

β -barium borate를 이용한 고리형 OPO의 발진특성Characteristics of the ring-type OPO using β -barium borate

임충수 · 김달우 · 오기장

포항산업과학연구원(RIST) 계측연구팀

cslim@risnet.rist.re.kr

I. 서론

OPO(optical parametric oscillator)는 비선형 단결정을 이용한 파장가변형 광원으로써 파장가변영역이 넓고 단결정의 수명도 매우 길다. 또한 펌핑 광의 변환효율이 높아 소형의 공진기에서도 높은 출력을 얻을 수 있다. 이러한 장점들로 인해 OPO는 파장가변영역이 좁고 색소의 주기적인 교환이 필요한 큰 규모의 색소 레이저에 대한 효율적 대안으로 인식되고 있다. 그러나 OPO는 비선형 단결정의 광학적 손상한계(optical damage threshold)가 낮고 parametric oscillation에 필요한 최소 펌핑 에너지가 커서 OPO 시스템의 실용화 및 응용이 아직 본격화되지 않고 있다. 그러나 최근 우수한 특성의 새로운 비선형 단결정이 등장하고 고효율의 펌핑 레이저가 사용되면서 이러한 문제점들이 점차 해결되고 있는 추세이다. 분광학 분야에서는 분광분석의 목적에 따라 넓은 선폭(broad bandwidth) 또는 좁은 선폭(narrow bandwidth)의 광원이 사용되며 특히 넓은 선폭의 광원은 측정대상 물질에 관한 많은 분광학적 정보를 단시간 내에 취득할 때 사용되며 동작 효율이 높고 레이저 구성이 상대적으로 간단하므로 현장용 분광학적 계측장비의 광원으로 적합하다. 본연구에서는 현장적용성이 우수한 넓은 선폭의 OPO 레이저를 구성하고 그 발진특성을 분석하였다.

II. 이론적 배경

Optical parametric process는 비선형 단결정을 통과하는 진동수 ω_p 의 펌핑 광자(photon)가 자발방출(spontaneous emission) 또는 여기방출(stimulated emission)에 의해 두 개의 낮은 에너지 광자(주파수 ω_1 과 ω_2)로 분리되는 현상이다. 상호 작용하는 광선이 동축 상에 있는 경우 각각의 광자들은 에너지 보존 및 위상정합(phase-matching) 조건에 의해 다음의 조건들을 따른다.

$$\omega_p = \omega_1 + \omega_2 \quad (1)$$

$$n_p \omega_p = n_1 \omega_1 + n_2 \omega_2 \quad (2)$$

이 조건들중 위상정합 조건은 비선형 효과에 의해 생성되는 빛의 파장분포를 결정한다. 일반적인 등방성 분산매질(isotropic dispersive medium)의 경우 펌핑 광의 파수 벡터의 크기는 항상 너무 커서 위상정합 조건을 만족시킬 수 없다. 그러나 비등방성 매질에서의 굴절률이나 파수 벡터는 단결정의 축에 대한 빛의 진행방향에 따라 다르다. 따라서 단결정을 회전시키면 펌핑광의 파수 벡터 또는 운동량의 크기가 달라지며 이러한 현상은 OPO의 기본적인 파장가변 원리이다. Parametric process의 선폭(bandwidth)은 펌핑 광의 발산성(divergence)과 스펙트럼의 폭(spectral width)에 의해 결정된다. 일반적으로 펌핑 광이 단결정의 주축 방향으로 진행하지 않을 경우 선폭은 펌핑광의 발산성에 따라 선형적으로 변한다. 비등방성 단결정의 주축(principal axis) 방향으로는 이러한 위상정합 조건이 큰 영향을 미치지 않는다. 실제로 parametric process에 의해 생성된 빛의 선폭은 비선형 단결정의 물리적 길이에 의해 주로 결정된다.

III. OPO의 구성 및 출력특성

OPO 레이저 시스템의 구성은 그림 1과 같다. Nd:YAG 레이저로부터 3차 조화파를 생성한 후 355nm에서 높은 반사율을 갖고 532nm와 1064nm에서는 투과율이 높은 두 개의 high energy UV dichroic mirror D₁과 D₂를 사용하여 파장 355nm인 UV 빔만을 추출하였다. 이 광선은 beam

reducer(BR)를 통하여 직경이 축소된 후 signal 주파수에서 단일 공명을 이루는 고리형 공진기(ring cavity)에 입사된다. 고리형 공진기를 통하여 607nm의 중심파장을 얻기 위하여 평면거울 M_1 과 M_2 는 이 파장에서 높은 반사율을 가지며 M_3 는 output coupler로써 30%의 투과율을 갖는다. M_3 를 통과한 OPO의 출력은 Pellin Broca prism(PP)을 통해 signal과 idler 광선으로 분리하였다. 이러한 고리형 공진기는 거울에 의한 펌핑 레이저의 back reflection을 방지한다. 이 구성은 또한 좁은 선폭 OPO의 구현을 위한 injection seeding도 가능하다. 비선형 단결정으로 사용된 beta-barium borate(BBO)는 크기가 7x7x15mm이며 type I의 위상정합을 위해 광축에 대해 30°로 절단되었다. 이 BBO는 흡습성(hygroscopy)이 낮고 기계적 강도가 높으며 화학적으로 안정하다. 또한 191nm까지의 짧은 파장에서도 투명하며 복굴절성(birefringency)이 상대적으로 높다. 그러므로 이 물질은 넓은 파장영역에서 위상정합과 파장조율이 가능하다.

Rotational stage를 이용하여 BBO 단결정을 회전시킴으로써 OPO의 출력파장을 조율하였다. Signal 파장은 optical multichannel analyzer를 이용하여 측정하였다. 각각의 위상정합에 대해 signal 광선을 측정 후 idler 파장은 이론식을 통해 추론하였다. 그림 2에 실험적으로 얻은 OPO의 조율영역을 나타내었다. OPO의 signal 광선을 424nm에서 695nm까지 조율하였으며 이 때 idler는 726nm에서 2181nm까지 가변되었다. OPO의 응용시 자주 사용되는 607nm의 signal 파장에서 작동하는 OPO의 출력에 대해 조사하였다. Parametric oscillation을 위한 임계 펌핑 에너지는 10mJ이었으며 이에 상응하는 임계 에너지 밀도와 임계 전력 밀도는 각각 $0.1\text{J}/\text{cm}^2$ 와 $20\text{MW}/\text{cm}^2$ 이었으며 이는 단결정의 손상 임계(damage threshold)인 $5\text{GW}/\text{cm}^2$ 보다 훨씬 낮다. 펌핑 에너지가 70mJ일 때 signal의 최대 출력은 9.0mJ이었으며 이는 signal만을 고려할 때 12.9%의 변환효율에 해당한다. Slope efficiency는 약 20%이었다. Idler 광선에 대한 변환 효율은 10.7% (idler의 최대 에너지는 7.5mJ)이었다. 펌핑 광의 에너지를 50mJ로 일정하게 유지하고 각각의 조율 영역에 대해 보정된 OMA를 통하여 선폭을 측정하였다. 스펙트럼의 선폭은 파장 650nm까지는 완만하게 증가하고 그 이상의 영역에서는 급격히 증가하였다.

IV. 결론

광대역에 걸쳐 파장가변이 가능한 고리형 공진기의 OPO 시스템을 구성하였다. 공진기 내의 비선형 단결정으로는 type I β -BBO를 사용하였다. 이 OPO는 Q-switched Nd:YAG 레이저의 355nm의 출력을 펌핑 광으로 이용하였으며 signal 파장에서 단일공명을 일으켰다. Signal 광선은 424nm에서 695nm까지 조율되었으며 이에 해당하는 idler 파장의 조율범위는 726nm-2181nm이었다. 이 OPO가 70mJ의 에너지로 펌핑되고 607nm의 signal 파장으로 작동될 때 signal과 idler의 출력은 각각 9.0mJ과 7.5mJ이었다. 이에 해당하는 signal의 변환효율은 12.9%, idler의 변환효율은 10.7%이었으며 총 변환효율은 23.6%이었다. Signal 광선중 파장이 607nm인 광선의 선폭은 1.7nm이었다.

References

1. J.G.Haub et al, Appl.Phys. Lett. Vol.58, pp.1718-1720 (1991)

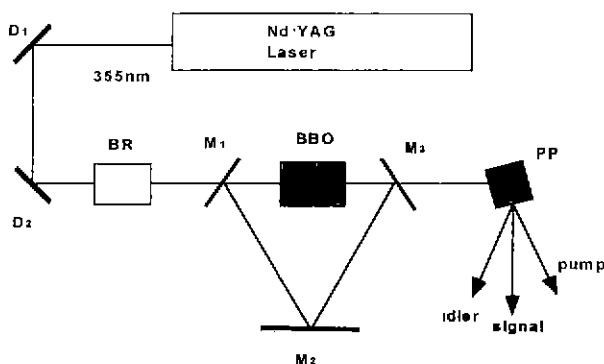


Fig. 1. A schematic diagram of the OPO laser system using BBO pumped at 355nm by Q-switched Nd:YAG laser.

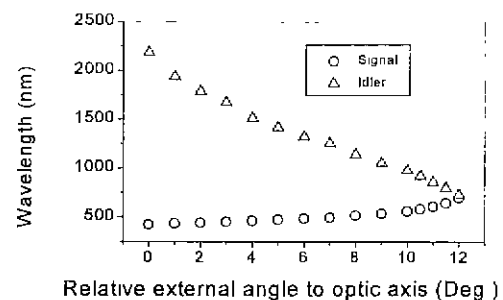


Fig. 2. Tuning responses in a BBO-OPO. The symbols represent the experimental data.