm. In order to avoid unstable mode-locking and power instabilities, self-built tubes were inserted into the beam path in the resonator and purged with N₂ gas. Finally, output powers of the Cr:YAG laser were optimized to 250 mW for long time stable mode-locked operation.

OCIS Codes : 140.3580, 160 3380, 320.2250, 320.7090.