

인젝션 록킹 방법에 의한 펄스 색소레이저의 단일 종모우드 발진*

김재완 · 공홍진

한국과학기술원, 물리학과

한재원 · 박승남

한국표준과학연구원, 양자연구부

(1993년 12월 6일 받음)

연속발진 색소레이저를 시드레이저로 하고, Nd:YAG 레이저로 펌핑하는 인젝션 록킹된 단일 모우드 펄스 색소레이저를 제작하였다. 위상민감 검출법으로 얻은 오차신호로 시드빔과 공진 상태를 유지하도록 공진기 길이를 조절하였을 때 99% 이상의 펄스가 시드레이저의 주파수에 록킹 되었다. 이때 레이저 출력빔의 중심 주파수 요동이 10 MHz 이내로 안정되었다. 펄스폭(FWHM)은 6 ns이고 선폭은 130 MHz이었다. 50 mJ로 펌핑하였을 때 2 mJ의 출력을 얻었으며 이때의 첨두출력은 0.33 MW이다.

I. 서 론

파장 가변 색소레이저를 고분해능 비선형 분광학에 사용하기 위해 넓은 파장 영역에서 선폭이 좁고 출력이 높은 펄스레이저를 개발하려는 노력이 계속되어 왔다. 펄스 색소레이저의 발진 선폭을 줄이기 위하여 공진기 형태에 관한 연구가 주로 진행되어 왔는데, 1972년 Hänsch^[1]가 공진기 내부에 에탈론(etalon)을 넣지 않고 빔확대기(telescope)로 회절격자(grating)의 분해능을 높여 펄스형 색소레이저를 선폭이 300 MHz인 단일 종모우드로 발진시켰다. 그후 1978년 Littman^[2]은 빔확대기 대신에 grazing-incidence 방법으로 회절격자의 분해능을 높인 공진기로 선폭이 150 MHz인 레이저 펄스를 얻었다. 그러나 이러한 형태의 공진기를 사용할 경우 레이저를 단일 모우드로 발진시키기 위해서 공진기 안에 분산이 큰 소자(prism, etalon, grating 등)를 넣어야 하므로에너지 손실이 많다. 또한 펌핑 상태에 따라 단일 종모우드 발진이 매우 불안하여 주로 발진 문턱(threshold) 근처에서 레이저를 동작시키며, 파장 변조시 단일 종모우드 발진의 안정도가 떨어지는 단점이 있다.

한편, 인젝션 록킹(injection-locking) 방법으로 단일 종모우드로 발진하는 펄스레이저를 만드는 연구가 진행되었다. U. Ganiel 등은^[3] 펄스레이저에 선폭이 좁은 레이저 빔을 입사시키면 대부분의 출력이 입사빔의 주파수로 발진하게 됨을 이론으로 설명하였다. 이 이론에 의하면 인젝션 록킹이 되면 록킹 된 레이저의 주파수 안정도는 시드레이저(seed/master laser)의 주파수 안정도에 의해서 결정되며, 주파수 변환(tuning)도 시드레이저 주파수를 변화시키면 된다. 보통의 연속발진 레이저의 주파수 요동은 펄스레이저의 요동보다 훨씬 작으므로 연속발진 레이저를 시드레이저로 사용하면 안정된 펄스 출력을 얻을 수 있다. 또한 인젝션 록킹이 된 레이저는 공진기 내부에 파장 선택 소자를 넣지 않아도 되므로 이런 소자에 의한 에너지 손실을 줄일 수 있다. S. Blit 등은^[4] 섬광판으로 펌핑하는 펄스레이저를 단일 모우드 연속발진 색소레이저로 인젝션 록킹하여 선폭이 30 MHz 이하인 단일 종모우드 출력을 얻었다. 인젝션 록킹 방법은 연속발진 색소레이저,^[5] 펄스 색소레이저,^[6,7] Ti:sapphire 레이저,^[8] Nd:YAG 레이저,^[9,10] Excimer 레이저^[11] 등에 광범위하게 적용되어 단일 종모우드 출력을 얻는데 사용되고 있다.

본 논문에서는 Nd:YAG 레이저의 2차 고조파로 펌핑하고 연속발진 고리형 색소레이저를 시드레이저로 사용

* 이 연구는 과기처 첨단요소과제 지원으로 수행된 것임.
저자 중 김재완과 공홍진은 한국원자력 연구소 장기 기초 연구비의 지원을 받았음.

하는 고리형 인젝션 록킹 색소레이저의 광학계와 제어 회로를 설계 제작하고, 선폭, 출력, 주파수 안정도, 주파수 가변성 등의 동작특성을 기술하였다.

II. 실험 장치

1. 인젝션 록킹 레이저의 광학계

인젝션 록킹 레이저는 시드레이저(seed/master laser)로 사용되는 연속발진 레이저, 인젝션 록킹이 되는 펄스레이저(injection-locked pulsed laser/slave laser), 펄스레이저의 펌핑 광원(레이저나 섭광관), 펄스레이저 광이 시드레이저로 진행하는 것을 막기 위한 광단절기(optical isolator), 횡모우드를 일치시키기 위한 모우드 일치 렌즈(mode matching lens), 그리고 펄스레이저 공진기의 종모우드를 시드레이저 주파수와 일치시키기 위한 제어 회로로 이루어진다.

본 연구에서 제작된 인젝션 록킹 레이저의 구조는 그림 1과 같다. 시드레이저는 Ar⁺ 레이저(Coherent Co, Innova 306)로 펌핑하는 연속발진 고리형 색소레이저(Coherent, 899-21)를 사용하였다. Nd:YAG 레이저(Quantel, YG661-10)의 2차 고조파(파장 532 nm)로 종속 레이저를 펌핑하였다. 이 펌프레이저는 인젝션 록킹에 의해서 단일 모우드로 발진하며 펄스폭은 약 8 ns이고 10 Hz로 동작 한다.

펄스레이저 공진기는 8자 고리형으로 하였다. 고리형 공진기는 이득 물질에서의 spatial hole burning이 없어서 큰 출력의 단일 모우드를 얻기가 용이하며 출력경이 레이저 빔의 입사 축에 대해 기울어져 있으므로 출력 경에서 시드레이저 빔이 반사되어 시드레이저 공진기로 되돌아 들어가서 시드레이저의 단일 모우드 발진을 방해하지 않는다. 공진기는 길이가 1 m이며, 반사율 60%인 출력경(M0)과 하나의 평면경(전반사경 M1) 그리고 곡률 반경이 100 mm인 두개의 전반사경(M2, M3)으로 공진기가 형성된다. 두 평면경 사이의 빔허리(bean waist)는 빔반경이 0.02 mm가 되도록 설계하였다.^[12] 이 빔허리에 바늘구멍(pinhole, 직경 0.04 mm)을 넣어 단일 횡모우드(TEM₀₀)로 발진시켰다. 펄스레이저의 색소 셀은 Bethune 셀을 사용하였다. 이 셀은 횡펌핑을 하게 되어 있고 색소는 직경이 2.3 mm인 관을 통과하게 된다. 색소 셀은 출력경 M0과 전반사경 M1 사이에 위치하는 빔허리(secondary beam waist)에 위치하도록 했다. 색소는 Rh6G (1.0×10^{-4} M, 용매; methanol)를 사용하였다. 색소 셀과 출력경 사이에 조리개를 넣어 출력경으로 나오는 ASE(amplified spontaneous emission)를 막도록 하였다.

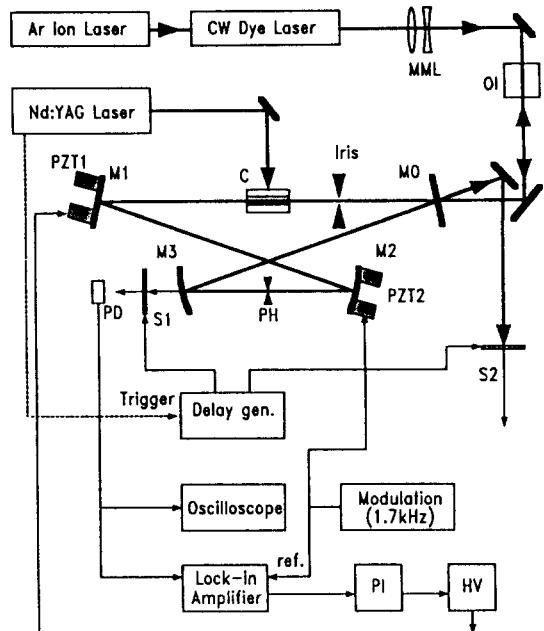


그림 1. 레이저 구성도.

MML; mode matching lenses($f = +10\text{ cm}$ & -5 cm), OI; optical isolator, C; dye cell, M0; output coupler($f = a$), M1; full mirror($f = a$), M2, M3; full mirror($f = 5\text{ cm}$), PD; photodiode, S1, S2; shutter, PI; propotional and integrational curcuits, HV; high voltage driver.

인젝션 록킹이 효과적으로 이루어지기 위해서는 시드레이저의 횡모우드와 펄스레이저 공진기의 횡모우드가 일치되어야 한다. 이를 위해서는 그림 2와 같이, 시드레이저 공진기에서 빔반경(ω_w)이 0.35 mm인 빔이 펄스레이저 공진기에 도착했을 때 횡모우드의 크기와 빔발산각(beam divergence)이 각각 펄스레이저 공진기의 모우드 크기(ω_{pulse} ; 0.75 mm)와 발산각과 같아지도록 렌즈를 설치해야 한다. 렌즈의 위치와 배율은 G.E. Francois 등이^[13] 계산한 방식으로 결정하였다. 펄스레이저에서 발생하는 ASE나 인젝션 록킹이 완전히 이루어지지 않을 때 나오게 되는 레이저 출력이 시드레이저 공진기로 입사되는 것을 막기 위해서 광단절기(optical isolator)를 렌즈와 펄스레이저 출력경 사이에 놓았다.

2. 제어 회로

효율적으로 인젝션 록킹을 이루기 위해서는 시드빔을 펄스레이저 공진기의 종모우드와 일치(longitudinal mode matching)시켜야 한다. 펄스레이저 공진기가 공진

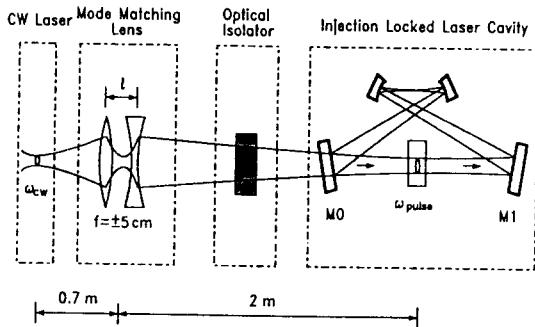


그림 2. 시드레이저 빔이 전파되어 펄스레이저 공진기에 다다랐을 때 모우드 일치 렌즈에 의해 펄스레이저 공진기의 횡모우드와 일치되는 원리.
cw; seed laser beam waist, l; distance between the two mode matching lenses, P: polarizer, FR; Faraday rotator, F; Fresnel rhomb, M0; laser output coupler, M1; full mirror, ω_{pulse} ; injection locked laser beam waist at the dye cell.

상태를 유지하지 못하는 것은 온도 변화나 진동 등과 같은 외부의 잡음 때문이므로 공진기 길이는 능동 제어되어야 한다.

펄스레이저 공진기를 공진 상태로 안정시키기 위해 모듈레이션 록(modulation lock)^[14] 방법을 사용하였다. 그림 3-(a)와 같은 간섭계의 투과한 광량은 고정점(resonance peak)을 중심으로 공진기가 사인파(sine wave)로 변조될 때는 공진기를 투과한 빛의 세기는 변조 주파수의 두 배로 변하게 된다. 그러나 투과 광선의 옆면 중 한 쪽에서 변조가 되면 공진기를 투과한 광량은 변조 주파수로 변하게 되고 각 옆면에서의 위상은 서로 180° 만큼 차이가 난다. 그러므로 투과 신호를 록인 증폭기(lock-in amplifier)로 위상민감 검출을 하면 그림 3-(b)와 같은 출력을 얻는다. 이를 제어회로의 오차신호로 사용하게 되면 투과 광량이 극대가 되도록 공진기를 조절할 수 있다.

그림 1과 같이 총속 레이저 공진기의 거울 M1과 M2에 PZT를 부착하여 M2에 부착된 PZT는 위상민감 검출을 하기 위한 변조용으로 사용하였으며, 다른 하나의 PZT는 공진기 길이를 보정하는데 사용하였다. 주파수 분석기(spectrum analyzer)로 측정한 잡음의 주파수는 약 500 Hz 이내에 분포하였다. 이 잡음을 효과적으로 제거하기 위하여 록인 증폭기의 시정수(time constant)를 1 ms로 하였고 변조 주파수는 1.7 kHz로 하였다. 전반사경 M3의 뒤에서 포토다이오우드로 공진기를 투과한 신호를 검출하였으며, 이 신호는 록인 증폭기에 입력된다. Lock-in

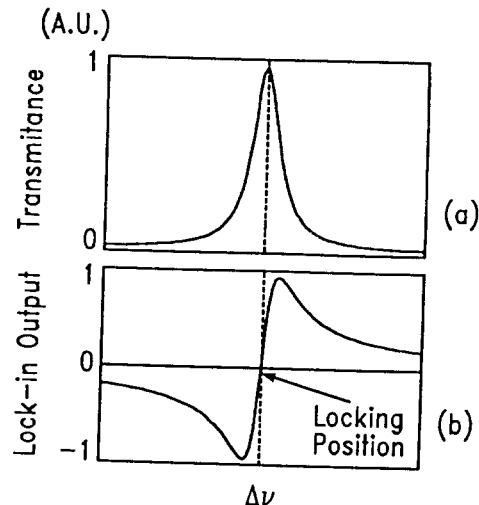


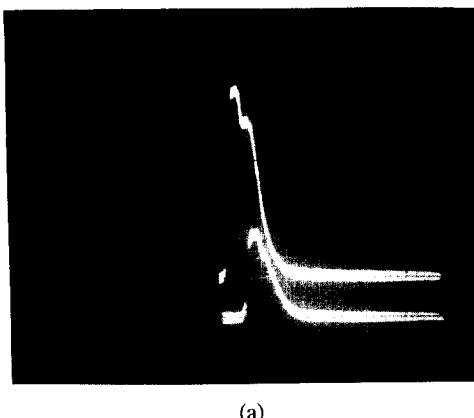
그림 3. (a) 간섭계를 투과한 광량(포토다이오우드의 신호).
(b) 록인 증폭기의 출력.

증폭기의 출력은 비례적분회로(proportional integration 회로, 적분상수: 1 s)를 거쳐 고전압(high voltage: 1000 V, gain 100)으로 증폭하여 M1의 PZT로 되먹임 하였다. M3와 포토다이오우드 사이에 셔터(NM LASER Co., 반응속도: 0.5 ms)를 놓아 펌핑할 때 포토다이오우드(photodiode)가 포화(saturation) 되는 것을 막았다. 펌프레이저의 트리거(trigger) 신호를 시간 지연시켜 셔터가 완전히 닫혔을 때 펌핑이 이루어지도록 셔터의 동작시점을 조절하였다. 출력경 바로 앞에 또 하나의 셔터를 놓아 펄스가 나오는 동안(3 ms)만 열고 다른 때는 닫아서 연속발진 레이저 빔의 대부분을 차단시켰다.

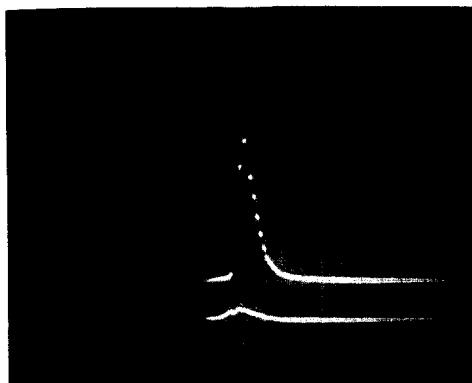
III. 실험 결과

본 레이저가 인젝션 록킹이 되었는지를 확인하기 위해 펄스레이저 공진기에서 나오는 두 방향의 출력을 측정하였다. 고리형 공진기에서 인젝션 록킹이 이루어지면 시드빔과 반대 방향의 출력은 나오지 않게 된다.^[6,16] 펌핑을 50 mJ로 하였을 때, 시드빔을 넣지 않으면 펄스레이저는 두 방향으로 1 mJ씩의 출력이 나오던 것이 시드빔을 넣으면 시드빔과 반대 방향의 출력은 거의 사라지고 시드빔과 같은 방향으로 출력(2 mJ)이 나왔다. 이때의 첨두출력은 330 kW이고 에너지 효율은 4%에 해당한다.

그림 4는 포토다이오우드(반응속도: 0.5 ns)로 각 방



(a)



(b)

그림 4. 포토다이오우드(반응속도; 0.5 ns)로 측정한 레이저 펄스.

(오실로스코프 bandwidth=500 MHz, 가로축: 10 ns/div.) (a) 시드빔과 같은 방향의 출력. 세기가 큰 펄스는 시드빔이 입사되었을 때, 세기가 작은 펄스는 시드빔을 넣지 않았을 때의 출력이다. (b) 시드빔과 반대 방향의 출력. 세기가 작은 펄스는 시드빔을 넣었을 때, 세기가 큰 펄스는 시드빔을 넣지 않았을 때의 출력이다.

향의 출력을 측정한 것이다. (a)는 시드빔과 같은 방향의 출력을 2중 노출에 의해 찍은 것이다. 세기가 큰 펄스(upper trace)는 시드빔을 입사시켰을 때의 출력이고 세기가 작은 펄스는 시드빔을 막은 경우의 출력이다. 그림 (b)는 시드빔과 반대 방향의 출력을 찍은 것이다. 크기가 작은 펄스는 시드빔을 넣었을 때이고 크기가 큰 펄스는 시드빔을 막았을 때의 출력이다. 시드빔을 넣어 주면 시드빔과 반대 방향의 출력은 세기가 1/10 이하로 감소하게 되고(그림 b의 작은 펄스) 시드빔과 같은 방향

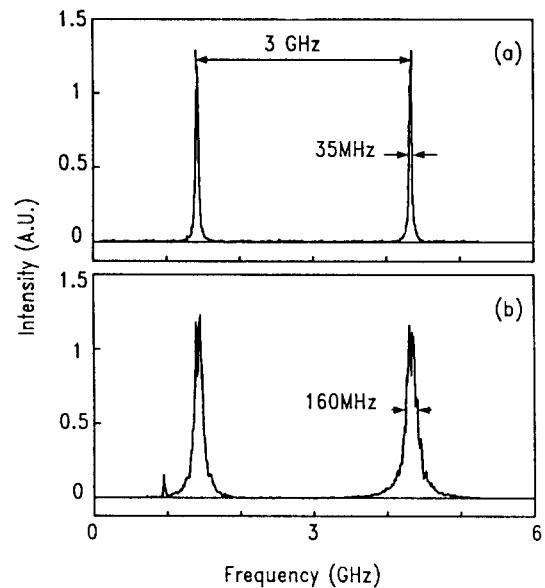


그림 5. 공초점 페브리 페로 간섭계를 튜닝하여 얻은 (a) 시드레이저, (b) 펄스레이저의 투과 곡선. (F.S.R. = 3 GHz, Finesse = 120).

(그림 a의 큰 펄스)으로 2배 정도 큰 출력의 펄스레이저가 나옴을 알 수 있다.

F.S.R.(free spectral range)가 3 GHz인 공초점 주사형 페브리 페로 간섭계(Burleigh; finesse 120)를 사용하여 펄스레이저 선폭을 측정하였다. 그림 5는 온도가 안정된 공초점 페브리 페로 간섭계의 길이를 천천히 변화시키며 시드레이저(a)와 펄스레이저(b)에 대해 간섭계를 투과한 광량을 박스카 평균기(boxcar averager)로 5회 평균하여 주파수 대 박스카 평균기의 출력으로 보인 것이다. 정상 상태에서 시드레이저의 선폭은 1 MHz 이내이므로 측정된 35 MHz는 사용된 간섭계의 분해능으로 볼 수 있다. 펄스레이저의 간섭 무늬는 선폭이 160 ± 20 MHz로 측정되었다. 이 값에 더해져(convolution)있는 간섭계의 분해능을 빼면 실제 펄스레이저 선폭은 약 130 MHz라고 볼 수 있다. 펄스레이저의 펄스폭(pulse duration)은 6 ns로 측정되었다.

그림 6은 펄스레이저의 주파수를 파수 측정기^[15]로 각각 600개의 펄스에 대해 측정한 것이다. 그림 6-(a)는 시드빔은 들어가지만 전기 제어를 하지 않은 상태에서 펄스레이저 출력을 나타내고 있다. 그림에서 중심 주파수에서 벗어난 점들은 이 공진기의 F.S.R.가 300 MHz인 점을 고려하면 외부의 잡음에 의해 시드레이저 주파수에 인접한 다른 공진 모우드로 발진한 것으로 볼 수 있다.

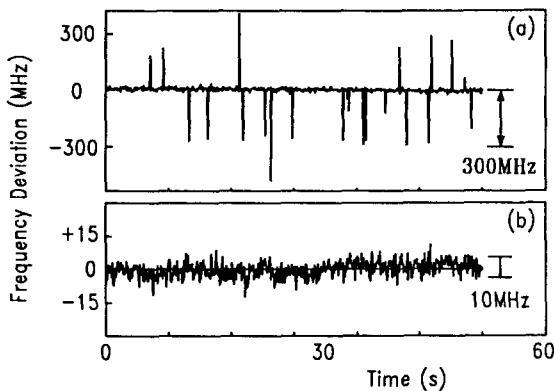


그림 6. 파수 측정기로 측정한 펄스레이저의 중심 주파수 변화.

시드레이저 빔은 입사되고 (a) 전기 제어는 하지 않았을 때, (b) 전기 제어를 하였을 때의 중심 주파수 변화.

이외에도 그림에는 표시하지 않았으나 몇 개의 펄스는 파수 측정기가 주파수를 측정하지 못하였고 이는 펄스레이저가 단일 모우드로 발진하지 않았기 때문이다. 이처럼 전자 제어를 하지 않으면 중심 주파수가 불안정하던 것이 전자 제어를 하면 그림 6-(b)와 같이 안정된 상태가 된다. 그림 6-(a)에서 보았던 모우드 뛴이 사라지고 전체 요동은 10 MHz 이내에 분포함을 알 수 있다. 전자 제어를 한 상태에서 다른 모우드로 발진하는 것은 0.1% 이하의 빈도로 측정되었다.

인젝션 록킹 레이저가 주파수 튜닝이 됨을 확인하기 위해 시드레이저의 주파수를 튜닝하며 펄스레이저의 출력을 파수 측정기로 측정하였다. 그림 7은 연속발진 레이저의 주파수를 1.5 GHz 만큼 주기적으로 변화시켰을 때 펄스레이저의 주파수가 이에 따라 변하고 있음을 보여준다. 펄스레이저의 주파수가 모우드 뛴(mode hopping)이 없이 깨끗하게 변하였고 이 상태는 관찰한 동안에는 언제나 유지되었다.

IV. 결론 및 토의

연속발진 색소레이저를 시드레이저로 하고 Nd:YAG 레이저를 펌프레이저로 하여 인젝션 록킹 방법으로 단일 모우드 펄스레이저를 만들었다. 50 mJ로 펌핑했을 때 2 mJ의 단일 모우드 출력을 얻었다. 이 때의 첨두출력은 330 kW이고 에너지 변환 효율은 4%이다. 선폭은 130 MHz이고 중심 주파수 요동은 10 MHz 이내로 안정되게 동작하였다. 본 레이저는 시드레이저의 튜닝 범위 안에

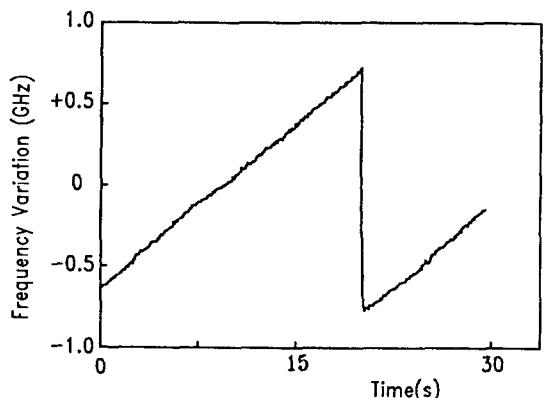


그림 5. 시드레이저를 1.5 GHz 만큼 반복 튜닝하였을 때 파수 측정기로 측정한 펄스레이저의 중심 주파수 변화.

서는 연속적인 주파수 튜닝이 가능하다.

실험 결과에서 록킹이 되었을 때 펄스 모양에 왜곡이 있는 것과 시드빔과 반대 방향으로 출력이 나오는 것은 개선하도록 해야 할 부분으로 생각한다. 이 두 가지 현상의 이유에 대해서는 입사된 시드빔으로 록킹이 되지 않은 펄스레이저 출력이 일부 남아 있기 때문으로 여겨진다. 이렇게 해석한 이유는 다음과 같다. 본 레이저의 경우에 펌프가 이루어지는 시간은 8 ns이므로 이때 펄스가 공진기를 도는 회수는 3회 이내이다. 이는 모우드 다툼(mode competition)을 통해 시드빔과 공진 하지 않은 다른 모우드가 발진하는 것을 막기에는 부족한 회수라고 여겨진다.^[16] 펌핑 펄스폭을 늘려서 펌핑을 하거나 공진기의 길이를 줄이는 것으로 이 점을 확인 해보려고 한다.

감사의 글

전자 장치의 제작에 도움을 주신 한국표준과학연구원의 윤태현 씨와 김봉학 씨에게 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] T. W. Hänisch, Appl. Opt. **11**, 895(1972).
- [2] M. G. Littman and H. J. Metcalf, Appl. Opt. **17**, 2224(1978).
- [3] M. G. Littman, Appl. Opt. **23**, 4465(1984).
- [4] U. Ganiel, A. Hardy and D. Treves, IEEE J. Quantum Electron. **QE-12**, 704(1976).
- [5] S. Blit, U. Ganiel and D. Treves, Appl. Phys. **12**,

- 69(1977).
- [5] B. Couillaud, A. Ducasse and E. Freysz, IEEE J. Quantum Electron., **QE-20**, 310(1984).
 - [6] J. P. Boquillon, Y. Ouazzany, and R. Chaux, J. Appl. Phys. **62**, 23(1987).
 - [7] F. Trehin, et al. Opt. Commun., **31**, 76(1979).
 - [8] C. E. Hamilton, Opt. Lett., **17**, 728(1992).
 - [9] Y. K. Park, G. Giuliani and R. L. Byer, Opt. Lett., **5**, 96(1980).
 - [10] L. A. Rahn, Appl. Opt., **B24**, 940(1985).
 - [11] I. B. Bigio and M. Slatkine, IEEE J. Quantum Electron., **QE-19**, 1426(1983).
 - [12] 김점술, 공홍진, 새물리, **30**, 630(1990).
 - [13] G. E. Francois, F. M. Librecht and J. J. Engelen, Appl. Opt., **10**, 1157(1971).
 - [14] L. Hollberg, in *Dye Laser Principles*, edited by F. J. Duarte and L. W. Hillman, (Academic press, Inc. New York, 1990), p. 216.
 - [15] 한재원, 박승남, 이충희, 응용물리, **4**, 309(1991).
 - [16] Y. K. Park, G. Giuliani and R. L. Byer, IEEE J. Quantum Electron., **QE-20**, 117(1984).

Single Longitudinal Mode Operation of a Pulsed Dye Laser Injection-seeded with a CW Ring Dye Laser

Jae Wan Kim and Hong-Jin Kong

Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technolody, Taejon 305-701, Korea

Jae Won Hahn and Seung Nam Park

*Division of Quantum Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science,
Taejon 305-606, Korea*

(Received: December 6, 1993)

A tunable pulsed dye laser was operated in a single longitudinal mode by injection locking with a cw ring dye laser. A doubled Nd:YAG laser was used as the pumping source. Phase sensitive detection technique was applied to maintain the required match between the master laser frequency and the slave resonator cavity length. The fluctuation of the center frequency of the pulsed laser was <10 MHz, and the pulse duration (FWHM) was 6 ns. The linewidth measured by scanning confocal interferometer was 130 MHz. When pumped by 50 mJ of the doubled Nd:YAG laser, the output energy of the pulsed dye laser was 2 mJ and the peak power was 330 kW.