

극초단 펄스 Cr⁴⁺:YAG 레이저의 제작 및 동작 특성

이봉연

충남대학교 기초과학연구소
Ⓣ 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220

이동한

충남대학교 물리학과
Ⓣ 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220

이치원[†] · 윤석범

공주대학교 광응용과학과
Ⓣ 314-712 충남 공주시 옥룡동 326

추한태

금오공과대학교 자연과학부
Ⓣ 730-701 경북 구미시 신평동 188

(2004년 7월 22일 받음, 2004년 9월 17일 수정본 받음)

1.064 μm 파장의 연속발진 Nd:YAG 레이저를 펄핑 광원으로 하여 적외선 영역에서 광대역으로 파장 가변되는 연속발진 및 극초단 펄스 Cr⁴⁺:YAG 레이저를 자체 제작하였다. Cr⁴⁺:YAG 레이저의 연속발진 및 펄스의 출력특성과 파장 가변 영역은 다음과 같다. 연속 발진일 경우 1.436 μm 에서 600 mW의 평균출력을 보였으나, 복굴절 필터를 삽입했을 경우는 1.492 μm 근처에서 400 mW의 평균출력을 보였다. 펄스발진일 경우 1.436 μm 에서 최초로 평균출력 320 mW의 모드록킹된 펄스가 발생하였지만 물 흡수대의 영향으로 불안정함을 피할 수 없었다. 따라서, 복굴절 필터를 사용하여 중심파장을 1.492 μm 로 이동시켰으며 이 영역에서 안정한 상태의 모드록킹된 43 fs의 극초단 펄스를 생성하였다. 이 때의 평균출력은 280 mW이고, 반치폭(FWHM)은 45 nm이었다.

주제어 : Cr⁴⁺:YAG laser, Kerr lens mode locking, ultra-short pulse.

I. 서 론

1960년 루비(Ruby) 레이저가 발명된 이래 기체, 액체, 고체, 반도체 등 다양한 종류의 매질을 이용한 레이저가 개발되어 정보통신, 의료, 물질공정, 연구개발, 계측, 국방 등 매우 광범위한 분야에서 사용되어지고 있고 그 사용 영역이 날로 확대되어 가는 추세이다. 그러나 레이저의 특성중 하나인 단색성과 좁은 파장변조 영역으로 인해 기존의 레이저가 제공할 수 없는 파장영역의 필요성이 날로 증대되고 있다. 최근 관심이 집중되고 있는 저 손실 광섬유 전송분야 및 광섬유 결합시스템 등에는 사람의 눈에 안전하고 공기 중에서 멀리 전파될 수 있는 1.5 μm 이상의 적외선 파장이 필수적으로 요구된다. 따라서 최근 몇 년 전까지만 해도 1.5 μm 영역의 파장을 갖는 레이저를 얻기 위해선 액체 질소에 의해 냉각되는 알칼리 할라이드계의 결정을 이용하는 색중심(color center) 레이저^[1,2]를 개발하여 사용하였다. 그러나 색중심 레이저는 값이 매우 비싸고 결정을 저온으로 냉각(약 -40℃)해야 할

뿐만 아니라, 결정 주위를 진공으로 유지시켜야 하며, 레이저 발진을 위한 광학소자 정렬 등에 많은 어려움이 있는 단점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 1.5 μm 정도의 파장을 요구하는 실험에는 기존의 색중심 레이저를 대신하여 실온에서 동작하는 파장가변 Cr⁴⁺:YAG(The Chromium-doped Yttrium Aluminum Garnet, Y₃Al₅O₁₂) 레이저가 많이 이용되고 있다. Cr⁴⁺:YAG 레이저는 1988년 Angert^[3] 등에 의해 최초로 보고된 이후 최근에는 분산을 보상하기 위하여 용융 석영 프리즘을^[4] 이용하여 Kerr-lens 모드록킹 방법으로 1.34 μm ~ 1.58 μm 의 파장가변 영역에서 43 fs의 극초단 펄스를 얻었으며, 2002년에는 double-chirped mirrors(DCMs)^[5]를 사용하여 Kerr-lens 모드록킹 방법으로 1.31 μm ~ 1.50 μm 의 파장가변 영역에서 20 fs의 극초단 펄스를 발생시켰으나, 아직 국내에서는 본 실험실에서만 연속발진 Cr⁴⁺:YAG 레이저 개발^[6]만이 이루어진 상태이므로 학문적 차원에서 뿐만 아니라 경제적 및 기반 기술 확보측면에서도 기술개발이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 1.064 μm 파장의 연속발진 Nd:YAG 레이저를 펄핑 광원으로 하여 적외선 영역에서 광대역으로 파장 가

[†]E-mail: cweon@kongju.ac.kr

변되는 연속발진 및 극초단 펄스 Cr⁴⁺:YAG 레이저를 개발하여 출력특성 및 파장가변 영역을 조사하였다. 레이저 매질인 Cr⁴⁺:YAG 결정은 부루스터(Brewster)각으로 가공된 직경 5 mm, 길이 20 mm 그리고 Cr 이온 도핑 농도가 0.15 wt.%인 것을 사용하였으며, Z-형태의 접합 거울 공진기를 구성하였다. 또한 공진기의 구조 및 정렬을 최적화하기 위하여 광축 정렬 장치를 제작하여 Cr⁴⁺:YAG 결정의 형광특성과 연속발진 및 극초단 펄스 Cr⁴⁺:YAG 레이저의 출력특성을 조사하였으며, Cr⁴⁺:YAG 레이저의 파장 가변 영역은 공진기 내에 복굴절 필터(Birefringent filter)를 삽입하여 측정하였다.

II. 실험

Cr⁴⁺:YAG 결정의 형광특성과 연속발진 및 극초단 펄스 Cr⁴⁺:YAG 레이저의 출력특성과 공진기 내에 복굴절 필터를 삽입하여 파장 가변 영역을 조사하기 위한 실험 장치를 그림 1에 나타냈다.

그림 1에서와 같이 레이저 공진기는 두 장의 오목거울 M₁과 M₂와 두 장의 평면거울 M₃과 M₄로 구성되어 강한 집속 모드를 레이저 매질 내에 형성시키도록 되어있다. 강한 집속 모드는 두 장의 오목 거울 사이에서 형성되므로 Cr⁴⁺:YAG 결정을 두 오목거울 사이에 놓게 된다. 오목거울의 곡률반경은 모두 100 mm이며, 1.380 μm ~ 1.650 μm에서 99.9% 이상 반사율을 가지도록 코팅된 이색 거울(dichromatic mirror)을 사용하였다. 두 장의 평면거울은 1.380 μm ~ 1.650 μm에서 2.0% 투과가 되는 출력거울(output coupler)과 고반사 거울(high reflector, R>99.9%)를 각각 사용하였다. 오목거울과 평면거울은 모두 반지름이 1.27 cm 이고, 1.3 μm ~ 1.6 μm의 파장 영역에 적합하도록 광대역에 걸쳐 코팅되었다. 이러한 광학소자들은 독일의 LAYERTEC GmbH에서 구입하였으며, 이렇게 배열된 Cr⁴⁺:YAG 레이저 장치는 1.064 μm에서 동작되는 연속발진 Nd:YAG 레이저[(주)금광, HSR1500]에 의해 중축

의 끝에서 펌핑하였다. Nd:YAG 펌프광은 선형편광판을 통해 편광이 조정된 후 1.064 μm에서 99%의 투과율을 갖는 M₁을 통해 Cr⁴⁺:YAG 결정으로 보내진다. 레이저 이득 매질은 양쪽 단면을 부루스터 각으로 가공된 직경 5 mm, 길이 20 mm의 Cr⁴⁺:YAG 결정이며, Cr⁴⁺의 첨가농도는 0.15wt.%인 Lithuania의 EKSMAs사의 제품을 구입하여 사용하였다. 또한 파장 가변성과 모드록킹시 물 흡수대의 영향을 피하기 위해 복굴절 필터 BF를 설치하였다. 레이저 발진시 펌프 빔이 렌즈를 통하여 Cr⁴⁺:YAG 결정에 집속되므로 결정의 온도가 급속히 상승하게 되며, 이로 인해 출력이 저하되고 Cr⁴⁺:YAG 결정에 치명적인 손상을 입히게 된다. 따라서 이를 극복하기 위해서 알루미늄으로 가공한 지지대에 결정을 고정시키고 되먹임 조절루프(feedback control loop)를 이용한 온도 조절 장치에 의해 구동되는 열전 냉각기(thermoelectric cooler)위에 장착하여 결정의 온도를 일정하게 유지시켜 출력을 안정화시켰다. 출력거울을 외부에 감쇄기(attenuator)를 설치하고, 슬라이드 유리를 출력 빔의 진행방향에 대하여 45° 회전시켜 설치하였다. 슬라이드 유리를 투과한 빔에 대하여 광 검출기(Epitaxx, ETX75FJSLR, risetime 15ps)와 연결된 오실로스코프(Tektronix 7104)로 KLM(Kerr-lens mode-locking)된 파형을 확인하였다. 슬라이드 유리에서 반사된 빔은 게르마늄 검출기(LN₂ cooled Ge detector, North Coast)와 분해능이 0.08 nm인 광 스펙트럼 분석기(Optical Spectrum Analyzer, : U.S.A Hewlett Packard, 70951B)를 이용하여 모드록킹된 빔의 선폭을 측정하였다.

공진기 내로 입사되는 펌프 에너지는 6 W로 일정하게 하였으며, 모드록킹이 동작이 일어나도록 M₃, M₄를 미세조정하고 L₁, L₂를 같은 길이로 움직여 공진기의 길이를 변화시켰다. 또한 고반사 거울 앞에 슬릿을 설치하여 강한 빔만 공진하도록 하였다. 모드록킹 동작이 일어났을 때의 L₃, L₄의 길이는 각각 640 mm와 675 mm이었으며, L₁, L₂ 사이의 거리는 120 mm로 공진기의 총 길이는 1435 mm이었다. 이때의 공진 빔의 반복률은 104.5 Mhz이었다.

III. 실험 결과 및 토의

Cr⁴⁺:YAG 레이저를 발진하기 위해선 광축정렬을 한 후 Cr⁴⁺:YAG 결정의 형광 세기가 출력거울 쪽으로 가장 강하게 나오도록 렌즈 L를 비롯한 공진기 거울 M₁, M₂, M₃, M₄ 및 결정의 위치, 경사도, 회전각 등을 미세 조정하여야 한다.

그림 2에 레이저가 발진되기 직전의 형광세기를 1.1 μm ~ 1.8 μm까지 영역에 걸쳐 실온(19°C)에서 측정하여 나타냈다. 형광의 파장영역은 1.2 μm ~ 1.7 μm까지이고 중심파장은 1.37 μm이었으며, 레이저의 발진 영역인 1.39 μm ~ 1.55 μm를 모두 포함하고 있음을 알 수 있다.

그림 3에는 출력거울 M₁의 투과율이 1.436 μm에서 2%일 때 Nd:YAG 레이저의 펌핑 출력에 대한 연속발진 Cr⁴⁺:YAG 레이저의 평균 출력을 나타냈다. 이때 결정의 온도는 19°C로 유지시켰고, 발진 레이저의 출력은 공진기 안정 영역 내에서

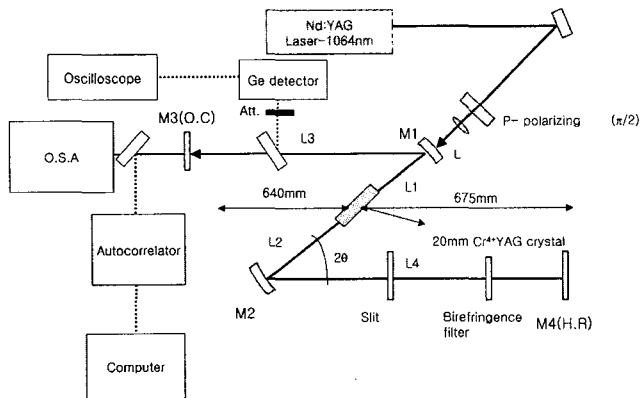


그림 1. Cr⁴⁺:YAG 레이저의 실험 장치도
O.S.A is an optical spectrum analyzer(U.S.A HEWLETT PACKARD, 70951B), O.C is an output coupler, H.R is a high reflector.

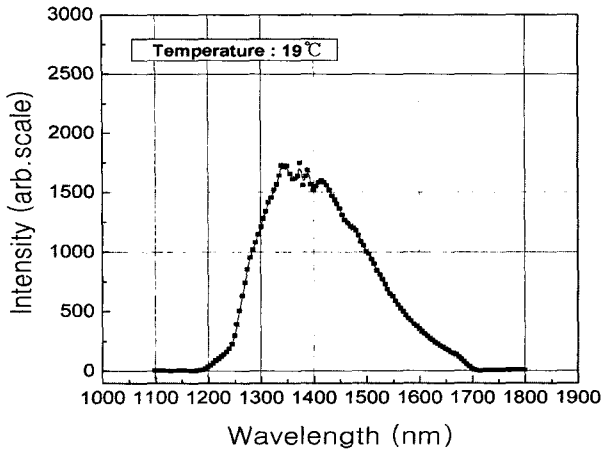


그림 2. 실온(19°C)에서 Nd:YAG 레이저로 여기한 Cr⁴⁺:YAG 결정의 방출 스펙트럼.

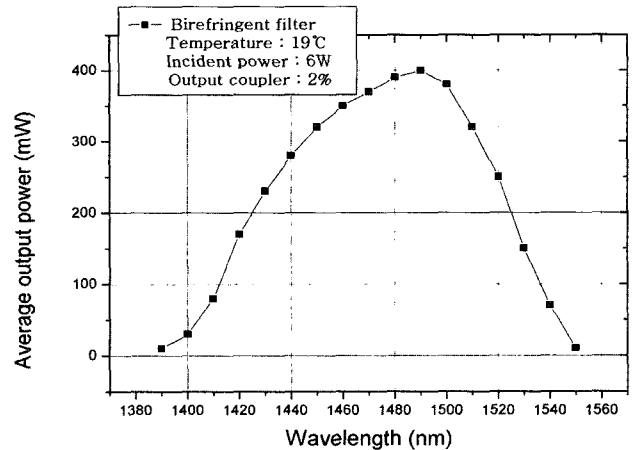


그림 4. 복굴절 필터(BF)를 이용한 Cr⁴⁺:YAG 레이저의 파장에 따른 출력 특성

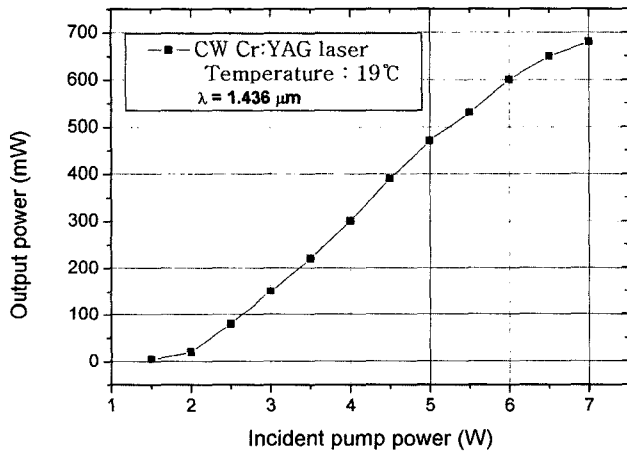


그림 3. 연속발진 Cr⁴⁺:YAG 레이저의 평균출력.

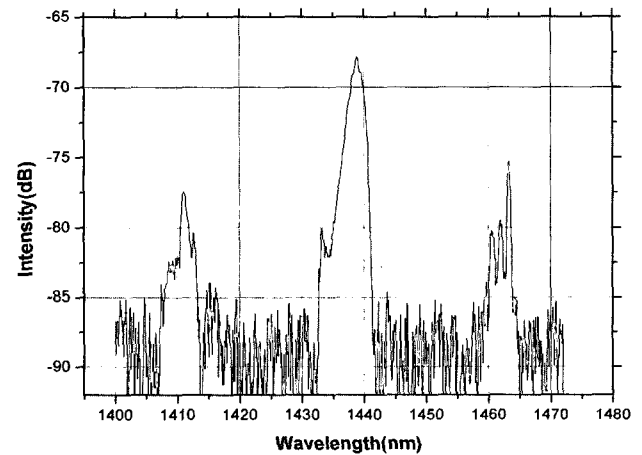


그림 5. 파장 1.436 μm에서 Cr⁴⁺:YAG 레이저의 불안정한 방출 파형 분포 모습.

각각의 공진기 거울 및 결정의 위치 등을 미세 조정하여 최적의 레이저 발진 상태로 유지시킨 후에 측정하였다.

그림 3에서와 같이 출력거울의 투과율이 2%일때의 문턱 펌프 출력은 1.5 W이고, 이때의 출력기울기 효율은 10%로서, 6 W 펌핑에 대하여 600 mW의 평균출력을 얻을 수 있었다. 또한 펌핑 출력이 6 W 정도까지는 Cr⁴⁺:YAG 레이저의 평균출력이 거의 선형적으로 증가하지만 그 이상에서는 레이저 매질의 강한 열 효과로 인해 출력 변동률의 폭이 증가하고 출력의 포화현상이 나타난다. 따라서 더 높은 출력을 얻기 위해서는 주위환경 및 결정의 고른 냉각에 세심한 주의가 필요함을 알 수 있다.

그림 4에는 펌핑 출력을 6 W로 고정하고 투과율이 2%인 출력거울을 사용했을 때 공진기내에 복굴절 필터를 삽입하여 측정한 연속발진 Cr⁴⁺:YAG 레이저의 파장가변 영역을 나타냈다. 그림 4에서와 같이 복굴절 필터를 삽입하지 않은 빈 공진기인 경우의 Cr⁴⁺:YAG 레이저의 중심파장은 1.436 μm에

서 최대 600 mW의 평균출력을 나타냈지만, 복굴절 필터를 삽입했을 경우 파장가변 영역은 1.390 μm~1.550 μm이며 1.492 μm에서 최대 400 mW의 평균 출력을 나타냈다.

그림 5는 중심파장이 1.436 μm일때 물 흡수대의 영향을 받아 불안정한 모드록킹이 일어났을 때의 모습을 게르마늄 검출기와 분해능이 0.08 nm인 광 스펙트럼 분석기를 사용하여 측정한 결과이며, 그림 6은 이 때의 실험실 내부의 대기상태를 백색광을 사용하여 분광기로 측정한 결과이다. 그림 6에서와 같이 1.350 μm과 1.500 μm 사이의 파장대역에서 그래프가 매우 심하게 요동하고 있음을 볼 수 있는데 이는 이 파장대역이 물 흡수가 나타나는 영역임을 알 수 있다.

이는 본 연구에서 제작된 모드록킹된 Cr⁴⁺:YAG 레이저의 발진파장 대역을 포함하고 있다. 따라서 본 연구에서는 복굴절 필터를 사용해서 중심파장을 물 흡수의 영향이 적은 1.500 μm대로 이동 시켰으며, 이때 안정된 모드록킹 펄스를 얻을 수 있었다.

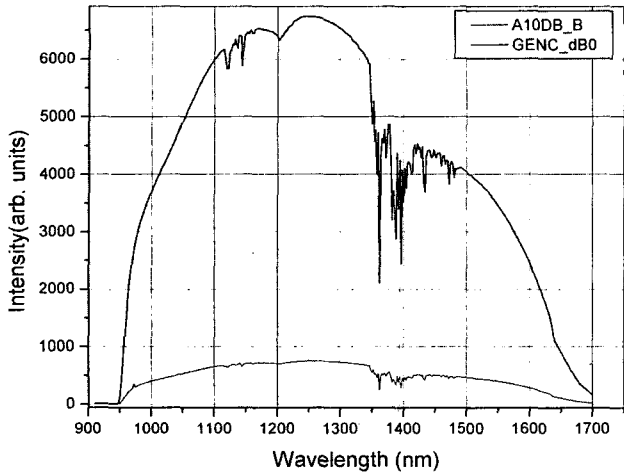


그림 6. 실험실 내부 대기상태에 대한 물흡수대 영역을 보여주는 파형분포

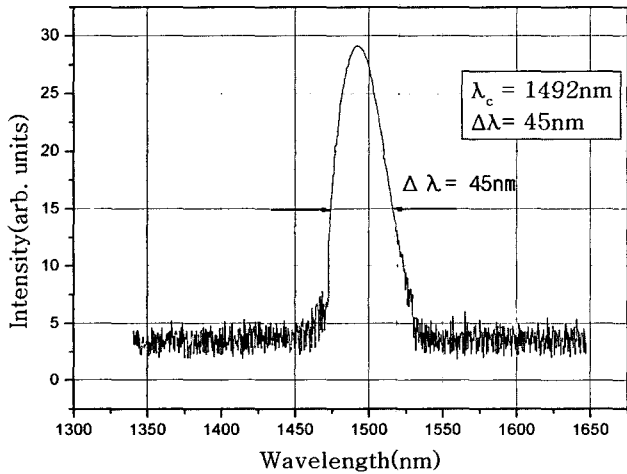


그림 7. 레이저 공진기내에 BF를 삽입하였을 경우 Cr⁴⁺:YAG 레이저 안정된 발진 파형.

그림 7은 복굴절 필터를 사용하여 중심파장을 1.492 μm대로 이동시킨 뒤 측정된 모드록킹 펄스의 파장 스펙트럼 결과이며, 그림 8의 (a)와 (b)는 빠른 광 검출기(Epitaxx, ETX75FJSLR, risetime:15ps)를 이용하여 오실로스코프상에 나타난 자체 모드록킹된 Cr⁴⁺:YAG 레이저의 펄스 열(pulse train)을 시간 축을 달리하여 나타냈다. 그림 7에서와 같이 스펙트럼 반치폭(FWHM)은 45 nm로 측정되었으며, 펄스 반복률이 104.5 MHz인 안정된 모드록킹된 펄스를 얻을 수 있었다.

그림 9에는 6 W로 펌핑될 때 모드록킹된 펄스를 강도형 자체상관계(Autocorrelator, FEMTOCHROME RESEARCH, INC, model: PR-103XL range≤5 fs)를 이용하여 측정된 펄스 모습이며 펄스의 반치폭은 43fs로 측정되었으며, 이때의 펄스 평균 출력은 280 mW로 측정되었다.

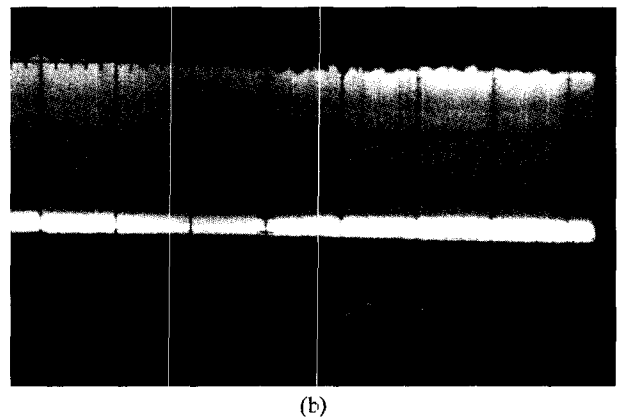
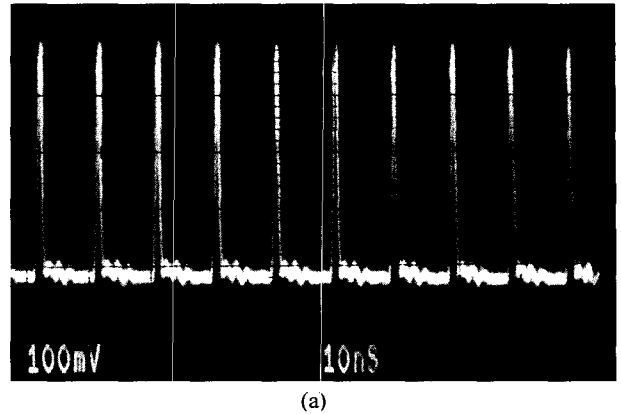


그림 8. 모드록킹 상태에서의 펄스열 분포모습.

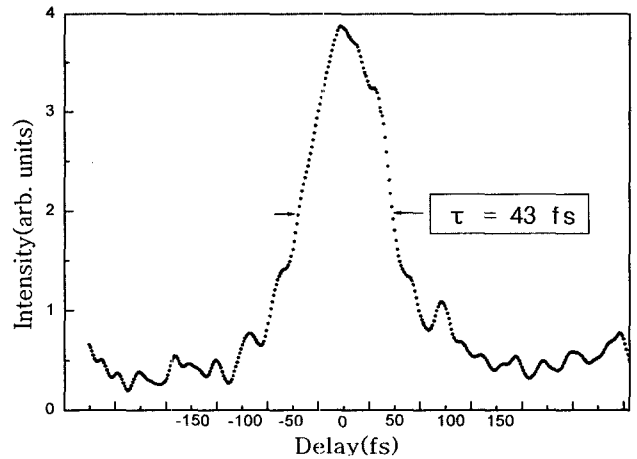


그림 9. 모드록킹상태에 대한 Cr⁴⁺:YAG 레이저의 펄스 파형.

IV. 결 론

본 연구에서는 1.064 μm 파장의 연속발진 Nd:YAG 레이저를 펌핑 광원으로 하여 적외선 영역에서 광대역으로 파장 가변되는 연속발진 및 극초단 펄스 Cr⁴⁺:YAG 레이저를 자체 제작하였다.

본 연구에서 살펴본 Cr⁴⁺:YAG 레이저의 연속발전 및 펄스의 출력특성과 파장가변 영역은 다음과 같다.

연속발전일 경우 1.436 μm에서 600 mW의 평균 출력을 보였으나, 복굴절 필터를 삽입했을 경우는 1.492 μm 근처에서 400 mW의 평균 출력을 보였으며 이때의 파장 가변 영역은 1.39 μm~1.55 μm이었다.

펄스 발전일 경우 1.436 μm에서 최초로 평균출력 320 mW의 모드록킹된 펄스가 발생하였지만 물 흡수대의 영향으로 불안정함을 피할 수 없었다. 따라서, 복굴절 필터를 사용하여 중심파장을 1.492 μm대로 이동시켰으며, 이 영역에서 안정한 상태의 모드록킹된 43 fs의 극초단 펄스를 생성하였다. 이때의 평균출력은 280 mW이고, 반치폭(FWHM)은 45 nm이었다.

향후 보다 안정화되고, 짧은 극초단 펄스 레이저의 제작을 위해서는 공진기를 밀폐한 후 공진기의 내부에 질소가스를 주입하여 공진기 내의 습도가 매우 낮게 유지시키고, 보다 세밀한 공진기의 구성과 질 좋은 광학소자를 선택하여 사용해야 할 것이며, 이에 대한 연구 실험도 계속할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 산학협동재단 학술연구과제 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] C. P. Yakymyshyn, J. F. Pinto and Clifford R. Pollock, "Additive-pulse mode-locked NaCl: OH⁻ laser," *Opt. Lett.* 14, pp. 621-623, 1989.
- [2] G. T. Kennedy, R. S. Grant and W. Sibbett, "Self-mode-locked NaCl:OH⁻ color-center laser," *Opt. Lett.* 18, pp. 1736-1738, 1993.
- [3] 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 center in yttrium aluminum garnet crystals at wavelengths in the range 1.35-1.45 μm," *Sov. J. Quantum Electron.* 18, pp. 73-74, 1998.
- [4] Y. P. Tong, P. M. W. French, J. R. Taylor, and J. G. Fujimoto, "All-solid-state femtosecond sources in the near infrared," *Opt. Commun.* 136, pp. 235-238, 1997.
- [5] D. J. Ripin, C. Chudoba, J. T. Gopinath, J. G. Fujimoto, and E. P. Ippen, etc. "Generation of 20-fs pulses by a prismless Cr⁴⁺:YAG laser," *Jan. Opt. Lett.* vol. 27, no. 1, pp. 61-63, 2002.
- [6] H. T. Choo, B. Y. Lee, etc. "적외선 영역에서 광대역폭으로 파장가변되는 연속발전 Cr⁴⁺:YAG 레이저 개발," *Hankook Kwanghak Hoeji*, vol. 10, no. 3, June, pp. 226-232, 1999.

Construction and operational characteristics of a Ultra-Short pulse Cr⁴⁺:YAG laser

Bong Yeon Lee

Research Institute of Basic Sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

Dong Han Lee

Dept. of Physics, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

Chi Weon Lee[†] and Seok Beom Yoon

Dept. of Optical Applied Science, Kongju National University, Kongju 314-712, Korea

[†]*E-mail: cweon@kongju.ac.kr*

Han Tae Choo

School of Natural Science, Kumoh National Institute of Technology, Kumi 730-701, Korea

(Received July 22, 2004, Revised manuscript September 17, 2004)

We have developed a mode-locked ultra-short pulse Cr⁴⁺:YAG laser, as well as a continuous wave Cr⁴⁺:YAG laser. The laser was pumped by a Nd:YAG laser and its characteristics were investigated. In continuous wave mode, we obtained as much as 600 mW at 1.436 μm with pumping power of 6 W, by using an output coupler with a reflectivity of 98%. The power slope efficiency was 10%, when the gain medium was cooled to 19°C. The tuning range was varied from 1.39 μm to 1.55 μm and the maximum power was 400 mW at 1.492 μm with a 3-plate birefringent filter. The Cr⁴⁺:YAG laser was mode-locked by a Kerr lens mode locking method. Mode locking at 1.436 μm was initiated by slightly rocking a mirror mount. But the pulses were very unstable because of the strong water absorption at this region. So we shifted the lasing wavelength to 1.492 μm by using a 3-plate birefringent filter. Then we obtained stable state mode-locking with the maximum average power of 280 mW for a pumping power of 6 W. The pulse width of 43 fs was measured using an autocorrelator and the repetition rate was 104.5 MHz.

OCIS Codes : 140.0140. 140.3580. 140.3600. 140.4050. 140.7090.