

KDP결정을 이용한 Nd:YAG 레이저 광의 제3고조파 변환에 관한 연구

장 용 부*
강 형 부한 양 대
전 기 과A Study on Third Harmonic Conversion of Nd:YAG Laser Beam
Using KDP CrystalCHANG YONG MOO*
KANG HYUNG BOOHAN YANG UNIV.
Dept. Elec. Eng.

1. 서론

1961년 Franken¹⁾에 의해 광의 제2고조파 변환이 실현된 후, 비선형 광학의 눈부신 발전과 더불어 최근 핵융합, x-선 lithography, 레이저에 의한 동위체 분리 등 여러 분야에서 단파장의 레이저가 요구되고 있다.²⁾ 현재 개발중인 Excimer레이저, 자유전자 레이저등은 대출력화가 미흡하다. 그러므로 대출력의 단파장 펄스를 얻기 위해서는 KDP와 같은 비선형 광학 소자를 이용하여 1.064 μm 의 레이저 펄스를 제2, 제3 고조파로 변환시켜 단파장(382 nm)펄스를 얻는것이 가장 유리하다.

본 연구에서는 Nd:YAG 레이저의 파장 1.064 μm 레이저펄스에 대한 제3 고조파 변환에 관해 수치 해석 하여 입사 레이저 펄스 강도에 따른 제3 고조파 변환 효율 및 입사 편광각 θ_p 및 위상 부정합각 θ_m 의 변화에 따른 변환 효율등을 구했으며, 펄스 강도와 rising time이 제3 고조파 변환 효율에 주는 영향등을 알아보았다.

2. 제3 고조파 변환 방정식

Armstrong³⁾ 등에 의해 제시된 고조파 변환 방정식은 아래식⁴⁾으로 주어지며 그 계략도는 그림 1과 같다.

$$\frac{dE_1}{dz} = -\frac{1}{2}\gamma_1 E_1 - iK E_3 E_2^* \exp(-i\Delta k z) \quad (1)$$

$$\frac{dE_2}{dz} = -\frac{1}{2}\gamma_2 E_2 - i2K E_3 E_1^* \exp(-i\Delta k z) \quad (2)$$

$$\frac{dE_3}{dz} = -\frac{1}{2}\gamma_3 E_3 - i3K E_1 E_2 \exp(i\Delta k z) \quad (3)$$

여기서 E_j 는 z방향으로 진행하는 수정된 복소 전계 벡터로서 계산의 간편화를 위해 $E_j = n_j \cdot E_j'$ (단, E_j' 는 복소전계 벡터, n_j 는 j파의 굴절율)로 수정하였다. 그림 1에서 보는 바와 Type - I KDP결정에 의한 제3 고조파 변환의 경우, 첨자 j(j = 1, 2, 3)는 각각 기본파 상광선, 제2 고조파 상광선 및 제3 고조파 이상광선을 나타낸다. 또 Type - II의 경우는 j = 1 이 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, 굴절률에 대한 Δk 식은 Type - I KDP 결정인 경우 식(5)로, Type - II KDP 결정인 경우에는 식(6)으로 주어진다⁵⁾.

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

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

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

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

식(4)의 d_{eff} 는 KDP결정의 실효적 광학상수로서 Type - I KDP 결정은 식(7)에서 KDP 결정을 $\phi = 90^\circ$ 로 절단 했을 때 d_{eff} 는 최대값을 갖게되며, Type - II 의 경우에는 $\phi = 0^\circ$ 로 결정을 절단 했을 때 식(8)의 d_{eff} 값이 최대가 된다.

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

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

θ_m : phase matching angle.

3. 제3고조파 변환의 수치해석 결과 및 고찰

Polarization mismatch 법은 그림1(b)에 있는 바와 같이 doubler와 tripler가 모두 Type - II KDP결정을 사용한 것으로써 입사기본파의 편광각 θ_p 는 doubler의 상광선축에 대해 $\theta_p = \tan^{-1}(1/\sqrt{2}) \approx 35.5^\circ$ 이다. 이것은 doubler에 입사되는 기본파 펄스의 상광선축방향과 이상광선축방향의 강도비가 2 : 1 이 되게하여 doubler로써 기본파 펄스의 일부($\approx 66.7\%$)를 제2고조파 변환시켜 tripler에 입사되는 제2고조파와 기본파 펄스의 강도비가 2 : 1이 되게 하여 tripler의 이상광선축 방향으로 편광된 제3고조파 변환 펄스가 출력되게 하는 방법이다.

KDP결정에 대한 제3고조파 변환방정식인

식(1) - 식(3)을 Runge-Kutta 법에 의해 polarization-mismatch법에 의한 제3고조파 변환을 수치해석하였다.

입력레이저 펄스는 완전히 선형편광 되었고,

시간 t 에 대하여 gauss형이며, 공간강도분포는 일정하다고 가정한 식(9)으로 하였다⁶⁾.

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

T : gaussian pulse width

또 흡수계수 γ_j 는 $\gamma_0 = 0.058 \text{ cm}^{-1}$, $\gamma_1 = 0.020 \text{ cm}^{-1}$, $\gamma_2 = 0.0 \text{ cm}^{-1}$, $\gamma_3 = 0.0 \text{ cm}^{-1}$ 로 하였다⁷⁾. 기본파펄스의 파장 $\lambda = 1.064 \text{ }\mu\text{m}$ 에 대한 Type - II KDP결정의 위상정합각은 doubler의 경우는 $\theta_m = 1.0284[\text{rad}]$, tripler는 $\theta_m = 1.0439[\text{rad}]$ 이며, K 는 $K_{doubler} = 1.128 \times 10^{-6}/V$, $K_{tripler} = 1.096 \times 10^{-6}/V$ (단, $d_{36} = 6.9 \times 10^{-24} [\text{As/V}]$ 이다.

그림2와 그림3은 최적위상정합 되었고 θ_p 가 35.5° 일때 결정의 두께를 파라메타로 했을 때의 제3고조파 변환 효율을 나타낸 것이다. 여기서 doubler와 tripler의 두께는 같게 하였다. Gauss형 입사펄스의 최대강도가 $0 \sim 500 \text{ MW/cm}^2$ 일때 그림2에서 보는 바와 같이 두께가 두꺼워질 수록 변환효율은 증가했으나 $L_d = L_t = 35 \text{ mm}$ 일 경우 400 MW/cm^2 이후 변환효율은 감소하였다.

그림3은 doubler에 입사되는 펄스의 최대강도가 $0 \sim 6 \text{ GW/cm}^2$ 일때 제3고조파 변환효율을 나타낸 것이다. 그림3에서는 KDP 결정의 두께에 따라 최대변환효율에 대응되는 펄스강도의 범위가 두텁게 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 두꺼울 수록 낮은 강도 쪽으로 변환효율의 최대값이 이동되는 것을 알 수 있다.

그림4와 그림5는 위상부정합각 $\Delta\theta$ 에 대한 제3고조파 변환 효율을 나타내었다. $L_d = L_t = 30 \text{ mm}$, $I_{\omega} = 300 \sim 400 \text{ MW/cm}^2$ 인 경우에 그림4에 보는 바와 같이 최적위상정합에서 부터 이탈된 각

$\Delta\theta_d = \Delta\theta_t$ 가 100 μrad 정도될 때 0 μrad 일 때보다 20% 정도 변환효율이 감소되는 것을 알 수 있다. 또 그림 5에서는 $\Delta\theta_d$ 와 $\Delta\theta_t$ 가 같이 0 ~ 500 μrad 으로 변할때 변환 효율로서 $\Delta\theta_d = \Delta\theta_t = 100 \mu\text{rad}$ 으로 위상정합을 하였을 때 최대 강도가 3 ~ 4 GW/cm^2 인 기본파 펄스는 70% 이상의 제3고조파 변환효율을 유지 할 수 있다.

입사평각각 θ_p 의 변화에 따라서 제3고조파 변환효율이 어떻게 변하는가를 그림 6과 그림 7로 알 수 있다. 그림 6과 같이 입사파의 최대강도 300 - 400 MW/cm^2 정도의 펄스는 $\theta_p \geq 35^\circ$ 인 경우보다 $\theta_p \leq 35^\circ$ 인 때가 변화효율의 변동이 작다는 것을 알 수 있다. 또 최대강도 3.5 GW/cm^2 정도일 때는 그림 7에서 보는 바와 같이 $\theta_p = 35^\circ$ 일 때가 가장 높은 변환효율을 얻을 수 있으며 $\pm 1^\circ$ 정도의 오차에서도 변환효율은 5% 이내의 감소를 보였다.

그림 8과 9는 angular-detuning법에 의한 제3고조파 변환효율을 나타 낸 것으로서 그림 1(a)에서와 같은 특수한 파장판이 필요치 않는 Type-I doubler와 Type-II tripler의 조합을 이용하였다. 기본파의 최대강도가 300 ~ 400 MW/cm^2 일때 $\Delta\theta_d$ 를 70 ~ 100 μrad 으로 위상정합하여 50 ~ 60%의 변환효율을 구했으며 3 ~ 4 GW/cm^2 의 기본파에 대해서는 $\Delta\theta_d$ 를 200 μrad 일때 약 50%의 변환효율을 얻었으나 위상부정합각의 변동에 매우 민감한 것을 알 수 있었다.

그림 10과 11은 polarization-bypass법에 의한 것으로서 위상부정합각 $\Delta\theta$ 의 변화에 따라 효율이 급격히 감소되는 결점을 알 수 있으며 위상부정합각에 민감하지 않는 결점이 개발될 경우 높은 효율이 기대되는 방법으로 생각 된다.

4. 결 론

이상의 결과로부터 최대강도가 300 ~ 400 MW/cm^2 인 1.064 μm 의 gauss형 Nd:YAG 레이저 펄스의 제3고조파 변환은 $L_d = L_t = 30\text{mm}$ 일때 최적위상정합 조건에서 65% 정도의 변환효율을 얻었으며, 최대강도가 3 ~ 4 GW/cm^2 정도 1.054 μm 파장의 대출력 Nd:글라스 레이저의 출력 펄스는 $L_d = L_t = 11\text{mm}$, 위상부정합각 $\Delta\theta = 100 \mu\text{rad}$, $\theta_p = 35^\circ \pm 1^\circ$ 의 경우에 제3고조파 변환효율이 75% 이상의 높은 효율을 얻을 수 있었다.

5. 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. Carton, IEEE J. Quantum Electron., QE - 17, p1771, 1981.
- 5) R. S. Carton et al., ibid, QE - 17, p1781, 1981.
- 6) Rep. UCRL-50021-76, 1977.
- 7) Rep. UCRL-50021-79, 1980.

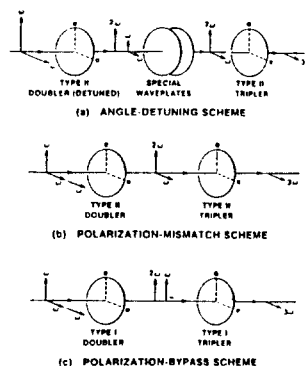


그림 1.

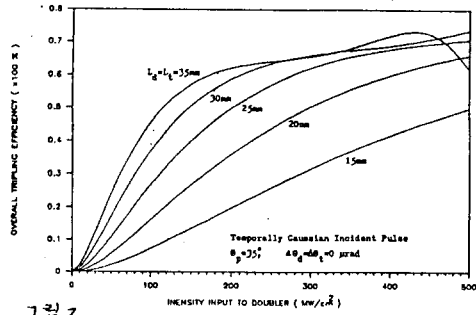


그림 2.

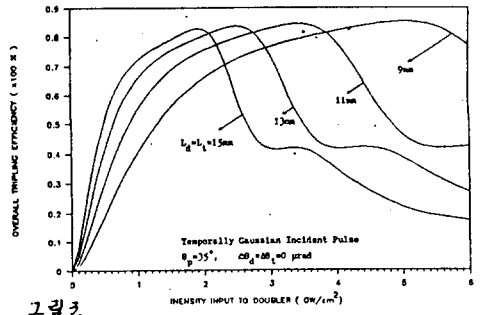


그림 3.

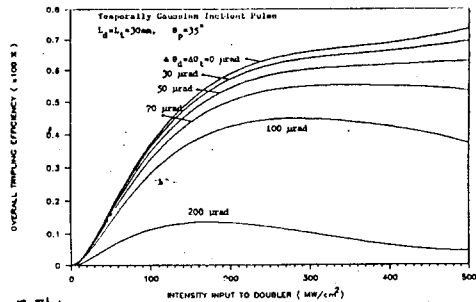


그림 4.

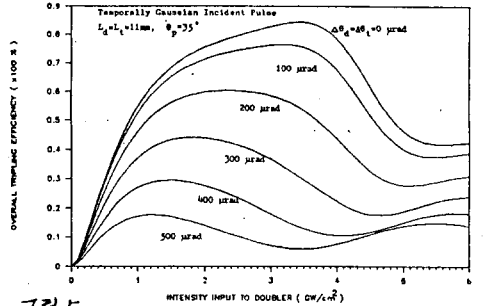


그림 5.

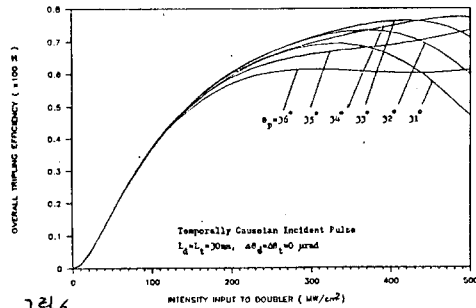


그림 6.

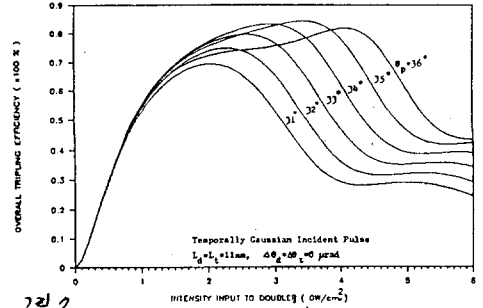


그림 7.

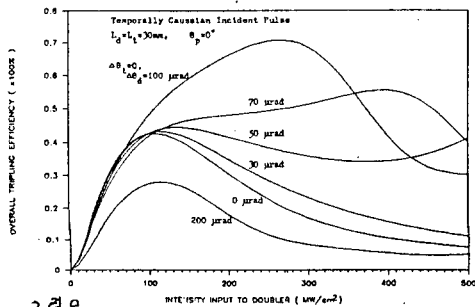


그림 8.

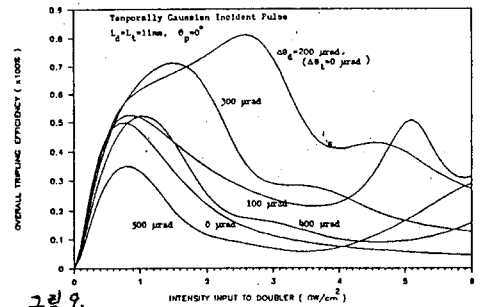


그림 9.

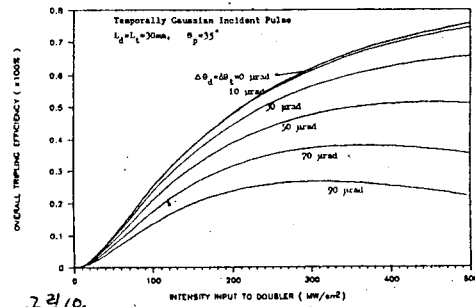


그림 10.

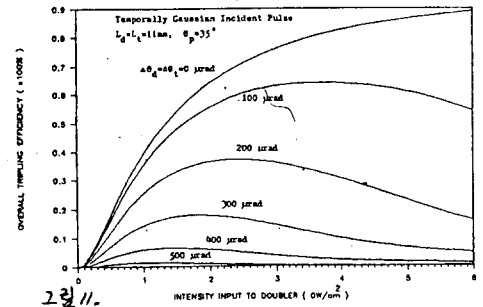


그림 11.