

넓은 파장영역에서 낮은 문턱 펌프출력으로 동작하는 MgO:PPLN 연속파 파라메트릭 발진기

Wavelength-tunable low-threshold continuous-wave (CW) optical parametric oscillator (OPO) using MgO:PPLN

이동훈, 박승남, 김승관, 이재용*, 박희수*, 최상경*
한국표준과학연구원(KRISS) 기반표준부, *전략기술연구부
dh.lee@kriss.re.kr

파라메트릭 발진기(OPO)는 2차 비선형성이 큰 광학결정을 이용하여 파장이 짧은 펌프(pump) 레이저의 출력빔을 시그널(signal)과 아이들러(idler)라 부르는 두 개의 파장이 긴 빔으로 변환하는 결맞는(coherent) 광원이다. 파라메트릭 변환의 위상맞춤(phase-matching) 조건을 조절하면 자유롭게 출력 파장을 선택할 수 있기 때문에 OPO는 가시광 및 적외선 영역에서 대표적인 파장가변 레이저로 사용되고 있다. 특히 최근에는 준위상맞춤(quasi-phase-matching) 기술을 적용함으로써 OPO의 변환효율과 파장변환 특성이 획기적으로 향상되었다⁽¹⁾.

우리는 준위상맞춤 기술을 적용하여 매우 넓은 파장영역에서 100 mW 이하의 저출력 펌프레이저로 동작할 수 있는 연속파(CW) OPO를 개발하였다. 출력 파장영역은 시그널파가 790 nm에서 920 nm까지, 아이들러파가 1260 nm에서 1620 nm까지이며 발진이 시작되는 문턱 펌프출력은 전 영역에서 30 mW 미만이고 펌프출력이 100 mW 이상이면 복사출력은 대부분의 아이들러 파장에서 0.5 mW가 넘었다. 이러한 파장가변 CW-OPO는 Si 및 InGaAs 검출기의 분광감응도 등 특성평가에 매우 유용한 광원이다. 또한 동시에 생성되는 시그널파와 아이들러파의 양자적 상관관계를 이용하여 양자 광측정 및 양자 광정보기술에 활용할 수 있는 중요한 양자광원이기도 하다⁽²⁾.

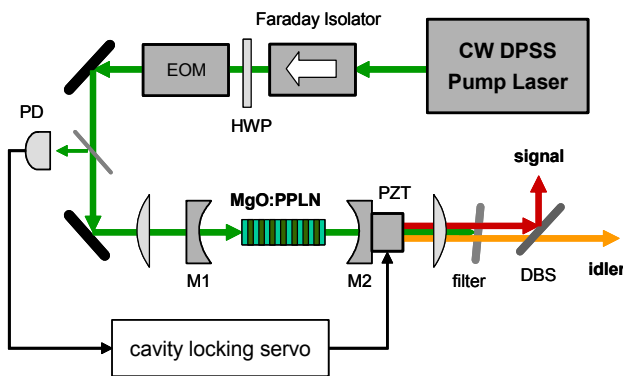


그림 1. CW-OPO

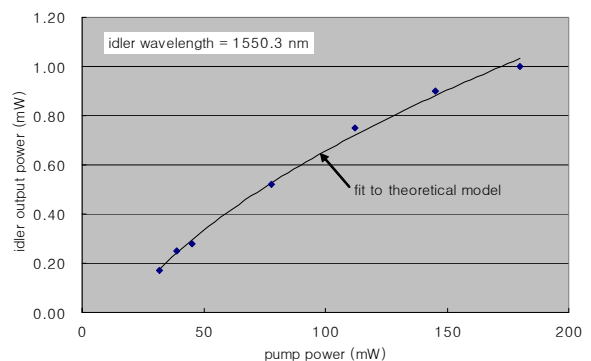


그림 2. 아이들러 출력의 펌프 출력에 대한 특성.

그림 1은 CW-OPO 장치의 개략도이다. 펌프 레이저로는 532 nm 파장에서 단일 횡모드 빔을 연속 출력하는 다이오드 여기 고체레이저(DPSS, Coherent Verdi)를 사용하였다. 펌프 레이저의 출력빔은 패러데이 광격리기(Faraday isolator)와 위상변조기(electro-optical modulator, EOM)를 통과하여 초점거리 120 mm의 볼록렌즈로 OPO 공진기 내부의 비선형 결정에 모아 주었다. QPM 비선형 결정으로는 주기적으로 분극반전된 MgO 첨가 LiNbO₃(periodically poled MgO-doped lithium niobate, MgO:PPLN)를 사용하였다. 이 결정(대만 HCP 제작)은 길이가 40 mm, 폭이 10 mm, 두께가 0.5 mm이며 7.1 μm에서 7.6 μm까지 분극반전 주기(Λ)를 0.1 μm 간격으로 달리한 6개의 채널이 길이방향으로 가공되어 있다. 결정은 두 개의 오목거울(M1, M2, 곡률반경 30 mm, 독일 Laseroptik 제작)로 구성된 광학적 공진기 중앙에 위치하며 빔이 통과하는 양쪽 면은 펌프, 시그널, 아이들러 파장에서 무반사 코팅을 하여 공진기 손실을 최소화하였다. 펌프빔이 입사하는 공진기 거울(M1)은 펌프파장에서 약 95 %, 시그널과 아이들러 파장에서 99.9 % 이상의 반사율을 가지며, 반대쪽 거울(M2)은 펌프와 시그널 파장에서 99.9 % 이상, 아이들러 파장에서 약 80 %의 반사율을 가진다. 두 거울은 40 mm 길이의 결정을 사이에 두고 약 78 mm 거리를 두고 있어 공초점 파라미터(confocal parameter) b 가 약 20 mm인 공진기를 구성한다.

공진기의 길이는 Pound-Drever-Hall 방법⁽³⁾을 통해 펌프파장에 안정시켜 OPO가 연속파를 출력하도록 하였다. 이를 위해 사용된 위상변조 주파수는 100 MHz이고 공진기에서 되돌아오는 펌프빔의 일부를 빠른 Si 광다이오드(photodiode, PD)로 검출해 증폭 및 복조(demodulation) 등을 거쳐 서보(servo) 신호를 만들었다. 서보신호는 출사거울에 부착된 압전튜브(piezo-electric transducer, PZT)로 주어 공진기 길이를 제어하였다. 펌프 레이저의 편광은 반파장판(half waveplate, HWP)을 사용하여 MgO:PPLN 결정의 분극방향과 평행하고 결정이 놓인 방향과는 수직이 되도록 조절하였다. 공진기에서 나오는 빔은 초점거리 120 mm의 볼록렌즈를 사용하여 다시 평행하게 만들어 준 뒤 레이저 출력계 혹은 광스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer, OSA)를 사용하여 세기와 파장을 측정하였다. 시그널과 아이들러 빔은 파장별 빔분리기(dichroic beamsplitter, DBS)를 사용하여 구별하였으며 결정을 투과한 펌프 레이저빔은 532 nm만 선택적으로 흡수하는 필터(notch filter)를 사용하여 차단하였다.

그림 2는 아이들러 파장이 1550.3 nm, 시그널 파장이 809.9 nm일 경우에 펌프출력에 따른 아이들러 출력을 측정한 결과(마름모 표시)이다. 이 때 MgO:PPLN 결정 온도는 73 °C, 분극반전 주기는 7.5 μm이었다. 그림의 실선은 측정결과에 최소제곱법(least square fit)으로 맞춘 OPO 이론모델에 따른 출력 함수 $P_{idler} = \eta(\sqrt{P_{th}P_{pump}} - P_{th})$ 이다⁽⁴⁾. 여기서 P_{th} 는 문턱 펌프출력(threshold pump power)이고 η 는 효율계수인데 각각 16.4 mW와 0.027로 산출되었다. 결정의 온도와 분극반전 주기를 변화시켜 아이들러 파장을 1260 nm에서 1620 nm까지 변환하여도 이러한 출력특성에 큰 변화가 없음을 확인하였다.

우리는 이외에도 출력 안정도와 분광특성 및 선폭 등 레이저 광원으로서 중요한 CW-OPO의 특성을 평가하고 이러한 파장가변 CW-OPO를 이용한 광검출기 특성평가 실험을 소개할 예정이다.

1. R. L. Sutherland, "Handbook of nonlinear optics," 2nd edition, Marcel Dekker, New York (2003), chapter 3.
2. H.-A. Bachor and T. C. Ralph, "A guide to experiments in quantum optics," 2nd edition, Wiley-VCH, Weinheim (2004).
3. R. W. P. Drever *et al.*, Appl. Phys. B **31**, 97 (1983).
4. D.-H. Lee *et al.*, Appl. Phys. B **66**, 747 (1998).