

## 1. 서론

중적외선이라 하면 일반적으로 파장이 3-30  $\mu\text{m}$ 의 영역에 있는 전자기파를 말하나, 경우에 따라 2  $\mu\text{m}$  대 영역의 것을 포함하기도 한다. 중적외선 영역의 레이저 광원은 매우 넓은 범위에서 이용하고 있다. 많은 분자들의 결합 공명이 이 영역에 있기 때문에 물질 분광, 물질 가공, 의료, 등의 분야에서 이용할 수 있으며, 특히 대기 투과 영역인 3-5  $\mu\text{m}$ , 8-13  $\mu\text{m}$ 에 해당하는 중적외선 레이저 광원은 대기 기체를 분석하는 환경 분야나, 원격 폭발물 탐지, 열 추적 유도탄 방어 같은 국방 분야, 그리고 무선 통신 분야에도 이용하고 있다 [1].

중적외선 레이저 광원으로 QC(Quantum Cascade) 레이저, 파이버 레이저, 광매개 공진기, 등을 꼽을 수 있다.

어 있어 광정렬이 틀어지지 않고, 빔살 품질이 뛰어나면 서도, 2.05  $\mu\text{m}$  파장에서 출력이 1 kW에 이를 정도로 고출력 레이저다 [4]. 그러나 개발된 것들의 출력 파장이 4  $\mu\text{m}$ 를 넘지 않고, 더구나 파장이 길어짐에 따라 출력은 지수함수 꼴로 감소하여 4  $\mu\text{m}$ 에서의 출력이 11 mW 밖에 되지 않는다는 [4] 단점이 있다.

광매개 공진기는 펌프 광원과 2차 비선형 광학 물질이 들어 있는 공진기로 구성되며 [5-6], 시그널과 아이들러, 두 개의 빛이 발생되는데, 두 빛의 파장은 비선형 광학 물질의 위상 정합 조건으로 결정된다. 거꾸로 말하면, 비선형 광학 물질의 위상 정합 조건을 변화시켜서 발생하는 빛의 파장을 변화시킬 수 있다는 말이 된다. 비선형 광학 물질이 복굴절 물질인 경우, 물질의 각도나 온도를 변화시켜서 위상 정합 조건을 변화시킬 수

# 특집 1 ■ 국방광기술

## 중적외선 레이저

정창수\*

QC 레이저는 intersubband 전이를 가능케 하는 다중 양자 우물 구조로 된 반도체 레이저로, ~3-25  $\mu\text{m}$ 에 이르는 넓은 출력 파장 범위를 아우르고, 선폴이 좁은 단일 모드 형태로도 개발되고 있다 [2]. 그러나 저온이 아닌 상온에서 그리고 변조 방식이 아닌 연속파 방식에서의 최고 성능이 2011년에 발표된 미국 NorthWestern 대학의 '전기-광 변환 효율 21%, 광 출력 5.1 W'에 [3] 지나지 않을 정도로 아직은 출력이 높지 않다는 단점이 있다.

파이버 레이저는 공진기가 파이버 도파로 형태로 되

있고, Periodically poled lithium niobate (PPLN) 같은 준 위상 정합 물질인 경우, 반전 주기나 온도를 변화시켜서 위상정합 조건을 변화시킬 수 있다. 중적외선 광 매개 공진기에 사용하는 비선형 광학 물질은 PPLN 또는 PPMgO:LN, Orientation-Patterned GaAs (OP-GaAs), Zinc Germanium Phosphide (ZnGeP<sub>2</sub>, ZGP), 등으로 다양하게 있고, 준위상 정합 물질 (앞 순서 세 물질)의 반전 주기와 복굴절 물질인 ZGP의 각도 또한 필요한 대로 선택할 수 있기 때문에, 중적외선 광매

\* 광주과학기술원 고등광기술연구소

중적외선 레이저

개 공진기로 구현할 수 있는 출력 파장은 매우 넓다. 더구나, 비선형 광학 물질의 손상 문턱을 넘지 않는 범위 안에서 펌프 광원의 출력을 높이는 방식으로 넓은 파장 영역에서 고효율의 광원을 구현할 수 있다는 것은 중적외선 광매개 공진기의 큰 장점이라고 할 수 있다. 실제로 현재 가장 널리 쓰이고 있는 중적외선 광원이다.

이 글에서는 위와 같이 넓은 파장 영역과 높은 출력을 갖는 중적외선 광매개 공진기를 소개하였다. 먼저 광매개 공진기의 기본 개념과 특성을 소개하고, 이어서 사용하는 비선형 광학 물질 별로 나누어 중적외선 광매개 공진기의 현황을 소개하였다.

2. 광매개 공진기 일반

높은 세기의 빛이 2차 비선형 광학 물질에 들어오면 상호작용을 통하여 주파수가 낮은 한 쌍의 빛이 발생할 수 있다. 들어온 빛을 펌프라 하고, 발생하는 두 빛을 시그널 및 아이들러라고 하는데, 세 빛 사이에는 주파수로는 관계식,  $\omega_p = \omega_s + \omega_i$  이 성립한다. 여기서  $\omega_p$ ,  $\omega_s$ ,  $\omega_i$ 는 각각 펌프, 시그널, 아이들러의 주파수다. 이 식을 파장으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i} \tag{1}$$

여기서  $\lambda_p$ ,  $\lambda_s$ ,  $\lambda_i$ 는 각각 펌프, 시그널, 아이들러의 파장이다. 시그널과 아이들러의 세부 파장은 물질 내 위상 정합 조건으로 결정되는데, 일반적으로 위상 정합 조건은 세 빛의 물질 내 파수 벡터 사이의 관계식,  $\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i$ 로 표현된다. 여기서  $\vec{k}_p$ ,  $\vec{k}_s$ ,  $\vec{k}_i$ 는 각각 펌프, 시그널, 아이들러의 파수 벡터다. 세 파수 벡터가 모두 같은 방향일 때는, 위상 정합 관계식을 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$\frac{n_p}{\lambda_p} = \frac{n_s}{\lambda_s} + \frac{n_i}{\lambda_i} \tag{2}$$

여기서  $n_p$ ,  $n_s$ ,  $n_i$ 는 각각 펌프, 시그널, 아이들러에 대한 비선형 광학 물질의 굴절률이다. 수식 (1)과 (2)를 모두 만족하는  $\lambda_s$ ,  $\lambda_i$  값이 바로 실제로 발생하는 시그널과 아이들러의 파장이다.

PPLN/PPMgO:LN 같은 물질은 완전한 위상 정합 상태가 아니라 준 위상 정합 상태를 이용하는 물질이다. 준 위상 정합 방법은 비선형 광학 계수는 크지만 위상 정합은 불가능한 물질을 활용하는 좋은 방법으로, 이때에는 수식 (2) 대신 다음과 같은 관계식, 수식 (3)이 성립하며, 이 수식을 만족하는 파장값으로 시그널과 아이들러가 발생한다.

$$\frac{n_p}{\lambda_p} = \frac{n_s}{\lambda_s} + \frac{n_i}{\lambda_i} + \frac{m}{\Lambda} \tag{3}$$

여기서  $\Lambda$ 는 비선형 광학 계수의 반전 주기이고,  $m$ 은 ‘ $m=1, 3, 5, \dots$ ’의 값을 갖는 정수인데, ‘ $m=1$ ’일 때가 유효 비선형 광학 계수,  $d_{\text{eff}}=(2/m\pi)d$ 가 가장 크고, 가장 일반적인 경우다 [6-7].

그림 1과 같이 비선형 광학 물질 앞뒤에 거울을 두어 공진기를 구성해서 발생하는 빛을 공진시키면 광 매개 증폭 현상이 반복되어 매우 강한 빛으로 발전시킬 수 있으며, 이 구조의 광원을 광 매개 공진기라 한다. 시그널과 아이들러 중 하나만 공진시키는 공진기를 Doubly resonant oscillator (DRO) 라 하고, 둘 다 공진시키는 공진기를 Singly resonant oscillator (SRO) 라 하는데, 발전 문턱은 높아도 안정성이 높은 SRO가 더 많이 사용된다. 안정한 공진이 일어나기 위해서는 비선형 광학 물질의 길이, 공진기 길이, 공진기 거울의 곡률 반지름, 등 공진기 구성 요소들의 사양 사이에 일정한 관계 조건이 필요하며, 안정 조건이 성립하는 경우에는 공진기 내부의 공진 빛살 크기가 결정된다 [8]. 광 매개 공진기의 출력을 높이기 위해서는 비선형 광학 물질 안에서 펌프 빛살과 공진 빛살의 크기를 잘 맞춰야 하기 때문에, 그림 1에 나타난 것처럼, 펌프 빛살을 집광시키는 렌즈를 사용하는 경우가 많다. 파장과 출력뿐만 아니라 선폭 또한 레이저 광원의 중요한 사양이다. 특히 분광학 광원의 경우에는 매우 중요한 사양이 되는데, 선폭 좁은 광원 개발을 위해 공진기 내부에 에탈론[9-12]이나 회절 격자 [13-14]를 사용하는 경우도 있다.

펌프 광원은 광 매개 공진기 광원의 중요한 구성 요소로 전체 사양에 큰 영향을 미친다. 펌프 광원의 출력과 파장은 각각 광 매개 공진기 광원의 출력과 파장에 영향을 미치고, 펄스폭은 광 매개 공진기 광원의 출력뿐만 아니라 공진기 구조에도 영향을 준다. 펌프 광원이 연속

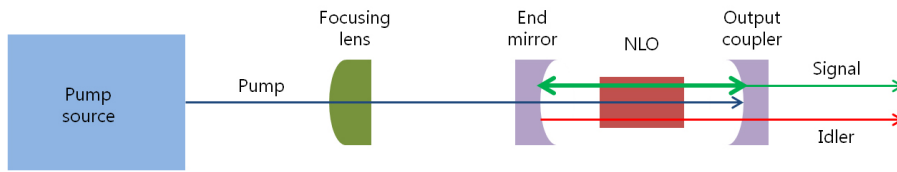
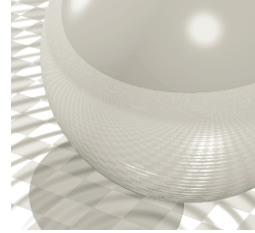


그림 1. 광 매개 공진기 구조

파 형태이거나 펄스폭이 긴 큐여단이 레이저 같은 형태일 때는 '공진기 왕복 시간  $\ll$  펄프 펄스폭'인 공진기 구성이 가능하여 한 개의 펄프 펄스 안에서 build-up 및 evolution이 가능하게 할 수 있다. 그러나 펄스폭이 매우 짧은 모드 잠금 레이저 같은 형태일 때는 한 펄스 안에서 build-up 및 evolution가 가능한 공진기 구현이 어렵기 때문에 여러 개의 펄스에 걸쳐 build-up 및 evolution이 이루어지도록 Synchronously pumping 해야 한다. 이 경우, 공진기 내부에서 공진하는 빛 (예를 들면 시그널 빛)의 펄스가 입력 되는 펄프 펄스들과 계속 시간적으로 겹치도록, 다시 말하면 '공진기 왕복 시간 = 펄프 펄스 간격'이도록 공진기 길이를 정확히 조절해야 한다.

광 매개 공진기의 발진이 일어 나기 위해서는 펄프 빛의 출력이 최소한의 값에 이르러야 하며, 여기에 이른 상태를 발진 문턱 (Oscillation threshold) 이라 한다. 발진 문턱은 공진기 내부의 손실 때문에 존재하며, 비선형 광학 물질의 비선형 계수와 길이, 공진기 내부 손실, 등으로 결정된다. 발진 문턱을 넘어서 펄프 빛살의 광출력을 계속 증가시키면 광 매개 공진기의 출력 빛살의 광출력도 점차 증가하는데, 세부 변화 형태는 광 매개 공진기의 종류에 따라 다르다. 그림 2는 연속파 광원으로 펄프되는 SRO의 이론적인 광출력 변환 효율 그래프 [5, 15] 다. 여기서 말하는 광출력 변환 효율은 입력되는 펄프 빛의

광출력에 대한 출력 빛의 광출력 비율로 정의된 물리량이다. 그림 2에서 실선으로 표현된 그래프는 펄프 빛을 평면파로 볼 수 있는 경우의

변환 효율 곡선으로, 펄프 빛 광출력이 문턱 값의  $(\pi/2)^2$  일 때 변환 효율이 최대가 되고 또 최대값도 100%로 펄프 빛을 온전히 출력 빛으로 변환할 수 있다는 것을 보여 주고 있다. 점선으로 표현된 그래프는 펄프 빛의 공간 모양이 가우스 꼴인 경우의 변환 효율 곡선으로, 펄프 빛살의 광출력이 문턱값의 약 6.5 배일 때 변환 효율이 최대가 되고 최대값은 약 70.6%임을 보여 주고 있다.

공진기 내부에 들어가는 비선형 광학 물질은 공진기의 이득 매질로서 펄프 빛의 파장, 평균 및 첨두 출력 그리고 발생하려고 하는 빛의 파장과 출력, 등을 고려하여 적당한 물질을 선택해야 한다. 중적외선을 내는 광 매개 공진기에 많이 사용되는 물질로는 PPLN 또는 PPMgO:LN, ZGP, OP-GaAs 이 있는데, 투명한 파장대역이 달라서 사용하는 펄프 광원의 파장과 발생되는 중적외선의 파장대가 다르다. LN, ZGP, GaAs, 세 물질의 투명 파장대역을 그림 3에 표현하였는데 많이 다를 수 있다. 각각 0.4-5.5  $\mu\text{m}$ [16], 0.74-12  $\mu\text{m}$ [16], 0.9-17  $\mu\text{m}$ [17]로 단파장 쪽 한계는 LN이 가장 짧고, 장파장 쪽 한계는 GaAs가 가장 길다. 이로부터 LN을 사용하는 광 매개 공진기에 가장 파장이 짧은 펄프 광원을 사용할 수 있고, GaAs를 사용하는 광 매개 공진기가 가장 파장 긴 중적외선을 낼 수 있다는 것을 알 수 있다.

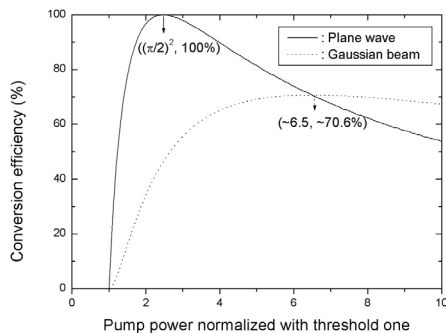


그림 2. 연속파 광 매개 공진기의 변환 효율 그래프

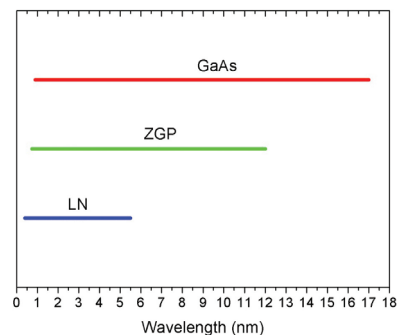


그림 3. 주요 비선형 광학 물질의 투명 파장대역

### 3. 중적외선 광 매개 공진기 개발 현황

이 장에서는 Periodically poled lithium niobate (PPLN) 또는 PPMgO:LN, Zinc Germanium Phosphide (ZnGeP<sub>2</sub>, ZGP), Orientation-Patterned GaAs (OP-GaAs) 를 이득 매질로 사용하는 중적외선 광 매개 공진기의 개발 현황을 소개하였다.

#### 가. PPLN/PPMgO:LN 기반 광 매개 공진기

PPLN과 PPMgO:LN 는 각각 LN과 MgO:LN에 기초한 준 위상 정합 물질로서 준 위상 정합 물질의 특징인 워크오프 손실 없음, 자유로운 파장 선택성, 등의 장점이 있다. 유효 비선형 광학 계수,  $d_{\text{eff}}=(2/\pi)d_{33}$  가 17 pm/V 이고, 투명한 파장 대역은 0.4–5.5  $\mu\text{m}$  이다[16]. 단 파장 쪽 투명 한계가 0.4  $\mu\text{m}$  로 짧기 때문에, 이광자 흡수에 대한 걱정 없이 가장 일반화된 레이저라 할 수 있는 1.0  $\mu\text{m}$  파장대의 레이저를 펌프 광원으로 사용할 수 있다. 개발 역사가 길어 출력, 안정성, 등 여러 사양에서 우수한 1.0  $\mu\text{m}$  파장대의 레이저를 펌프 광원으로 사용할 수 있다는 것은 매우 큰 장점이라 할 수 있다.

실제로 개발되고 있는 PPLN/PPMgO:LN 기반 광 매개 공진기들은 가끔씩 1.5  $\mu\text{m}$  파장대의 레이저를 펌프 광원으로 사용하기도 하지만[18–19], 주로 1.0  $\mu\text{m}$  파장대의 레이저를 사용하고 있으며[13–14, 20–35], 출력 빛살의 파장, 광출력, 변환 효율을 살펴 보면 그림 4와 같다. 광출력 현황을 보면 3–4  $\mu\text{m}$  영역에서 수 와트가 어렵지 않게 얻어지고 있고 15 W 이상도 얻어지고 있음을 알 수 있다. 그림 4에서 채워진 기호로 표시된 데이터는 1.0  $\mu\text{m}$  파장대의 레이저로 펌핑한 광원의 결과고, 속이 빈 기호로 표시된 데이터는 1.5  $\mu\text{m}$  파장대의 레이저로 펌핑한 광원의 결과다. 1.0  $\mu\text{m}$  파장대의 레이저로 펌핑한 광원의 펌프 빛에서 출력 빛으로의 변환 효율 현황을 보면, 파장이 길수록 변환 효율이 낮은 경향을 알 수 있는데, 4  $\mu\text{m}$  이상 영역에서 광출력이 1 W 급 이하인 것도 이러한 변환 효율 경향과 관계가 있다고 볼 수 있다. PPLN/PPMgO:LN 기반 광 매개 공진기가 4  $\mu\text{m}$  이상 영역에서 낮은 변환 효율을 보이는 것의 원인으로는 두 가지를 생각해 볼 수 있다. 첫째 원인은 광 매개 발생

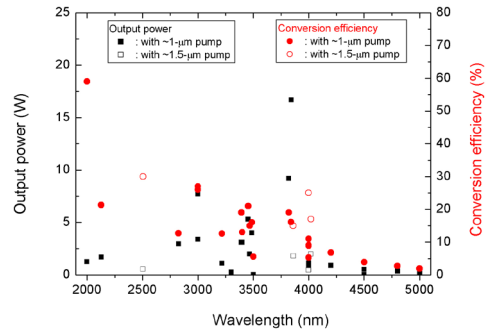


그림 4. PPLN/PPMgO:LN 기반 광 매개 공진기의 파장, 출력, 변환 효율 현황

의 광자수 보존 법칙과 관련이 있다. 광 매개 발생에서는 펌프 광자 1개가 사라지면서 시그널 광자와 아이들러 광자 한 쌍이 동시에 발생하기 때문에, 시그널과 아이들러의 광출력 비율은 일반적으로는 두 빛의 주파수 비율, 파장으로 말하면 파장 역수 비율과 같다. 그래서 장파장의 아이들러일수록 근본적으로 펌프 빛 대비 변환 효율이 낮을 수 밖에 없는 것이다. 1.5  $\mu\text{m}$  파장대의 레이저로 펌핑한 광원이 4  $\mu\text{m}$  근처의 출력 파장에서 1.0  $\mu\text{m}$  파장대의 레이저로 펌핑한 광원보다 높은 변환 효율을 보이는 것을 보면 이를 확인할 수 있다. 둘째 원인은 LN의 물성과 관련이 있다. LN은 4  $\mu\text{m}$  근처부터는 장파장으로 갈수록 흡수가 조금씩 증가하는 성질이 있는데, LN의 이 성질이 이 파장대의 중적외선 출력을 떨어뜨리는 한 가지 원인이 된다.

#### 나. ZGP 기반 광 매개 공진기

ZGP는 복굴절 물질로 많이 이용되는 결정각도인  $\theta = 45-60^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$  또는  $90^\circ$ 에서 유효 비선형 광학 계수가 60–70 pm/V 이고, 투명한 파장 대역은 0.74–12  $\mu\text{m}$  이다[16]. 이렇게 ZGP는 장파장 쪽 투명 한계가 12  $\mu\text{m}$ 로 LN의 5.5  $\mu\text{m}$ 보다 훨씬 길어서, LN 기반 광 매개 공진기로는 고출력을 내기 어렵거나 아예 접근이 힘든 4  $\mu\text{m}$  이상 파장의 광원을 개발하는 데 많이 이용되어 왔다. 단 파장 쪽 투명 한계가 0.74  $\mu\text{m}$  로 비교적 길고, 더구나 장파장 중적외선의 변환 효율을 높이기에는 펌프 빛의 파장이 길어야 유리하기 때문에, ZGP 기반 광 매개 공진기는 펌프 광원으로 2.0  $\mu\text{m}$  이상의 파장을 갖는 레이저를 사용한다.

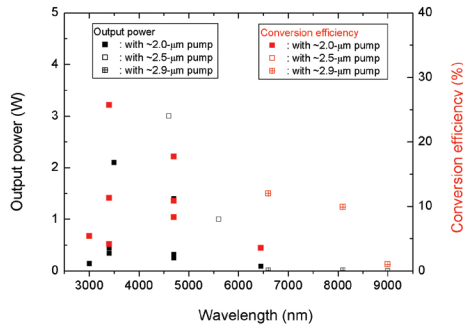
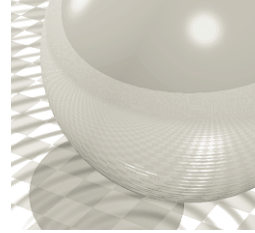


그림 5. ZGP 기반 광 매개 공진기의 파장, 출력, 변환 효율 현황

개발되고 있는 ZGP 기반 광 매개 공진기들은 2.0  $\mu\text{m}$  파장대의 광원[36–37], 2.5  $\mu\text{m}$  파장대 광원[38], 2.9  $\mu\text{m}$  파장대 광원[39], 등을 펌프 광원으로 사용하고 있는데, 이들의 파장, 광출력, 변환 효율을 살펴 보면 그림 5와 같다. 광출력 현황을 보면, 4–5  $\mu\text{m}$  파장대에서 최대 3 W의 광출력이, 6–7  $\mu\text{m}$  파장대에서 수백 mW의 광출력이 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림 5에서 채워진 기호로 표시된 데이터는 2.0  $\mu\text{m}$  파장대의 레이저로 펌핑한 광원의 결과고, 속이 빈 기호로 표시된 데이터는 2.5  $\mu\text{m}$  파장대의 레이저로 펌핑한 광원의 결과고, 속이 ‘+’가 들어간 기호로 표시된 데이터는 2.9  $\mu\text{m}$  파장대의 레이저로 펌핑한 광원의 결과다. 앞 절에서 설명한 PPLN/PPMgO:LN 기반 광 매개 공진기처럼, 장파장의 펌프 광원을 사용한 것들이 더 높은 변환 효율을 보인다는 것과 펌프 파장이 같은 경우엔 장파장으로 갈수록 변환 효율이 낮아지는 것을 알 수 있다. 2.9  $\mu\text{m}$  파장대의 레이저로 펌핑한 광원의 변환 효율을 보면 8  $\mu\text{m}$  에서는 10%의 변환 효율을 보이던 것이 9  $\mu\text{m}$  에서는 1%로 크게 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 이 파장대부터 흡수가 점점 커지기 때문이다[39].

#### 다. OP-GaAs 기반 광 매개 공진기

OP-GaAs 는 준 위상 정합 물질로 유효 비선형 광학 계수가 69 pm/V 이고, 투명한 파장 대역은 0.9–17  $\mu\text{m}$  다[17]. 최근에 제작 기술이 개발되면서 이를 이용하는 광원 개발도 활발해지고 있으며, 장파장 쪽 한계가 17  $\mu\text{m}$ 로 매우 길어서 ZGP 로도 접근하기 힘든 장파장 중 적외선 개발에 매우 유용하다. 더구나 준 위상 정합 물

질이 되기 때문에 ZGP와 달리 위크오프 문제가 없다는 것을 생각하면 OP-GaAs의 잠재력은 매우 크다고 할 수 있다. ZGP와 마찬가지로 OP-GaAs 또한 단파장 쪽 투명 한계가 비교적 긴 데다가, 장파장 중적외선의 변환 효율을 높이기 위해서는 펌프 빛의 파장이 길어야 유리하므로, OP-GaAs 기반 광 매개 공진기도 펌프 광원으로 2.0  $\mu\text{m}$  이상 파장대의 레이저를 많이 사용한다. 최근 스펙트럼이 4.4–5.4  $\mu\text{m}$ [40], 3–6  $\mu\text{m}$ [41–42]에 이르는 주파수 빔 형태의 광원이나 4.7  $\mu\text{m}$ 에서 광출력 4 W, 변환 효율 16%를 보이는 광원[43]도 발표되고 있으며, 향후 활발한 연구개발이 예상된다.

## 4. 결론

이 글에서는 비선형 광학 물질을 이용하는 중적외선 광 매개 공진기 광원의 개발 현황을 살펴 보았다. PPLN/PPMgO:LN를 이용하는 광원은 잘 개발된 펌프 광원에 힘입어 2–4  $\mu\text{m}$  파장대에서 수 와트 또는 15 와트 이상의 높은 광출력을 내는 것을 알 수 있었다. 그러나 4  $\mu\text{m}$  이상의 파장에서는 LN의 물성 때문에 높은 광출력, 높은 변환 효율이 힘들고, 이러한 장파장 영역은 ZGP나 OP-GaAs같은 물질을 이용해야 한다는 것도 알 수 있었다. 특히 투명 파장대역이 매우 넓고 준 위상 정합 물질이어서 위크오프 문제가 없는 OP-GaAs를 이용하는 광 매개 공진기의 장래성도 예상할 수 있었다.

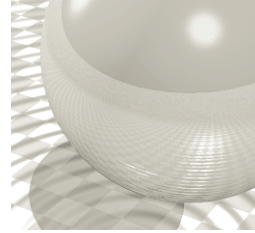
ZGP나 OP-GaAs같은 물질을 이용하여 고출력의 광 매개 공진기를 구현하기 위해서는 파장이 2  $\mu\text{m}$  이상인 고출력 펌프 광원이 반드시 필요한데, 최근에 이 파장대의 광원이 점점 고출력으로 개발되고 있다[4, 43]. 또, 2  $\mu\text{m}$  파장대의 펌프 광원을 이용하면 파장이 3–4  $\mu\text{m}$ 와 4  $\mu\text{m}$  이상인 두 개의 중적외선 빛살을 동시에 얻을 수 있다는 장점도 있다.

### 참고문헌

- [1] Editorial, “Extending opportunities,” *Nature photon.* 6, 407 (2012).
- [2] Yu Yao, Anthony J. Hoffman, and Claire F. Gmachl, “Mid-infrared quantum cascade lasers,” *Nature photon.* 6, 432–439

## 중적외선 레이저

- (2012).
- [3] Y. Bai, N. Bandyopadhyay, S. Tsao, S. Slivken, and M. Razeghia, "Room temperature quantum cascade lasers with 27% wall plug efficiency," *Appl. Phys. Lett.* 98, 181102 (2011).
- [4] Stuart D. Jackson, "Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser," *Nature photon.* 6, 423–431 (2012).
- [5] 이범구, 비선형 광학 (아르케, 2000), 5장.
- [6] Robert W. Boyd, *Nonlinear optics* (ACADEMIC, 2003), Chap. 2.
- [7] M. Houé and P. D. Townsend, "An introduction to methods of periodic poling for second-harmonic generation," *J. Phys. D: Appl. Phys.* 28, 1747–1763 (1995).
- [8] Amnon Yariv, *Optical electronics* (Saunders College Publishing, 1991), Chap. 4.
- [9] G. K. Samanta, G. R. Fayaz and M. Ebrahim-Zadeh, "1.59 W, single-frequency, continuous-wave optical parametric oscillator based on MgO:sPPLT," *Opt. Lett.* 32, 2623–2625 (2007).
- [10] P. Groβ, I. D. Lindsay, C. J. Lee, M. Nittmann, T. Bauer, J. Bartschke, U. Warring, A. Fischer, A. Kellerbauer and J.-J. Boller, "Frequency control of a 1163 nm singly resonant OPO based on MgO:PPLN," *Opt. Lett.* 35, 820–822 (2010).
- [11] G. K. Samanta and M. Ebrahim-Zadeh, "High-power, cw OPO pumped by a optically-pumped semiconductor laser at 532 nm," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science*, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper CThY7.
- [12] K. Iloakeimidi, J. R. Schwesyg, C. R. Phillips, K. L. Vodopyanov and M. M. Fejer, "Singly resonant CW Mid-IR optical parametric oscillator pumped by a tunable C-Band source for free space coherent optical communications," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science*, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper CThH1.
- [13] Markku Vainio, Mikael Siltanen, Tuomas Hieta and Lauri Halonen, "Continuous-wave optical parametric oscillator based on Bragg grating," *Opt. Lett.* 35, 1527–1529 (2010).
- [14] P. Koch, F. Ruebel, M. Nittmann, T. Bauer, J. Bartschke and J. A. L'huillier, "Narrow-band degenerate OPO in PPMgO:LN with a volume Bragg grating output coupler," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science*, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper CThY6.
- [15] John E. Bjorkholm, "Some effects of spatially nonuniform pumping in pulsed optical parametric oscillators," *IEEE J. Quantum Electron.* QE-7, 109–118 (1971).
- [16] V. G. Dmitriev, G. G. Gurzadyan, and D. N. Nikogosyan, *Handbook of nonlinear optical crystals* (Springer, 1999), Chap. 3.
- [17] K. L. Vodopyanov, O. Levi, P. S. Kuo, T. J. Pinguet, J. S. Harris, M. M. Fejer, B. Gerard, L. Becouarn, and E. Lallier, "Optical parametric oscillation in quasi-phase-matched GaAs," *Opt. Lett.* 29, 1912–1914 (2004).
- [18] Ti Chuang and Ralph Burnham, "Multiband generation of mid infrared by use of periodically poled lithium niobate," *Opt. Lett.* 23, 43–45 (1998).
- [19] K. Iloakeimidi, J. R. Schwesyg, C. R. Phillips, K. L. Vodopyanov, and M. M. Fejer, "Singly resonant CW Mid-IR optical parametric oscillator pumped by a tunable C-Band source for free space coherent optical communications," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science*, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper CThH1.
- [20] Ravi Bhushan, Hidetsugu Yoshida, Koji Tsubakimoto, Hisanori Fujita, Masahiro Nakatsuka, Nobuaki Miyayama, Yasukazu Izawa, Hideki Ishizuki, and Takunori Taira, "Generation of high efficiency 2 um laser pulse from a periodically poled 5 mole % MgO-doped LiNbO3 optical parametric oscillator," *Appl. Phys. Express* 1, 022007 (2008).
- [21] Hongyi Lin, Huiming Tan, Jianguang Miao, Tiecheng Cui, Shaochang Su, Jin Guo, "Extra-cavity, widely tunable, continuous wave MgO-doped PPLN optical parametric oscillator pumped with a Nd:YVO4 laser," *Opt. Mater.* 32, 257–260 (2009).
- [22] Ritwick Das, S. Chaitanya Kumar, G. K. Samanta, and M. Ebrahim-Zadeh, "Broadband, high-power, continuous-wave, mid-infrared source using extended phase-matching bandwidth in MgO:PPLN," *Opt. Lett.* 34, 3836–3838 (2009).
- [23] Yuefeng Peng, Weimin Wang, Xingbin Wei, and Deming Li, "High-efficiency mid-infrared optical parametric oscillator based on PPMgO:CLN," *Opt. Lett.* 34, 2897–2899 (2009).
- [24] Bo Wu, Jian Kong, and Yonghang Shen, "High-efficiency semi-external-cavity-structured periodically poled MgLN-based optical parametric oscillator with output power exceeding 9.2 W at 3.82 um," *Opt. Lett.* 35, 1118–1120 (2010).
- [25] Florian Kienle, Kang K. Chen, Shaif-ul Alam, Corin B. E. Gawith, Jacob I. Mackenzie, David C. Hanna, David J. Richardson, and David P. Shepherd, "A picosecond OPO synchronously pumped by an amplified gain-switched laser diode," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science*, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper CThZ7.
- [26] Omid Kokabee, Adolfo Esteban-Martin, Majid Ebrahim-Zadeh, "High-power, fiber-laser-pumped ps OPO for the near- to mid-IR," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science*, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper CThY1.
- [27] S. Chaitanya Kumar, Ritwick Das, G. K. Samanta and M. Ebrahim-Zadeh, "Stable, 17.5 W, optimally-output-coupled, Yb-fiber-pumped mid-infrared OPO," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science*, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper CThP6.
- [28] A. Godard, M. Raybaut, T. Schmid, M. Lefebvre, A.-M.



- Michel, M. Péalat, "Management of thermal effects in high average power pulsed optical parametric oscillators," in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper CThP3.
- [29] S. Chaitanya Kumar, Ritwick Das, G. K. Samanta, and M. Ebrahim-Zadeh, "High-power, broadband, continuous-wave, mid-infrared optical parametric oscillator based on MgO:PPLN," in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper CThH6.
- [30] Felix Ruebel, Gregor Anstett and Johannes A. L'hullier, "Mid-infrared picosecond laser source with high average output power exceeding 1 W at 4.5  $\mu\text{m}$ ," in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper CThH4.
- [31] Ichiro Shoji, Hajime Sannomiya, Keiji Miura, and Koichi Matsukawa, "A compact, tunable, and highly-efficient continuous-wave intracavity optical parametric oscillator by use of periodically-poled MgO-doped LiNbO<sub>3</sub> oscillating at 4.7  $\mu\text{m}$ ," in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper CThH2.
- [32] Nils Hempler, Gordon Robertson, Leigh Bromley, Craig Hamilton and Graeme Malcolm, "Compact, narrow linewidth, continuous-wave, intracavity optical parametric oscillator pumped by a semiconductor disk laser," in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper CTuK2.
- [33] Antoine Godard, Myriam Raybaut, Michel Lefebvre, Anne-Marie Michel, Michel Péalat, "Optimized 4- $\mu\text{m}$  OPO with intracavity OPA based on a single dual-grating PPLN crystal," in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper CMR3.
- [34] Jessica Barrientos-Barria, Jean-Baptiste Dherbecourt, Myriam Raybaut, Antoine Godard, Jean-Michel Melkonian, and Michel Lefebvre, "Fiber laser pumped, microsecond, single frequency, nested cavities OPO for spectroscopy in the 3.0–3.5  $\mu\text{m}$  range," in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012), paper CF2B.2.
- [35] Kavita Devi S. Chaitanya Kumar A. Esteban-Martin and M. Ebrahim-Zadeh, "Interferometrically output-coupled continuous-wave optical parametric oscillator," in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012), paper CF2B.1.
- [36] Daniel Creedon, Peter A. Ketteridge, Peter A. Budni, Scott D. Setzler, York E. Young, John C. McCarthy, Kevin Zawilski, Peter G. Schunemann, Thomas M. Pollak, Evan P. Chicklis, and Min Jiang, "Thulium fiber laser-pumped mid-IR OPO," Proc. SPIE 6952, 69520S (2008).
- [37] Georg Stoepler, Nicky Thilmann, Marc Eichhorn, Valdas Pasiskevicius, Andrius Zukauskas, and Carlota Canalias, "Mid-infrared cascaded parametric source in 6  $\mu\text{m}$  region for medical applications," in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012), paper CF3B.4.
- [38] Andrew Zakel, Gregory J. Wagner, William J. Alford and Timothy J. Carrig, "High-power, rapidly-tunable ZnGeP<sub>2</sub> intracavity optical parametric oscillator," in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2005), paper CThY5.
- [39] K. L. Vodopyanov, F. Ganikhanov, J. P. Maffetone, I. Zwieback, and W. Ruderman, "ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator with 3.8–12.4- $\mu\text{m}$  tenability," Opt. Lett., 25, 841–843 (2000).
- [40] K. L. Vodopyanov, E. Sorokin, I. T. Sorokina, and P. G. Schunemann, "Mid-IR frequency com source spanning 4.4–5.4 $\mu\text{m}$  based on subharmonic GaAs optical parametric oscillator," Opt. Lett., 36, 2275–2277 (2011).
- [41] Konstantin L. Vodopyanov, "Mid-IR frequency combs based on subharmonic GaAs OPO," in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012), paper CF3B.1.
- [42] Nick C. Leindecker, Alireza Marandi, Robert L. Byer, Konstantin L. Vodopyanov, Jie Jiang, Ingmar Hartl, Martin Fermann, and Peter G. Schunemann, "Nearly 3–6  $\mu\text{m}$  spectral comb derived from Tm mode-locked laser using GaAs-based degenerate OPO," in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012), paper CF3B.3.
- [43] L. Pomeranz, P. Schunemann, S. Setzler, C. Jones, and P. Budni, "Continuous-wave optical parametric oscillator based on orientation patterned gallium arsenide (OP-GaAs)," in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012), paper CJTh11.4.

## 약 력



### 정창수

- 1988. 2 - 1992. 2 서강대학교 물리학과 이학사
- 1992. 2 - 1998. 2 서강대학교 물리학과 이학석사
- 1998. 2 - 2002. 8 서강대학교 물리학과 이학박사
- 2002. 9 - 현재 광주과학기술원 고등광기술연구소 선임연구원, 책임연구원