

고리형 Enhancement Cavity를 이용한 저출력 반도체 레이저의 제 2 조화파 발생

오차환·김상기*·안준석·박윤찬
한국표준과학연구원 시간·주파수연구실

김 필 수
한양대학교 물리학과

(1993년 3월 22일 받음)

LiI₃ 결정에서 최대 출력 30 mW의 저출력 CW 반도체레이저에 대한 제 2 조화파 발생 실험을 실시하였다. 두개의 오목 거울과 두개의 평면 거울로 이루어진 고리형 enhancement 공진기를 이용하여 제 2 조화파 변환 효율을 증가시켰다. 사용된 오목 거울의 곡률 반경은 50 mm이었고, LiI₃ 결정은 길이 5 mm와 10 mm의 두개를 사용하였다. 펄핑 출력에 따른 제 2 조화파의 출력을 측정하고 이론값과 비교하였다. 794 nm의 펄핑출력이 28 mW 일 때 10 mm의 LiI₃ 결정에서 6.6 μW의 397 nm 출력을 얻을 수 있었다.

I. 서 론

최근 이온이나 원자에서의 레이저 냉각이 분광학의 획기적인 기술로 등장함에 따라 레이저 냉각에 알맞는 자외 영역의 레이저 광원을 얻으려는 연구가 활발해 지고 있다. 특히 Ca⁺, Yb⁺, Ba⁺ 이온 등 이용 가능한 거의 모든 이온은 450 nm 이하 영역의 에너지 준위를 가지기 때문에 이온의 레이저 냉각에는 자외 영역 레이저가 필수적이다.^{1,2} 자외 영역의 광원을 얻기 위한 가장 일반적인 방법은 고효율 레이저를 이용한 비선형 매질(non-linear medium)에서의 제 2 조화파 발생(second harmonic generation)이다. 1961년 P.A. Franken 등은 최초로 수정 결정에서 루비레이저 광속에 대한 제 2 조화파 발생에 성공하였다.³ 1968년 G.D. Boyd와 D.A. Kleinman은 가우스 분포를 갖는 레이저 광속을 이용한 제 2 조화파 발생 효율을 계산하였다.⁴ 그후 많은 실험이 이루어졌으며 제 2 조화파 변환 효율(conversion efficiency)을 향상시키기 위한 여러가지 방법이 제안되었다. 변환 효율을 높이는 방법으로는 크게 레이저를 펄스로 동작시키는 것⁵과 external enhancement 공진기를 사용하는 방법⁶이 있다. external enhancement 공진기로

많이 쓰이는 고리형 공진기는 선형 공진기에서 발생하는 홀 버닝(hole burning) 현상이 존재하지 않으므로 고효율의 레이저 발생이나 2차 조화파 발생시 높은 효율의 파장 변환에 유리하다. M.K. Chun 등은 injection locking된 LD array를 이용하여 KNbO₃ 결정에서 0.27%의 변환 효율을 얻었다.⁷ P.F. Curley 등은 모드록킹된 Ti:Al₂O₃ 레이저와 고리형의 external enhancement 공진기를 이용하여 7 mm의 LiI₃ 결정에서 42%의 변환 효율을 얻었다.⁸

반도체레이저는 가격이 저렴하고 발전 주파수 대역이 넓으나 레이저의 출력이 낮고 선폭이 넓은 것이 분광 실험에 응용시 단점으로 제시되어 왔다. 그러나 최근 광캐환에 의한 선폭 축소 기술이 개발되었고, 특히 저출력 CW 반도체레이저에 의한 비선형 매질에서의 제 2 조화파 발생이 성공함에 따라 분광학 분야에서 반도체 레이저의 응용이 폭 넓어 지고 있다. 1989년 G.J. Dixon 등은 단일 종모드로 발전하는 12.4 mW의 저출력 CW 반도체레이저와 Fabry-Perot형 공진기를 이용하여 KNbO₃ 결정에서 0.215 mW의 432 nm 광원을 얻었다.⁹ A. Hemmerich 등은 고리 공진기를 이용하여 62 mW의 CW 반도체레이저 출력으로 6.7 mW의 421 nm 출력을

* 한양대학교 물리학과

연였으며, 주파수 안정화와 tuning을 실시하여 좁은 선폭의 85Rb, 5S-6P 전이 스펙트럼을 관측하였다.¹⁰⁾

지금까지 CW 반도체레이저를 이용한 대부분의 실험들은 420 nm 파장대의 제 2 조화파 발생을 보고하고 있으며, 제 2 조화파 발생 매질도 비선형 계수가 큰(2.1×10^{11} m/V) KNbO₃ 결정을 사용하였다. 그러나 KNbO₃의 사용 가능 영역은 840~950 nm이기 때문에 400 nm 이하의 자외선 발생에는 이용할 수가 없다. 400 nm 이하의 영역에서 잘 알려진 비선형 매질은 LiIO₃와 BBO이다. 이들의 비선형 계수는 KNbO₃에 비해 낮으나 사용 파장대가 넓고 흡수가 작다는 장점을 가진다.

본 실험에서는 반도체 레이저의 제 2 조화파 발생에 의해 Ca⁺ 이온의 검출에 필요한 397 nm 광원을 얻었다. 제 2 조화파 변환 효율을 증가시키기 위하여 고리형의 enhancement 공진기를 이용하였으며, LiIO₃ 결정을 이용해 최대 출력 30 mW의 저출력 반도체레이저에 대한 제 2 조화파를 발생시켰고, 그 결과를 이론값과 비교하였다.

II. 고리형 공진기를 이용한 제 2 조화파 발생

일반적으로 제 2 조화파 출력은 펌프 레이저 출력의 제곱에 비례한다. G.D. Boyd와 D.A. Kleinman의 계산 결과에 따르면,¹⁴⁾ 제 2 조화파 출력을 P_2 , 펌프 레이저의 출력을 P_1 이라 할 때,

$$P_2 = \gamma_{SH} P_1^2 = 2(\omega^2 d_{eff}^2 kL / \pi n^3 \epsilon_0 c^3) \cdot h(B, \xi) P_1^2 \quad (1)$$

이다. 여기에서, γ_{SH} 는 제 2 조화파 변환 계수(conversion coefficient)라 한다. ω 와 k 는 각각 펌프광의 각주파수 및 파수(wave number)이고, n 은 펌프광 파장에서 매질의 굴절률이며, ϵ_0 와 c 는 각각 진공중의 유전 상수(permittivity)와 광속도이다. 그리고, L 은 매질의 길이이며, d_{eff} 는 매질의 유효 비선형 계수(nonlinear coefficient)이다. d_{eff} 는 위상정합 각 θ_m 에 의해 $d_{eff} = d_{31} \sin(\theta_m)$ 으로 주어지며, LiIO₃ 결정의 경우 비선형 계수 d_{31} 은 7.5×10^{-12} m/V으로 알려져 있다.¹⁶⁾ 윗 식에서 $h(B, \xi)$ 는 walk-off factor B와 focusing parameter ξ 에 의해 결정되는 focusing factor라 한다. $h(B, \xi)$ 는

$$h(B, \xi) = (w_x/w_y)^{1/2} (L_o/L) \tan^{-1}(\xi) \quad (2)$$

으로 표현되며, 여기에서 L_o 는 $L_o = \pi^{1/2} w_x / \rho$ 로 주어진다. 또, ξ 는 $\xi = L/w_x w_y k$ 이며 w_x 와 w_y 는 beam waist에서 레이저 빔의 반경을 나타낸다. 이론식에 의해 주어지는 794 nm 파장에서의 위상 정합각 θ_m 및 walk-off angle ρ 는

LiIO₃에 대해 42.98°와 87.26 mrad이다. 또, 길이가 5 mm이고 $w_x = w_y = 16.9 \mu\text{m}$ 일 때, ξ 값은 1.1843이며, $h(B, \xi)$ 는 0.0597로 계산된다.

고리공진기에 의한 펌프광 출력의 증가율은 공진기를 이루는 거울의 반사율과 비선형 매질의 투과도 및 제 2 조화파 변환 계수에 의해 결정되며 입사 출력을 P_i 이라 할 때, 공진기 내부출력(intra-cavity power) P_c 는^{6,8)}

$$P_c = t_1 / (1 - \sqrt{r_1 r_m})^2 P_i \quad (3)$$

$$r_m = r_2 r_3 r_4 t_{SH} \quad (4)$$

$$t_{SH} = (1 - \gamma_{SH} P_c) \quad (5)$$

의 연립 방정식으로부터 얻어진다. 여기에서, r_1, r_2, r_3 와 r_4 는 고리공진기 거울의 반사도이며, t_{SH} 는 제 2 조화파로의 변환에 의한 펌프광의 손실을 나타낸다. 또, t 는 비선형 매질의 투과도이며 r_m 은 거울의 반사도와 제 2 조화파로의 변환 및 비선형 매질의 투과도로 인해 발생하는 공진기 내에서의 펌프광의 총 손실을 나타낸다. 윗 식으로부터 공진기 내부출력은 입사되는 펌프 출력에 비해 크게 증가함을 알 수 있으며, 고리공진기 내부에 위치한 비선형 매질에 의한 제 2 조화파 출력은 이론식 (1)의 P_i 을 P_c 로 대체함으로써

$$P_{SH} = \gamma_{SH} P_c^2 \quad (6)$$

으로 표현된다.

III. 실험 장치 및 방법

그림 1은 고리형 공진기를 이용한 반도체레이저의 제 2 조화파 발생 장치의 구조를 나타낸다. 그림에서 M1, M2는 곡률 반경 50 mm의 오목 거울이고 M3, M4는 평면 거울이다. 반도체레이저는 M3를 통해 공진기로 입사되며 비선형 매질인 LiIO₃는 M1, M2 사이의 beam waist에 위치한다. LiIO₃ 결정은 10 mm×10 mm, 길이 5 mm와 10 mm 짜리의 두개를 사용하였으며, 모두 광축에 대해 43.21도로 cutting 하였고 결정의 양면은 794 nm에 대해 AR coating 하였다. M3는 입사되는 반도체레이저(794 nm)에 대해 98%의 반사도를 가지며 입사 쪽 면은 794 nm에 대해 AR coating 하였다. M1, M4는 794 nm에서 전반사경으로 제작된 것이며, M2는 제 2 조화파가 투과하는 출력경으로 앞면은 794 nm에 대해서는 전반사경, 397 nm에 대해서는 투과도가 최대가 되도록 2색 coating 하였다. 거울의 뒷면은 발생된 자외선 출력이 손실없이 투과 하도록 397 nm에 대해 AR coating을 하

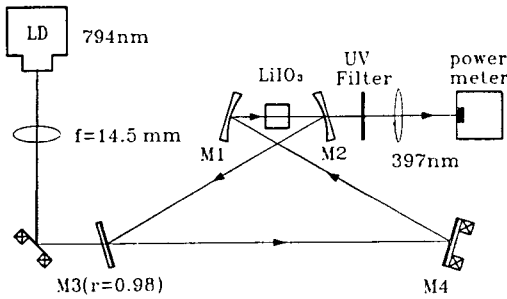


그림 1. 고리형 공진기를 이용한 저출력 반도체레이저의 제 2 조화파 발생 장치도.

였다.

펌프광인 반도체레이저는 Mitsubishi사 제품(model: ML64110N)으로 30 mW의 최대 출력을 가진다. 레이저의 온도 조절이나 주입 전류원은 모두 본 연구실에서 자체 제작한 것을 사용하였다. 레이저 다이오드는 2단의 thermo-electric cooler에 의해 조절되며 약 ±1 mK의 안정도를 나타낸다. 레이저의 적정 주입전류는 약 140 mA이고 상온에서의 발진 파장은 794 nm이다. 펌프광의 파장은 0.2 nm의 분해능을 갖는 monochrometer(Thermo Jarrell Ash, model: 82-410)를 이용하여 측정하였다. 펌프광과 고리공진기의 기본 모드 사이에 모드 매칭을 만족하기 위하여 렌즈를 이용하여 펌프광을 집속하였다. 본 실험에서는 14.5 mm의 초점 거리를 갖는 렌즈를 사용하여 펌프광을 M3, M4 사이의 beam waist에 집속함으로써 모드 매칭하였으며, 공진기 내에서의 빔 정렬은 IR viewer 를 이용하였다. 우선 비선형 매질이 없는 상태에서 최적의 정렬을 하고 결정을 두 오목 거울 사이의 beam waist에 위치시켜, 결정으로부터의 미약한 산란광이 펌프빔의 경로로 정확히 되돌아가 반도체레이저 공진기로 되반사 되도록 하였다. 공진기 내부출력은 공진기 투과 출력에 비례하기 때문에 광검출기로써 공진기 투과 출력을 측정하여 투과 출력이 최대가 되도록 공진기 거울을 조정함으로써 최적의 정렬을 하였다. 발생된 자외선은 형광판으로 관측할수 있었으며, 광필터를 통과한 자외선 출력 및 파장을 pico watt 광도계와 monochrometer로 측정하였다.

IV. 실험결과 및 토의

그림 1의 고리형 공진기의 해석은 구면경을 얇은 렌즈의 주기적 배열로 등가 변환 시킴으로서 쉽게 얻을 수 있다.^[1] 그림에서 곡률 반경 R1, R2를 갖는 구면경

M1, M2 를 초점거리 $f_1=R_1/2$, $f_2=R_2/2$ 를 갖는 블록렌즈로 대체하고 M1, M2 사이의 거리를 $d=f_1+f_2+\delta$, M3와 M4를 경유하는 M1, M2 사이의 거리를 x로 표시하면 이 공진기는 d와 x 간격의 주기적인 두 렌즈의 배열로 나타낼 수 있다. 여기에서 $\delta=d-f_1-f_2$ 는 두 구면경 간의 간격이 그들의 공 초점으로부터 얼마 만큼 벗어나 있는지를 나타내는 변수이다. 등가 렌즈계에 대해 Kogelnik-Li의 표준 공식을 적용하면 공진기의 안정화 영역과 d, x 구간에서 빔반경의 크기 및 위치 beam waist의 크기 및 위치 등을 계산 할 수 있다. 이들은 각각 다음 식으로 표현된다.

$$\delta_{min} < \delta < \delta_{max} \tag{7-1}$$

$$\omega_0^2 = (\lambda/2\pi) [(\delta - \delta_{min})(\delta_{max} - \delta)]^{1/2} \tag{7-2}$$

$$\omega_x^2 = (\lambda/2\pi) [(x - x_{min})(x_{max} - x)]^{1/2} \tag{7-3}$$

$$z_0 = \delta/2 + \langle 2f_1 x - (f_1 + f_2)^2/2 \rangle / (x - f_1 - f_2) \tag{7-4}$$

$$z_x = x/2 + (f_1 - f_2)(\delta + f_1 + f_2)/2\delta \tag{7-5}$$

여기에서

$$\delta_{min} = (f_1 - f_2)^2 / (x - f_1 - f_2) \tag{8-1}$$

$$\delta_{max} = (f_1 + f_2)^2 / (x - f_1 - f_2) \tag{8-2}$$

$$x_{min} = (f_1 + f_2) + (f_1 - f_2)^2 / \delta \tag{8-3}$$

$$x_{max} = (f_1 + f_2) + (f_1 + f_2)^2 / \delta \tag{8-4}$$

이다. 또, 공진기 내에서의 beam waist가 구해지면 그 beam waist ω_0 를 갖는 가우시안 빔은

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 [1 + \lambda^2 z^2 / \pi^2 \omega_0^4] \tag{9}$$

의 빔 반경을 갖도록 z 방향으로 진행하기 때문에 공진기 내에서의 빔 크기를 얻을 수 있다. 본 실험에서는 $R_1=R_2=50$ mm이고, x를 600 mm로 정하였다. 윗 식으로부터 δ_{min} , δ_{max} 는 각각 0, 4.54 mm이다. δ 값에 따른 공진기에서의 beam waist의 크기는 그림 2와 같다. δ 값 허용치의 양쪽 경계에서는 공진기 안정도가 급격히 떨어지기 때문에 공진기 설계시 δ 값은 허용치의 중간값을 잡는 것이 좋다. 본 실험에서도 δ 값은 δ_{min} , δ_{max} 의 중간 값인 2.27 mm를 선택하였다. 그 값으로부터 수식에 의해 계산된 beam waist는 d 구간의 중심에서 $w_0=16.9 \mu\text{m}$, x의 중간에서 $w_x=0.2638$ mm이었다. 이러한 조건에서 공진기 내부의 빔의 전달은 그림 3과 같다.

실험에 사용된 LiIO₃ 결정의 제 2 조화파 변환 효율을

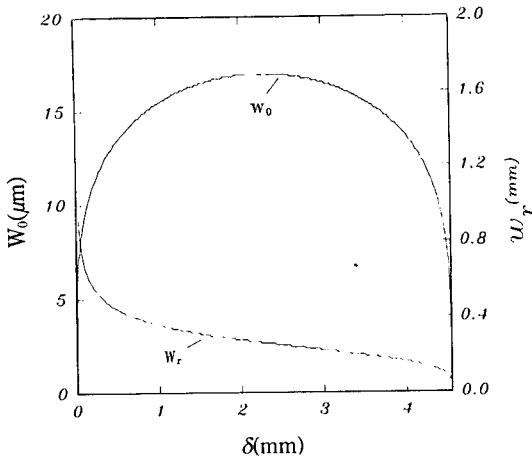


그림 2. 값에 따른 고리형 공진기에서의 beam waist의 변화.

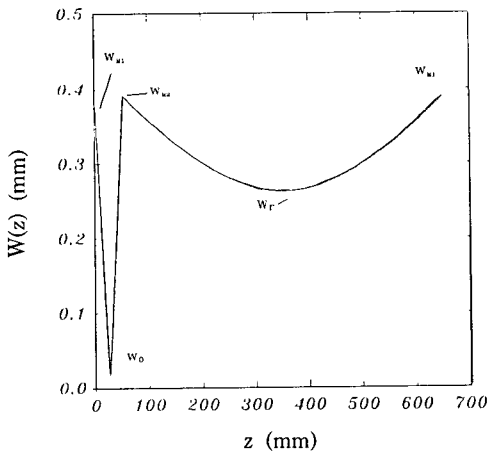


그림 3. 고리공진기 내부의 빔의 전달($x=600$ mm, $\delta=2.27$ mm).

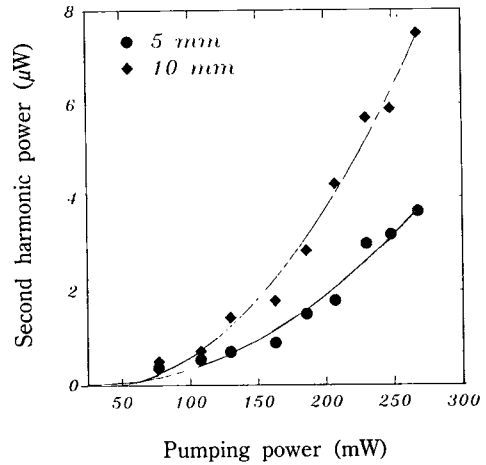


그림 4. Single pass에 의해 LiIO₃ 결정에서 얻어진 Ti:sapphire 레이저의 제 2 조화파 출력.

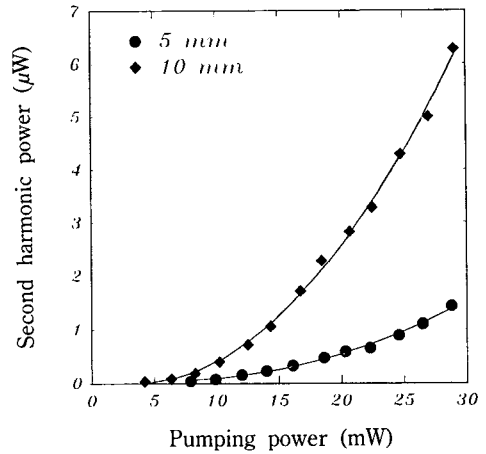


그림 5. 고리 공진기를 이용한 경우 794 nm 반도체레이저 입사 출력에 대한 제 2 조화파 출력.

측정하기 위하여 single pass에 의한 794 nm CW Ti:sapphire 레이저의 제 2 조화파 출력을 측정하였다. 그림 4에 Ti:sapphire 레이저 출력에 대한 제 2 조화파 출력이 나타나 있다. 평균관을 이용하여 관측한 결과 제 2 조화파가 발생하기 시작하는 최소 펌핑 출력은 약 42 mW임을 알 수 있었다. 그림에서 실선은 측정 결과를 $\gamma_{SH}P_1^2$ 의 2차 곡선에 least square fitting한 것이다. 이로부터 사용된 LiIO₃ 결정의 변환 계수를 구하였으며 변환 계수 γ_{SH} : 5 mm LiIO₃에 대해 $(5.28 \pm 0.33) \times 10^{-5} W^{-1}$ 이었고, 10 mm에 대해서는 $(1.06 \pm 0.05) \times 10^{-4} W^{-1}$ 이었다. 이러한 값은 S. Bourzeix 등의 결과^[12]와 잘 일치한다. 이론

식에서 알 수 있듯이 변환 계수는 매질의 길이에 선형적으로 비례하였다.

그림 5는 고리 공진기를 이용하였을 때 레이저 다이오드 펌프광 출력에 대한 제 2 조화파의 출력을 측정된 결과이다. 그림 4의 결과와 비교할 때, 고리 공진기를 이용함으로써 single pass의 경우 보다 낮은 펌프 출력으로도 제 2 조화파 발생이 가능하였으며 출력도 유사한 수준이었다. 펌프 출력이 28 mW일 때 5 mm의 LiIO₃에서 약 1.5 μW , 10 mm에서 약 6.6 μW 의 제 2 조화파를 얻을 수 있었다. 이 경우 공진기 내부 출력은 약 400 mW로 고리 공진기를 이용함으로써 약 14배의 출력 증강 효과를

얻었음을 알 수 있다.

측정 결과를 이론값과 비교하기 위하여, 식 (3)~(5)에서 얻어지는 P_2 와 (1), (6)식을 이용하여 제 2 조화파 출력을 계산하였다. 이때, beam waist는 레이저 다이오드의 표준 발산각의 비인 $w_x=16.9 \mu\text{m}$, $w_y=42.6 \mu\text{m}$ 로 하였으며, 그에 따라 변환계수 γ_{SH} 는 (1), (2) 식과 그림 4에서 측정된 값으로부터 5 mm LiIO_3 에 대해 $2.01 \times 10^{-5} \text{W}^{-1}$, 10 mm에 대해서는 $4.14 \times 10^{-5} \text{W}^{-1}$ 을 이용하였다. 또, (3)~(5) 식에서 공진기 거울의 반사율은 $r_2=r_3=r_4=0.9993$, $r_1=0.98$, $t_1=0.02$ 이었다. 또, 결정의 투과도 t 는 실험적으로 측정된 값을 이용하였으며, spectrophotometer로 측정된 결과 $t=0.96$ 이었다. 그림 6은 이론식에

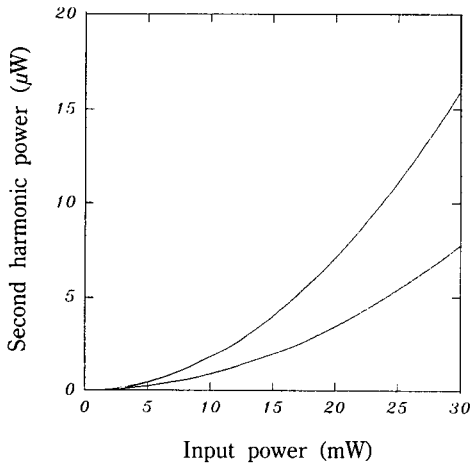


그림 6. 펌프 출력에 따른 제 2 조화파 출력의 계산치 ($t=0.96$).

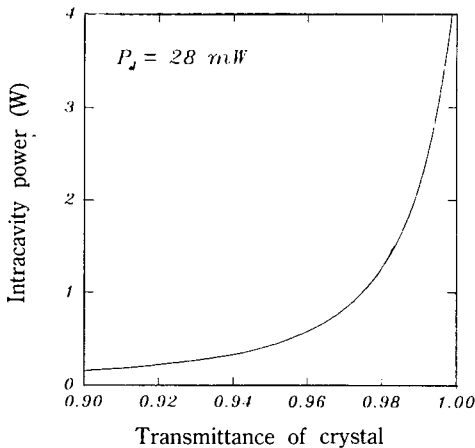


그림 7. 고정된 입사출력에서 결정의 투과도에 따른 공진기 내부출력의 계산치 ($P_1=28 \text{mW}$).

의해 계산된 펌프 출력에 따른 제 2 조화파의 출력을 나타낸다.

펌프 출력이 28 mW일 때 예상되는 제 2 조화파 출력은 10 mm 결정에 대해 $13 \mu\text{W}$, 5 mm에 대해 약 $6.3 \mu\text{W}$ 이다. 그림 5의 실험값과 비교할 때 본 실험에서 얻은 값은 이론값에 비해 10 mm에서는 50%, 5 mm에 대해서는 약 25% 수준임을 알 수 있다. 아직까지 계산값과의 차이를 설명할 수는 없으나, 몇가지 원인으로 모드 매칭의 불완전성이나 사용된 공진기의 불안정, 결정축의 불일치나 결정의 결함 등을 들 수 있다.^[9,10] 실험적으로는 레이저 빔이 통과하는 결정면에 따라 공진기 내부 출력이 매우 민감하게 변화하는 것을 관측할 수 있었다. 사용되는 결정면은 수십 μm 반경의 작은 부분을 사용하기 때문에 결정의 작은 결함도 결정의 투과도에 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 그림 7에 펌프 출력을 고정하였을 때 이론식으로 계산된 결정의 투과도에 따른 공진기 내부 출력의 변화가 나타나 있다. 그림에서 보듯이 공진기 내부출력은 결정의 투과도에 따라 매우 민감하게 변함을 알 수 있다. 그러므로 실험시 결정의 투과도를 최대화하는 것이 중요하다. 본 실험에 사용된 LiIO_3 결정의 투과도는 spectrophotometer로 측정된 결과 794 nm에서 $t=0.96$ 으로 다소 낮았다. LiIO_3 결정의 흡수도를 감안할 때 AR coating을 좀더 세심히 함으로서 투과도를 $t=0.98$ 까지 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그림에서 보듯이 $t=0.98$ 일 때 공진기 내부 출력은 $t=0.96$ 의 경우보다 2배 이상 높으며, 제 2 조화파 출력을 5배 정도 향상시킬 수 있을 것으로 여겨진다.

사진 1은 고리공진기 출력단에서 얻은 397 nm와 794 nm 광속이 프리즘에 의해 분할된 모습을 나타낸다.

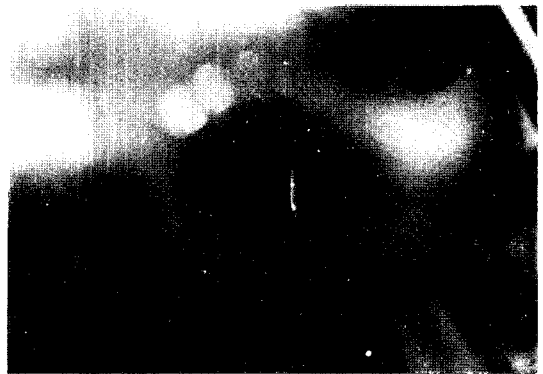


사진 1. 고리공진기 출력단에서 얻은 397 nm 및 794 nm 광속이 프리즘에 의해 분할된 모습.

V. 결 론

이상으로 Ca⁺ 이온의 분광에 이용될 397 nm 광원을 얻기 위하여 고리형 enhancement cavity를 이용하여 5 mm와 10 mm 짜리 LiIO₃ 결정에서 저출력 CW 반도체 레이저의 제 2 조화파 발생을 실시하였다. 펄프 출력이 28 mW일 때 10 mm LiIO₃ 결정에서 약 6.6 μW, 5 mm에 대해서는 1.5 μW의 제 2 조화파를 얻을 수 있었다. 지금까지 비선형도가 큰 KNbO₃를 이용한 420 nm 영역에서의 제 2 조화파 발생 결과는 많이 보고되었으나, 저출력 CW 반도체레이저를 이용하는 LiIO₃에서의 400 nm 미만 광원 발생은 본 실험에서 처음으로 성공한 것이다.

앞으로 발생된 자외선 광의 출력을 증가시키는 것과 동시에 주파수를 안정화 하는 연구가 계속되어야 하겠고, 397 nm 파장의 광원은 Ca⁺ 이온의 분광 및 레이저 냉각에 응용될 수 있기 때문에 그에 대한 연구가 계속될 것이다. 본 실험 결과는 다른 파장이나 다른 레이저에 대해서도 응용이 가능하기 때문에 앞으로 저출력 CW 레이저를 이용한 제 2 조화파 발생에 많은 도움이 되리라 여겨진다.

참 고 문 헌

[1] W. Nagourney, J. Sandberg, and H. Dehmelt,

Phys. Rev. Lett. **56**(26), 2797 (1986).
 [2] H. A. Klein, A. S. Bell, G. P. Barwood, P. Gill, and W. R. C. Rowley, IEEE Transactions of Instrum. and Measurement **40**(2), 129 (1991).
 [3] P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters, and G. Weinreich, Phys. Rev. Lett. **7**, 118 (1961).
 [4] G. D. Boyd, and D. A. Kleinman, J. of Appl. Phys. **39**(8), 3597 (1968).
 [5] P. Gunter, P. M. Asbeck, and S. K. Kurtz, Appl. Phys. Lett. **35**(6), 461 (1979).
 [6] C. S. Adams, A. I. Ferguson, Opt. Commun. **79**(3), 219 (1990).
 [7] M. K. Chun, L. Goldberg, and J. F. Weller, Appl. Phys. Lett. **53**(13), 1170(1988).
 [8] P. F. Curley, and A. I. Ferguson, Opt. Commun. **80**(5), 365 (1991).
 [9] G. J. Dixon, C. E. Tanner, and C. E. Wieman, Opt. Lett. **14**(14), 731 (1989).
 [10] A. Hemmerrich, D. H. McIntyre, C. Zimmermann, and T. W. Hansch, Opt. Lett. **15**(7), 372 (1990).
 [11] 김 점술, "Na 원자 D-선의 도플러 효과 제거 초 미세 공명신호에 대한 레이저 광펌핑의 영향에 관한 연구", 한국과학기술원 박사학위 청구논문 (1991).
 [12] S. Bouzeix, M. D. Plimmer, F. Nez, L. Julien and F. Biraben, Opt. Commun. **99**, 89(1993).

Second Harmonic Generation of Low Power Laser Diode Using a Ring Enhancement Cavity

Cha Hwan Oh, Sang Gee Kim, Jun Suck Ahn and Yoon Chan Park
 Time and Frequency Laboratory, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-606, Korea

Phil Soo Kim
 Dept. of Physics, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received: March 22, 1993)

We carried out the second harmonic generation of low power CW laser diode with maximum power of 30 mW in LiIO₃ crystals. We used a ring enhancement cavity to increase the second harmonic conversion efficiency. The ring enhancement cavity was composed of two flat mirrors and two concave mirrors. The focal length of concave mirrors was 25 mm, and 5 mm long and 10 mm long LiIO₃ crystals were used. We measured the second harmonic power according to the pumping power and compared with theoretical value. We obtained 397 nm second harmonic power of about 6.6 μW in 10 mm long LiIO₃ crystal with the fundamental 794 nm pumping power of 28 mW.