

밀도 반전된 Nd:YAG에서의 자체 발진 위상공액 레이저

김동한 · M.J.Damzen*

한국과학기술연구원 정보전자 연구부

*Imperial College, London SW7 2BZ, U.K.

(1997년 5월 3일 받음)

밀도반전된 Nd:YAG에서 자체 교차하는 빔경로를 구성하여 위상공액과 레이저를 발진 시켰다. 서로 교차하는 두빔에 의한 spatial hole burning에 의해 3차 비선형 분극이 유도되어 레이저 공진기 내부의 위상 왜곡(phase distortion)이 자체 보정됨을 관측하였고, 레이저 이득체내에서 형성되는 동적 부피 격자의 생성과 소멸에 의한 효과로 반치폭 20 나노초의 자연 Q-switched 레이저 펄스가 발진되었다. 평균 펄스당 출력 에너지는 10 Hz 동작에서 200 mJ로 측정되었으며, 최대 전체 출력 효율은 0.8%로 나타났다.

I. 서 론

고성능 고체 레이저 시스템 개발에 있어서, 레이저 공진기 빔의 공간적, 시간적, 주파수 제어 기술에 대해 비선형효과를 이용한 많은 신제어기술에 대한 보고가 발표되었다.^[1,2] 특히, 고출력 레이저 시스템에 있어서는 레이저 빔의 공간적 제어기술이 중요한데, 이에 대해 필연적인 비균일 플래쉬 램프의 펌핑에 의해 유도되는 레이저빔의 파면 왜곡을 SBS(Stimulated Brillouin Scattering) 등의 위상공액 기술을 이용하여 시스템에 적용하였다.^[3] 그러나, SBS효과는 입사된 레이저 빔을 다른 파장으로 전환시키는 단점이 있으며, 높은 문턱 에너지 조건 때문에, 고출력 레이저 시스템에만 적용될 수밖에 없다. 한편 다른 위상공액 기술로는 4광파 혼합이 있는데, 축퇴된 경우는 위상공액과 파장이 입사 파장과 같으며, 문턱에너지도 낮으므로, 저급 또는 중급의 출력 수준에서 위상공액 레이저를 구성할 수 있다. 최근, 동적 이득격자의 형성과 이에 대한 위상공액파에 대한 연구분야는 새로운 관심거리가 되고 있다. 특히 이득격자는 기존의 흡수격자와는 달리 발생하는 위상공액파의 100% 이상의 반사율과 증폭이 동시에 일어나므로 이를 레이저 발진에 응용하려는 연구가 최근 관심의 대상이 되고 있다.^[4,6]

본 논문은 플래쉬램프 펌핑에 의해 밀도반전된 레이저 이득체에 부피 격자를 구성함으로써 공진기 내부에서 발생된 임의의 파면 왜곡을 자체 보정하여 TEM₀₀ 모우드의 레이저빔을 발진시켰고, 이에 대한 출력의 공간적, 시간적 및 주파수 모우드 특성을 조사하였다.

II. 레이저 이득격자에서의 위상공액파 발생

Nd:YAG 레이저 매질은 4 준위 에너지 준위를 가지므로 CW 동작조건을 가정하면, 레이저 이득은 다음과 같이 표현된다.^[7]

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{I}{I_s}}, \quad I_s = \frac{h\nu}{\sigma\tau} \quad (1)$$

여기서 I_s 는 포화 세기로서, 매질내에 광세기가 I_s 가 되면 이득이 반으로 줄어드는 광세기를 나타내며, σ , τ 는 유도방출 단면적, 상준위 여기수명을 각각 나타낸다. 그런데, 레이저 이득은 $\alpha = \sigma\Delta N$ 이므로, 서로 교차하는 가간섭성빔에 의한 간섭 세기 변화는 포화 이득체에서 spatial hole burning에 의한 밀도반전의 변조를 가져온다.

$$\Delta N = \frac{\Delta N_0}{1 + [I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta k \cdot z)]/I_s} \quad (2)$$

따라서, 밀도반전의 변조는 레이저 이득의 변조를 가져오므로 레이저 이득체에서의 4 광파 혼합은 매질굴절율의 허수 부분의 변조에 의한 비선형 분극을 유도한다.

밀도반전된 Nd:YAG인 경우, 전체 분극은 모체 물질(YAG)과 레이저 여기 물질(Nd)에 의한 성분으로 분리하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P^L = P^{YAG} + P^{Nd} \quad (3)$$

여기서, 유도 분극을 전기장의 선형관계식으로 표현하면, 먼저 모체 물질(YAG)에 의한 분극은 $P^{YAG} = \epsilon_0 \chi^{YAG} E$ 로서, 이는 레이저 매질의 실수부 굴절율을 결정한다. 한편, 여기물질에 의한 분극 성분은 $P^{Nd} = \epsilon_0 \chi^{Nd} E$ 로 표현되는데, 레이저 이득이 레이저 세기의 비선형함수이므로, $\chi^{Nd} = i \frac{2\alpha}{k} = i \frac{2}{k} \frac{\alpha_0}{1 + I/I_s}$ 의 관계로부터 약한 포화(weak saturation)를 가정하면 여기원자에 의한 분극항을 다음과 같이 전기장세기의 함수로 다차항 전개할 수 있다.

$$P^{Nd} \propto \alpha \frac{E}{1 + E^2/I_s} \simeq \alpha_0 \left\{ E - \frac{E \cdot E^2}{I_s} + \frac{E \cdot E^4}{I_s^2} - \dots \right\} \quad (4)$$

위 식에서 보면 유도된 분극의 다차항 전개항중, 전체 전기장 세기의 3차 항에 비례하는 항이 존재하며, 이는 마치 3차 비선형 감수율 역할을 하므로 ($\chi^{(3)} \propto \alpha_0/I_s$) 레이저 이득체에

서의 4광과 혼합의 이론적 근거를 제시한다. 그러나 전체 전기장의 세기가 포화 세기(I_s)에 비해 무시할 수 없을 정도로 큰 경우는 위와 같은 다차항 전개가 불가능하므로 각 전기장의 진행 효과는 비선형 분극항을 포함한 전산 시뮬에 의한 수치 해석만이 가능하다.

III. 4광자 혼합에 의한 위상공액파 레이저 이론

그림 1과 같이 외부에서 주입된 레이저빔에 의해 레이저 매질에서 자체 교차(self-intersecting)하는 공진기 구조를 고려하면 외부의 한 빔에 의해 4광과 혼합 구조를 이루므로 이를 자체 펌핑된 위상 공액 레이저(self-pumped phase conjugate laser) 구조라 하며, 이에 대해 앞서 유도한 비선형 분극항을 고려하여 맥스웰 파동 방정식에 대입하면, 다음과 같은 각각의 진행파에 대한 결합 방정식을 얻는다.^[8] 여기서 문제를 간단히 하기 위해 투과형 이득격자 만을 생각한다.

$$\frac{dA_1}{dz} = +[\gamma(z)A_1 + \kappa(z)A_3] \tag{5.a}$$

$$\frac{dA_2}{dz} = -[\gamma(z)A_2 + \kappa(z)A_4] \tag{5.b}$$

$$\frac{dA_3}{dz} = +[\gamma(z)A_3 + \kappa(z)A_1] \tag{5.c}$$

$$\frac{dA_4}{dz} = -[\gamma(z)A_4 + \kappa(z)A_2] \tag{5.d}$$

$$\gamma = \alpha_0(S^2 - C^2)^{-1/2}, \quad \kappa = \alpha_0 C^{-1} [1 - S(S^2 - C^2)^{-1/2}]$$

$$S = 1 + \sum_{j=1}^4 \frac{A_j^2}{A_s^2}, \quad C = 2(A_1 A_3 + A_2 A_4) / A_s^2$$

그런데, 여기서 이득의 약한 포화 상태를 가정하면, 즉 $A_j \ll A_s, j=1..4$ 이면, $\gamma \approx \alpha_0, S \approx 1, C \ll 1$ 이므로 결합 계수는 $\kappa \approx \alpha_0 A_1 A_3^*$ 로 근사 표현된다. 따라서 전방진행파에 대해서는 소신호 증폭이 이루어 진다고 가정하면, $A_1(z) = A_1(0)e^{\alpha_0 z}, A_3(z) = t A_1(L)e^{\alpha_0 z}$ 이고 후방 진행파에 대한 결합 방정식은 다음과 같다.

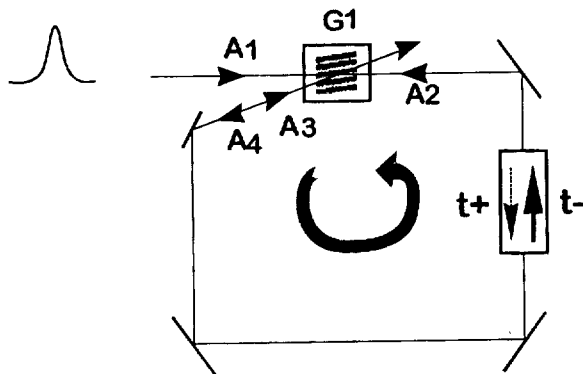


그림 1. Self-conjugating loop geometry in gain medium for a transmission grating written by the self-intersecting input beams.

$$\frac{dA_2}{dz} = -\alpha_0 A_2 + \alpha_0 A_1 A_3 A_4 \tag{6.a}$$

$$\frac{dA_4}{dz} = -\alpha_0 A_4 + \alpha_0 A_1 A_2 A_3 \tag{6.b}$$

따라서 위 연립 방정식을 경계치 조건, $A_2(L) = t A_2(0), A_3(0) = t A_3(L)$ 을 이용하여 회절 효율을 구하면 다음과 같다.

$$\eta = \frac{A_4(0)}{A_2(L)} = e^{\alpha L} \frac{\text{sech } u(L) - e^{-u(L)}}{\tanh u(L) + 1},$$

$$u(L) = \frac{1}{2} t_+ \frac{I_1(0)}{I_s} e^{2\alpha L} \sinh(\alpha_0 L) \tag{7}$$

레이저 문턱부근에서는 이득의 약한 포화 조건을 만족하므로, $u(L) \ll 1$ 인 경우 위의 회절 효율은 다음과 같이 근사적으로 표현된다.^[9]

$$\eta \approx -t_+ \frac{I_1(0)}{I_s} e^{3\alpha L} \sinh(\alpha_0 L) \tag{8}$$

또한 레이저 공진에 대한 문턱발전 조건은 $\eta_- = +1$ 이므로, 여기서 레이저 발전을 위한 문턱 세기의 표현을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{I_1^{\text{th}}}{I_s} \approx \frac{e^{-3\alpha L}}{|t_+^* t_-| \sinh(\alpha_0 L)} \tag{9}$$

위의 근사표현은 고이득 매질에서는 ($\alpha_0 L > 1$) 적절히 만족되어 진다. 그림 1의 개략적 장치도에서 본실험에 사용된 Nd:YAG 증폭기의 이득곱($\alpha_0 L$)은 2.5이고 t_+ 와 t_- 는 각각 0.001과 0.999 이고(1:1000) Nd:YAG레이저의 경우 포화 에너지 세기는 약 500 mJ/cm² 이므로 문턱 에너지를 위 식으로부터 계산하면 약 28 μJ에 해당한다. 이 값은 적당한 반사경을 출력단에 위치해 두면 외부의 어떠한 주입광이 없어도 고이득 레이저 매질인 경우, 공진기내부의 증폭된 자발방출(Amplified Spontaneous Emission)에 의해 문턱조건이 쉽게 만족될 수 있는 에너지이므로 포화 이득체 내에서 4광과 혼합 기하구조에 의한 빔경로로부터 스스로 발전되는 레이저빔을 얻을 수 있다.

위와 같이 외부 주입빔에 의한 자체 펌핑 위상공액 레이저(self-pumped phase conjugate laser)와 외부 주입빔이 없이 반사경을 두어 증폭된 자연방출빔에 의해 동기되는 자체 발전 위상공액 레이저(self-starting phase conjugate laser)에 인가해 준 플래쉬 램프의 문턱 펌핑 에너지(threshold pumping energy)를 비교하면, 전자는 18 J에 비해 후자는 21 J로 자체 발전 위상공액 레이저인 경우가 높았다. 이는 증폭된 자발 방출의 감쇄 및 손실을 고려 할 때 레이저 발전이 되기 위해 더 높은 이득이 요구 됨을 예상 할 수 있다.

IV. 자체 발전 위상공액 레이저(self-starting phase conjugate laser) 장치 및 출력 특성

위상공액 레이저 장치는 그림 2와 같이 자체 펌핑 위상공액 레이저(self-pumped phase conjugate laser) 장치에서 출력경향

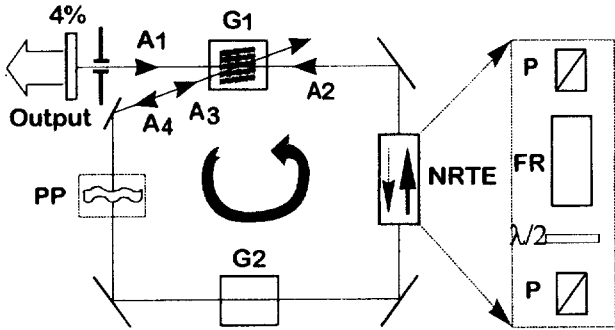


그림 2. Schematic representation of the self-starting phase conjugate laser oscillator. G1, G2: Nd:YAG amplifier; FR: Faraday rotator; P1, P2: polarizers; NRTE: nonreciprocal transmission element; PP: phase plate.

을 위치하면 외부의 주입빔이 없어도 스스로 발진하는 구조를 갖는다. 자체 교차하는 두빔 A1과 A3는 서로 공간적 겹침이 가능한 한 최대가 되도록 조정하여, 약 10mrad 정도로 정렬하였다. 출력경은 4% 반사의 무반사 코팅 거울을 사용하였고, Nd:YAG 증폭기는 2개의 플래쉬 램프로 펌핑되는 타원형 cavity이다. 레이저 봉은 길이 100 mm에, 6 mm의 직경으로 증폭을(G)은 130이었다. 그림에서 NRTE(non-reciprocal transmission element) 소자는 선형 편광빔을 45도 회전시키는 파라데이 회전기(Faraday Rotator)와 반파장판(half wave plate)의 조합으로 구성되어 있어서 전방향과 후방향과의 투과도는 약 1:1000 정도이며 wave plate를 가변시켜주므로서 투과도를 가변할 수 있게 되어있다. 이는 첫째로 레이저 이득체에서 이득 격자의 변조 깊이(modulation depth)가 최대가 되도록 각각의 입력 빔의 세기를 조절해주는 역할을 하며 한편으로는, 레이저 이득체에서 발생된 위상공액파만이 공진할 수 있도록 해준다.

실험 구성도에서 보면 두 반사경에 의한 파브리-페롯(Fabry-Perot) 형태의 레이저 공진기와는 달리 출력경만 있고 반사경이 없는데, 레이저 이득체에서 서로 교차하여 간섭하는 두빔에 의해 레이저 매질내에서 밀도반전의 공간적 변조에 의해 형성된 이득격자가 위상공액 반사경 역할을 대신한다. 이 위상공액 반사경은 레이저 이득체에서 형성되었으므로 포화흡수체와는 달리 증폭작용도 동시에 일어나므로 회절효율이나 반사효율이 1 보다 상당히 크므로 레이저 동작을 할 수 있게 한다.

공진기 내부의 편광상태는 NRTE소자에 의해 모두 p-파로 고정되어 있어서 이득체내에서 상호작용하는 4광파는 같은 편광상태에 의한 다중 격자(multiple grating)가 형성된다. 그러나 위상 정합조건(phase matching)을 고려하면 직접 레이저 작용에 해당하는 위상공액파를 발생시키는 격자는 두 종류로서 빔 A1과 A3에 의한 투과형격자와 빔 A2와 A3에 의한 반사형 격자가 생성된다. 레이저 작용은 NRTE에 의해 시계방향으로는 불충분하지만 초기의 낮은 수준의 자발방출 잡음(spontaneous emission noise)이 진행하면서 증폭매질 G2를 통하여 A1 또는 A2와 비동할 정도로 증폭된 후 G1에서 서로 교차하게 된다. 이때 두 빔 간섭에 의한 초기 투과형 또는 반사형 격자가 형성되는데, 미약하지만 이러한 초기 이득 격자에서

회절된 위상공액파는 스펙트럼의 선폭이 Bragg회절에 의해 주파수 필터링(spectral filtering)이 이루어 지므로 가간섭성이 향상된다. 이러한 설명은 Nd:YAG 증폭 매질의 이득 주파수 대역폭이 수백 GHz에 비해 자체 발진 위상공액레이저의 공진기 길이가 왕복 150 cm이므로 단일 종모우드가 발진되기 위해서는 발진 선폭이 적어도 인접한 종모우드 간의 주파수 간격(200 MHz)보다도 작아야 한다는 사실에 근거한 것이다. 이 회절된 위상공액파는 반시계 방향으로 거의 감쇄없이 진행하므로 공진기내부에 어느정도 이상의 위상공액파 광자가 축적될 때까지 이러한 공진을 계속하는데, 회절되는 빔은 Bragg 반사조건을 만족시켜야 하므로 점점 주파수 스펙트럼이 협대역화 되어지므로 이득 격자는 시간에 따라 점점 자연 향상되어 진다고 볼수있다. 따라서 공진기 내부에 축적된 위상공액파의 밀도가 문턱조건을 넘어서면 레이저 작용이 이루어지다가 레이저 이득의 포화현상에 따라 이득이 감소되어 이득 격자가 소멸하게 되므로, 그림 3(a) 와같이 20나노초 반치폭의 자연 Q-switching 펄스가 발진하게 된다. 이는 기존의 파브리-페롯 형태의 레이저가 relaxation oscillation에 의해 수 마이크로초의 불규칙한 펄스형태와 비교하면, 레이저 이득격자에 의해 시간상으로도 스스로 제어된 펄스를 발생시킴을 볼수있다.

펄스 분해능 1나노초 이하의 오실로스코프로 측정한 출력 펄스의 모양에 아무런 모우드 맥놀이 현상(beatting)이 없는 것으로 보아 이는 단일 종모우드 발진임을 알 수있었다. 약 10%내외로 그림 3(b)와 같이 5 나노초 정도의 모우드 맥놀이가

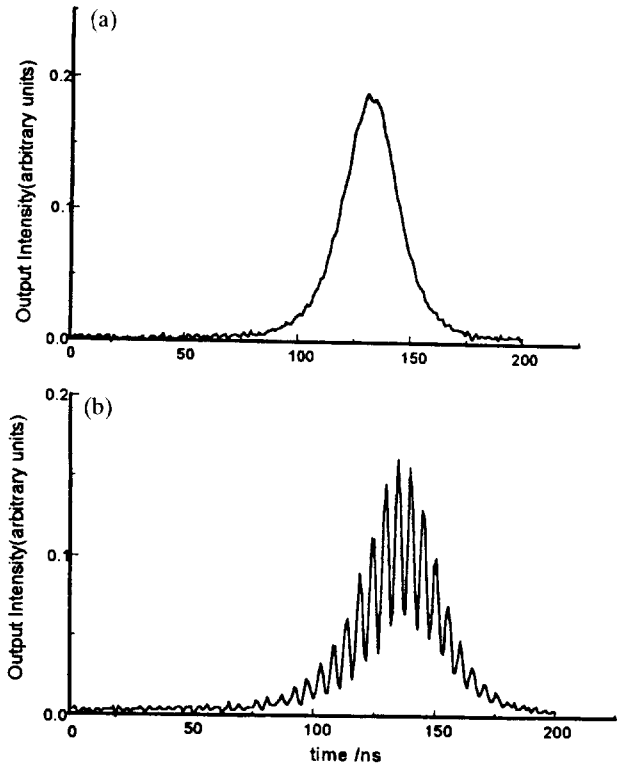


그림 3. A temporal profile of the output, showing a smooth pulse of duration 20ns (a) and an occasional mode-beating pulse with a small temporal modulation of 5ns (b).

현상을 보이는데 이는 레이저의 공진기 길이가 약 150 cm임을 고려하면 때때로 2개의 인접한 종 모드 맥늘이가 일어남을 관측할수 있었다. 공간적 빔세기분포는 거의 직경 4-5 mm 정도의 가우시안 형태이다. 따라서 공진기 내부에 적당한 개구경을 두어 공간 여과를 하면 직경 4 mm의 깨끗한 가우시안 모드를 얻는다. 이 가우시안 모드는 CCD에 측정된 형상과 렌즈에 의해 집속된 반경을 측정함으로써 diffraction limited 빔임을 알수 있었다. 이때의 출력에너지는 200 mJ/pulse이었으므로 플래쉬 램프에 인가해준 전기적 에너지는 25 J로부터 전체 효율(overall efficiency)은 약 0.8%에 달했고, 기울기 효율(slope efficiency)은 약 1%로 측정되었다. 또한 기존의 레이저의 TEM00 모드와 비교할때 위상공액 레이저의 빔크기가 직경 3-4 mm 정도로 2-3배 정도 더 크다. 그림 4(a)는 위상 공액 레이저의 공진기안 개구를 위치하지 않을 때 출력된 공간모드를 CCD 카메라로 측정한 결과이다. 출력된 레이저빔의 꼬리부분이 다소 산란된 흔적이 있으나 공진기 내에 그림 2와 같이 개구를 두어 공간 모드를 3차원으로 나타내면 그림 4(b)와 같이 깨끗한 TEM₀₀ 모드를 얻는다. 또한 공진기 내부의 임의의 위치에 불산으로 식각한 슬라이드 글라스를 두어 공진기 내부의 레이저빔의 위상을 왜곡시켜도 출력빔은 위상왜곡은 보정되어, 위상왜곡판이 없을 때의 레이저 파면과 같은 가우시안 세기 형태의 공간 모드를 얻었다.

특히 본 레이저 특성중 주목할 것은 일단 정렬이 되고나면 어느 정도의 출력경의 정렬 오차(misalignment)에 대해서는 레이저 작용에 아무런 영향이 없었다. 즉 공진기 내부에 왕복

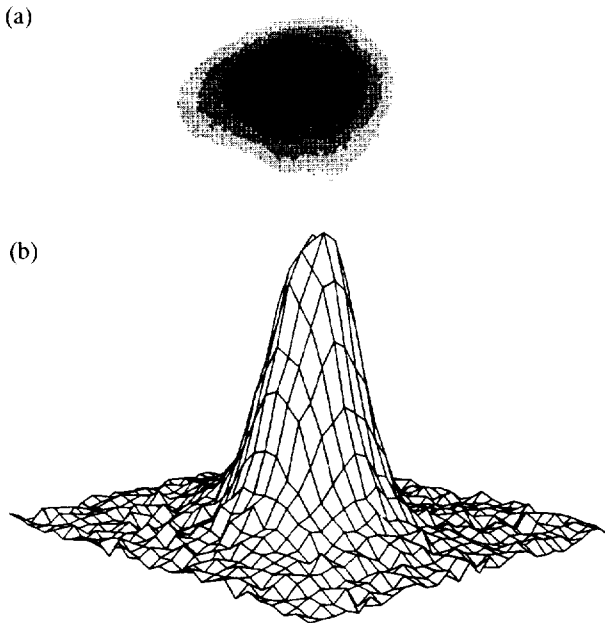


그림 4. Spatial mode properties of self-starting phase conjugate laser oscillator. (a) CCD image of the output mode profile without intracavity aperture, (b) 3-D image of the stable TEM₀₀ mode profile with the aperture, which is unperturbed by the intracavity phase distorter(etched glass plate).

하는 빔이 레이저 이득체내에서 4광과 혼합이 이루어질 정도로만 유지된다면 출력경이 흐트러지더라도 시간적, 공간적 모드의 변화없이 레이저 작용이 계속된다. 이는 출력경의 정렬오차는 입사 신호파인 A3의 정렬오차를 가져오나 축퇴된 4광자 혼합(Degenerate Four Wave Mixing)의 특성상, 위상 공액파는 자연 위상정합이 되므로 A3의 역방향으로 생성되므로 출력빔의 위치 변화만 가져올 뿐 모드의 성격은 변화하지 않는다. 이러한 발진 특성은 파브리-페롯 형태의 레이저에서는 출력경의 정렬오차는 고차 공간적 모드의 발진을 유도하거나 레이저 작용이 중단되는 것에 비교하면 외부의 환경변화에 대해 스스로 자체 적응하는 특성을 나타냄을 보여주었다.

V. 결 론

레이저 이득자체에서 4광과 혼합구조에 의한 레이저 공진기를 구성함으로써 공간적, 시간적 발진 특성이 우수한 위상공액 레이저빔을 발진시켰다. 기존의 파브리-페롯 형태의 레이저에 비해 높은 수준의 펄핑 에너지(21 J)가 요구되었으나, 레이저 출력 펄스폭은 20나노초 정도의 자연 Q-switching되는 특성을 보였고, 공진기 내부에 위상 왜곡판의 삽입에도 불구하고 스스로 위상보정이 된 가우시안 형태의 출력빔을 얻었다. 또한 축퇴된 4광과 혼합의 자연 위상정합 특성상, 출력경의 정렬오차에 상관없이 레이저 동작이 됨을 관측하였다.

자체 펄핑 위상공액과 레이저의 문턱에너지를 유도함으로써 고이득 레이저 매질에서는 공진기내의 증폭된 자발방출 잡음에 의해서도 자체 발진 위상공액과 레이저(self-starting phase conjugate laser) 동작이 될 수 있음을 논하였다.

참고문헌

- [1] R.P.M. Green, G.J. Crofts, W. Hubbard, D. Udaiyan, D. H. Kim and M.J. Damzen, IEEE J. of Quantum Electron., Vol.32, p371 (1996).
- [2] P.J. Soan, M.J. Damzen, V. Aboites and H.R. Hutchinson, Opt. Lett., Vol.19, p783 (1994).
- [3] I.D. Carr and D.C. Hanna, Appl. Phys. B., Vol.36, p 83(1985).
- [4] G.J. Crofts, R.P.M. Green and M.J. Damzen, Optics Lett. Vol.17, p920 (1992).
- [5] M.J. Damzen, R.P.M. Green and G.J. Crofts, Optics Lett. Vol.17, p1331 (1992).
- [6] A. Brignon, J. Raffy and J.P. Huignard, Opt. Lett., Vol. 19, p865 (1994).
- [7] W. Koechner, *solid-state laser engineering*, (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1992).
- [8] R.P.M. Green, *Holographic Laser Resonators*, (Ph.D thesis, Imperial college, 1994).
- [9] M.J. Damzen, R.P.M. Green and G.J. Crofts, Optics Lett. Vol.19, p34 (1994).

Self-starting phase conjugate laser in population inverted Nd:YAG

Dong-Hwan Kim and M.J.Damzen*

*Division of Electronics and Information Technology,
Korea Institute of Science and Technology, P.O.Box 131, Cheongryang, Seoul, Korea.*

**The Blackett Laboratory, Imperial College, London SW7 2BZ, UK*

(Received : May 3, 1997)

We report the operation of a self-starting phase conjugate laser (PCL) oscillator which compensates intracavity phase distortion. The self-starting PCL in the population inverted Nd:YAG gain media produced an output energy of 200 mJ in a 20 ns single-longitudinal-mode pulse at 10 Hz. And it showed well-defined Gaussian spatial profile.