

LD끝면러기 내부공진 2차고조파발진Nd:YAG/KTP 레이저의 단순설계방정식과 해석

장재식, 김일룡

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《기초과학이 든든해야 나라의 과학기술이 공고한 토대우에서 끊임없이 발전할수 있습니다.》

최근 레이저현시, 의학, 빛기록, 생체광학, 수중통신, 상표인쇄, 정밀미소제작과 같은 많은 분야에서는 보임빛과 자외선대역의 소형화된 완전고체레이자가 널리 리용되고있다.[1] 보임빛과 자외선레이자발진에는 적외선레이자의 2차고조파발진(SHG)이 널리 쓰이고있다.[2] 이를 위해 비선형광학결수가 큰 결정들에 대한 연구[3]가 광범히 진행되였다.

KH_2PO_4 (KDP), LiNbO_3 (LN), KTiOPO_4 (KTP), LiB_3O_5 (LBO), $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ (β -BBO), $\text{GdCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ (GdCOB)과 같은 잘 알려진 무기비선형결정들외에도 3-메틸-4-니트로피리딘-1-옥시드(POM)와 N-4-니트로페닐-L-프로니놀(NPP)과 같은 새로운 유기분자비선형결정들과 질산-싱아산염일수화리튬과 같은 새로운 반유기비선형단결정들이 분자공학과 결정성장기술에 의해 성과적으로 만들어졌다.[4]

6mm 길이의 비선형광학결정Sr첨가GdCOB를 리용한 반도체레이자끝면러기 Nd:YVO₄ 내부공진SHG레이저에서 2.3W의 연속록색레이자출력이 17.7%의 빛변환효율로 얻어졌다.[5] 2차고조파의 높은 변환효율은 비선형광학결정의 내부공진SHG에서 이루어지기때문에 SHG변환효율을 비선형광학결정, 레이저결정 그리고 공진기와의 호상관계속에서 해석하는것이 필요하다. 지금까지 공진기파라미터가 주어진 조건에서 SHG변환효율을 실험적으로 측정한 결과들이 많이 발표되었지만 높은 변환효율을 가진 내부공진SHG레이저의 단순설계방정식에 대한 이론적연구는 거의 제기된것이 없었다.

우리는 내부공진SHG레이저의 단순설계방정식에 기초하여 반도체레이자끝면러기 내부공진2차고조파발진Nd:YAG/KTP레이저의 변환효율에 주는 비선형광학결정, 레이저결정의 영향을 이론적으로 밝혔다.

1. LD끝면러기 내부공진 2차고조파발진레이저의 변환출력

LD끝면러기 내부공진2차고조파발진레이저의 구성을 그림 1에 보여주었다.

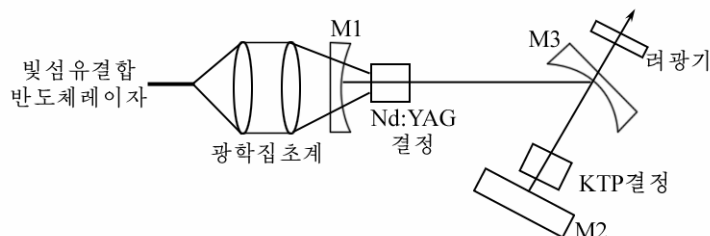


그림 1. LD끝면러기 내부공진2차고조파발진레이저의 구성

M1은 입사면우에 809nm 파장의 반사방지막, 다른 면우에 1.06 μ m 파장의 고반사막과 809nm 파장의 고투과막이 입혀진 오목거울이다. M2는 그것의 안쪽 결면우에 1.06 μ m와 532nm의 두 파장에서 고반사막을 가진 평면거울이다. M3은 굴곡면우에 1.06 μ m에서 고반사막, 532nm에서 고투과막 그리고 다른 면우에 532nm에서 반사방지막이 입혀진 SHG록색 빛의 출구인 오목거울이다.

레이자결정(Nd:YAG)에 대한 러기원천은 807nm의 중심파장을 가진 최대로 30W의 출력을 복사할수 있는 빔섬유결합반도체레이자(OPC-DO30-FCHS)이다. 그것의 출구빛은 광학집초제에 의해서 작은 직경의 초점으로 레이자결정에 집초된다.

레이자결정은 반대면우에 809nm와 1.064 μ m의 반사방지막이 입혀져있다. 기본파의 출력밀도를 증가시키기 위하여 비선형광학결정을 빔뭉음이 쏘여지는 끝면거울 M2의 가까운 근방에 놓는다.

러기빛과 고조파발진빛은 모두 동축가우스빔뭉음이며 레이자결정에서 러기빛의 발산을 무시할수 있다고 가정한다.

빛의 증폭리론으로부터 공진기안에서 빛의 왕복출력증가는 다음과 같다.

$$\Delta P = 2g_0 \frac{\omega_x \cdot \omega_y}{\sqrt{\omega_x^2 + \omega_0^2} \sqrt{\omega_y^2 + \omega_0^2}} \frac{(1/\alpha_p) \cdot (1 - e^{-\alpha_p l}) p}{1 + 4p/\pi\omega_0^2 s_0} \quad (1)$$

여기서 $g_0 = 2\sigma\tau\lambda_p P_{p_0} / \pi h_c \omega_p^2$, σ 와 τ 는 각각 레이자결정의 강제복사단면과 형광수명, h_c 는 플랑크상수, λ_p 는 러기빛파장, α_p 는 레이자결정의 러기빛에 대한 흡수결수, P_{p_0} 은 레이자결정의 입사단면에서 러기빛출력, $\omega_0 = [\lambda^2 L_0 (R_0 - L_0) / \pi]^{1/4}$ 은 평면-오목공진기에 서 기본주파수빛의 조임반경, λ 는 기본발진주파수빛의 파장, L_0 은 공진기의 광학적길이, ω_x 와 ω_y 는 레이자결정에서 러기빛의 평균반경, l 은 레이자결정의 길이이다.

반도체레이자출구와 Nd:YAG결정의 입사면사이의 거리가 d 라고 할 때 레이자결정의 입사면에서 러기빛의 반경은 $\omega_x(0) = \frac{\lambda_p d}{\pi\omega_{0x}}$, $\omega_y(0) = \frac{\lambda_p d}{\pi\omega_{0y}}$ 이다. 여기서 ω_{0x} , ω_{0y} 는 반도체레이자의 출구에서 러기빛의 반경이다.

러기빛은 x , y 축에 대하여 비대칭가우스빔뭉음이며 ω_x , ω_y 는 다음과 같이 표시된다.

$$\omega_x = \sqrt{\omega_x^2} = \left[\frac{1}{l} \int_0^l \omega_x^2(z) dz \right]^{1/2} = \sqrt{\frac{(\omega_x(0) + \theta'_x l)^3 - \omega_x^3(0)}{3\theta'_x l}} \quad (2)$$

$$\omega_y = \sqrt{\omega_y^2} = \left[\frac{1}{l} \int_0^l \omega_y^2(z) dz \right]^{1/2} = \sqrt{\frac{(\omega_y(0) + \theta'_y l)^3 - \omega_y^3(0)}{3\theta'_y l}} \quad (3)$$

여기서 θ'_x , θ'_y 는 각각 x , y 축에서 결정안의 러기빛의 발산각으로서 $\sin \theta_x = n_0 \sin \theta'_x$, $\sin \theta_y = n_0 \sin \theta'_y$ 에 의해 결정된다. 반도체레이자의 경우 $\theta_x = 30^\circ$, $\theta_y = 10^\circ$ 정도이다.

내부공진2차고조파발진레이자의 안정한 레이자발진조건은 왕복출력증가와 총손실(비선형손실 δ_n + 선형손실 δ_l)이 같아야 한다.

$$\delta_l = \delta_0 + 1 - e^{-2\alpha l_c} \quad (4)$$

여기서 α 는 KTP결정의 기본주파수빛에 대한 흡수결수, l_c 는 KTP결정의 길이, δ_0 은 공

진기의 산란손실, 회절손실, 공진거울의 투과손실 등 기타 손실의 총합이다.

2차고조파출력밀도 S_{SHG} 는 다음과 같이 표시된다.

$$S_{SHG} = 2(\mu_0 / \varepsilon_0)^{1/2} \frac{\omega^2 d_{\text{유효}}^2 S^2}{n_1^2 n_2 c^2} \sin^2(\Delta k l_c / 2) \quad (5)$$

여기서 S 는 공진기안에서 기본주파수빛의 출력밀도, n_1 과 n_2 는 각각 기본주파수빛과 2차고조파빛에 대한 KTP결정의 굴절률이다.

비선형결정에서 기본주파수빛의 산란을 무시하고 KTP결정전체에서 완전한 위상정합이 이루어졌다고 하면 비선형손실은 $\delta_n = KS$ 로 된다. 여기서

$$K = 4(\mu_0 / \varepsilon_0)^{1/2} \frac{\omega^2 d_{\text{유효}}^2 l_c^2}{n_1^2 n_2 c^2} \quad (6)$$

이로부터 안정한 레이자발전조건은 다음과 같이 표시된다.

$$4K \left(\frac{P}{\pi \omega_0^2} \right)^2 + (Ks_0 + 4\delta_l) \frac{P}{\pi \omega_0^2} + \delta_l s_0 - 2s_0 l' g_0 \frac{\omega_x \omega_y}{\sqrt{\omega_x^2 + \omega_0^2} \sqrt{\omega_y^2 + \omega_0^2}} = 0 \quad (7)$$

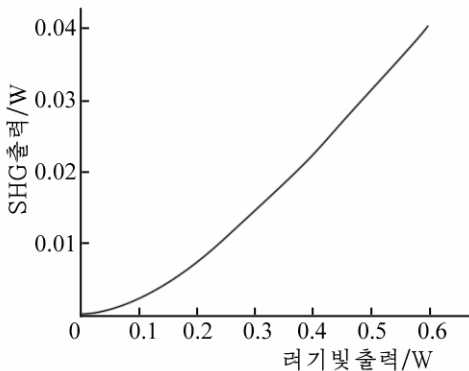


그림 2. 펌프광출력에 따르는 2차고조파 발전출력의 변화

여기서 $s_0 = \frac{\hbar \omega}{\sigma \tau}$ 는 포화빛출력밀도, ω 는 기본주

파수빛의 각주파수, $l' = \frac{1}{\alpha_p} (1 - e^{-\alpha_p l})$ 이다.

식 (7)로부터 SHG변환효율에 주는 비선형광학결정, 레이자결정 그리고 공진기파라미터들의 영향을 이론적으로 계산할수 있다.

이로부터 식 (7)은 내부공진SHG레이자의 단순설계방정식으로 된다.

KTP결정은 비선형광학결수, 빛손상턱값, 위상정합각도허용폭이 큰 비선형결정으로 널리 쓰이고있다.

식 (7)에 기초하여 그림 1에 보여준 반도체레이자끝면러기 내부공진2차고조파발전Nd:YAG/KTP레이자의 펌프광출력에 따르는 2차고조파발전출력을 평가하면 그림 2와 같다.

2. 변환효율에 주는 KTP결정과 Nd:YAG결정의 영향

집초된 가우스빔묶음에서 2차고조파발전출력에 주는 인자는 기본주파수빛과 2차고조파사이의 위크오프효과에 의한 유효호상작용길이의 감소, 기본주파수빛의 회절효과에 의한 출력밀도의 감소 및 위상정합방향으로부터의 편차이다. 이것을 고려한 2차고조파변

환효율이 최대가 되는 최적립계위상정합방향은 성능지수 $a = \frac{d_{\text{유효}}^2 M}{n_1^2 n_2 \rho}$ 이 최대가 되는 방향이다. 여기서 $d_{\text{유효}}$ 는 유효비선형광학결수, M 은 허용각도, ρ 는 위크오프각이다.

KTP결정에서 II형위상정합의 경우에 a 를 평가하면 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 에 대하여 $\theta = 90^\circ$,

$\varphi = 24^\circ$ 방향에서 $d_{\text{유효}} = -7.3 \times 10^{-12} \text{ m/V}$, $a = 2.7 \times 10^{-25} \text{ m}^3/\text{V}^2$ 으로서 최대값을 가진다.

LD결면러기 내부공진2차고조파발진레이자에서도 역시 이 방향에서 2차고조파발진출력이 최대로 된다.(그림 3)

결정의 유효호상작용길이는 ω_0 이 주어진 조건에서 $l_c = l_c^{\text{유효}} < l_a, l_f, l_m$ 으로 결정된다. 여

기서 $l_m = \sqrt{\frac{M}{\partial(\Delta B)/\partial l_c}} [\partial(n_2^e - n_1^o)/\partial \varphi]$, n_2^e 는 2차고조파의 이상광선굴절률, n_1^o 는 기본주파수빛의 보통광선굴절률, $l_a = \sqrt{n_1} \omega_0 / \rho$, $l_f = \frac{\pi n_1}{\lambda} \omega_0^2$ 이다.

KTP결정에서는 최적위상정합방향에서 θ 와 φ 에 대하여 각각 비림계 및 림계위상정합이기 때문에 φ 에 관한 광학적불균일성이 기본인자로 된다. $\partial(\Delta B)/\partial l_c$ 가 10^{-4} , 10^{-5} mm^{-1} 일 때 l_m 은 각각 15, 45mm 이다. 그러나 식 (7)에 의하면 결정의 유효호상작용길이는 공진기에서 결정 자체의 손실로 인한 제한을 받는다. 즉 $l_c^{\text{유효}}$ 가 커질수록 변환효율은 증가하지만 결정 자체의 흡수손실로 인한 제한을 받는다.

그림 4에서 보는바와 같이 P_{SHG} 는 KTP결정과 공진기의 기타 손실값에 따라서 $l_c = 5 \sim 10 \text{ mm}$ 부근에서 포화값에 도달한다.

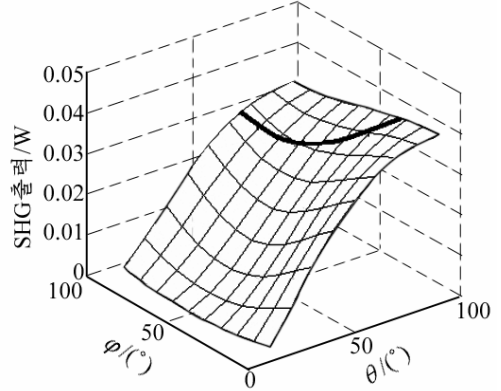


그림 3. KTP결정의 결정학적방위에 따르는 2차고조파발진출력의 변화

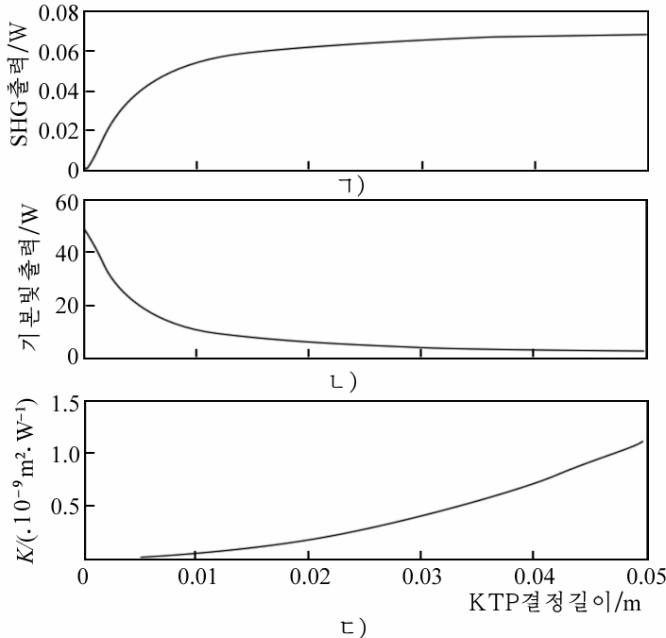


그림 4. KTP결정의 결정길이에 따르는 파라미터의 변화
가) 2차고조파발진출력, 나) 기본빛출력, 다) 비선형손실인자

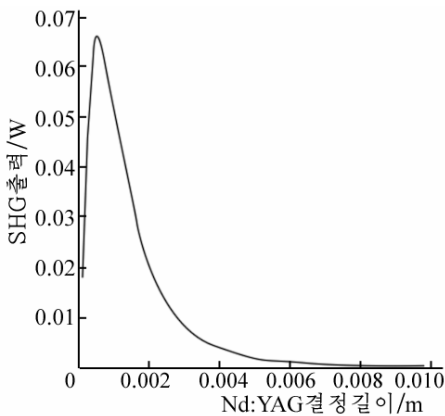


그림 5. Nd:YAG결정길이에 따르는
2차고조파발진출력의 변화

였다. KTP결정에서 II형위상정합의 경우에 a 를 평가하면 $\lambda_p = 1.064 \mu\text{m}$ 에 대하여 $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 24^\circ$ 방향에서 $d_{\text{유효}} = -7.3 \times 10^{-12} \text{ m/V}$, $a = 2.7 \times 10^{-25} \text{ m}^3/\text{V}^2$ 으로서 최대값을 가진다. KTP결정의 길이는 러기빛출력 0.5~12W에 대하여 5~10mm로 제한되며 레이자결정의 최적길이는 $l = 1.1 \sim 1.3 \text{ mm}$ 이다. 이 결과들은 비선형광학결정소자의 연구와 응용에 이용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] X. T. Tao; Opt. Express, 21, 7821, 2013.
- [2] P. Nagapandisevi et al.; Opt. Mater., 47, 398, 2015.
- [3] D. S. Yuan et al.; J. Cryst. Growth, 433, 59, 2016.
- [4] J. Dalal et al.; Opt. Mater., 51, 139, 2016.
- [5] J. H. Liu et al.; Opt. Commun., 195, 267, 2001.

주체108(2019)년 9월 5일 원고접수

Simple Design Equation and Analysis of LD End-Pumped Intracavity Second Harmonic Generation Nd:YAG/KTP Laser

Jang Jae Sik, Kim Il Ryong

We derived the simple design equation of intracavity SHG laser. On the basis of it we theoretically estimated the influences of nonlinear optical crystal, laser crystal and resonator parameters on conversion efficiency of LD end-pumped intracavity SHG Nd:YAG/KTP laser. In the case of type-II phase matching(PM), the optimal length of KTP crystal is limited to 5~10mm for the pumped power 0.5~12W and the optimal length of Nd:YAG crystal has the range of 1.1~1.3mm in the PM direction of $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 24^\circ$.

Keywords: SHG, nonlinear optical crystal, Nd:YAG/KTP laser