

KH₂PO₄(KDP) 결정을 이용한 Nd:YAG 레이저의 제3고조파 변환

장 용 무[○] *김 병 태 강 형 부
 한양대 전기공학과, *오사카 대학

Second Harmonic Conversion of Nd:YAG Laser using KH₂PO₄(KDP) Crystal

CHANG, YONG MOO[○] *KIM, BYUNG TAI KANG, HYUNG BOO
 HAN YANG UNIV. DEPT. ELEC. ENG., * OSAKA UNIV. ILE.

The simulation results of the third harmonic conversion with 1.064 um Nd:YAG laser using polarization mismatch method are reported. The third harmonic conversion efficiency was over 65% for the Gaussian incident pulse of 300~400 MW/cm² peak intensity, and over 80% for 3~4 GW/cm² peak intensity pulse.

The dependence of the third harmonic conversion efficiency on the variation of incident polarization angle θ_p and angular discrepancy $\Delta\theta$ of phase matched angle θ_m is discussed.

1. 서 론

1961년 Franken¹⁾에 의해 광의 제2고조파 변환이 실현 된 후, 비선형 광학의 눈부신 발전과 더불어 최근 핵융합, X-선 lithography, 레이저에 의한 동위체 분리 등 여러 분야에서 단파장의 레이저가 요구되고 있다.²⁾ 현재 개발 중인 엑사이머 레이저, 자유 전자 레이저 등은 대출력화가 미흡하다. 그러므로 대출력의 단파장 펄스를 얻기 위해서는 KDP 와 같은 비선형 광학 소자를 이용하여 1.064 μm 의 레이저 펄스를 제2, 제3고조파 변환시켜 단파장(382 nm) 펄스를 얻는 것이 가장 유리하다.

Nd:YAG 레이저에 대한 제2고조파 변환에 관한 수치 해석 결과는 이미 발표한 바 있으며, 본 연구에서는 제2고조파 변환에 이어서 1.064 μm 의 레이저 펄스에 대한 제3고조파 변환에 관해 수치해석하여 입사 레이저

펄스 강도에 따른 제3고조파 변환 효율 및 입사 편광 각 θ_p 및 위상 부정합각 θ_m 의 변화에 따른 변환 효율 등을 구했으며, 펄스 강도와 rising time이 제3고조파 변환 효율에 주는 영향 등을 알아 보았다.

2. 제3고조파 변환 방정식

Armstrong 등³⁾에 의해 제시된 고조파 변환

방정식은 아래 식(1)~식(3)으로 주어지며 그 개략도는 그림 1과 같다.

$$dE_1/dz = -\frac{1}{2}\gamma_1 E_1 - iKE_3 E_2^* \exp(-i\Delta kz) \quad (1)$$

$$dE_2/dz = -\frac{1}{2}\gamma_2 E_2 - i2KE_3 E_1^* \exp(-i\Delta kz) \quad (2)$$

$$dE_3/dz = -\frac{1}{2}\gamma_3 E_3 - i3KE_1 E_2 \exp(i\Delta kz) \quad (3)$$

여기서 E_j 는 z 방향으로 진행하는 수정된 복소 전기 벡터로서 계산의 간편화를 위해 $E_j = n_j E_j'$ (단, E_j 는 복소 전기 벡터, n_j 는 j 파의 굴절률)로 수정하였다.

그림 1에서 보는 바와 같이 Type-I KDP 결정에 의한 제3고조파 변환의 경우, 첨자(j=1, 2, 3)는 각각 기본파 상광선, 제2고조파 상광선, 및 제3고조파 이상광선을 나타낸다. 또 Type-II의 경우는 j=1이 기본파 이상광선을 나타내고, j=2, 3은 Type-I의 경우와 동일하다.

γ_j 는 비선형 매질의 흡수 계수이다.

Δk 는 $\Delta k = k_3 - (k_1 + k_2)$ 로서 파수의 부정합을 나타낸 것으로서 위상 정합각과 진행파의 방향이 이루는 부정합각 $\Delta\theta$ 에 비례한다. 또, K는 식(4)로 주어지며,

결정물에 대한 Δk 식은 Type-I KDP 결정인 경우 식(5)로, Type-II KDP 결정인 경우는 식(6)으로 주어진다.⁵⁾

$$K = \frac{w}{2c} \frac{1}{\sqrt{n_1 n_2 n_3}} \frac{d_{eff}}{\epsilon_0} \quad (4)$$

ϵ_0 : permittivity of free space
 c : velocity of light in vacuum

$$\Delta k = \frac{w}{c} (3n_3(\theta) - 2n_2 - n_1) \quad (5)$$

$$\Delta k = \frac{w}{c} (3n_3(\theta) - 2n_2 - n_1(\theta)) \quad (6)$$

식(4)의 d_{eff} 는 KDP 결정의 실효적 광학상수로써 Type-I KDP 결정은 식(7)로, Type-II 는 식(8)로 나타낼 수 있으며, 식(7)에서 KDP 결정을 $\theta = 90^\circ$ 로 절단 했을 때 d_{eff} 는 최대값을 갖게되며, Type-II 의 경우에는 $\theta = 0^\circ$ 로 결정을 절단했을 때 식(8)이 최대가 된다.

$$d_{eff} = d_{36} \sin 2\theta \cdot \sin \theta_m \quad (7)$$

$$d_{eff} = d_{36} \cos 2\theta \cdot \sin 2\theta_m \quad (8)$$

θ_m : phase matching angle

3. Polarization mismatch 법에 의한 제3고조파 변환의 수치해석 결과 및 고찰

Polarization mismatch 법은 그림1(b)에 있는 바와 같이 doubler 와 tripler 가 모두 Type-II KDP 결정을 사용한 것으로서 입사기본파의 편광각 θ_p 는 doubler 의 상광선축에 대해 $\theta_p = \tan^{-1}(1/\sqrt{2}) \approx 35.5^\circ$ 이다. 이것은 doubler 에 입사되는 기본파 펄스의 상광선축방향과 이상광선축방향의 강도비가 2:1이 되게하여 doubler 로써 기본파펄스의 일부($\approx 66.7\%$)를 제2고조파 변환시켜 tripler 에 입사되는 제2고조파 펄스와 기본파펄스의 강도비가 2:1이 되게 tripler의 이상광선축 방향으로 편광된 제3고조파 펄스가 출력되게 하는 방법이다.

KDP결정에 대한 제3고조파 변환방정식인 식(1)~식(3)을 Runge-Kutta 법에 의해 polariz-mismatch 법에 의한 제3고조파변환을 수치해석 하였다.

입력레이저 펄스는 완전히 선형편광 되었고, 시간t에 대하여 gauss 형이며, 공간강도분포는 일정하다고 가정한 식(6)으로 하였다.⁶⁾

$$I(t) = I_{peak} \cdot \exp(-t^2/T^2) \quad (9)$$

T: gaussian pulse width

또 흡수계수 γ_j 는 $\gamma_0^w = 0.058 \text{ cm}^{-1}$, $\gamma_e^w = 0.020 \text{ cm}^{-1}$, $\gamma_0^{2w} = 0.0 \text{ cm}^{-1}$, $\gamma_0^{3w} = 0.0 \text{ cm}^{-1}$ 로 하였다.⁷⁾ 기본파펄스의 파장 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 에 대한 Type-II KDP 결정의 위상정합각은 doubler 경우는 $\theta_m = 1.0284 \text{ [rad]}$, Tripler 는 $\theta_m = 1.0439 \text{ [rad]}$ 이며, K 는 $K_{doub} = 1.128 \times 10^{-6} \text{ /V}$, $K_{tripler} = 1.096 \times 10^{-6} / \text{V}$ (단, $d_{36} = 6.9 \times 10^{-24} \text{ [AS/V}^2\text{]}$)이다.

그림2와 그림3은 최적위상정합되었고 θ_p 가 35.3° 일때 결정의 두께를 파라미터로 했을때의 제3고조파 변환 효율을 나타낸것이다. 여기서 doubler 와 tripler 의 두께는 같게 하였다. gauss형 입사펄스의 최대강도가 $0 \sim 500 \text{ MW/cm}^2$ 일때 그림2에서 보는 바와 같이 두께가 두꺼워질수록 변환효율은 증가했으나 $L_d = L_t = 35 \text{ mm}$ 일 경우 400 MW/cm^2 이후 변환효율은 감소하였다.

그림3은 doubler 에 입사되는 펄스의 최대강도가 $0 \sim 6 \text{ GW/cm}^2$ 일때 제3고조파변환효율을 나타낸 것이다. 그림3에서는 KDP 결정의 두께에 따라 최대변환효율에 대응되는 펄스강도폭이 뚜렷이 나타난다. 즉 $3 \sim 4 \text{ GW/cm}^2$ 의 펄스에 대해 $L_d = L_t = 11 \text{ mm}$ 일때 변환효율이 80% 이상이 되었으며, 결정의 두께가 두꺼울수록 낮은 강도쪽으로 최대효율 값이 이동되는 것을 알 수 있다.

그림4와 그림5는 위상부정합각 $\Delta\theta$ 에 대한 제3고조파 변환효율을 나타내었다. $L_d = L_t = 30 \text{ mm}$, $I_w = 300 \sim 400 \text{ MW/cm}^2$ 인 경우에 그림4에 보는 바와같이 최적위상정합에서 부터 이탈된 각 $\Delta\theta_d = \Delta\theta_t$ 가 $100 \mu\text{rad}$ 정도 될 때 $\Delta\theta_d = \Delta\theta_t = 0 \mu\text{rad}$ 일때보다 20% 정도 변환효율이 감소되는 것을 알 수 있다. 또 그림5에는 $\Delta\theta_d$ 와 $\Delta\theta_t$ 가 같이 $0 \sim 500 \mu\text{rad}$ 에 변환할 때의 변환효율로서 $\Delta\theta_d = \Delta\theta_t = 100 \mu\text{rad}$ 로 위상정합을 하였을 때 최대강도가 $3 \sim 4 \text{ GW/cm}^2$ 인 펄스는 70% 이상의 효율을 유지할 수 있다.

입사편광각 θ_p 의 변화에 따라서 제3고조파변환효율이 어떻게 변하는가를 그림6과 그림7로 알 수 있다. 그림6과 같이 최대강도 $300 \sim 400 \text{ MW/cm}^2$ 정도의 펄스는 $\theta_p = 35^\circ$ 인 경우보다 $\theta_p = 35^\circ$ 인 때가 변화효율의 변동이 작다는 것을 알 수 있다. 또 최대강도 3.5 GW/cm^2 정도일 때는 그림7에서 보는 바와같이 $\theta_p = 35^\circ$ 일때가 가장 높은 변환효율을

얻을 수 있으며 $\pm 1^\circ$ 정도의 오차에서도 변환효율은 5% 이내의 감소를 보였다.

이상의 결과로부터 최대강도가 $300 \sim 400 \text{ MW/cm}^2$ 인 $1.064 \mu\text{m}$ 의 gauss 형 Nd:YAG 레이저펄스의 제3고조파 변환효율은 $L_d=L_t=30\text{mm}$ 일때 최적위상정합 조건에서 65% 정도가 되었으며, 최대강도가 $3 \sim 4 \text{ GW/cm}^2$ 정도 $1.054 \mu\text{m}$ 파장의 대출력 Nd:글라스레이저의 출력펄스는 $L_d=L_t=11\text{mm}$ 위상부정합각 $\Delta\theta=100\mu\text{rad}$, $\theta_p=35^\circ \pm 1^\circ$ 의 경우에 제3고조파변환효율이 75%이상의 높은 효율을 얻을 수 있었다.

4. 참고문헌

- 1) P.A. Franken et al., Phys. Rev. Lett., 7, p118 1961.
- 2) H. Nishimura et al., Phys. Rev. A23, p2001,1981.
- 3) J.A.Armstrong et al., Phys. Rev., 127, p1918, 1962.
- 4) R.S.Crarton, IEEE J. Quantum Electron., QE-17, p1771, 1981.
- 5) R.S.Craxon et al., ibid, QE-17, p1782, 1981.
- 6) Rep. UCRL-50021-76, 1977.
- 7) Rep. UCRL-50021-79, 1980.

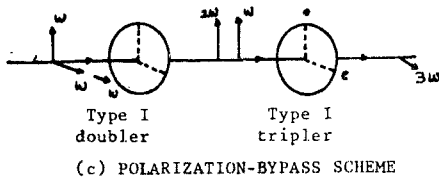
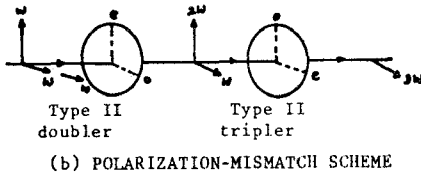
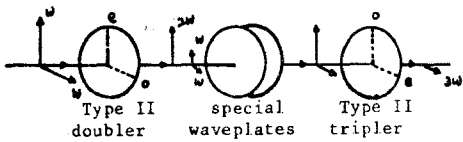


Fig. 1. Idealized doubler performance for three tripling schemes.

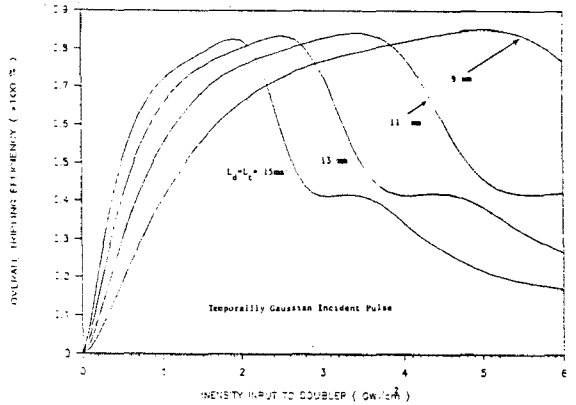


Fig. 3. Calculated tripling efficiency as a function of the thickness of the KDP crystal

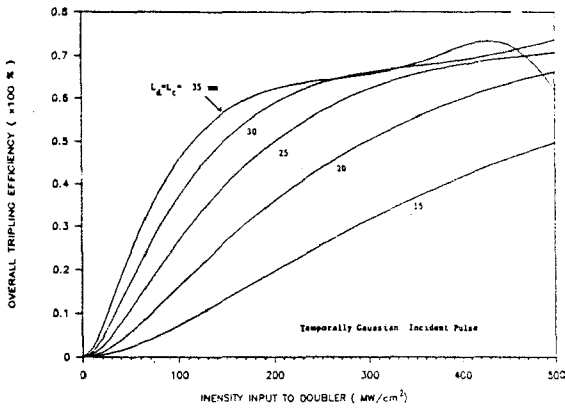


Fig. 2. Calculated tripling efficiency as a function of the thickness of the KDP crystal

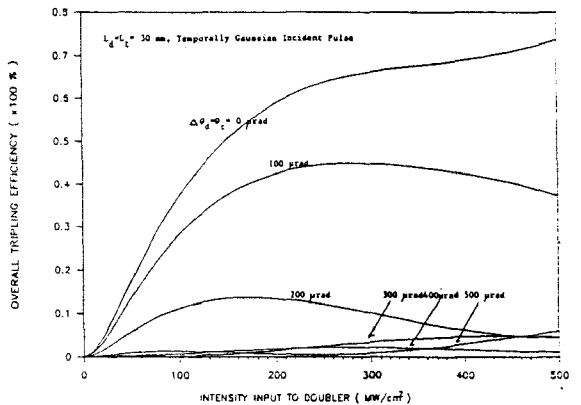


Fig. 4. Calculated dependence of the tripling efficiency on the angular discrepancy $\Delta\theta$

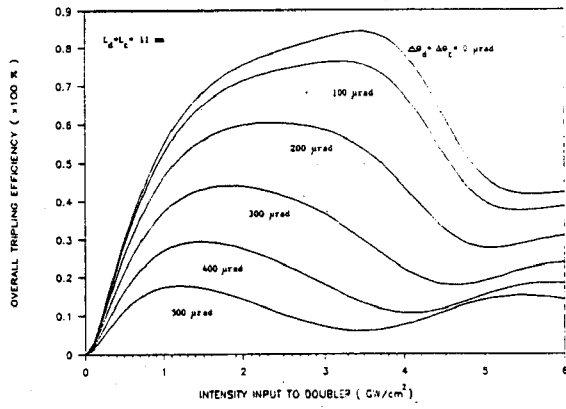


Fig. 5. Calculated dependence of the tripling efficiency on the angular discrepancy $\Delta\theta$.

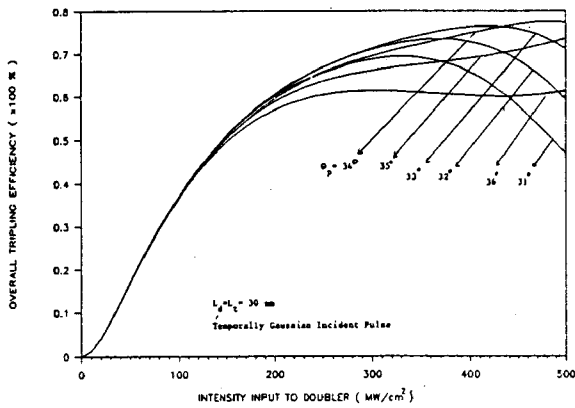


Fig. 6. Calculated dependence of the tripling efficiency on the polarization angle θ_p .

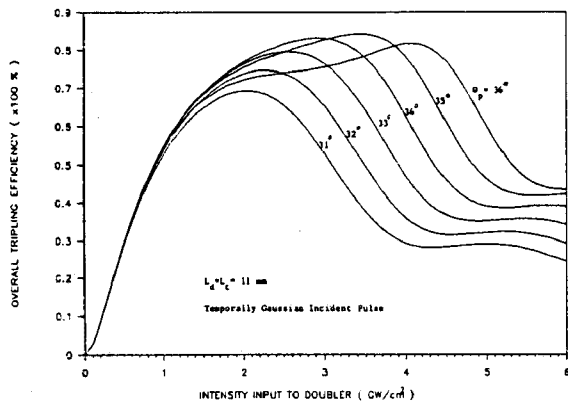


Fig. 7. Calculated dependence of the tripling efficiency on the polarization angle θ_p .