

고리형 증폭 공진기에 의한 LiIO_3 결정에서 제2조화파 발생

김 상 기

동남보건대학 안경광학과, 수원 440-714
(1999년 11월 31일 받음)

고리형 증폭 공진기를 이용하여 LiIO_3 결정에서 최대 출력 35mW의 연속발진 레이저 다이오우드에 대한, 제2조화파(파장 397 nm)를 발생시켰다. 사용된 비선형 결정은 두께 5 mm, 10mm의 LiIO_3 로 광축에 대해 43.21° 각도로 절단된 것이며, 양면은 파장 794nm에 대해 AR코팅(anti-reflection coating)을 하였다. 공진기 안에 결정이 들어갔을 경우, 펄핑광에 대해 최적의 모드매칭(mode matching)이 이루어지는 곡률 거울간 거리의 적정조건을 찾아 내었다. 고리형 증폭 공진기에 의한 펄핑광의 공진증폭(resonant enhancement)으로 제2조화파 변환효율을 향상시킬 수 있었으며, 결정으로부터의 산란광에 의한 역진모드(counter-propagation mode)를 이용하여 레이저 다이오우드의 주파수를 고리형 증폭 공진기의 공진 주파수에 locking 시켰다. 공진증폭율은 결정이 없을 때 약 45배, 결정이 있을 때에는 결정의 투과 손실로 인하여 약 14배이었다. 펄프 레이저 출력에 대한 제2조화파의 출력을 측정하였고, 28mW의 입사 출력에 대해 두께 5mm와 10mm에서 각각 $1.5\mu\text{W}$ 와 $6.6\mu\text{W}$ 이상의 출력을 얻을 수 있었으며, 그에 해당하는 변환효율(conversion efficiency)은 각각 $(6.584 \pm 0.56) \times 10^{-3}\%$, $(2.6 \pm 0.21) \times 10^{-2}\%$ 이었다.

Frequency Doubling in LiIO_3 Crystals by the Ring Enhancement Cavity

Kim, Sang-Gee

Department of Optical Science, Dongnam Health College, Suwon 440-714
(Received by 31 November 1999)

The second harmonic, wavelength is 397nm, of the continuous wave diode laser, whose maximum power is 35mW, was generated in LiIO_3 crystals in a ring enhancement cavity. 5mm- and 10mm-long crystals cut 43.21° for optic axis were used in this experiment. Both surfaces of those were anti-reflection coated for 794nm. In case the crystal was inserted into the cavity, the condition of separation between two concave mirrors for the optimum mode matching was found. The conversion efficiency of second harmonic generation was increased by the resonant enhancement of pumping power in the ring enhancement cavity, and the frequency of diode laser was locked to that of the counter-propagation mode generated from the surface of crystal. When the pumping power was 28 mW, the infrared buildup factor was about 45 without the crystal, and 14 with the crystal due to the transmission loss of crystal. The maximum second harmonic powers of $1.5\mu\text{W}$ and $6.6\mu\text{W}$ were obtained, and corresponding conversion efficiencies were $(6.584 \pm 0.56) \times 10^{-3}\%$, $(2.6 \pm 0.21) \times 10^{-2}\%$ in 5mm- and 10mm-long LiIO_3 , respectively.

1. 서 론

1961년 N. G. Basov 등¹⁾에 의해 다이오우드 레이저가 발명된 이래, 반도체 산업의 눈부신 발전으로 경제적이고, 대량생산이 가능한 상온에서 단일 종모드로 발진하는 제품이 생산되어 지고 있다. 다이오우드 레이저는 가격이 저렴하고 주파수 대역이 넓다는 장점이 있으나, 이를 실제로 분광학 실험에 응용하기에는 선폭이 약 25MHz로 넓고, 출력이 낮다는 단점을 가지고 있다. 하지만, 1987년 B. Dahmani 등²⁾에 의해 다이오우드 레이저가 선폭 축소 및 안정화가 이루어져 분광학에 이용이 가능하여 졌다. 더 나아가, 1989년 G. J. Dixon³⁾에 의해 그동안 다이오우드 레이저가 저출력으로 발진하는 단점을 외부 증폭 공진기인 Fabry-Perot 공진기를 사용하여 극복함으로써 다이오우드 레이저에 대한 제 2조화파 발생이 가능해 졌다. 또한, 1990년 A. Hemmerich 등⁴⁾은 62mW 출력의 다이오우드 레이저, 고리형 증폭 공진기와 KNbO₃ 결정을 사용하여 파장 421nm, 출력 6.7mW의 제2조화파를 발생시켰으며, 주파수 안정화와 tuning을 실시하여 좁은 선폭의 ⁸Rb, 5S-6P 전이 스펙트럼을 관측하였다.

고리형 증폭 공진기는 선형 공진기에서 발생하는 홀 버닝(hole burning) 현상이 존재하지 않으므로 단일 모드의 출력을 쉽게 얻을 수 있으며 선형 레이저 공진기의 출력 한계를 넘는 고출력의 레이저 광원 발생에 유리하다. 또한, 공진기 내부 빔의 전파 모드(propagation mode)에서 waist가 상당히 작은 부분이 존재하므로 dye 레이저의 dye jet나 제2조화파 발생을 위한 비선형결정 등을 사용하여 높은 효율의 레이저 광원을 만들기 유리하다. 이러한 고리형 증폭 공진기는 높은 출력을 필요로 하는 분광 실험이나 제2조화파 발생 등에서 높은 효율의 파장 변환에 이용된다. 기존의 single pass에 의한 변환효율에 비해 상당히 높은 변환효율을 가짐을 입증하고 있다.

비선형결정 LiIO₃가 가지고 있는 장점은 첫째 온도에 따른 굴절률의 변화가 미약하고, 둘째 높은 damage threshold를 가지고 있어 고출력의 레이저 실험에서 이용이 가능하고, 셋째 일반적인 실험실

환경 하에서 화학적으로 안정적이며, 넷째 300nm 이하의 파장에서도 높은 투과도를 가지고, 다섯째 400nm 미만의 파장에서도 제2조화파 발생이 가능하다는 것이다.

본 논문에서는 Ca²⁺ 이온을 분광할 수 있는 397nm의 광원을 얻기 위하여 LiIO₃ 결정과 고리형 증폭 공진기를 이용한 파장 794nm인 다이오우드 레이저의 제2조화파 발생에 관하여 실험한 결과를 논하고자 한다.

2. 고리형 증폭 공진기의 제작 및 장치

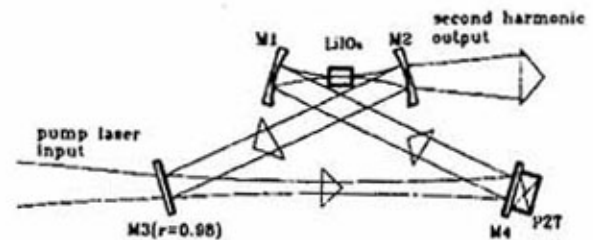


그림 1. 고리형 증폭 공진기의 구조 및 실험 장치도.
R1 = R2 = 50 mm, R3 = R4 = ∞.

그림 1은 고리형 증폭 공진기를 이용한 다이오우드 레이저의 제2조화파 발생 장치의 구조를 나타낸다. 먼저 펌프광인 다이오우드 레이저(Mitsubishi Model : ML64110N)는 35 mW의 최대 출력을 가진다. 펌프광의 파장은 0.2 nm의 분해능을 갖는 monochromator(Thermo Jarrell Ash, Model : 82-410)를 이용하여 측정하였다. 펌프광과 고리형 증폭 공진기의 기본 모드 사이에 모드매칭을 만족하기 위하여 초점거리 14.5 mm의 볼록렌즈를 이용하여 고리형 증폭 공진기의 first beam waist에 광속이 집중 되도록 정렬하였다. 계산에 의해 first beam waist의 크기는 0.2638 mm이다. 자외선 출력은 5 mm, 10 mm 두께의 결정으로 얻을 수 있었으며 공진기 내에서의 빔 정렬은 IR(infrared) viewer를 이용하였다. 우선 비선형 매질이 없는 상태에서 최적의 정렬을 하고 결정을 두 오목 거울 사이의 beam waist에 위치시켜, 결정으로부터의 미약한 산란광이 펌프 빔의 경로로 정확히 되돌아가 다이오우드 레이저에 되반사 되도록 하였다.

발생된 자외선은 형광판으로 관측할 수 있었으며, 그 때의 출력 및 파장을 pico watt 광도계와 monochrometer 로 측정하였다.

그림 1 에서 M1, M2는 곡률 반경 50 mm 의 오목 거울이고 M3, M4는 평면 거울이다. 다이오우드 레이저는 M3를 통해 공진기로 입사되며 비선형 매질인 LiIO₃는 M1, M2 사이의 second beam waist에 위치한다. LiIO₃ 결정은 10×10, 두께 L = 5 mm 와 10 mm 를 사용하였으며, 굴절률은 λ = 794 nm 에서 1.87 이며, 광축(optic axics)에 대해 43.21° 로 절단된 것이며 결정의 양면은 파장 794 nm에 대해 무반사코팅(anti-reflection coating)을 하여 투과율을 결정 5 mm 와 10 mm 에서 96 % 로 높였다. M3는 입사되는 다이오우드 레이저(λ = 794 nm)에 대해 98 %의 반사도를 가지며 입사쪽 면은 794 nm에 대해 무반사코팅(AR coating)을 하였다. M4, M3는 794 nm에서 전반사경(반사율 99.93 %)으로 제작된 것이며, M2는 제2조화파가 투과하는 출력경으로 앞면은 794 nm에 대해서는 전반사경(반사율 99.93%), 397 nm에 대해서는 투과도는 최대(투과율 95 %)가 되도록 2색코팅(dichromatic coating)을 하였다. 거울의 뒷면은 발생된 자외선 출력이 손실 없이 투과하도록 397 nm에 대해 무반사코팅(AR coating)을 하였다.

그림 2 은 본 실험에서 사용되어진 고리형 증폭 공진기에서의 투과 곡선과 crystal 표면으로부터 되 반사된 counter-propagation mode에 의해 다이오우드 레이저가 고리형 증폭 공진기의 공진 주파수에 locking된 data이다. 공진기 내부의 총 길이는 약 650 mm이며, FSR(free spectral range)는 460



그림 2 고리형 증폭 공진기를 통과한 투과곡선. 공진기 내부에 결정이 없을 때(위), 있을 때(아래).

MHz이다.

3. 공진기 내부에서 광속의 전파 모드(propagation mode)에 관한 이론적 고찰

그림 1 과 같은 고리형 공진기의 해석은 구면경을 얇은 렌즈의 주기적 배열로 등가 변환시킴으로서 쉽게 얻을 수 있다. 그림에서 곡률 반경 R1, R2 를 갖는 구면경 M1, M2를 초점거리 f₁ = R1/2, f₂ = R2/2 를 갖는 볼록 렌즈로 대치하고 M1, M2 사이의 거리를 d = f₁ + f₂ + δ, M3와 M4를 경유하는 M1, M2 사이의 거리를 x로 표시하면, 이 공진기는 d와 x 간격의 주기적인 두 렌즈의 배열로 나타낼 수 있다. 여기에서 δ = d - f₁ - f₂는 두 구면경 간의 간격이 그들의 공 초점으로 부터 얼마 만큼 벗어나 있는지를 나타내는 변수이다. 등가 렌즈에 대해 Kogelnik-Li^[6]의 표준 공식을 적용하면 공진기의 안정화 영역과 d, x 구간에서 빔반경의 크기 및 위치 beam waist 의 크기 및 위치 등을 계산 할 수 있다. 이들은 각각 다음 식으로 표현된다.

$$\delta_{\min} < \delta < \delta_{\max} \tag{1}$$

$$w_0^2 = \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right) \left(\frac{\delta - \delta_{\min}}{\delta_{\max} - \delta} \right)^{1/2} \tag{2}$$

$$w_0^2 = \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right) \left(\frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x} \right)^{1/2} \tag{3}$$

$$z_0 = \frac{\delta}{2} + \frac{\left[f_1 x - \frac{(f_1 + f_2)^2}{2} \right]}{x - f_1 - f_2} \tag{4}$$

$$z_1 = \frac{x}{2} + \frac{(f_1 - f_2)(\delta + f_1 + f_2)}{2\delta} \tag{5}$$

여기에서

$$\delta_{\min} = \frac{(f_1 - f_2)^2}{x - f_1 - f_2} \tag{6}$$

$$\delta_{\max} = \frac{(f_1 + f_2)^2}{x - f_1 - f_2} \tag{7}$$

$$x_{\min} = (f_1 + f_2) + \frac{(f_1 - f_2)^2}{\delta} \quad (8)$$

$$x_{\max} = (f_1 + f_2) + \frac{(f_1 + f_2)^2}{\delta} \quad (9)$$

이다. 여기에서 w_0, z_0 는 second beam waist 의 크기 및 위치이고, w_1, z_1 은 first beam waist 의 크기 및 위치이다. 또, 공진기 내에서의 beam waist 가 구해지면 그 beam waist w_1 를 갖는 가우시안 빔은

$$w^2(z) = w_1^2 \left[1 + \frac{\lambda^2 z^2}{\pi^2 w_1^4} \right] \quad (10)$$

의 빔반경을 갖도록 z 방향으로 진행하기 때문에 공진기 내에서의 빔 크기를 얻을 수 있다.

본 실험에서는 $R1 = R2 = 50 \text{ mm}$ 이고, x 를 600 mm 로 공진기를 구성하였다. 위 식으로 부터 $\delta_{\min}, \delta_{\max}$ 는 각각 $0, 4.54 \text{ mm}$ 이다. 본 실험에서는 결정이 없을 때의 δ 값은 $\delta_{\min}, \delta_{\max}$ 의 중간값인 2.27 mm 로 하였다. 그 값으로 부터 수식에 의해 계산된 beam waist 는 d 구간의 중심에서 $w_0 = 16.9 \mu\text{m}$, x 의 중간에서 $w_1 = 0.2638 \text{ mm}$ 이었다.

이와 같은 조건에서 모드매칭은 first beam waist 에 대하여 행하여 졌다. 그리고 second beam waist 에 굴절율이 있는 매질이 들어갔을 경우 광속 (beam)의 경로가 짧아졌기 때문에 δ 의 적정값은

$$\delta_m = \delta + L \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right) \quad (11)$$

와 같이 늘어나야 한다. 이 식에 의해 δ_m 은 결정 두께 $5 \text{ mm}, 10 \text{ mm}$ 일 경우, 각각 $4.59 \text{ mm}, 6.92 \text{ mm}$ 이다.

4. 공진기 내부에서 광속의 출력 증폭에 관한 이론적 고찰

공진기 내부에서 광속(beam)의 출력 증폭 요인은 다음과 같은 식들에 의해 주어진다.

$$P_c = \frac{t_1}{(1 - \sqrt{r_1 r_m})^2} P_1 \quad (12)$$

$$r_m = r_2 r_3 r_4 t_{SH} \quad (13)$$

$$t_{SH} = 1 - \gamma_{SH} P_c \quad (14)$$

위 식에서 P_c 는 공진기 내부출력(intracavity power), P_1 은 다이오우드 레이저의 펌핑출력(pumping power)을 나타낸다. t_1 은 거울 M1의 투과율이고, r_1, r_2, r_3, r_4 는 각각 거울 M1, M2, M3, M4의 반사율을 나타낸다. r_m 은 공진기 내의 총손실을 나타내고, t 는 crystal의 투과도를 나타낸다. t_{SH} 는 제2조화파의 발생으로 인한 손실을 나타낸다.

공진기 내부에서 제2조화파가 발생한 출력은 다음과 같은 식에 의해 표현되어 진다.

$$P_{SH} = \gamma_{SH} \cdot P_c^2 \quad (15)$$

여기서 P_{SH} 는 제2조화파의 출력이다.

5. 결 론

그림 3은 펌프광 출력에 대한 제2조화파의 출력

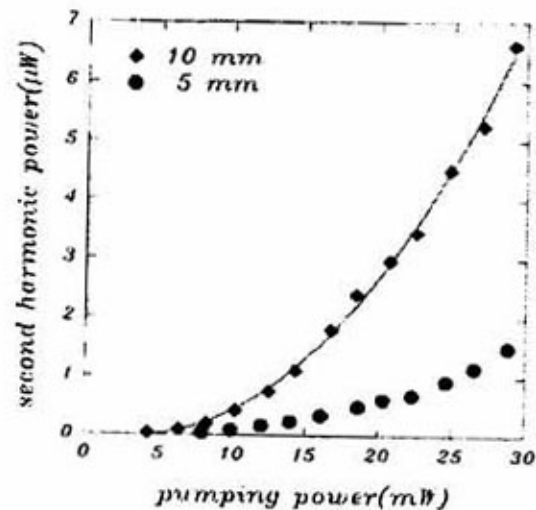


그림 3. 레이저 다이오우드의 펌핑 출력에 따른 제2조화파 출력 (LiIO₃두께 : 5 mm(●), 10 mm(◆)).

을 측정된 결과이다. 펌프광 출력에 대해 발생하는 제2조화파의 출력은 2차로 비례함을 알 수 있었으며 최대 28 mW의 펌프광으로 약 $1.5 \mu W$ (5 mm)와 $6.6 \mu W$ (10 mm)의 제2조화파를 얻을 수 있었다. single pass에 의한 측정된 출력 결과와 비교할 때, 고리형 증폭 공진기를 사용하였을 때와 대등한 결과를 얻음으로서 제2조화파의 변환효율은 증가하였음을 알 수 있다. 본 실험의 결과, 고리형 증폭 공진기를 이용함으로써 레이저 출력은 결정이 없을 시에는 45배 증강시켰고, 결정이 있을 때에는 결정의 투과율로 인하여 14배 증강이 되었다. 이 때의 펌핑출력에 대한 변환효율(conversion efficiency)은 $(2.6 \pm 0.21) \times 10^2 \%$ (10 mm), $(6.584 \pm 0.56) \times 10^3 \%$ (5 mm) 이었다.

참고문헌

- [1] G.D. Boyd and D.A. Kleinman, J. of Appl. Phys. 39(8), 3597(1968).
- [2] H. Buesener, A. Renn, M. Brieger, F. von Moers, and A. Hese, Appl. Phys. B39, 77 (1986).
- [3] A. Yariv, *Quantum Electronics*, Chap. 16, John Wiley & Sons, Inc., New York(1975).
- [4] N. G. Basov, O. N. Krokhin, and Y. M. Popov, J.E.T.P. 40, 1320(1961).
- [5] B. Dahmani, L. Hollberg and R. Drullinger, Opt. Lett. 12, 876(1987).
- [6] G. J. Dixon, C. E. Tanner and C. E. Wieman, Opt. Lett. 14(14), 731(1989).
- [7] A. Hemmerich, D. H. McIntyre, C. Zimmermann, and T. W. Hansch, Opt. Lett. 15(7), 372(1990).
- [8] H. Kogelnik, and T. Li, Proc. IEEE 54, 1312 (1966).
- [9] A. Steinbach, M. Rauner, F.C. Cruz and J. C. Bergquist, Opt. commun. 123, 207(1996).