

Lithium Triborate(LiB₃O₅, LBO) 결정을 이용한 파장가변 티타늄 사파이어 레이저의 내부공진기 진동수 배가

추한태* · 박차곤 · 김규욱

금오공과대학교 자연과학부

Ⓣ 730-701 경북 구미시 신평동 188번지

(2001년 1월 16일 받음, 2001년 4월 10일 수정본 받음)

Lithium triborate(LiB₃O₅, LBO) 결정을 이용하여 파장가변 티타늄 사파이어 레이저로부터 내부공진기 구조를 이용한 진동수 배가를 수행하였다. 효과적인 진동수 배가를 수행하기 위해서 자체 개발한 파장가변 티타늄 사파이어 레이저를 이용하여 기본파의 중심 파장 및 파장 변화에 대한 LBO 결정의 스펙트럼 선폭 및 각선폭 등을 측정하였으며, 내부공진기 방법을 이용하여 진동수 배가된 제2고조파 출력 특성 및 파장 가변성 등을 측정하였다. 800 nm의 기본파 파장에서 LBO 결정의 θ 방향에 대한 스펙트럼 선폭 및 각선폭은 각각 1.54 nm·cm 및 3.8 mrad·cm으로 확인되었다. 또한 내부공진기 구조를 이용한 진동수 배가 결과, 기본파의 출력이 800 nm에서 185 mW일 때, 400 nm에서 스펙트럼의 반치폭이 0.089 nm인 5.3 mW의 제2고조파 출력을 얻을 수 있었고, 진동수 배가된 출력의 파장가변 영역은 397 nm~403 nm로 확인되었다.
분류코드 : NL.010, LO.080.

I. 서 론

최근에는 티타늄 사파이어 레이저(Ti:sapphire laser)와 Cr:LiSAF 레이저 등과 같은 파장가변 고체 레이저로부터 청색 광원을 얻기 위해서 비선형 결정인 lithium triborate(LiB₃O₅, LBO), lithium iodate(LiIO₃), beta-barium borate(β -BaB₂O₄, BBO) 결정 등을 이용한 진동수 배가 방법(frequency doubling)을 이용하고 있다. 이러한 고체레이저의 진동수 배가 방법에는 비선형 결정을 펄핑 레이저 공진기의 외부에 별도로 구성하는 외부공진기 방법^[1-4]과 공진기의 내부에 포함시키는 내부공진기 방법^[5-8]을 주로 사용한다. 외부공진기 방법은 제2고조파(second-harmonic generation) 변환 효율이 다소 감소되고, 공진기 구성이 복잡하지만 빔살(beam)의 질이 매우 양호한 단일 진동수의 제2고조파를 얻을 수 있다. 이에 반해 내부공진기 구조를 이용하면 공진기 구성이 매우 간편해지고 고효율의 제2고조파를 얻을 수 있으므로 단일 진동수를 요구하지 않는 고효율의 파장가변 자외선 및 극자외선 광원을 얻기에 매우 적합하다.

안정되고 고효율의 진동수 배가를 위해서는 공진기 구조 뿐만 아니라 비선형 결정의 선택도 매우 중요하다. LBO 결정은 1989년 C. Chen 등에 의해 새롭게 개발되었으며,^[9] 유전체 축(dielectric axes)인 X-축, Y-축 및 Z-축이 결정학적 축(crystallographic axes)인 a-축, c-축 및 b-축에 각각 평행한 음의 쌍축성(negative biaxial) 결정으로^[10] 티타늄 사파이어 레이저의 중심 파장인 800 nm에서 BBO 결정과 LiIO₃ 결정에 비해 비선형 광학 계수(1 pm/V)는 다소 작지만 제2고조파 변환 계수($\gamma_{SH} = 2.04 \times 10^{-5}$ W)가 크며 기본파의 파장에 대한 외부

수용각(external acceptance angle)이 더 넓다. 또한 복굴절에 의한 벗어남 각(walk-off angle, $\rho = 17$ mrad)이 매우 작으며 결정 손상 문턱값(약 10 GW/cm²)이 크므로 최근에 티타늄 사파이어 레이저의 진동수 배가를 위한 비선형 결정으로 주로 이용되고 있다. 실제로 S. Bourzeix 등은 LBO 결정을 이용한 외부공진기 방법으로 820 nm에서 1.9 W의 출력을 갖는 티타늄 사파이어 레이저로부터 진동수 배가된 410 nm에서 410 mW의 출력을 얻었으며,^[3] C. S. Adams 등은 같은 방법으로 360 nm부터 400 nm의 파장 영역에서 10 mW 이상의 출력과 380 nm에서 최대 60 mW의 출력을 얻었다.^[4] 또한 W. L. Zhou 등은 연속발진 티타늄 사파이어 레이저로부터 조화거울(harmonic mirror)을 이용한 내부공진기 방법으로 389 nm에서 460 mW인 고효율(36% 이상의 변환 효율)의 청색 광원을 얻었다.^[8]

본 실험에서도 LBO 결정을 이용하여 파장가변 티타늄 사파이어 레이저로부터 내부공진기 구조를 이용한 진동수 배가를 수행하였다. 효과적인 진동수 배가를 수행하기 위해서 자체 개발한 파장가변 연속발진 티타늄 사파이어 레이저를 이용하여 LBO 결정의 파장에 따른 위상정합각(phase-matching angle)을 측정하고, 기본파(fundamental wave)의 중심 파장 및 파장 변화에 대한 LBO 결정의 스펙트럼 선폭(spectral bandwidth) 및 각선폭(angular bandwidth) 등의 광학적 특성을 측정하여 이론값과 비교하였으며, 내부공진기 방법을 이용하여 진동수 배가된 제2고조파 출력 특성 및 파장가변성 등을 측정하였다.

II. 이 론

LBO 결정은 유전체 축인 X-축, Y-축 및 Z-축이 결정학적

*E-mail: htchoo@knut.kumoh.ac.kr

표 1. LBO 결정에 대한 굴절률 상수값

C. Chen	A	B	C	D	K. Kato	A	B	C	D
x	2.4517	0.01177	0.00921	0.00960	x	2.4542	0.01125	0.01135	0.01388
y	2.5279	0.01652	-0.005459	0.01137	y	2.5390	0.01277	0.01189	0.01848
z	2.5818	0.01414	0.01186	0.01457	z	2.5865	0.01310	0.01223	0.01861

축인 a-축, c-축 및 b-축에 각각 평행한 사방정계[orthorhombic, (a≠b≠c(a=8.447 Å, b=7.7488 Å, c=5.1359 Å), α=β=γ=90°] 구조이며, X-축, Y-축 및 Z-축에 대하여 n_z>n_y>n_x의 굴절률을 갖는 음의 쌍축성 결정으로 알려져 있다.^[10,11] 이때, 파장에 따른 각 축에 대한 굴절률 방정식은 Sellmeier 방정식에 따라

$$n_{x,y,z}^2 = A_{x,y,z} + \frac{B_{x,y,z}}{\lambda^2 - C_{x,y,z}} - D_{x,y,z} \lambda^2 \quad (1)$$

과 같이 주어진다. 여기서, 파장인 λ의 단위는 μm이며 A_{x,y,z}, B_{x,y,z}, C_{x,y,z} 및 D_{x,y,z}는 분산상수(dispersion constant)로써 C. Chen 등^[9]과 K. Kato^[12]가 구한 값을 표 1에 나타내었다.

또한 기본파에 대한 Type-I 제2고조파 발생을 위한 위상정합각은

$$\sin \phi_m = \left[\frac{(n_{z1})^{-2} - (n_{y2})^{-2}}{(n_{x2})^{-2} - (n_{y2})^{-2}} \right]^{1/2} \quad (2)$$

으로 주어진다.^[10] 여기서, 아래 첨자인 1과 2는 각각 기본파 및 제2고조파 파장에 대한 굴절률을 나타내며, 티타늄 사파이어 레이저의 중심 파장인 800 nm에서의 위상정합각 φ_m은 식 (1), 표 1 및 식 (2)를 이용하여 계산하면 Chen 값과 Kato 값에 대하여 각각 33.740° 및 31.689°가 된다.

한편, LBO 결정의 스펙트럼 선폭인 Δλ · L(nm · cm)은 길이가 L인 결정이 고정된 위상정합각인 φ_m에 대하여 기본파의 파장 변화에 대한 제2고조파 출력의 반치폭(full width at half maximum, FWHM)으로 정의되며, 이론적인 스펙트럼 선폭은

$$\Delta \lambda \cdot L = \frac{0.0442 \lambda_1}{[(\partial n_{z1} / \partial \lambda_1 - 0.5(\partial n_{e2}(\phi) / \partial \lambda_2))]} \quad (3)$$

으로 주어진다. 여기서, n_{e2}(φ_m) = [sin²φ_m(n_{x2})² + cos²φ_m(n_{y2})²]^{-1/2}는 φ_m에 대한 제2고조파 굴절률을 나타내고, λ₁과 λ₂는 각각 기본파 및 제2고조파 파장으로 단위는 μm이다.

각선폭인 Δφ · L(mrad · cm)은 길이가 L인 LBO 결정이 고정된 기본파의 파장에 대하여 외부 각 변화에 대한 제2고조파 출력 세기의 반치폭으로 결정되며

$$\Delta \phi \cdot L = \frac{0.0884 \lambda_1}{n_{z1}^2 (n_{x2}^{-2} - n_{y2}^{-2}) \sin 2 \phi_m} \quad (4)$$

로 주어진다.^[10]

또한 G. D. Boyd와 D. A. Kleinman의 집속된 가우시안 빛살(focused Gaussian beam)^[13]과 R. C. Eckardt 등의 비점수차(astigmatism)가 존재하는 빛살^[14]에 의한 제2고조파 변환 계수(conversion coefficient) γ_{SH}는

$$\gamma_{SH} = \frac{P_{intra}(2\omega)}{P_{cir}^2(\omega)} = \frac{2\omega^2 d_{eff}^2 k_1 L}{\pi \epsilon_0 n^3 c^3} h(B, \xi_y) \frac{w_y}{w_x} \quad (5)$$

로 주어진다. 여기서, P_{intra}(2ω)는 공진기 내부의 단일 경로(single-pass)에 의해 발생하는 제2고조파 출력이며, P_{cir}(ω)는 공진기 내부에서 순환(circulation)하는 기본파의 출력이고, ω와 k₁는 각각 기본파의 각진동수(angular frequency) 및 파동벡터(wave vector)이며, ε₀는 자유공간의 유전률(permittivity), L은 결정의 길이, n은 기본파에 대한 위상정합 방향으로의 굴절률, c는 빛의 속도 그리고 d_{eff}는 유효 비선형 계수(effective nonlinear coefficient)를 나타낸다. 또한, h(B, ξ_y)는 Boyd와 Kleinman^[13]의 집속 인자(focusing factor)로 복굴절 인자 B = (ρ/2)(Lk₁)^{1/2}와 집속 파라메타(focusing parameter) ξ_y = L/(k₁w_y²)의 함수로 주어지며, ρ는 복굴절에 의한 벗어남 각(walk-off angle)이며, w_x와 w_y는 각각 결정의 입사면(incident plane) 방향 및 입사면에 수직인 빛살의 반경이다. 따라서 제2고조파 발생을 위한 내부공진기 구조에서 공진기 내부에 있는 길이 L = 0.8 cm의 LBO 결정을 w_x = 96 μm와 w_y = 174 μm의 비대칭 기본파로 집속할 경우,^[8] 기본파의 파장이 800 nm일 때 n = 1.611, d_{eff} = 1 pm/V, ρ = 17 mrad이므로 B = 2.704, ξ_y = 0.021 및 h(B, ξ_y) = 0.035가 되어 γ_{SH} = 2.284 × 10⁻⁵ W⁻¹이 된다.

한편, 제2고조파 발생을 위한 내부공진기 이론에 의하면 공진기 내부의 이중 경로(double-pass)에 의해 발생하는 제2고조파 출력은 α_{HM}이라는 향상 인자(enhancement factor)에 의해 증가되며^[8,15,16]

$$\alpha_{HM} = 4 \sin^2(\Delta k L / 2) \times \cos^2(\Delta k L / 2 + 2\omega \Delta n S / c + \phi_2 / 2 - \phi_1) \quad (6)$$

로 주어진다. 여기서, Δk = k₂ - 2k₁으로 k₁과 k₂는 기본파 및 조화파의 파동벡터이며, S는 조화거울(harmonic mirror)^[16]로부터 LBO 결정 끝 면까지의 거리를 나타낸다. 또한 Δn은 기본파와 조화파에 대한 공기분산(air dispersion)이며 W. L. Zhou 등^[8]과 J. M. Yarborough 등^[17]에 의하면 798 nm/398 nm에 대하여 Δn = 8.3 × 10⁻⁶로 주어지고, Δφ - φ₂/2 - φ₁는 기본파와 조화파가 조화거울에서 반사할 때 생기는 상대적인 위상 변화를 나타낸다. 식 (6)으로부터 Δk와 Δφ 및 조화거울로부터 LBO 결정 끝 면까지의 거리 S가 제2고조파 출력에 크게 기여함을 알 수 있으며, 내부공진기를 구성할 때도 이점을 고려해야 한다. 또한 S. Helmfrid 등^[18]에 의하면 다중모드(multimode)의 기본파는 제2고조파 발생 과정에 대한 변환 효율을 단일모드(single mode)보다 최대 두 배까지 향상시킬 수 있다고 보고하였으며, W. L. Zhou 등^[8]은 기본파의 스펙트럼이 Lorentzian 분포라고 가정할 때 기본파의 스펙트럼 반치폭(0.2 nm)과 LBO 결정의 길이(0.8 cm) 및 스펙트럼 선폭(1 nm)을 고려해서 다중모드에 의한 기여 인자 β_{ML} = 1.65로 계산하였다. 따라서 내부공진기 구조에 의한 제2고조파 출력인 P_{out}(2ω)는

$$P_{out}(2\omega) = \gamma_{SH} \alpha_{MM} \beta_{ML} T_{2\omega} P_{cir}^2(\omega) \quad (7)$$

가 된다. 여기서 $T_{2\omega}$ 는 제2고조파 출력이 나오는 출력거울의 투과율이다.

III. 실험 및 결과

그림 1은 파장가변 티타늄 사파이어 레이저를 이용하여 LBO 결정의 파장 변화에 따른 위상정합각, 스펙트럼 선폭 및 각선폭 등의 광학적 특성을 측정하기 위한 실험 장치도를 나타낸다.

실험에 사용된 아르곤-이온 레이저(Coherent사, 5 W)로 펌핑하는 파장가변 티타늄 사파이어 레이저는 양면이 Brewster 각으로 가공된 직경 5 mm, 길이 9 mm의 사파이어 결정(도핑농도 : 0.1 wt%, FOM : 300, Union Carbide사)과 네 개의 거울(LayerTec사 제품)을 이용하여 비점수차(astigmatism)가 보상된 Z-자형 공진기로 구성하여 발진시켰다. 또한 공진기 내부에 삽입한 3-plate 복굴절 필터를 이용하여 발진 파장을 730 nm~908 nm까지의 가변이 가능하며, 800 nm에서 1.0 W 이상의 출력을 얻을 수 있었다. 이때, 출력거울로부터 1.5 m 떨어진 거리에서 측정된 티타늄 사파이어 레이저의 빔살 크기 (beam diameter) 및 발산각(divergence angle, 2θ)은 각각 2.5 mm 및 1.3 mrad였다.

LBO 결정은 양면이 800 nm와 400 nm에서 무반사 코팅이된 EKSMA사의 제품으로 유전체 축인 X, Y와 Z-축을 따라 크기가 각각 $8 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ 이며, 800 nm에서 $\phi_m = 31.7^\circ$ 이고 $\theta = 90^\circ$ 로 가공된 Type-I인 결정이다. 여기서, ϕ_m 은 광축을 포함한 주평면(principal plane)이 XY-평면인 결정에서 X-축으로부터 측정된 위상정합각이고, θ 는 Z-축으로부터 측정된 각을 의미한다. 이 결정을 X-축 및 Y-축 방향으로의 병진 이동이 가능한 이동대(translator) 위에 Z-축을 중심으로 XY-평면의 정밀 회전(360°)이 가능하고, X-축 및 Y-축 중심에서의 정밀한 경사각 조정($\pm 5^\circ$ 이내)이 가능한 회전자(rotator)를 장착하여 항상 일정한 온도($\pm 0.1^\circ\text{C}$)를 유지시켰다. 기본파와 제2고조파 파장 및 선폭은 분광기(ARC SpectraPro-750, 분해능 : 0.025 nm, $f = 75 \text{ cm}$, $F\# = 9.7$)를 사용하여 측정하였고, 기본파를 제거한 제2고조파 세기는 광다이오드(Hamamatsu, G1116, spectral response : 300 nm~680 nm, peak wavelength : 640 nm, rise time : 4 μs)를 통해 오실로스코프(Tektronix TDS360, 200

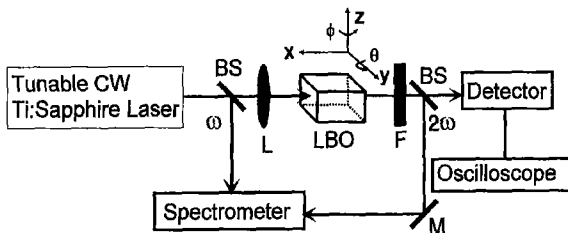


그림 1. LBO 결정의 광학적 특성을 측정하기 위한 실험 장치 구성도. BS : 광속 분할기, L : 초점거리 100 mm인 볼록 렌즈, F : 자외선 통과 필터, M : 거울.

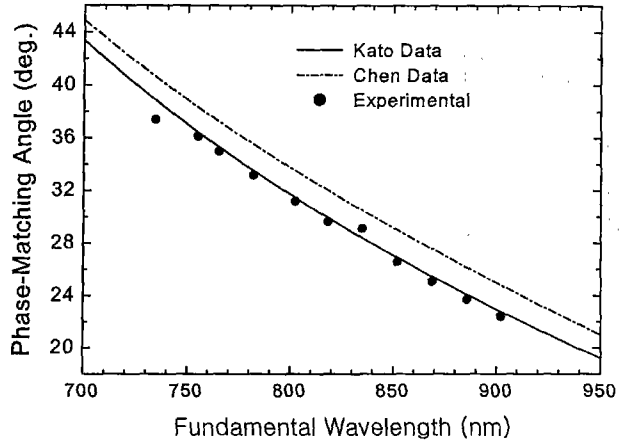


그림 2. LBO 결정의 파장에 따른 위상정합각.

MHz)로 측정하였다.

그림 2는 티타늄 사파이어 레이저의 파장 변화에 따라 측정된 LBO 결정의 위상정합각과 식 (2)에 의한 이론적인 위상정합각과의 비교 결과를 나타낸다. 이때, 제2고조파 출력 측정 데이터는 결정의 온도를 항상 20°C 를 유지시켜 8번 측정하고 평균하여 실험의 정밀도를 높였다. 실험에 의한 위상정합각은 파장 변화에 따라 LBO 결정의 X-Y 평면을 Z-축(결정의 ϕ -방향)을 중심으로 미세하게 회전시키면서 최대 출력의 제2고조파를 얻는 미세 회전각 변화를 측정하고, 각각 파장에 대한 결정의 굴절률과 측정된 회전각을 스넬의 법칙을 이용하여 내부각(internal angle)으로 변환하여 측정된 결과이다.

그림에서와 같이 본 실험에 의한 위상정합각은 C. Chen 등에 의한 결과^[9]와는 약간의 차이를 보이지만, Da-Wun Chen 등^[6]이 실험한 결과와 동일하게 K. Kato가 구한 굴절률 상수^[12]에 의한 위상정합각과 잘 일치됨을 확인할 수 있었다.

그림 3은 LBO 결정의 θ -방향과 ϕ -방향의 각을 기본파인 800 nm의 티타늄 사파이어 레이저에 대한 위상정합각($\theta = 90^\circ$, $\phi = 31.7^\circ$)에 고정하고, 고정된 각에 대하여 기본파의 파장 변화에 따른 각각의 제2고조파 출력을 측정하여 나타낸 결

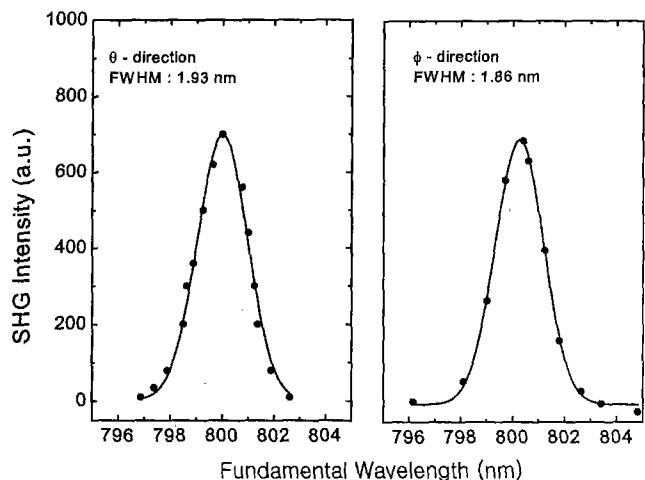


그림 3. 기본파의 파장 변화에 따른 LBO 결정의 θ -방향 및 ϕ -방향에 대한 제2고조파 출력 특성.

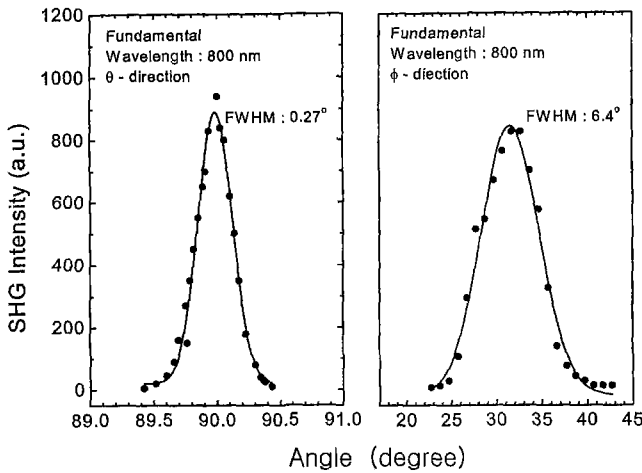


그림 4. 기본파의 파장이 800 nm일 때 LBO 결정의 θ -방향 및 ϕ -방향 회전각에 대한 제2고조파 출력 특성.

과이다.

그림에서와 같이 제2고조파 발생을 위한 결정의 θ -방향에 대한 외부 수용 파장 범위의 반치폭은 1.93 nm으로, ϕ -방향에 대한 반치폭은 1.86 nm으로 거의 비슷하게 측정되었다. 따라서 실험에 사용한 LBO 결정의 θ -방향 및 ϕ -방향에 대한 스펙트럼 선폭은 결정의 길이가 0.8 cm이므로 각각 1.54 nm·cm 및 1.49 nm·cm가 된다.

그림 4는 티타늄 사파이어 레이저의 발진 파장을 800 nm로 고정하고 LBO 결정의 θ -방향과 ϕ -방향의 각 변화에 따른 제2고조파 출력을 측정하여 나타낸 결과이다. 여기서 각 θ 는 800 nm 파장의 기본파에 대한 위상정합각을 만족한 상태에서 결정의 XZ-평면을 Y-축을 중심으로 회전시킨 각이며, ϕ 는 결정의 XY-평면을 Z-축을 중심으로 회전시킨 각을 의미한다.

그림에서와 같이 제2고조파 발생을 위한 결정의 θ -방향 회전에 대한 외부 수용각의 반치폭은 0.27로 제2고조파 출력이 결정의 θ -방향 회전에 매우 민감한 반면, ϕ -방향 회전에 대한 외부 수용각의 반치폭은 6.4로 훨씬 커짐을 확인하였다. 따라서 800 nm의 기본파의 파장에 대한 LBO 결정의 θ -방향 및 ϕ -방향에 대한 각선평폭은 결정의 길이가 8 mm이므로 각각 3.8 mrad·cm 및 89.4 mrad·cm가 된다. 이때 본 실험에서 측정 한 θ -방향에 대한 각선평폭 값인 3.8 mrad·cm은 Da-Wun Chen 등^[6]이 길이 6.0 mm와 10.26 mm의 결정을 이용하여 800 nm의 기본파로 측정한 값인 2.2 mrad·cm 및 T. Ukachi^[19] 등이 길이 3.9 mm의 결정을 1.064 μ m 기본파로 측정한 θ -방향 및 ϕ -방향에 대한 각선평폭 값인 50 mrad·cm 및 62 mrad·cm와도 많은 차이를 보이고 있으며, 이는 측정하는 기본파의 파장에 대하여 빔 크기 및 발산각과 결정의 온도 및 측정 방법 등에 기인한 것으로 생각된다. 그림 4의 측정값으로부터 제2고조파 발생을 위한 내부공진기를 구성할 때는 LBO 결정의 ϕ -방향보다도 기본파의 파장이 변화할 때 민감하게 변하는 θ -방향으로의 회전각 범위를 잘 고려하여 설계해야 함을 알 수 있다.

그림 5는 기본파의 파장 변화에 대해 민감한 LBO 결정의

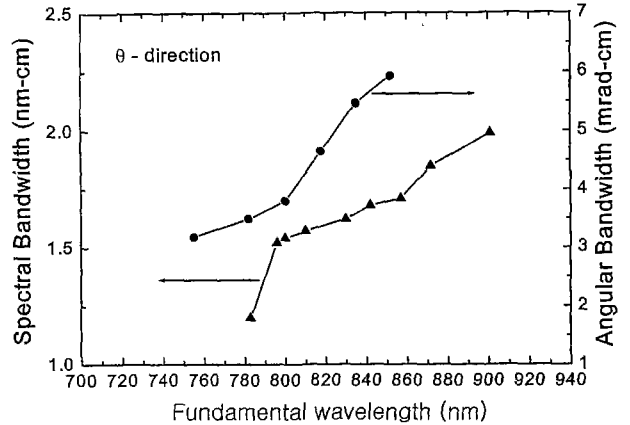


그림 5. 기본파의 파장 변화에 따른 LBO 결정의 θ -방향에 대한 스펙트럼 선폭과 각선평폭.

θ -방향의 파장에 따른 스펙트럼 선폭 및 각선평폭에 대한 측정 결과를 나타낸다.

그림에서 기본파의 파장 변화 폭은 LBO 결정의 단면적(5×5 mm²)과 길이(8 mm)로 인하여 제2고조파 출력 측정이 가능한 범위로 스펙트럼 선폭 측정은 783 nm~901 nm까지, 각선평폭 측정은 755 nm~852 nm까지로 제한되었다. 식 (3)과 식 (4)에서 예측한 바와 같이 그림에서도 기본파의 파장이 증가함에 따라 스펙트럼 선폭과 각선평폭이 증가함을 확인할 수 있었다.

그림 6는 LBO 결정을 이용하여 연속발진 티타늄 사파이어 레이저로부터 진동수 배가를 수행하기 위해서 5개의 거울을 이용한 내부공진기 구조를 나타낸다.

그림에서 M_1 과 M_2 는 아르곤 이온 레이저 파장인 514 nm 파장에 대해 무반사 코팅되고, 티타늄 사파이어 레이저의 중심 파장인 800 nm에서 고반사하는 곡률반경 10 cm의 광대역 이색(dichroic) 옉목거울이고, M_3 은 평면거울로 800 nm에서 3%의 투과율을 갖는 기본파의 출력거울이며, M_1 , M_2 및 M_3 은 모두 Layer Tec사 제품을 사용하였다. 또한 M_4 는 800 nm에서 고반사하고, 400 nm에서는 50%의 투과율을 갖는 제2고조파 출력거울이고, M_5 는 800 nm과 400 nm에서 고반사하는 조화거울(harmonic mirror)로써 두 거울 모두 곡률반경 10 cm인 CVI사 제품의 옉목거울이다. 또한 BF는 기본파의 파장 가변을 위한 복굴절 필터이며, S는 조화거울 M_5 에서 LBO 결정 끝 면까지의 거리를 나타낸다.

그림 7은 5 W의 아르곤 이온 레이저 펌핑에 대하여 M_3 에서

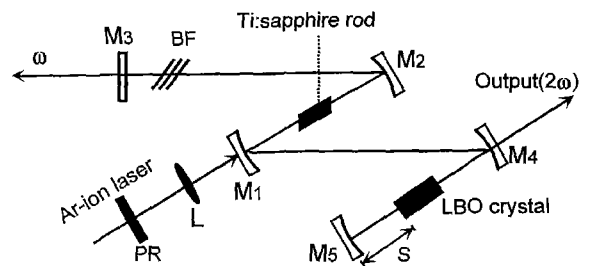


그림 6. 내부공진기 제2고조파 발생을 위한 실험 장치 구성도. BF : 복굴절 필터, S : M_5 (조화거울)에서 LBO 결정 끝 면까지의 거리.

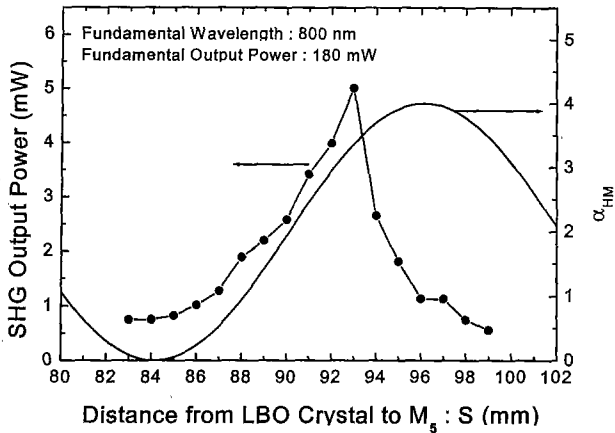


그림 7. 조화거울 M₅에서 LBO 결정 끝 면까지의 거리에 따른 제2고조파 출력 특성 및 향상 인자 α_{HM} .

의 티타늄 사파이어 레이저의 파장 및 출력이 각각 800 nm와 180 mW일 때, 조화거울 M₅와 LBO 결정 사이의 거리 S에 따른 제2고조파 출력 특성 및 향상 인자(enhancement factor)인 α_{HM} 를 나타낸 결과이다.

그림에서 오른쪽은 식 (6)으로부터 $\Delta k = 0$ 및 $\Delta\phi = 0$ 이라고 가정하고 S의 변화에 대해 나타난 α_{HM} 의 계산 결과이며 최대의 α_{HM} 값은 S=96 mm로 나타났다. 반면에 실험에 의한 최대의 제2고조파 출력은 약간의 차이를 보여 S=93 mm 일 때 5 mW로 그때의 α_{HM} 은 3.5 정도가 된다. 이는 식 (6)에서 기본파와 제2고조파에 대한 공기분산 Δn 과 위상 변화 효과를 고려하지 않았기 때문으로 생각된다.

그림 8은 S=96 mm로 고정시키고, M₃로 출력되는 파장 800 nm의 티타늄 사파이어 레이저의 기본파 출력 변화에 대한 파장 400 nm의 제2고조파 출력 특성을 나타낸 결과이다.

그림에서 실선은 식 (7)에 의한 계산 결과를 나타낸다. 기본파의 출력 변화에 대한 제2고조파 출력은 공진기 거울 코팅에 의한 손실로 다소 차이를 보이며, 185 mW의 기본파 출력에 대하여 5.3 mW의 제2고조파 출력을 얻을 수 있었다. 이러한 출력은 LBO 및 LiIO₃ 결정을 이용한 고리형 외부공진기 구조^[12]에서 제한된 기본파 출력이 각각 1.9 W 및 4.0 W에 대

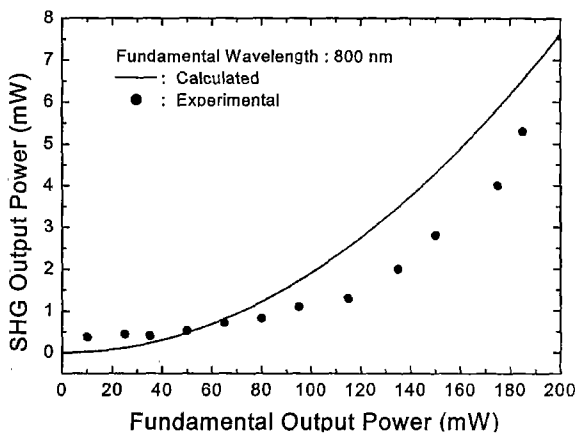


그림 8. 기본파의 출력에 대한 제2고조파 출력 특성.

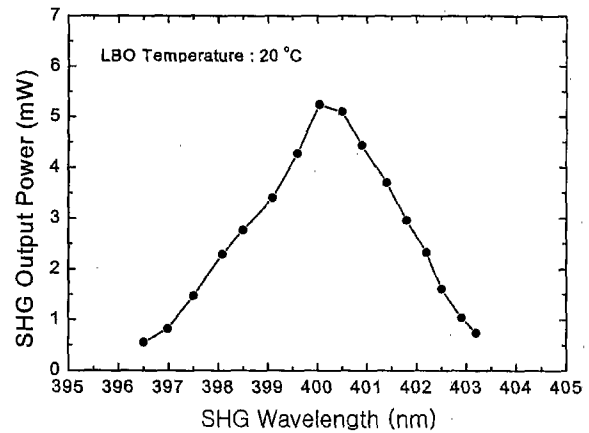


그림 9. 진동수 배가된 제2고조파 파장에 따른 출력 특성.

한 제2고조파 변환 효율이 각각 21.6% 및 36%인 것과 비교하면 상당히 낮은 효율이다. 그러나 내부공진기 방법에서도 기본적으로 펌핑 레이저의 출력과 더불어 기본파의 출력을 높이고, 출력거울인 M₄를 제외한 나머지 공진기 거울을 800 nm와 400 nm를 중심으로 넓게 고반사 할 수 있는 이색(dichroic) 거울로 대체하여 거울에서의 손실을 줄이면 제2고조파 변환 효율을 크게 향상시킬 수 있으며, 본 실험에서 얻은 그림 8의 데이터를 분석하면 30% 이상의 제2고조파 변환 효율을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

그림 9는 공진기 내부의 복굴절 필터를 이용하여 기본파의 파장을 변화시키면서 진동수 배가된 제2고조파 출력 특성을 나타낸 결과이다.

그림에서와 같이 진동수 배가된 출력의 파장가변 영역은 397 nm~403 nm로 확인되었으며, 전술한 바와 같이 공진기 거울의 고반사되는 파장 영역의 폭을 넓게 하여 출력 손실을 줄이면 제2고조파 출력의 증가와 더불어 더욱 넓은 파장 가변 영역을 얻을 수 있으리라 생각된다.

그림 10의 (a)와 (b)는 제2고조파 출력이 5.3 mW일 때의 스펙트럼과 출력거울로부터 5 cm 떨어진 곳에서 디지털 카메라로 촬영한 가우시안 세기 분포를 갖는 빛살 모양의 측정 결

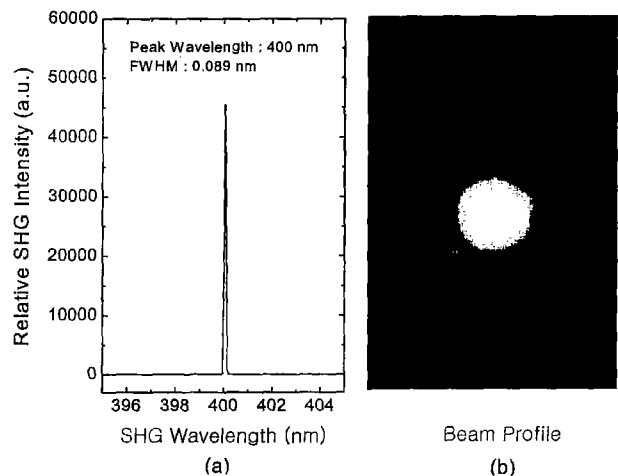


그림 10. 제2고조파 스펙트럼(a) 및 빛살 모양(b).

파를 각각 나타낸다. 그림에서와 같이 발생된 제2고조파 스펙트럼의 침두 파장은 400 nm이고 반치폭은 0.089 nm로 확인되었다.

IV. 결 론

본 실험에서는 LBO 결정을 이용하여 파장가변 티타늄 사파이어 레이저로부터 내부공진기 구조를 이용한 진동수 배가를 수행하였다. 효과적인 진동수 배가를 수행하기 위해서 자체 개발한 파장가변 티타늄 사파이어 레이저를 이용하여 LBO 결정의 파장에 따른 위상정합각(phase-matching angle)을 측정하고, 기본파의 중심 파장 및 파장 변화에 대한 LBO 결정의 스펙트럼 선폭 및 각선폭 등과 같은 광학적 특성을 측정하여 이론값과 비교하였으며, 내부공진기 방법을 이용하여 진동수 배가된 제2고조파 출력 특성 및 파장 가변성 등을 측정하였다.

본 실험에 사용한 LBO 결정의 파장 변화에 따른 위상정합각은 Kato의 결과와 잘 일치하였고, 800 nm의 기본파 파장에서 LBO 결정의 θ 방향에 대한 스펙트럼 선폭 및 각선폭은 각각 $1.54 \text{ nm} \cdot \text{cm}$ 및 $3.8 \text{ mrad} \cdot \text{cm}$ 으로 확인되었으며, 내부공진기 구조에서 조화저울(M_3)과 LBO 결정 사이의 거리가 제2고조파 출력 특성에 큰 영향을 줄을 실험적으로 확인하였다. 또한 티타늄 사파이어 레이저의 출력이 800 nm에서 185 mW 일 때 400 nm에서 스펙트럼의 반치폭이 0.089 nm인 5.3 mW의 제2고조파 출력을 얻을 수 있었고, 진동수 배가된 출력의 파장 가변 영역은 397 nm~403 nm로 확인되었다. 따라서 내부공진기 거울들의 코팅 문제에 의한 손실을 줄이면 제2고조파 출력의 증가와 더불어 더욱 넓은 파장 가변 영역을 얻을 수 있으리라 생각되며, 이에 대한 실험도 진행중이다.

감사의 글

본 연구 과제는 금오공과대학교 99년 과제수탁촉진연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] C. S. Adams and A. I. Ferguson, "Frequency doubling of a single frequency Ti:Al₂O₃ laser using an external enhancement cavity," *Opt. Commun.*, vol. 79, no. 3,4, pp. 219-223, 1990.
 [2] G. A. Skripko, S. G. Bartoshevich, I. V. Mikhnyuk, and I. G. Tarazevich, "LiB₃O₅ : a highly efficient frequency converter for Ti:sapphire lasers," *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 22, pp. 1726-1728, 1991.
 [3] S. Bourzeix, M. D. Plimmer, F. Nez, L. Julien, and F. Biraben, "Efficient frequency doubling of a continuous wave titanium:sapphire laser in an external enhancement cavity," *Opt. Commun.*, vol. 99, no. 1,2, pp. 89-94, 1993.
 [4] C. S. Adams and A. I. Ferguson, "Tunable narrow line-width ultra-violet light generation by frequency doubling of a ring Ti:sapphire laser using lithium tri-borate in an external enhancement cavity," *Opt. Commun.*, vol. 90, no. 1,2,3,

pp. 89-94, 1992.
 [5] F. Balembois, P. Georges, F. Salin, G. Roger, and A. Burn, "Tunable blue light source by intracavity frequency doubling of a Cr-doped LiSrAlF₆ laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, no. 20, pp. 2381-2382, 1992.
 [6] Da-Wun and J. T. Lin, "Temperature-tuned phase-matching properties of LiB₃O₅ for Ti:sapphire laser frequency doubling," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 2, pp. 307-310, 1993.
 [7] P. Poirier and F. Hanson, "Intracavity frequency doubling of a 2.5-kHz pulsed Ti:Al₂O₃ laser," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 22, pp. 1925-1927, 1993.
 [8] W.-L. Zhou, Y. T. Sasaki, S. Nakai, K. Nakano, S. Niikura, and B. Craig, "Intracavity frequency doubling of a continuous wave Ti:sapphire laser with over 70% conversion efficiency," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 66, no. 19, pp. 2463-2465, 1995.
 [9] C. Chen, Y. Wu, A. Jiang, B. Wu, G. You, R. Li, and S. Lin, "New nonlinear-optical crystal: LiB₃O₅," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 6, no. 4, pp. 616-621, 1989.
 [10] S. Lin, Z. Sun, B. Wu, and C. Chen, "The nonlinear optical characteristics of a LiB₃O₅ crystal," *J. Appl. Phys.*, vol. 67, no. 2, pp. 634-638, 1990.
 [11] S. P. Velsko, M. Webb, L. Davis, and C. Huang, "Phase-matched harmonic generation in lithium triborate (LBO)," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 9, pp. 2182-2192, 1991.
 [12] K. Kato, "Tunable UV generation to 0.2325 in LiB₃O₅," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, no. 7, pp. 1173-1175, 1990.
 [13] G. D. Boyd and D. A. Kleinman, "Parametric interaction focused Gaussian light beams," *J. Appl. Phys.*, vol. 39, no. 8, pp. 3597-3639, 1968.
 [14] R. C. Eckardt, H. Masuda, Y. X. Fan, and R. L. Byer, "Absolute and relative nonlinear optical coefficients of KDP, KD*P, BaB₂O₄, LiIO₃, MgO : LiNbO₃, and KTP measured by phase-matched second-harmonic generation," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, no. 5, pp. 922-933, 1990.
 [15] R. G. Smith, "Theory of intracavity optical second-harmonic generation," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-6, no. 4, pp. 215-223, 1970.
 [16] D. G. Gonzalez, S. T. K. Nieh, and W. H. Steier, "Two-pass-internal second-harmonic generation using a prism coupler," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-9, no. 1, pp. 23-26, 1973.
 [17] J. M. Yarborough, J. Falk, and C. B. Hitz, "Enhancement of optical second harmonic generation by utilizing the dispersion air," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 18, no. 3, pp. 70-73, 1971.
 [18] S. Helmfrid and G. Arvidsson, "Second-harmonic generation in quasi-phase-matching waveguides with a multi-mode pump," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 8, no. 11, pp. 2326-2330, 1991.
 [19] T. Ukachi, R. J. Lane, W. R. Bosenberg, and C. L. Tang, "Measurements of noncritically phase-matched second-harmonic generation in a LiB₃O₅ crystal," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, no. 10, pp. 980-982, 1990.

**Intracavity frequency doubling of a tunable Ti:Sapphire laser
using a lithium triborate(LiB_3O_5 , LBO) crystal**

Han Tae Choo[†], Park Cha Gon, and Gyu Ug Kim

School of Natural Science, Kumoh National University of Technology, Kumi 730-701, KOREA

[†]*E-Mail : htchoo@knut.kumoh.ac.kr*

(Received January 16, 2001, Revised manuscript received April 10, 2001)

We performed the intracavity frequency-doubling of a tunable continuous-wave Ti:sapphire laser using a lithium triborate (LiB_3O_5 , LBO) crystal. For an efficient intracavity frequency-doubling, we measured the spectral and the angular bandwidth about the θ -direction of LBO crystal. The measured values at a fundamental wavelength of 800 nm were 1.54 nm·cm and 3.8 mrad·cm, respectively. As a result of an intracavity frequency-doubling, we obtained the second-harmonic generation output power of 5.3 mW at 400 nm with the full width at half maximum(FWHM) of 0.089 nm from the fundamental output power of 185 mW at 800 nm. The frequency-doubled output was tuned from 397 nm to 403 nm.

Classification codes : NL.010, LO.080.