

TSSG 법으로 육성한 LiB₃O₅ 단결정의 제 2 조화파 발생 특성*

권택용 · 오학태 · 주정진 · 백현호 · 김정남 · 윤수인

부산대학교 물리학과 및 유전체물성연구소

(1994년 2월 1일 받음)

이 연구에서는 TSSG 법으로 육성한 LiB₃O₅(LBO) 단결정의 1064 nm 광에 대한 type I 및 type II 제 2 조화파 발생(SHG) 특성을 조사하였다. Type I SHG의 위상정합각은 $\theta_m=90^\circ$, $\phi_m=11.6^\circ$ 였고 angular acceptance bandwidth는 각각 $\delta\theta_m L_{1/2}=3.3^\circ\text{-cm}^{1/2}$, $\theta\phi_m L=0.27^\circ\text{-cm}$ 로 측정되었다. Type II SHG의 위상정합각은 $\theta_m=20^\circ$, $\phi_m=90^\circ$ 였고 angular acceptance bandwidth는 각각 $\delta\theta_m L=0.65^\circ\text{-cm}$, $\delta\phi_m L^{1/2}=3.5^\circ\text{-cm}^{1/2}$ 로 측정되었다. Type I NCPM SHG 온도는 149°C 였고 temperature bandwidth ΔT_L 은 4.8°C -cm였다. Nd:YAG 레이저의 peak power 가 171 MW/cm^2 일때 두께가 2.6 mm인 LBO 결정의 SHG 변환효율은 약 1.8%였고, 이차 비선형 계수 d_{32} 는 약 $0.74 \pm 0.05\text{ pm/V}$ 로 측정되었다.

I. 서 론

제 2 조화파 발생(Second Harmonic Generation, SHG)은 1961년 Franken에 의해 최초로 실현된 후 현재에 이르기까지 많은 연구자들의 관심의 대상이 되어 왔다. Franken은 quartz 결정을 비선형 결정으로 이용했고^[1] 그 이후 여러가지 비선형 결정들이 개발, 연구 되었다.^[2,3] 그 중에서 KDP(KH₂PO₄) 결정은 상용화되어 Nd:YAG 레이저의 1064 nm의 광을 SHG 하는데 이용되고 있다. 그러나 KDP 결정은 조해성이 있고 SHG 변환효율이 비교적 낮아 보다 효율이 높고 조해성이 없는 비선형 결정에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 이러한 연구 결과로 1976년 Zumsteg에 의해 KTP(KTiOPO₄) 결정이 새로운 SHG용 비선형결정으로 개발되었고,^[4] KTP 결정의 SHG 특성에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다.^[5-10] KTP 결정은 SHG 특성이 뛰어나지만, 최근의 연구 보고에 의하면 KTP 결정은 높은 출력의 레이저 광을 SHG 하는데 있어서는 color center가 형성되어 SHG 변환효율을 감소시킨다고 알려져 있다.^[10]

1989년 Chen 등에 의해 B₃O₆와 B₃O₇을 기본구조로 하는 borate 계열의 BBO(β -BaB₂O₄)와 LBO(LiB₃O₅) 결정이 새로운 비선형 결정으로 적합하다는 연구 보고가 있는^[11] 후 이들 결정에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔고 현재에도 많은 연구자들의 관심의 대상이 되고

있다.^[11-26] LBO 결정은 KTP 결정에 비해 SHG 변환효율은 다소 낮으나 높은 광손상 문턱에너지지를 갖고 있어서^[11,12] 고출력 레이저광을 SHG 하는데 적합할 뿐 아니라 UV 특성이 우수하여^[11] SHG된 UV광을 얻는데도 유리하다. 그리고 근적외선 영역에서 NCPM(noncritical phase matching) SHG가 가능하며,^[23] NCPM SHG의 장점은 SHG 변환효율을 약화시키는 walk-off 효과를 제거할 수 있고 큰 angular acceptance bandwidth를 갖는다는 것이다.

LBO 결정은 집균 mm²(공간군 Pna2₁)인 직방정계에 속하며 격자상수가 $a=8.4462\text{ \AA}$, $b=7.3802\text{ \AA}$, $c=5.1472\text{ \AA}$ 이고,^[27] 광축 x, y, z에 대응하는 결정축은 각각 a, c, b순이다.^[14]

본 연구에서는 부산대학교 유전체물성연구소에서 TSSG(Top-Seed Solution Growth)법으로 육성한 LBO 결정의 type I 및 type II SHG 특성을 조사하였다. 위상정합각과 angular acceptance bandwidth를 측정하고, 이들의 온도 의존성을 조사하여 계산값 및 다른 연구자들의 연구결과와 비교하였다.

II. 실험방법

실험에 사용한 LBO 단결정은 부산대학교 유전체물성연구소에서 TSSG법으로 육성한 것으로 a면의 두께가 2.6 mm인 것과 b면의 두께가 2.05 mm인 것을 사용하였다. 시료의 광투과 스펙트럼은 200 nm에서 2.5 μm 까

* 본 연구는 한국과학재단 우수연구센터 지원연구비에 의한 것임.

지는 분광광도계(CARY 5, Varian)로 측정하였으며, 2.5 μm에서 5 μm까지는 FT-IR 분광광도계(5020/5060, Galaxy)로 측정하였다.

SHG 측정장치도는 그림 1과 같다. Pumping 광으로는 Q-switching된 Nd:YAG 레이저(SL802G, Spectron)에서 나오는 1064 nm의 광을 사용하였으며, pulse 폭은 약 6 ns, pulse 반복주기는 10 Hz였다. SHG된 532 nm의 광을 확인하기 위해서는 75 cm monochromator(1702, SPEX), PMT(C31034, RCA) 및 photon counting system(1105/99, PAR)을 사용하였다. 그리고 SHG 위상정합각 측정을 위해서는 SHG된 532 nm 광을 prism으로 pumping광과 분리하여 photodiode와 digital oscilloscope(2232, Tektronix)로 검출하고 pc로 data를 읽어 들었다. SHG 변환효율을 측정하기 위한 pump 광과 SHG광의 power 측정에는 calorimeter(38-0101, Scientech)를 사용했다. 위상정합각과 같이 정밀한 각 변화를 측정하기 위해서는 아날로그가 붙은 회전대를 이용하였다.

III. 실험결과 및 검토

그림 2는 LBO 결정의 광투과 스펙트럼이다. LBO 결정의 광투과 영역은 약 0.2~2.6 μm로 이미 보고된 결과와 잘 일치한다.^[2] LBO 결정은 흡수단이 다른 비선형 결정에 비해 단파장쪽에 위치하여 보다 짧은 파장에서 SHG가 가능하다. 본 실험에서는 측정 장비의 미비로 200 nm 보다 단파장쪽의 UV 영역에 있는 흡수단은 측정하지 못하였으나, 본 실험에 사용된 LBO 결정은 약 200 nm에서 2.6 μm까지는 투명하여 1064 nm 광을 SHG 하는데 있어서 광흡수로 인한 장애는 없음을 알 수 있다.

LBO 결정은 Hobden의 분류에 의하면 10번째 class에 속하며,^[28] θ=90°일 때 type I SHG와, φ=90°일 때 type II SHG의 위상정합조건은

$$n_o(2\omega) = n_x(\omega) \tag{1a}$$

$$n_x(2\omega) = \frac{1}{2} [n_x(\theta) + n_x(\omega)] \tag{1b}$$

이다. (1a)식은 type I, (1b)식은 type II SHG의 위상정합조건이다. n_o는 편광방향과 광의 진행방향이 모두 xy 평면에 있고 광의 진행방향이 x축과 각 φ를 이룰때의 굴절률이다. n_x는 편광방향과 광의 진행방향이 모두 yz 평면에 있고 광의 진행방향이 z축과 각 θ를 이룰때의 굴절률이다. Type I SHG의 위상정합각을 측정하기 위

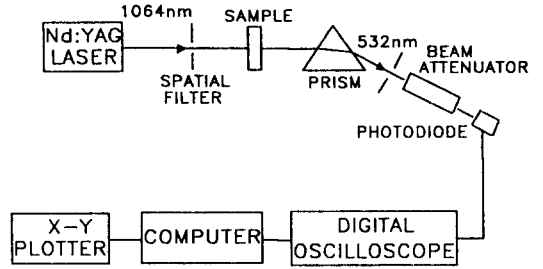


그림 1. 제 2 조화파발생(SHG) 측정장치도.

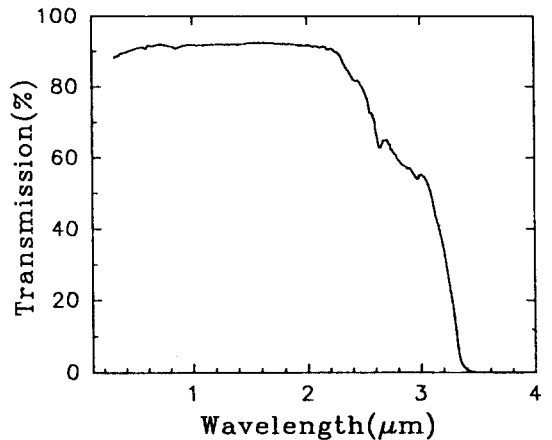


그림 2. LBO 결정의 광투과 스펙트럼.

해서는 a면으로 자른 시료를, 그리고 type II SHG의 경우에는 b면으로 자른 시료를 사용하였다.

그림 3은 23°C에서 LBO 결정의 type I SHG의 위상정합각을 측정한 것이다. θ=90°일 때 type I SHG의 위상정합각 φ_m은 약 11.6°로 나타났으며, 이는 (1a)식으로부터 LBO 결정의 굴절률 n_x(2ω)=1.5784, n_y(2ω)=1.6065, n_x(ω)=1.6054^[22]을 대입하여 계산한 11.4°와 잘 일치된다. 그림에서 실선은 위상정합함수(sinξ/ξ)²로 fitting한 것이다. 이때 ξ=ΔkL/2로써 ξ=0이 될때를 위상정합이라 하며, ΔkL은 phase-mismatch 이고 L은 시료의 두께이다. Angular acceptance bandwidth는 phase-mismatch Δk로부터 구할 수 있다. Δk를 φ에 대해 Taylor 급수전개를 하면

$$\Delta k = (\Delta k)_{\phi m} + \left(\frac{\partial \Delta k}{\partial \phi} \right)_{\phi m} (\delta \phi) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \Delta k}{\partial \phi^2} \right)_{\phi m} (\delta \phi)^2 + \dots \tag{2}$$

이다. 각 φ의 경우에는 (2)식에서 첫번째 항은 영이 되

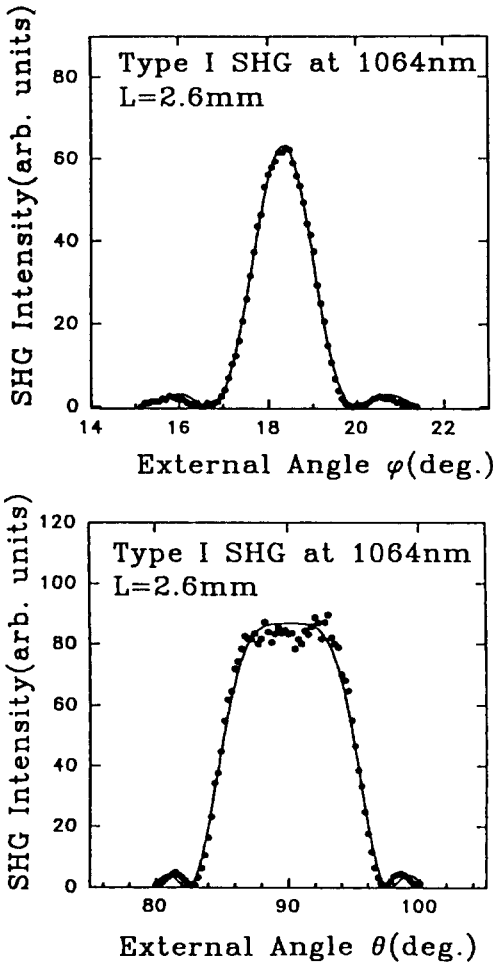


그림 3. LBO 결정의 type I SHG의 위상정합 특성.

므로 두번째 항까지 근사를 취하고 FWHM(full width at half maximum)을 계산하여 구한 angular acceptance bandwidth $\delta\phi_m L$ 은 0.24°-cm이다. 그림 3에서 위상정합함수로 fitting하여 구한 $\delta\phi_m L$ 은 0.27°-cm로 계산값과 비교적 잘 일치됨을 알 수 있고, Ukachi 등^[22]의 측정값인 0.24°-cm와, Wu^[24]의 측정값인 0.29°-cm와도 비교적 잘 일치한다. 각 θ 의 angular acceptance bandwidth도 각 ϕ 의 경우와 같이 Δk 를 θ 에 대해서 Taylor 급수전개를 하여 구할 수 있고, 각 θ 의 경우에는 (2)식에서 $\delta\phi$, ϕ_m 에 각각 $\delta\theta$, θ_m 를 대치한 것과 같다. 이때 각 ϕ 의 경우와는 달리 첫번째 항과 두번째 항이 모두 영이 되므로 세번째 항까지 근사를 취하여야 하고, 이렇게 구한 angular acceptance bandwidth $\delta\theta_m L^{1/2}$ 은 4.4°-cm^{1/2}이다. 본 실험에서 측정된 결과를 위상정합함수로 fitting하여 구한 $\delta\theta_m L^{1/2}$

은 3.3°-cm^{1/2}로 계산값과 차이가 난다. 이는 계산값을 구하는 근사에서 Δk 를 θ 에 대해 Taylor 급수전개하여 세번째 항만을 취하였기 때문이다. θ 가 90°에서 벗어남에 따라 Δk 를 θ 에 대해 Taylor 급수전개한 식에서 두번째 항의 기여가 커지므로 실제로는 4.4°-cm^{1/2} 보다 작게 나타날 것으로 기대된다. 다른 연구자들이 측정한 값과 비교하여 보면 본 실험의 결과인 3.3°-cm^{1/2}는 Chen 등^[11]의 측정값인 3.4°-cm^{1/2}와는 잘 일치하며, Ukachi 등^[19]의 측정값인 2.88°-cm^{1/2} 보다 크게 나타났다.

그림 4는 23°C에서 LBO 결정의 type II SHG의 위상정합각을 측정된 것이다. $\phi=90^\circ$ 일 때 type II SHG의 위상정합각 θ_m 은 약 20°로 나타났으며, 이는 (1b)식으로 부터 LBO 결정의 굴절률 $n_x(\omega)=1.5645$, $n_y(\omega)=1.5903$, $n_z(\omega)=1.6054$, $n_x(2\omega)=1.5784$ ^[22]을 대입하여 계산한 20.9°와, Lin 등^[19]의 측정값인 21°와는 약 1°가 차이이지만 대체로 일치한다고 볼 수 있다. Type I의 경우와 같이 angular acceptance bandwidth를 계산하면 $\delta\theta_m L=0.97^\circ$ -cm, $\delta\phi_m L^{1/2}=4.8^\circ$ -cm^{1/2}이다. 본 실험에서 측정된 결과를 위상정합함수로 fitting하여 구한 각 θ 의 angular acceptance bandwidth $\delta\theta_m L$ 는 계산값 보다 약 0.32°-cm 작은 0.65°-cm로 나타났다. 이 값은 Wu^[24]의 측정값인 1.05°-cm 보다 약 0.4°-cm가 작다. 각 ϕ 의 angular acceptance bandwidth $\delta\phi_m L^{1/2}$ 는 계산값 보다 작은 3.5°-cm^{1/2}로 나타났다. 이는 type I SHG의 경우와 마찬가지로 ϕ 가 90°에서 벗어남에 따라 Δk 를 θ 에 대해 Taylor 급수전개한 (2) 식에서 두번째 항의 기여가 커지기 때문이다. Wu^[24]의 측정에서도 $\delta\phi_m L^{1/2}$ 은 계산값 보다 작은 3.8°-cm^{1/2}였고, 이는 본 실험의 측정값인 $\delta\phi_m L^{1/2}=3.5^\circ$ -cm^{1/2}와 비교적 잘 일치한다.

LBO 결정은 상온에서 약 1.21 θ_m 의 파장에서 a축 방향으로 type I NCPM SHG가 일어나며, 시료의 온도를 변화시키면 약 0.95~1.8 μ m의 파장 영역에서 type I NCPM SHG가 가능하다.^[23] NCPM SHG의 장점은 변환효율을 감소시키는 walk-off 효과가 없으며 큰 angular acceptance bandwidth를 가진다는 것이다. 그림 5는 pump 광의 진행방향을 a축과 일치시키고 시료의 온도를 변화시키면서 SHG 신호의 세기를 측정된 것이다. 1064 nm 광에 대한 type I NCPM SHG 온도는 149°C였고, temperature bandwidth ΔTL 은 4.8°C-cm였다. Lin 등^[17]은 1064 nm 광에 대한 type I NCPM SHG 온도를 149°C, Ukachi 등^[22]은 148°C로 각각 측정 보고하였다. 그러나 최근 Wu 등^[25]이 1064 nm 광에 대한 type I NCPM SHG 온도를 이전의 연구결과^[17,22]와 다른 133°C로 보고하였다. Wu 등^[25]에 의하면 이전의 연구자들^[17,22]이 측정하

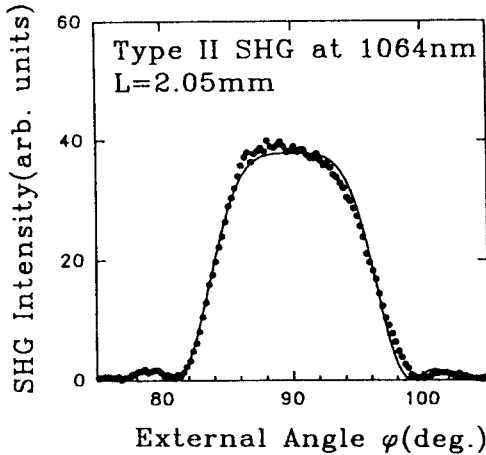
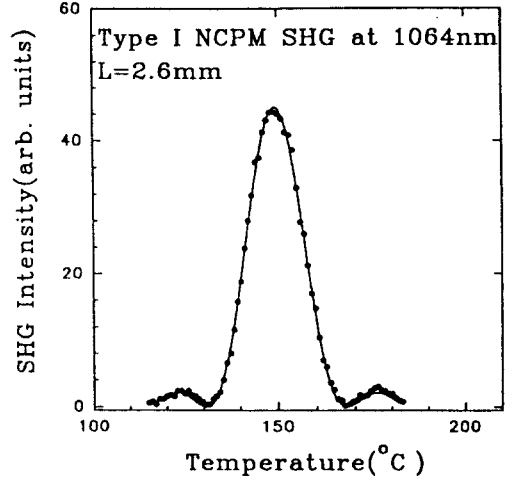
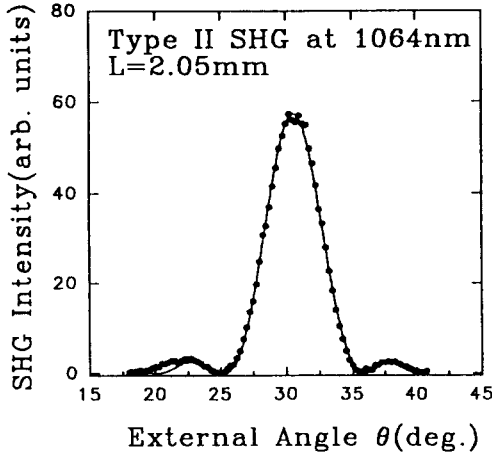


그림 5. LBO 결정의 a축 방향의 type I NCPM SHG 특성.

그림 4. LBO 결정의 type II SHG의 위상정합 특성.

148 $^{\circ}$ C, 149 $^{\circ}$ C 는 각 θ 가 90 $^{\circ}$ 에서 벗어났기 때문인 것으로 추측하였고, 각 θ 가 90 $^{\circ}$ 에서 약 4 $^{\circ}$ 정도 벗어나면 NCPM SHG 온도가 약 19 $^{\circ}$ C 정도 증가됨을 보였다. 본 실험에서도 NCPM SHG 온도를 확인하기 위하여 각 θ 를 90 $^{\circ}$ 주위에서 변화시키면서 NCPM SHG 온도를 측정하였다. Wu 등의 결과^[25]와 같이 각 θ 가 90 $^{\circ}$ 에서 벗어남에 따라 NCPM SHG 온도가 높아지는 것을 볼 수 있었으나, 각 θ 가 90 $^{\circ}$ 일 때 1064 nm 광에 대한 type I NCPM SHG 온도는 149 $^{\circ}$ C로 Lin 등^[17]과 Ukachi 등^[22]의 결과와 일치하였다. 본 실험에서 측정된 temperature bandwidth ΔT_L 은 4.8 $^{\circ}$ C-cm로 Lin 등^[21]에 의해 보고된 5.2 $^{\circ}$ C-cm와 비슷하나, Wu 등^[25]에 의해 측정된 4.3 $^{\circ}$ C-cm와 Ukachi 등^[22]에 의해 측정된 3.9 $^{\circ}$ C-cm 보다 크게 나타났다.

그림 6은 시료의 온도를 type I NCPM SHG가 일어나는 149 $^{\circ}$ C로 일정하게 유지하고 pump 광과 결정축과의

각 θ, ϕ 를 변화시키면서 NCPM SHG의 angular acceptance bandwidth를 측정 한 것이다. NCPM SHG의 angular acceptance bandwidth $\delta\theta_{ext}L^{1/2}, \delta\phi_{ext}L^{1/2}$ 은 각각 4.7 $^{\circ}$ -cm^{1/2}, 5.4 $^{\circ}$ -cm^{1/2}였다. 본 실험의 측정값은 Ukachi 등^[14,22]의 측정값인 $\delta\theta_{ext}L^{1/2}=4.12^{\circ}$ -cm^{1/2}, $\delta\phi_{ext}L^{1/2}=5.68^{\circ}$ -cm^{1/2}와, Wu 등^[25]의 측정값인 $\delta\theta_{ext}L^{1/2}=4.24^{\circ}$ -cm^{1/2}, $\delta\phi_{ext}L^{1/2}=4.69^{\circ}$ -cm^{1/2}와 대체로 일치한다.

그림 7은 pump광의 power를 변화시키면서 SHG power를 측정 한 것이다. 이때 시료에 쏘여주는 beam의 공간적인 모양은 gaussian이며, beam의 크기는 약 3.1 mm²으로 일정하게 고정하였고, 광의 진행방향은 type I SHG의 위상정합각에 고정하였다. 그림에서 실선은 이론식에 fitting한 것으로 측정치와 대체로 잘 일치됨을 알 수 있다. SHG 변환효율은

$$\eta = \tanh^2(Cd_{eff}/[n_z^2(\omega)n_o(2\omega)]^{1/2}I^{1/2}L) \quad (3)$$

이며,^[29] 이 식에서 I는 pump 광의 peak intensity(W/cm²)이고, $C=2\pi(\epsilon_0^3\epsilon'')^{1/4}/\lambda$ 인 상수로서 pump 광의 파장이 1064 nm 일때는 $C=1.1469108(J^{1/2}s^{1/2}/Cm)$ 의 값을 가진다. LBO 결정의 type I SHG의 유효 이차비선형계수 d_{eff} 는

$$d_{eff} = d_{32} \cos\phi \quad (4)$$

이다. 그림 7의 결과를 (3) 식으로 fitting하여 구한 d_{32} 는 약 0.74 \pm 0.05 pm/V였고, 이 값은 Velsko 등^[13]이 측정 한 0.84 \pm 0.06 pm/V와 대체로 잘 일치한다. Nd:YAG 레이

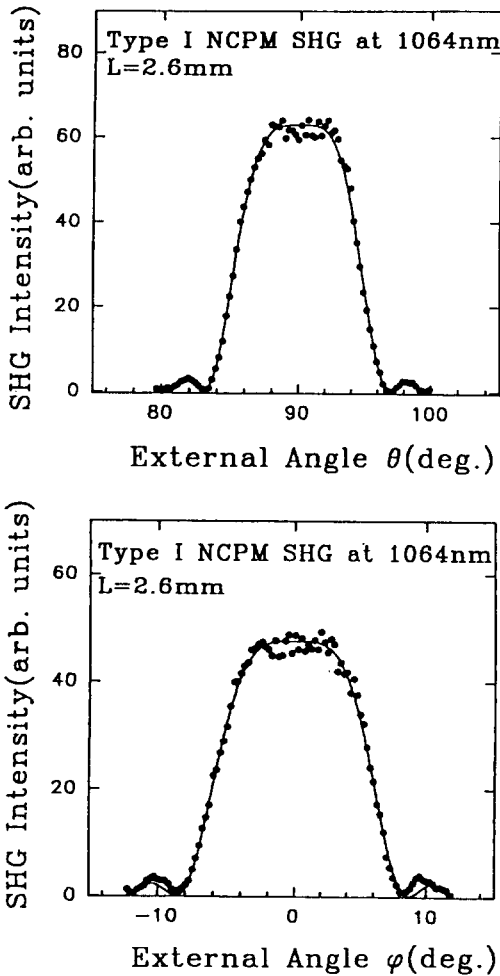


그림 6. LBO 결정의 type I NCPM SHG의 위상정합 특성.

저의 peak power가 약 171 MW/cm²일 때 SHG 변환효율은 약 1.8%로 나타났다. Xie 등^[12]은 두께가 14 mm인 LBO 결정을 이용하여 peak power가 약 500 MW/cm²일 때 약 70%의 SHG 변환효율을 얻었다. 본 실험에서 사용된 LBO 결정의 두께는 약 2.6 mm이므로 Xie 등의 결과와 직접 비교할 수는 없지만, 그림 7의 결과를 (3) 식을 이용하여 Xie 등과 같은 조건일때의 SHG 변환효율을 외삽하여 추정된 결과 약 72%가 나왔다. 이는 본 연구에서 사용한 LBO 결정의 SHG 변환효율은 Xie 등의 결과와 거의 같다고 볼 수 있다.

IV. 결 론

TSSG 법으로 육성한 LBO 단결정의 1064 nm 광에

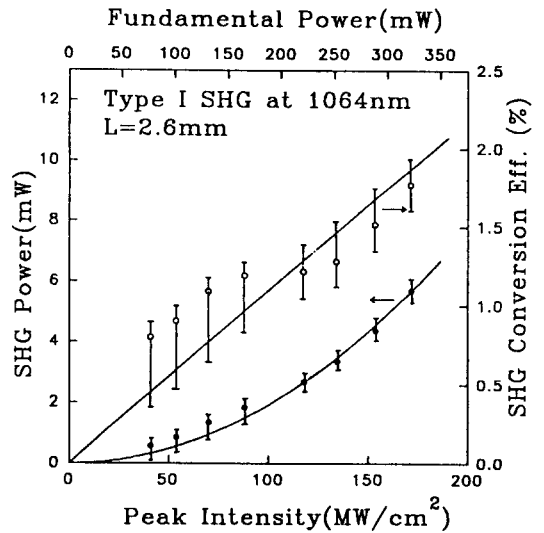


그림 7. Fundamental power와 SHG power의 관계.

대한 type I 및 type II SHG 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1064 nm 광에 대한 Type I SHG의 위상정합각은 $\theta_m = 90^\circ$, $\theta_m = 11.6^\circ$ 였고, 이때 angular acceptance bandwidth는 각각 $\delta\theta_{ext}L^{1/2} = 3.3^\circ\text{-cm}^{1/2}$, $\delta\phi_{ext}L^{1/2} = 0.27^\circ\text{-cm}$ 였다. 그리고 type II SHG의 위상정합각은 $\theta_m = 20^\circ$, $\theta_m = 90^\circ$ 였고, 이때 angular acceptance bandwidth는 각각 $\delta\theta_{ext}L = 0.65^\circ\text{-cm}$, $\delta\phi_{ext}L^{1/2} = 3.5^\circ\text{-cm}^{1/2}$ 였다. Type I NCPM SHG 온도는 149°C였으며, temperature bandwidth ΔTL 은 4.8 °C-cm로 나타났다. NCPM SHG의 angular acceptance bandwidth는 각각 $\delta\theta_{ext}L^{1/2} = 4.7^\circ\text{-cm}^{1/2}$, $\delta\phi_{ext}L^{1/2} = 5.4^\circ\text{-cm}^{1/2}$ 였다. Pump 광인 1064 nm 광의 peak power가 약 171 MW/cm²일 때 두께가 2.6 mm인 LBO 결정의 SHG 변환효율은 약 1.8%였고, 이차비선형계수 d_{32} 는 약 0.74±0.05 pm/V로 측정되었다.

참 고 문 헌

[1] P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters, and G. Weinreich, Phys. Rev. Lett. 7, 118(1961).
 [2] V. G. Dmitriev, G. G. Gurzadyan, and D. N. Nikogasyan(eds), *Handbook of Nonlinear Optical Crystals* (Springer-Verlag, New York, 1991).
 [3] Shin-ichi Furusawa, Osamu Chikagawa, Shoji Tange, Takeo Ishidate, Hiroshi Orihara, Yoshihiro Ishibashi, and Kazuo Miwa, J. Phys. Soc. Jpn. 60, 2691(1991).
 [4] F. C. Zumsteg, J. D. Bierlein, and T. E. Gier,

- J. Appl. Phys. **47**, 4980(1976).
- [5] T. Y. Fan, C. E. Huang, B. Q. Hu, R. C. Eckardt, Y. X. Fan, R. L. Byer, and R. S. Feigelson, Appl. Opt. **26**, 2390(1987).
- [6] R. A. Stolzenberger, Appl. Opt. **27**, 3883(1988).
- [7] L. Zhang, P. J. Chandler, P. D. Townsend, Z. T. Alwahabi, S. L. Pityana, and A. J. McCaffery, J. Appl. Phys. **73**, 2695(1993).
- [8] R. J. Bolt and M. van der Mooren, Opt. Commun. **100**, 399(1993).
- [9] T. Y. Kwon, H. T. Oh, J. J. Ju, B. C. Choi, J. N. Kim, and S. I. Yun, Korean Appl. Phys. **6**, 519(1993).
- [10] N. B. Angert, V. M. Garmash, N. I. Pavlova, and A. V. Tarasov, Sov. J. Quantum Electron. **21**, 426 (1991).
- [11] C. Chen, Y. Wu, A. Jiang, B. Wu, G. You, R. Li, and S. Lin, J. Opt. Soc. Am. B. **6**, 616(1989).
- [12] F. Xie, B. Wu, G. You, and C. Chen, Opt. Lett. **16**, 1237(1991).
- [13] S. P. Velsko, M. Webb, L. Davis, and C. Huang, IEEE J. Quantum Electron. **27**, 2182(1991).
- [14] T. Ukachi, R. J. Lane, W. R. Bosenberg, and C. L. Tang, Appl. Phys. Lett. **57**, 980(1990).
- [15] B. Wu, N. Chen, C. Chen, D. Deng, and Z. Xu, Opt. Lett. **14**, 1080(1989).
- [16] W. S. Pelouch, T. Ukachi, E. S. Wachman, and C. L. Tang, Appl. Phys. Lett. **57**, 111(1990).
- [17] J. T. Lin, J. L. Montgomery, and K. Kato, Opt. Commun. **80**, 159(1990).
- [18] S. Lin, Z. Sun, B. Wu, and C. Chen, J. Appl. Phys. **67**, 634(1990).
- [19] S. Lin, B. Wu, F. Xie, and C. Chen, Appl. Phys. Lett. **59**, 1541(1991).
- [20] S. T. Yang, C. C. Pohalski, E. K. Gustafson, R. L. Byer, R. S. Feigelson, R. J. Raymakers, and R. K. Route, Opt. Lett. **16**, 1493(1991).
- [21] H. Mao, F. Fu, B. Wu, and C. Chen, Appl. Phys. Lett. **61**, 1148(1992).
- [22] T. Ukachi, R. J. Lane, W. R. Bosenberg, and C. L. Tang, J. Opt. Soc. Am. B. **9**, 1128(1992).
- [23] S. Lin, B. Wu, F. Xie, and C. Chen, J. Appl. Phys. **73**, 1029(1993).
- [24] R. Wu, Appl. Opt. **32**, 971(1993).
- [25] B. Wu, F. Xie, and C. Chen, J. Appl. Phys. **73**, 7108(1993).
- [26] D. W. Chen and J. T. Lin, IEEE J. Quantum Electron. **29**, 307(1993).
- [27] S. Zhao, C. Huang, and H. Zhang, J. Cryst. Growth, **99**, 805(1990).
- [28] M. V. Hobden, J. Appl. Phys. **38**, 4365(1967).
- [29] Y. R. Shen, *The Principles of Nonlinear Optics* (John & Wiley Sons, New York, 1984).

Characteristics of Second Harmonic Generation in LiB₃O₅ Crystals Grown by TSSG Method

T. Y. Kwon, H. T. Oh, J. J. Ju, H. H. Baek, J. N. Kim and S. I. Yun
*Physics Department and Research Center for Dielectric and Advanced Matter Physics,
 Pusan National University, Pusan 609-735, Korea*

(Received: February 1, 1994)

The characteristics of the type I and type II SHG in LiB₃O₅ crystals grown by TSSG method have been investigated using 1064 nm beam from a Q-switched Nd:YAG laser. The measured phase matching angles and angular acceptance bandwidths were $\theta_m = 90^\circ$, $\phi_m = 11.6^\circ$, $\delta\theta_m L^{1/2} = 3.3^\circ\text{-cm}^{1/2}$, $\delta\phi_m L = 0.27^\circ\text{-cm}$ for type I SHG and $\theta_m = 20^\circ$, $\phi_m = 90^\circ$, $\delta\theta_m L = 0.65^\circ\text{-cm}$, $\delta\phi_m L^{1/2} = 3.5^\circ\text{-cm}^{1/2}$ for type II SHG, respectively. The type I NCPM temperature of 1064 nm beam was found to be 149°C with the temperature bandwidth ΔT_L of 4.8°C-cm. An energy conversion efficiency of about 1.8% with 2.6 mm thick LBO crystal at an incident power of 171 MW/cm² was demonstrated. The measured d_{32} was 0.74 ± 0.05 pm/V.