

## 연속파 파라메트릭 발진기의 주입파종 발진

### Injection-seeding of a CW optical parametric oscillator

이동훈\*, 박승남\*, 박희수\*\*, 최상경\*\*, 이재용\*\*, 문한섭\*\*\*

\*한국표준과학연구원(KRISS) 기반표준부, \*\*한국표준과학연구원(KRISS) 전략기술연구부,  
\*\*\*부산대학교 물리학과

dh.lee@kriss.re.kr

연속파 파라메트릭 발진기(CW-OPO)는 비선형 광학결정과 공진기로 구성되어 파장이 짧은 연속파 펌프(pump) 레이저의 출력빔을 시그널(signal)과 아이들러(idler)라 부르는 두 개의 파장이 긴 빔으로 변환하여 출력하는 결맞는(coherent) 광원이다. 우리는 최근 MgO:PPLN 결정을 사용하여 준위상맞춤(quasi-phase matching)을 적용한 파장변환 CW-OPO를 개발하여 InGaAs 광다이오드 검출기를 사용하는 적외선영역 광원으로 활용하고 있다<sup>(1)</sup>. 이러한 CW-OPO는 공진기가 펌프파장과 시그널파장에 동시에 공진조건을 유지하도록 설계하여함으로써 펌프 문턱출력을 100 mW 이하로 낮추어 손쉽게 구할 수 있는 532 nm 고체레이저를 펌프레이저로 사용하여도 수 mW 내외의 근적외선 출력을 얻을 수 있는 실용적인 장점이 있다. 하지만 이러한 이중 공진조건은 단일 횡모드 출력을 수 초 이상 유지하기 어려운 단점을 유발하였는데 그 이유로는 공진기 내부의 높은 펌프 및 시그널 출력에 의한 결정 내부에 온도 변화와 이를 통한 공진 조건의 변화가 유력하다.

우리는 낮은 펌프출력을 유지하면서도 안정된 단일 횡모드 출력을 얻기 위하여 외부에서 다이오드 레이저 출력빔을 공진기에 주입함으로써 OPO의 발진을 유도하는 주입파종(injection-seeding)을 시도하였다. 주입파종은 외부에서 OPO 공진기로 특정 주파수의 레이저빔을 주입하여 해당 모드에서 OPO 발진이 다른 모드보다 쉽게 이루어지는 조건을 만들어 줌으로써 단일 모드에서의 발진을 유도하는 방법이다<sup>(2)</sup>. 주입파종에 의해 발진하는 OPO는 출력특성이 주입 레이저의 특성에 따라 결정되므로 다이오드 레이저 등 안정도와 파장가변 특성이 우수한 레이저로 펄스형 OPO의 출력 선폰을 줄이고 빔모양과 파장변환 특성을 향상하기 위하여 주로 사용하는 방법이다<sup>(3)</sup>. 하지만 CW-OPO에 적용한 시도는 아직 보고된 바가 없는 것으로 알고 있다. 또한, 주입파종은 연속파 레이저에서 특성 안정화 등에 많이 사용되는 주입잠금(injection-locking)과는 원리적으로 구별되는 기술이다<sup>(4)</sup>. 주입잠금은 이미 특정 모드에서 발진이 시작된 레이저(혹은 OPO 등 진동자)에 외부 레이저빔을 주입하여 두 레이저가 동일한 특성으로 출력하도록 하는 일종의 동기화(synchronizing) 방법인 반면 주입파종은 발진이 이루어지지 않은 레이저에 주입하여 특정한 모드를 골라 발진시키는 모드선택(mode selection) 방법이다.

우리는 CW-OPO의 펌프출력을 낮게 조절하여 자체적으로는 발진이 되지 않도록 만든 후 시그널 파장에 해당하는 단일모드 다이오드 레이저를 공진기에 주입하여 그 모드에서만 OPO 발진이 이루어지도록 하였다. 그림 1은 CW-OPO의 주입파종 발진 실험장치의 개략도이다. OPO는 길이 40 mm의 MgO:PPLN 결정과 공초점 파라미터가 약 20 mm인 일자형 공진기로 구성되며 532 nm에서 단일 횡모드로 연속 출력하는 다이오드 여기 고체레이저를 펌프레이저로 사용하였다<sup>(1)</sup>. 결정의 분극반진 주기는 7.7  $\mu\text{m}$ 로 선택하여 온도가 약 40  $^{\circ}\text{C}$ 일 때 시그널파장이 780 nm, 아이들러 파장이 1673 nm 근처가 되도록 하였으며 이 조건에서 문턱 펌프출력은 약 60 mW로 확인하였다. OPO의 공진기 길이는

Poud-Drever-Hall 방법에 따라 펌프레이저 파장에 안정화하여 펌프 공진조건이 연속적으로 유지되도록 만들어 주었다<sup>(1)</sup>. 주입 레이저로 사용한 레이저는 파장 780 nm 근처에서 출력하는 파장가변 외부공진기 형 다이오드 레이저(ECDL, external cavity diode laser)이며 단일모드 광섬유를 통과한 후 OPO 공진기 모드에 거울 M2를 통하여 입사하였다. 거울 M2 직전에 측정된 다이오드 레이저 출력(주입출력)은 편광을 OPO 시그널 출력의 편광과 일치하도록 조절한 상태에서 최대 7 mW에 이르렀다. OPO 공진기를 통과한 다이오드 레이저 출력은 그림 1와 같이 실리콘 다이오드(Si-PD #2)로 관측하여 다이오드 레이저의 파장을 OPO 공진기 모드에 주파수변조와 Lock-In 증폭을 통해 안정화하는데 이용하였다.

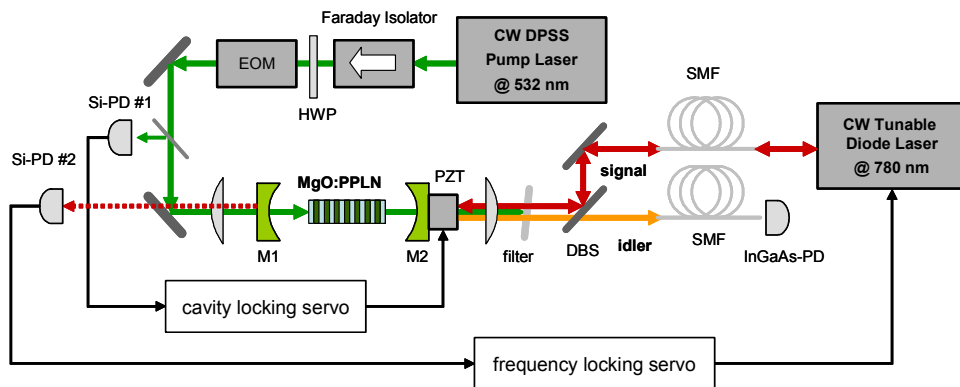


그림 1. CW-OPO의 주입파종 발진 실험장치의 개략적인 구성.

주입파종 발진은 펌프출력이 50 mW 미만으로 OPO 발진이 이루어지지 않는 조건에서 다이오드 레이저를 주입함과 동시에 아이들러 출력이 관측되는 것을 통하여 확인하였다. 펌프출력 38 mW, 주입 출력 6.6 mW일 때 주입파종 발진에 의한 아이들러 출력은 약 0.9 mW으로 측정하였다. 특히 펌프출력을 높여 CW-OPO 자체적으로 발진할 경우 수 초의 시간간격으로 모드튐(mode hopping)이 발생하여 지속적인 단일모드 동작이 불가능하였던 반면 낮은 펌프출력에서 주입잠금으로 발진할 경우 OPO 공진기 모드와 다이오드 레이저의 주파수 안정화가 유지되는 한 CW-OPO의 출력모드는 수 분 이상 단일 모드를 유지하는 것을 아이들러 파장에서 패브리-페로(Fabry-Perot) 간섭계로 스펙트럼을 관측하여 확인할 수 있었다.

결론적으로 우리는 CW-OPO의 주입파종 발진을 실험적으로 구현하였으며 이 경우 CW-OPO의 특성은 다이오드 레이저에 의하여 지배되므로 출력 및 주파수의 안정도가 월등히 향상되는 것을 확인하였다. 우리는 앞으로 OPO의 공진기 구조를 개선하고 파장가변이 가능한 펌프레이저를 사용함으로써 펌프 파장과 시그널 파장의 공진기를 분리하여 각각 독립적으로 제어할 수 있도록 개선할 계획을 가지고 있다. 펌프와 시그널 공진기를 각각 펌프레이저와 주입레이저에 안정화한다면 다이오드 레이저의 우수한 파장가변 특성을 CW-OPO를 통하여 적외선 아이들러 파장으로 전달할 수 있어 분광연구 혹은 두 출력 사이의 양자 상관관계를 이용한 연구 등에 활용도가 높을 것으로 기대한다.

1. 이동훈 등, 한국광학회 2006 하계학술발표회 논문집 69쪽.
2. J. E. Bjorkholm, H. G. Danielmeyer, Appl. Phys. Lett. 15, 171 (1969).
3. G. Anstett, R. Wallenstein, Appl. Phys. B 79, 827-836 (2004).
4. A. E. Siegman, "Lasers," University Science Books (Mill Valley, California, 1986), Chapter 29.