

양방향으로 발진하는 일체형 Nd:YAG 고리레이저에서의 출력변조현상

홍정미 · 손승현 · 송홍주 · 김상근 · 이재철

고등기술연구원

(1995년 3월 4일 받음)

본 논문에서는 일체형 Nd:YAG 고리 레이저에서 서로 반대방향으로 진행하는 두 모드의 비선형적인 상호작용에 의한 출력 불안정 현상을 조사하였다. 실험을 통하여 두 모드가 각각 단일 종모드로 발진함을 확인하였고, 레이저가 발진하는 임계치 부근의 낮은 펌핑수준을 유지하여 다중모드간의 경쟁이나 단방향 발진에 의한 출력 불안정이 아님을 확인하였다. 또한 잘 알려진 시스템 고유의 감쇄진동과 구별되는 현상임을 보였다. 두 모드간의 손실차가 클수록 이 출력의 변조주파수는 증가하고 변조폭이 줄어들어 안정화 되며 단방향 발진이 일어난다.

I. 서 론

이득이 고르게 퍼진 고리 레이저(homogeneously broadened, ring laser)에서의 불안정성(instability)은 여러 다양한 레이저들을 이용한 실험과 전산시뮬을 통해 이론적 모델의 검증과 개선이 계속되고 있다. Haken-Lorentz 모델^[1]에 따르면 불포화 이득(unsaturated gain)이 작을 때는 일관되게 정상상태로 접근하여 레이저가 안정하게 작동하고, 그 보다 큰 값을 가질때는 감쇄진동(relaxation oscillation)을 동반하게 되며, 불안정성 임계치(instability threshold)로 불리는 한계 이상에서는 레이저 출력이 감쇄되지 않는 펄스의 형태로 나타난다. 여기에 시스템 변수들이 몇몇 특별한 값의 조합을 이룰 때 주기적인 성향을 나타내기도 하고 완전히 불규칙 하고 혼돈스러운(chaotic) 요동을 보이기도 한다.^[2]

고리형 공진기내에서 서로 반대방향으로 진행하는 두 모드간에 충분한 손실차를 갖도록 패러데이 편광회전기(Faraday rotator)를 포함시킨 구조에서는 손실이 작은 한쪽 방향으로만 발진이 된다. 이 경우는 간단히 진행파로 가정할 수 있으므로 단일모드뿐 아니라 다중모드 발진에 대해서도 연구가 상당히 진행되어 있다.^[3,5] 그러나 양방향 발진이 레이저 출력의 불안정성에 미치는 효과에 대해서는 아직도 이론적 모델에 대한 논쟁의 여지가 남아있으며^[6,8], 특히 자이로스코프로서의 응용성 때문에 그 동역학적 특성에 대한 관심이 모아져 활발히

연구가 계속되고 있다. CO₂, NH₃ 레이저 출력에서 이미 복잡한 모양의 펄스가 나타나는 것이 관찰되었고 그 중 많은 부분이 간단한 두 모드 모델에 의한 전산시뮬 결과와 정성적으로 상당한 일치를 보였다.^[9,10]

일반적으로 양방향 발진 고리레이저의 출력불안정은 공간적으로 형성된 밀도반전 격자에 의한 것으로 설명된다. 고리형 공진기 안에서 서로 반대 방향으로 진행하는 두 빔의 간섭에 의해 밀도반전이 공간에 따라 불균일 해져 일종의 격자의 구실을 하게 되므로 공진기 내의 정해진 경로를 따라 진행하던 파를 산란시킨다. 이 산란된 파와 반대방향 파와의 비선형적 결합에 의해 레이저의 출력이 감쇄되지 않는 펄스형태가 나타나게 된다.^[6,7]

본 실험에서는 Nd:YAG 결정으로 일체형 비평면공진기(monolithic nonplanar resonator)^[11]를 구성하여 자기장을 가할 때 두 모드간에 손실차를 일으키도록 설계하였다. 자기장의 세기변화에 따라 손실차가 달라질 때 출력의 변화를 관찰하여 Zeghlache의 안정성 분석(stability analysis)결과^[6]와 비교하였다.

펌핑원인 레이저 다이오드(LD, Laser Diode)와 결정의 온도를 조정하여 원자공명주파수(atomic resonance frequency)와 실제 발진하는 레이저 주파수간의 차이(detuning)를 최소화한 상태에서 안정한 삼각함수 꼴의 출력 변조 현상을 관찰하였다. 스펙트럼 분석기(spectrum analyzer)를 사용하여 단일 종모드로 발진함을 확인하고,

양방향으로 발전하는 두 파가 위상이 어긋난 채 거의 같은 주파수로 변조되어 나오는 것을 관찰하였다. 출력 스펙트럼으로부터 외부 자기장에 따라 양방향 손실차이가 달라질 때, 레이저 시스템의 고유한 감쇄진동 주파수와 출력불안정에 지배적인 또 다른 변조 주파수 성분의 변화를 관찰하였다.

II. 이 론

이득이 고르게 퍼진 레이저 매질을 포함하는 고리형 공진기내에서 서로 반대방향으로 진행되는 두 전기장 성분분에 대해 Maxwell-Bloch 방정식으로부터 공간적 hole burning 효과가 고려된 다음과 같은 결과를 얻는다.^[6,12]

$$(\partial_t + 1)E_1 = (1 + i\Delta)\bar{A}(E_1D_0 + E_2D_1^*) \quad (1)$$

$$(\partial_t + K)E_2 = (1 + i\Delta)\bar{A}(E_2D_0 + E_1D_1) \quad (2)$$

$$(\partial_t + d_0)D_0 = d_0 - \bar{d}_0 D_0 (|E_1|^2 + |E_2|^2) - \bar{d}_1 E_1 E_2^* D_1 + c.c. \quad (3)$$

$$(\partial_t + d_1)D_1 = -\bar{d}_1 D_1 (|E_1|^2 + |E_2|^2) - \bar{d}_1 E_1^* E_2 D_0 \quad (4)$$

$$E_j = \left[\frac{\gamma_{\parallel} \gamma_{\perp}}{2|g_j|^2} \right]^{-1/2} e^{i\omega_j t} \beta_j(t) \quad (5)$$

$$D_n = \frac{1}{\sigma L} \int_0^L \left(\frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} \right) e^{2imkx} dx \quad (6)$$

매질은 천이주파수가 ω_A 인 2준위 계(two-level system)이고 이득곡선 폭에 비해 공진기의 종모드 간격이 충분히 커서 레이저는 ω_L 의 단일모드로 발전 한다고 가정하였다. 두 전기장 성분은 평면파이고, 진폭이 시간에 따라 천천히 변하며, 평균 전기장 한계(mean field limit)를 취할 수 있다고 근사하였다.

편광상태가 풀리는 비율(polarization relaxation rate) γ_{\perp} 가 공진기 내의 전기장 진폭이 감쇄하는 비율(cavity field decay rate) $\kappa_{1,2}$ 나 밀도반전이 감쇄하는 비율(population inversion decay rate) γ_{\parallel} 보다 훨씬 클 때($\gamma_{\perp} \gg \kappa_{1,2}, \gamma_{\parallel}$), 편광성분의 진폭이 갖는 시간의존성을 무시할 수 있다. 참고로 고체 레이저들은 대개 $\gamma_{\parallel} \approx 10^3 - 10^5/s$, $\kappa_{1,2} \approx 10^7/s$, $\gamma_{\perp} \approx 10^{12}/s$ 범위의 값을 가진다. 따라서 시스템을 설명하는 미분방정식으로부터 편광성분을 제외하고 전기장과 밀도반전에 대해서만 고려하면 된다.^[6] 한편, 밀도반전이 만드는 격자형태는 평균값에 비해 그 진폭이 작을 때 삼각함수꼴의 공간의존성을 갖는 것으로 근사할 수 있게 되며, 레이저 발전 주파수의 2배에 해당하는

주파수를 기저로 삼아 푸리에 급수(Fourier series)로 전개하여 상수항과 첫 번째 고조파항만을 취하였다.

식 (5)에서 $\beta_j(t)$ 는 천천히 변하는 전기장 진폭의 테두리(envelope)이며, E_j 는 차원이 없는 새로 정의한 전기장 성분을 나타내며, N_+, N_- 가 각각 2준위 근사에서 상위 및 하위 에너지 준위를 나타낸다고 할 때, 식 (6)의 D_n 은 밀도반전차를 조화함수로 전개했을 때의 일반항이다. 여기서 n 은 차수를 나타내는 정수이고, $D_n \approx 0$ ($n \geq 2$)으로 근사하였다. 시간을 나타내는 변수 t 대신 $\tau = \kappa_1 t$ 를 새로 정의하였고, $\Delta = \frac{\omega_c - \omega_A}{\kappa_1}$ 는 공진기의 고유주파수가 ω_c 일 때 ω_A 로부터의 어긋남(detuning)을 나타낸다.

$$\bar{A} \text{는 } \bar{A} = A/(1 + \Delta^2) = \frac{\sigma N |g_j|^2}{(1 + \Delta^2) \gamma_{\perp} \kappa_1} \text{으로 정의되는 펄}$$

평조건에 관련된 변수로서, 이 때 N 은 전체 원자의 갯수이고 σ 는 차원이 없는 밀도반전 차($N_+ - N_-$)/($N_+ + N_-$)의 초기값이며 펄핑비율 W_p 에 비례한다. μ 를 쌍극자 행렬원소, x 를 공진기내 빔의 경로를 따라 붙인 공간 변수라고 할 때, $g_j(x)$ 는 편광 성분을 제외시키기 이전에 밀도반전에 관한 미분 방정식에서 전기장과 매질의 상호작용을 나타내는 항의 결합계수를 나타내며 $g_j(x) = -i(2\pi\omega_A)^{1/2}(2\pi\mu\hbar)\exp[(-1)^j - ikx]$ 이다.^[12]

$K \equiv \frac{\kappa_2}{\kappa_1}$ 는 공진기내 전기장 성분간의 상대적인 감쇄 비이며, \bar{d}_n 는 $\bar{d}_n = d_n/(1 + \Delta^2)$ 로서 $d_{\parallel} \equiv \frac{\gamma_{\parallel}}{\kappa_1}$, $d_{\perp} \equiv \frac{\gamma_{\perp}}{\kappa_1}$ 이다.

패러데이 편광회전기가 포함된 구조이므로 두 모드간의 손실이 다르다고 가정하면 식 (1)~(4)의 해를 아래와 같이 놓을 수 있다. 이때, E_1 과 E_2 , D_0 와 D_1 간의 크기차를 두기 위해 임의의 작은 변수 ε 을 도입하였다.^[6]

$$E_1 = \bar{A}_1^{1/2} e^{i\Delta\tau} + \varepsilon \xi_1 e^{i\Delta\tau} e^{i\tau} + O(\varepsilon^2) \quad (7)$$

$$E_2 = \varepsilon \xi_2 e^{i\Delta\tau} e^{i\tau} + O(\varepsilon^2) \quad (8)$$

$$D_0 = \bar{A}^{-1} + \varepsilon \eta_0 e^{i\tau} + O(\varepsilon^2) \quad (9)$$

$$D_1 = \varepsilon \eta_1 e^{i\tau} + O(\varepsilon^2) \quad (10)$$

식 (7)~(10)을 식 (1)~(4)에 대입하고 ε 의 1차항까지만 고려하면 λ 에 대한 7차 특성방정식을 얻을 수 있는데, 이 방정식은 3차와 4차식으로 인수분해가 된다. 이 중 3차식은 D_0 와 두 모드 중에 출력이 강한 E_1 과의, 4차식은 D_1 과 약한 모드 E_2 와의 결합과 그 안정성을 나타낸다. 주파수 어긋남 Δ_2 에 대한 펄핑변수 A 의 관계로부터 고유치 λ 의 실수부가 0보다 큰지 아닌지에 따라 레이저

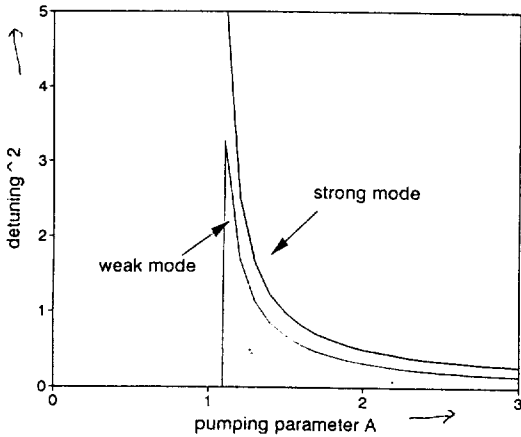


그림 1. $K=1.02$, $d_{||}=0.01$ 일 때 주파수 어긋남 Δ^2 과 펌핑변수 A 공간에서 약한 모드해와 강한 모드해의 안정영역

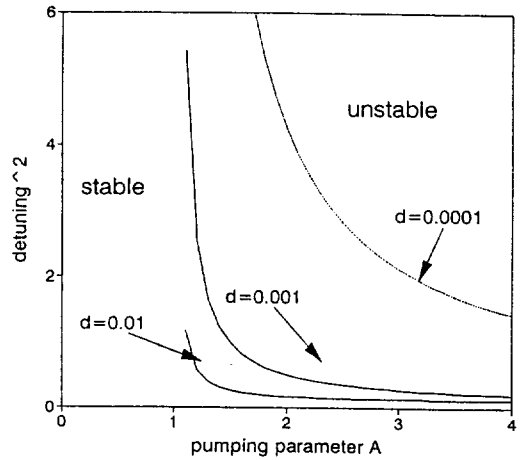


그림 3. $K=1.0002$, $d_{||}=1.0 \times 10^{-6}$ 으로 양방향 손실차이가 작고 밀도반전이 풀리는 비율이 매우 작은, 본 실험의 시스템과 비슷한 조건에서의 안정성 분석결과.

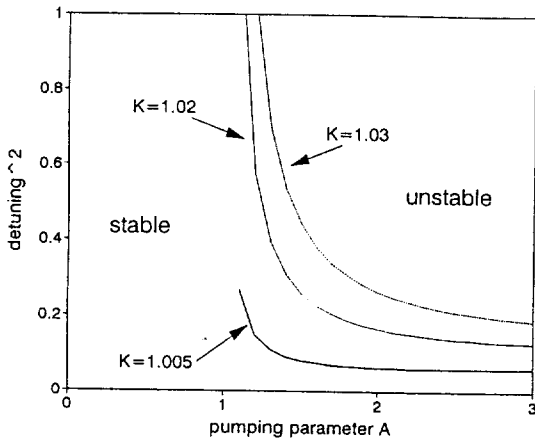


그림 2. $d_{||}=0.01$ 일 때, 손실차 K 값의 증가에 따른 시스템의 안정성 변화.

발전이 안정한 영역과 감쇄되지 않는 펄스모양의 출력이 나타나는 불안정 영역으로 구분된다.

정상상태 해의 초기조건에 따라 ‘약한 모드해’와 ‘강한 모드해’로 지칭되는 서로 다른 해가 존재하는데 모든 경우에 약한 모드해가 안정하게 발전하는 영역이 강한 모드해가 안정한 영역에 포함되므로, 그림 1에서 약한 모드해가 안정한 영역에서는 양방향으로 안정한 레이저 발전이 가능하다. 그러나, 선형적인 안정성 분석만으로는 레이저 출력의 진폭이 상당한 진폭을 가진 펄스모양으로 나오는 것을 예측할 수 없으며, 전산시뮬의 결과로부터 두 정상상태 해가 둘다 불안정한 영역에 속할

때 비로소 펄스형태의 출력이 나타남이 알려져 있다.^[6] 레이저의 출력 불안정을 결정하는 강한 모드해만을 생각하면, 그림 2로부터 고정된 $d_{||}$ 에 대해 K 가 커질수록, 즉 두 모드간에 손실차이가 많이 날수록 안정한 영역이 넓어지므로, 불규칙하고 진폭이 큰 펄스출력의 요동이 줄어든다.

본 실험에 사용된 Nd:YAG 레이저의 경우 $d_{||} \approx 10^{-6}$, $K-1 < 10^{-3}$ 으로 둘다 매우 작은 값을 가지며, 이때 불안정성 임계치(Instability threshold)가 현저히 내려가 아주 작은 주파수 어긋남과 낮은 펌핑조건에서도 쉽게 출력불안정 현상이 나타나는 것을 그림 3으로부터 예측할 수 있다.

III. 실험 및 결과

전체적인 실험장치도는 그림 4(a)와 같다. 그림 4(b)에 나타낸 것처럼 Nd:YAG 결정으로 비평면 고리형 공진기를 만들고 상온에서 발전파장이 810 nm인 GaAlAs 반도체 레이저로 펌핑하였다.

LD의 온도가 불안정할 때 펌핑원의 파장이 달라지고 ($0.3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$) 결정의 흡수선 영역안에 들어오는 펌핑의 세기가 바뀌게 되어, 발전하는 $1.064 \mu\text{m}$ 레이저 출력이 영향을 받게 된다. 따라서, 서로 상호작용하는 두 모드의 세기가 달라지고 이에 따라 나타나는 출력의 변조주파수가 불안정하게 된다. TEC(thermo-electric cooler)를 이용하여 온도를 제어하더라도 펌핑원의 출력조건에 따

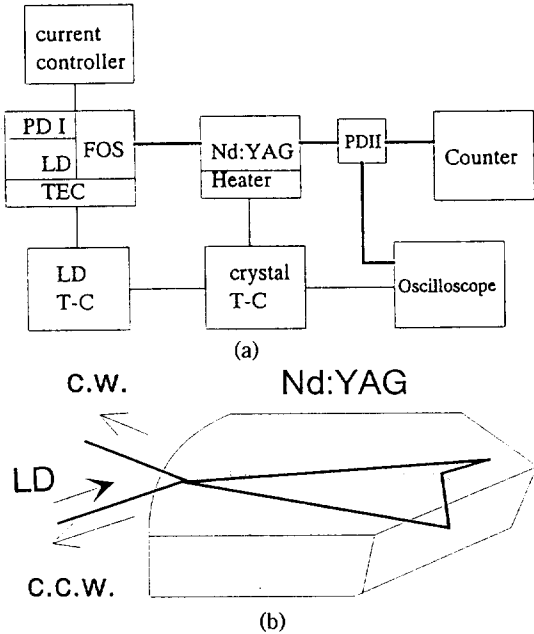


그림 4 (a). 실험 장치도
 LD: 레이저 다이오드, FOS: 빔 집속을 위한 렌즈 시스템(Focusing Optical System), PDI: LD에 내장된 포토다이오드, TEC: (ThermoElectric Cooler) Nd:YAG: 일체형 공진기로 사용된 결정, heater: 결정의 온도제어를 위한 히터, PDII: 공진기를 반시계방향으로 진행하다 빠져 나오는 레이저 출력을 검출하기 위한 포토 다이오드, Oscilloscope : 출력의 파형을 보기위한 오실로스코프, T-C: 온도 제어 장치, Counter: 주파수 측정기, current controller: LD의 전류 제어 장치. (b). 일체형 공진기를 이루는 Nd:YAG 결정과 내부에 형성되는 빔 경로의 모양.

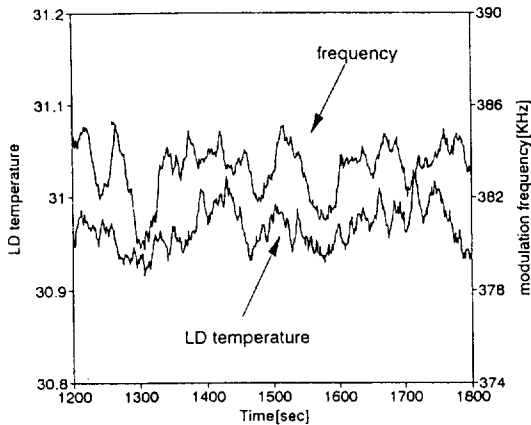


그림 5. LD의 출력에 대한 레이저 출력의 안정성.

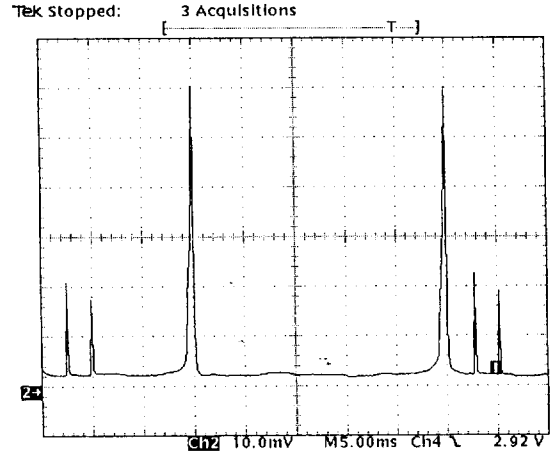


그림 6. 단일 종모드로 발진하는 한쪽 방향 출력.

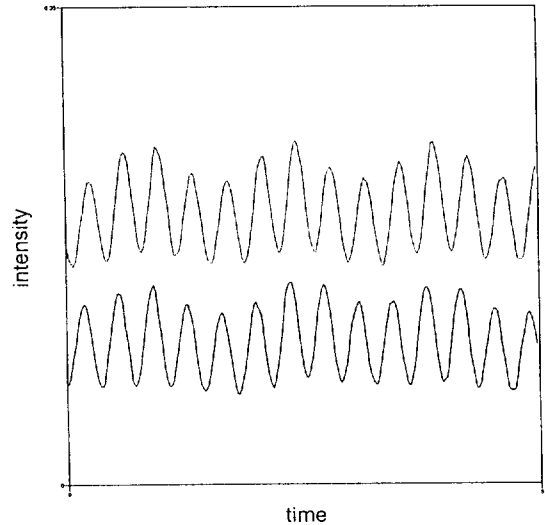


그림 7. 공진기내에서 서로 반대방향으로 진행되는 두 모드가 거의 같은 주파수로 진동하는 모양.

라 레이저의 출력 주파수 안정성이 그림 5에서 보는 바와 같이 직접적인 영향을 받을 수 있다. 별도의 주파수 측정장치를 제작하여 LD의 온도와 함께 출력의 변조 주파수를 동시에 측정하였다. 그리고 반도체 레이저의 출력을 안정화 시키기 위해 내장된 포토 다이오드의 전류를 검출하여 폐환회로를 통하여 반도체 레이저의 구동전류를 제어하였다.

공진기는 네개의 반사면을 가지는데, 펄핑광이 입사하는 출력경은 50 mm의 곡률반경을 가지며, 나머지 세 면은 내부 전반사를 이용한 반사면으로서 전체적으로

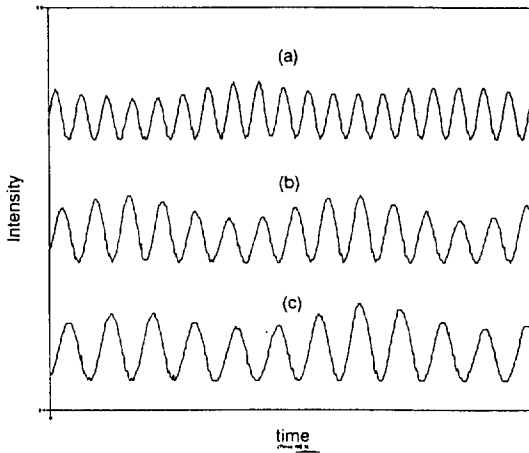


그림 8. 외부 자기장이 (a)(b)(c)순으로 감소하여 두 모드간의 손실차가 줄어들때 출력의 변조주파수가 감소하고 요동폭이 커져 불안정해지는 모양.

안정된 공진기를 형성한다.^[10] 공진기의 광경로를 일정하게 유지하기 위하여 공진기 밑에 히터를 부착하여 온도를 제어하였다.

실험에서 관찰한 출력의 불안정과 변조현상이 과연 양방향으로 진행되는 두 모드간의 상호작용에 의한 것인지 알아보기 위해 먼저 스펙트럼 분석기를 사용하여 단일 종모드로 발전함을 확인하였다. 그림 6에서 같은 크기의 두 마루는 동일한 모드로, Fabry Perot 간섭계의 압전 소자(piezoelectric transducer)에 걸리는 전압을 변화시키면서 처음 마루가 나타난 점으로부터 간섭계의 모드간격 10 GHz만큼 더 움직였을 때 다시 공진이 일어나기 때문이다. 한편 압전소자에 인가되는 경사전압(ramp voltage) 범위를 줄여서 10 GHz 미만으로 하면 한번의 검색 주기에 단 하나의 마루를 볼 수 있다. 옆에 보이는 작은 두개의 마루는 경사전압이 감쇄하는 주기 동안 이 모드들을 중복하여 검출한 것으로 의미가 없다.

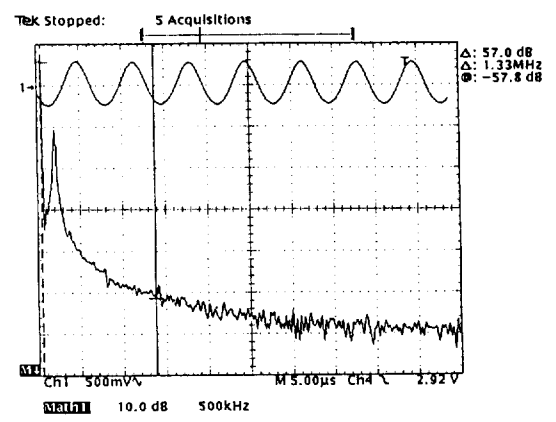
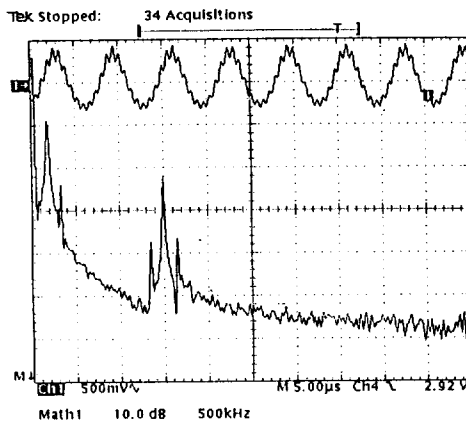
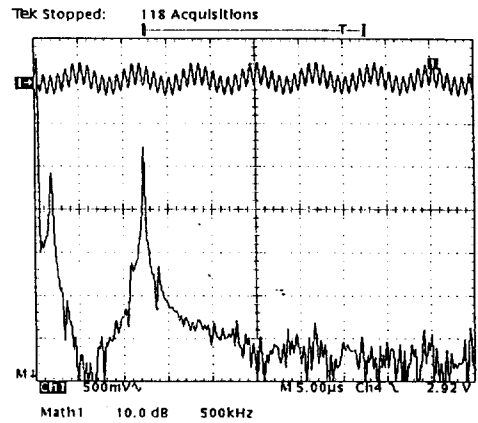
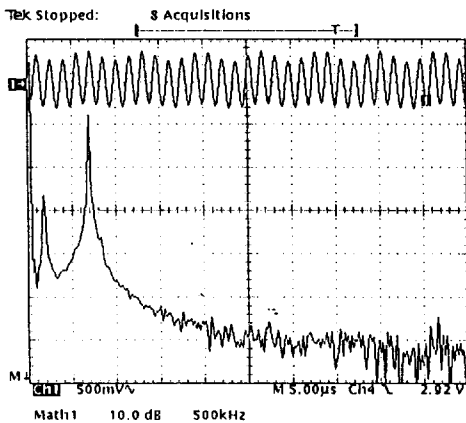


그림 9. 레이저 출력 스펙트럼 (a): 외부 자기장이 전혀 가해지지 않은 경우, (b)(c)(d)순으로 자기장이 증가할 때 시스템의 고유한 감쇄진동 주파수와 두 모드간의 상호작용에 의한 변조 주파수의 상대적인 변화.

레이저가 발진하는 임계치 부근의 펄핑세기를 유지하여 다중모드가 발진하지 않도록 주의하였다. 또한, 단방향 발진때 나타나는 출력 불안정일 가능성을 배제하기 위해 공진기안을 반시계 방향으로 진행하던 $1.064 \mu\text{m}$ 의 레이저 출력 신호는 외부 포토다이오드로 측정하고, LD안에 내장된 포토다이오드로 되돌아 들어오는 반대방향 출력을 동시에 측정하여 양방향 발진을 확인하였다. 그림 7에서 서로 위상이 어긋난 채로 진동하는 두 모드를 볼 수 있다.

결정의 윗면에 빔이 지나는 경로에 대해 나란하게 자석을 두고 거리를 조절하여 자기장을 변화시켜 가면서 양방향 모드의 손실차를 다르게 할 때 그림 8과 같은 출력의 변화를 보였다. 실험에 사용한 자석의 자속밀도는 공진기 내에 빔이 진행되는 위치에서 0.1 T 미만으로 큰 손실차를 발생시키지 않기 때문에 반대방향으로 발진하는 두 모드가 공존할 수 있다. 외부 자기장이 세질수록 변조 주파수가 커지고 변조폭은 줄어드는 경향을 나타내며, 충분히 강한 자기장이 주어질 때 출력의 변조현상은 사라지고 단방향 발진영역으로 넘어가게 된다. 두 모드간에 손실차가 커질수록 앞의 그림 2와 같이 출력의 불안정성이 나타나는 경계가 펄핑출력과 주파수 어긋남이 큰 쪽으로 이동하게 된다. 따라서 같은 펄핑조건에서 레이저 발진이 안정화되는 영역에 접근하게 되므로 변조폭이 줄어드는 것을 예측할 수 있고 실험결과도 그런 경향을 잘 설명해 준다.

실험에서 측정된 레이저 출력의 변조 주파수가 잘 알려진 시스템의 고유한 감쇄진동 주파수와 다름을 확인하기 위해 출력 스펙트럼을 측정하였다. 그림 9(a)는 전혀 외부 자기장이 가해지지 않은 경우로서 100 kHz 대의 작은 마루(peak)가 감쇄진동에 의한 주파수 성분이고 300~500 kHz 부근에 보다 큰 마루가 출력의 변조 주파수로 서로 반대 방향으로 진행하는 두 모드간의 비선형적 상호작용에 의해 발생하는 성분이다. 자기장을 증가시킬 때 그림 9(b), (c)에서 볼 수 있듯이 감쇄진동 주파수는 고정되어 있는 반면에 출력의 변조 주파수 성분은 주파수가 증가하는 쪽으로 이동하며 크기는 줄어들어 서로 확연히 구분되는 다른 양상을 알 수 있다. 자기장이 어떤 한계 이상이 되면 그림 9(d)와 같이 단방향으로 안정하게 발진하는 영역으로 넘어가게 되어 출력의 주파수 변조현상은 사라지고 감쇄진동만 존재하는 것을 확인하였다.

IV. 결 론

일체형 Nd:YAG 고리레이저에서 나타나는 출력 불안

정성에 대해 조사하였다. 단방향 발진의 경우에 나타나는 불안정성의 영향을 배제하기 위해 그 조건을 벗어나는 낮은 펄핑조건에서 실험하였다. 서로 반대방향으로 진행되는 두 모드간의 상호작용으로 출력 변조현상을 설명하는 Zeghlache의 이론^[6]과 정성적으로 일치하는 실험결과를 얻었다.

외부의 레이저 출력 검출용 포토다이오드 외에 LD안에 내장되어 있는 펄핑출력 제어용 포토다이오드로부터 고리형 공진기내에서 서로 반대 방향으로 진행하는 두 파를 동시에 측정하였다. 펄핑원인 LD의 출력요동에 대한 의존성과 외부 자기장에 의해 손실차가 생기는 경우 출력불안정에 미치는 영향을 조사하였다. LD의 출력이 증가할수록 출력의 변조주파수가 선형적으로 증가함을 확인하였다. 이론에서 예상한 대로 펄핑조건이 고정되어 있을때 손실차가 증가할수록 출력의 변조 주파수가 커지고 요동폭이 줄어 안정화되는 것을 확인하였다.

CO₂나 NH₃에서 볼 수 있는 구형과가 나타나지 않은 것은 Nd:YAG 레이저가 이들보다 훨씬 작은 d_p 값을 가지기 때문인 것으로 보인다. 한편, 이득의 불균일한 퍼짐(inhomogeneous broadening)에 의한 영향과 레이저 빔의 단면을 고려한다면 단방향 발진에 의한 불안정성 임계치가 낮아지므로, 낮은 펄핑조건에서 편광이 풀리는 비율이 아주 큰 시스템에다 실험을 했더라도 원래 반대방향으로 진행되는 두 모드간의 상호작용에 이러한 효과가 결합되어 출력 불안정에 반영될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] H. Haken Phys. Lett. **53A** 77(1975).
- [2] L. M. Narducci, H. Sadiky, L. A. Lugiato, and N. B. Abraham Opt. Comm. **55**, 370(1985).
- [3] L. A. Lugiato, L. M. Narducci, J. R. Tredicce and D. K. Bandy "25 Years of Laser instabilities" in *Instabilities and Chaos in Quantum Optics II*, N. B. Abraham et al. ed. (Nato ASI series B: physics vol. 177).
- [4] L. M. Narducci, J. R. Tredicce L. A. Lugiato, N. B. Abraham and D. K. Bandy, Phys. Rev. **A33**, 1842(1986).
- [5] H. Zeghlache, P. Mandel, N. B. Abraham and C. O. Weiss, Phys. Rev. **A38**, 3128(1988).
- [6] H. Zeghlache, P. Mandel, N. B. Abraham L. M. Hoffer, G. L. Lippi and T. Mello, Phys. Rev. **A37**, 470(1988).
- [7] N. V. Kravtsov and E. G. Lariontsev, Kvantovaya Electronika **24**, 841(1994)

- [8] P. A. Khandokhin and Ya. I. Khanin, J. Opt. Soc. Am. **B2**, 226(1985).
[9] G. L. Lippi, J. R. Tredicce, F. T. Arecchi and N. B. Abraham, Opt. Comm. **53**, 129(1985).
[10] N. B. Abraham and C. O. Weiss, Opt. Comm. **68**, 437(1988).
[11] T. J. Kane and R. L. Byer, Opt. Lett. **10**, 65(1985).
[12] P. Mandel and G. P. Agrawal, Opt. Comm. **42**, 269(1982).

Dynamical Behavior of Bidirectional Monolithic Nd:YAG Ring Laser

Jeongmee Hong, Seonghyun Son, Hongjoo Song, Sangkeun Gil and Jae-Cheul Lee
Institute for Advanced Engineering, Taejeon 306-040, Korea

(Received: March 4, 1995)

In a monolithic Nd:YAG ring laser we have recently observed instabilities, undamped pulsation phenomena due to the nonlinear interaction between two counterpropagating waves. The operation conditions were selected to confirm that these instabilities were not resulted from either the unidirectional oscillation or the competition among the multimode oscillations. It was examined that these intensity pulsation phenomena were distinguished from the well-known relaxation oscillations. As the loss difference between two modes increased, the modulation frequencies increased and the modulation depth decreased. Finally the output became stable and the unidirectional oscillation occurred.