

1. 서론

1991년에 처음 개발된 수동 모드잠금 타이타늄 사파이어(Ti:sapphire) 레이저는 극초단 레이저 개발 및 응용분야에 획기적인 기여를 하였으며, 이를 통해 손쉬운 펄스초 수준의 극초단 펄스 발생이 가능하게 되었다.^[1] 이후 사파이어 덩어리 모결정(bulk host crystal) 이외에도 forsterite, YAG, LiSAF 등과 같은 모결정에 다양한 전이 금속 이온을 첨가함으로써 근적외선 영역에서 펄스초 펄스 방출이 가능한 100 THz 이상의 넓은 방출스펙트럼을 지닌 레이저 결정들이 개발되었다. 이러한 이득매질을 활용하여 구성된 레이저 공진기로부터 다양한 모드잠금 기법을 통해 몇 광사이클(optical cycle)만을 지닌 매우 짧은 펄스를 얻어낼 수 있게 되었으며, 고체레이저의 이득매질로 활용되는 덩어리 결정들 이외에도 광섬유를 이득 매질

생증폭(regenerative amplification)과 다중통과증폭(multi-pass amplification)등이 잘 알려져 있다. 현재 전 세계적으로 보급된 거의 모든 극초단 펄스레이저 증폭시스템들이 이 기술을 기반으로 제작되었다고 해도 과언이 아니다. 하지만 이러한 레이저 공진기와 증폭시스템의 경우에는 발진 파장영역이 대부분 근적외선 영역으로 제한되어 있다는 단점을 지니고 있다. 이 때문에 다양한 분야에서의 응용을 위해서는 광대역 파장영역에서의 레이저 펄스 방출을 가능하게 하는 기술개발이 불가피하다. 레이저 발진파장영역을 넓히기 위한 기술로는 비선형 물질과 입사되는 빛의 상호작용을 이용한 합주파수 발생(SFG: sum frequency generation), 차주파수 발생(DFG: difference frequency generation), 그리고 광매개 공진, 발생 및 증폭(OPO, OPG & OPA: optical parametric oscillation, generation & amplification) 등이 활발히 연

특집 ┃ QPM 소자기술

준위상정합 기반의 광매개 쳐프 펄스 증폭 기술 현황

이상민*

로 이용한 극초단 펄스레이저가 개발되어 광통신 및 의학 분야에서 많이 활용되고 있다. 이러한 공진기 구조를 지닌 고체 또는 광섬유 레이저의 경우에는 MHz 수준의 반복률로 동작하면서 와트(W) 급 평균출력 방출이 가능하지만, 방출되는 펄스당 에너지는 대부분의 경우 nJ 수준에 머무르고 있어 더 강력한 펄스 에너지를 필요로 하는 연구 분야에서는 그 활용이 제한적이다.

따라서 펄스 에너지를 높이기 위한 다양한 방법들이 고안되었고, 현재 펄스 에너지와 순간출력을 높이는 방법으로 많이 사용되고 있는 기술은 쳐프펄스증폭(CPA: chirped pulse amplification)법을 기반으로 하고 있는 재

구되고 있다. 특히 광매개 증폭(OPA) 방법은 200 nm 차외선 영역에서 20 μm에 이르는 중적외선 영역의 광범위한 대역에서 파장조절이 가능한 피코초 혹은 고에너지 펄스 방출이 가능하다고 보고되었다. 따라서 앞선 쳐프펄스 증폭법 기반의 증폭시스템이 지닌 파장제한 한계를 극복하고, 광매개 증폭법이 지닌 장점을 조합한 새로운 증폭 방법이 고안되었고, 이를 광매개 쳐프펄스 증폭(OPCPA: optical parametric chirped pulse amplification)이라 일컫는다. 최근 활발히 연구되고 있는 이 OPCPA의 연구방향은 크게 두 분야로 나눌 수 있는데, 한 분야는 BBO, LBO, KTP 등의 덩어리 비선형 단결정

* 아주대학교 물리학과/에너지시스템학부 복잡매질포토닉스 연구실

준위상정합 기반의 광매개 처프 펄스 증폭 기술 현황

들을 활용하여 페타와트(PW)급 첨두출력을 지닌 펄스 방출이 가능한 고에너지 극초단 펄스 증폭 시스템 개발에 초점을 맞추고 있다. 이 분야의 연구에는 영국의 Rutherford Appleton Laboratory (RAL), 미국의 Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) 등을 비롯해 아시아와 유럽의 몇 연구소에서 활발히 진행하고 있으며, 이들 연구소에서는 single shot 에서 10 Hz 사이의 반복율을 지닌 TW-PW급 고푼력 OPCPA 레이저 시스템을 개발하여, X-선 방출 및 고차 조화파 방출 연구 등에 활용하고 있다.

반면 다른 또 하나의 OPCPA 연구방향은 kHz 이상의 고반복률에서 μJ 이상의 에너지를 지닌 극초단 펄스 방출이 가능한 소규모 OPCPA 시스템 개발이다. 이러한 연구에서는 단일 증폭단 만으로도 높은 펄스 에너지 증폭 및 우수한 변환효율이 가능해야 하므로, 이를 위해 주기적으로 분극반전된(PP: periodically poled) 비선형 단결정을 주 증폭매질로 사용하고 있다.

고에너지 OPCPA 개발연구에 관련된 자세한 정보는 현재 출간된 두 개의 리뷰논문을 참조하기 바라며,^(2,3) 본 글에서는 현재까지 보고된 준위상정합(quasi phase matching) 기반의 주요 OPCPA 연구현황을 소개하고자 한다.

2. 광매개 처프펄스 증폭의 원리 및 특성

1992년 Piskarskas 교수 연구팀에⁽⁴⁾ 의해 처음으로 제안된 OPCPA의 기본원리는 피코 혹은 나노초 레이저에서 방출된 펄스의 에너지를, 시간상에서 인위적으로 늘린 넓은 스펙트럼폭을 지닌 처프펄스에 효과적으로 전이시킨 후 재 압축하는 증폭법이다 (그림 1).

따라서 OPCPA는 위에서 언급한 바와 같이 CPA와

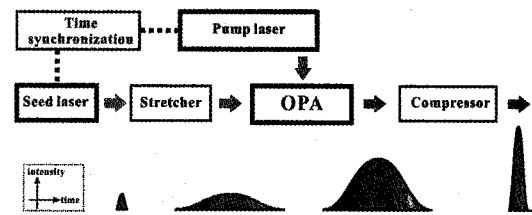


그림 1. OPCPA의 기본 원리

OPA 기술을 결합한 것으로서, 증폭매질로 사용되는 비선형 물질의 특성과 위상정합(phase matching) 조건에 따라 증폭파장, 변환효율 및 스펙트럼상의 이득띠폭(spectral gain bandwidth)의 크기 등의 주요변수 조절이 가능하다.

광매개 현상이란 2차 비선형성을 지닌 물질에 입사되는 높은 주파수를 지닌 펌프(pump) 광자가 위상정합 조건 ($\Delta k = k_p - k_s - k_i = 0$)하에서 에너지 및 운동량 보존법칙에 따라 주파수가 낮은 두 개의 광자쌍(signal 과 idler)으로 나누어지는 현상을 말한다. OPA의 경우에는 증폭매질에 입사하는 펌프 광과 함께 시간, 공간상에서 동기화된 signal 혹은 idler 주파수영역의 씨앗(seed) 광을 동시에 넣어주면, 씨앗광의 발진 주파수 영역에서 높은 증폭을 유도할 수 있다.

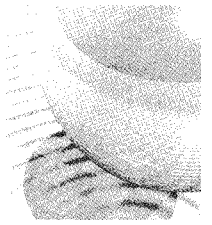
재생증폭 및 다중통과증폭 방법의 경우에는 증폭매질이 레이저의 이득매질과 동일한 결정으로 제한되어 증폭 후 동작 파장영역이 어느 정도 고정된 것과는 달리 OPA의 경우 다양한 비선형 물질을 증폭매질로 사용할 수 있고, 펌프, signal 및 idler광이 투과되는 비선형 매질의 넓은 파장 대역에서 위상정합, 즉 증폭이 가능하다. 이 외에도 매우 큰 단일통과 증폭률(single-pass parametric gain), 밀도반전(population inversion) 부재에 의한 적은 열현상(thermal effect), 자발방출증폭(amplified spontaneous emission)의 부재, 넓은 이득띠폭, 증폭시 스펙트럼의 이득띠폭 좁아지는(spectral gain narrowing) 현상의 부재, 파장조절의 유연성, 증폭 빔의 우수한 횡모드 특성, 그리고 큰 신호대잡음비(signal-to-noise ratio) 등은 OPA가 지닌 주요 장점이라 할 수 있다.

일반적으로 동일선상(collinear) 극초단 펄스 OPA 방법의 이득띠폭은 단색 펌프광, 낮은 펌프 소멸 등을 가정한 평면파 근사법 등을 활용하여 3개 파의 상호작용(three-wave interaction)을 나타내는 단순화된 다음의 방정식으로부터 유도할 수가 있다.⁽⁵⁾

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} = -\frac{1}{v_s} \frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{i}{2} g_s \frac{\partial^2 A_s}{\partial t^2} + i\sigma_s A_i^* A_p$$

$$\frac{\partial A_i}{\partial z} = -\frac{1}{v_i} \frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{i}{2} g_i \frac{\partial^2 A_i}{\partial t^2} + i\sigma_i A_s^* A_p$$

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} = -\frac{1}{v_p} \frac{\partial A_p}{\partial t} + \frac{i}{2} g_p \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} + i\sigma_p A_s A_i$$



여기서, A_s , A_i 그리고 A_p 는 각각 signal, idler, pump 파의 복소수 진폭을 나타내며, v , g 와 σ 는 signal, idler, pump 파의 군속도, 군속도 분산(GVD) 및 비선형 결합 상수를 나타낸다. 이 때 파수(wavenumber)로 표현된 OPA 이득띠폭은

$$\Delta\tilde{\nu} = 0.53/c\sqrt{F/L}|u_{si}|, \quad 1/u_{si} \neq 0$$

$$\Delta\tilde{\nu} = 0.58/c(\Gamma/L)^{1/4}|g_s + g_i|^{-1/2}, \quad 1/u_{si} = 0$$

이며, $1/u_{si} = 1/v_s - 1/v_i$ 는 signal 과 idler 펄스간의 군속도 부정합(GVM; group velocity mismatch), $g_{s,i} = \partial^2 k_{s,i}/\partial\omega^2 |_{\omega = \omega_p}$ 으로, 특히 극초단 펄스 기반의 OPA에서 고려해야 할 중요한 변수이다. 그 외에, L 은 상호작용하는 매질의 길이를 나타낸다. Γ 는 광매개 이득인수(parametric gain factor)로써 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$\Gamma = d_{eff} \sqrt{2 \frac{\omega_s \omega_i I_p}{\epsilon_0 n_s n_i n_p c^3}}$$

여기서 I_p 는 pump 세기, d_{eff} 는 유효 비선형 계수값, ω_s 와 ω_i 는 signal과 idler 파의 주파수, 그리고 n 은 아래첨자로 표시된 각 파장에서의 굴절률을 각각 나타낸다.

특히 광매개 증폭은 차주파수(DFG) 혹은 합주파수 발생(SFG)의 경우와 달리 Γ 에 대한 지수함수에 비례하여 증가하므로 비선형 매질이 지닌 유효 비선형성의 크기에 따라 매우 큰 증폭이 가능하다. 덩어리 비선형 단결정으로 잘 알려진 BBO, LBO, KDP의 경우 위상정합에 사용되는 비선형 계수값은 0.16-2.3 pm/V로 비교적 작지만 큰 크기의 결정성장이 가능하여 OPCPA를 포함한 다양한 고에너지/고출력 주파수변환 연구에 많이 사용되고 있으며, 이 때 위상정합은 복굴절 특성을 이용하여 이루어진다.

반면에 LiNbO_3 (LN), LiTiO_3 (LT), KTiOPO_4 (KTP) 등의 강유전성 특성을 지닌 단결정들은 복굴절을 통한 위상정합 비선형 매질로 사용되기도 하지만, 특히 전기장을 인가하여 주기적으로 결정내 영역(domain)의 주기적인 분극반전이 가능하고 이렇게 생성된 격자주기 Λ_g 를 잘 이용하면 주파수 변환 시 위상정합이 가능하다. 이를 준위상정합(QPM; quasi phase matching)이라 하며, 이때의 위상정합조건은 $\Delta k = k_p - k_s - k_i - 2\pi/\Lambda_g = 0$ 으로 정의된다. QPM 단결정에서는 복굴절 단결정을 이용한 위상정합 시 사용될 수 없는 물질이 지닌 가장 큰 2차 비선형 계수인

d_{33} 가 위상정합에 사용되기 때문에 고효율 주파수변환 연구에 적극 사용되고 있다. 참고로 KTP, LT 및 LN의 d_{33} 값은 대략 10-24 pm/V 정도로 복굴절을 이용한 위상정합 시 사용되는 d -값에 비해 상당히 크다. 또한 QPM 단결정의 경우 non-critical 위상정합이 가능하여 서로 상호작용하는 3개의 파가 매질 진행할 때 공간적으로 퍼짐(spatial walk-off)현상도 배제되므로 OPCPA를 포함한 다양한 주파수변환 연구에 큰 장점으로 작용한다. 다만 현재까지의 기술로는 주기적 분극반전 할 수 있는 물질의 두께가 아직 1 mm 내외로 크기가 제한되어 있어서 고에너지/고출력 응용연구에 사용하는 것이 실질적으로 어렵다. 이를 해결하기 위한 연구는 현재에도 지속적으로 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 OPCPA의 종류는 펌프광과 씨앗광의 주파수에 따라 크게 두 가지로 분류 할 수 있으며, 위상정합 시 펌프광과 씨앗광의 차주파수 영역이 씨앗광의 주파수와 일치, 즉 signal 과 idler 주파수 혹은 두 파의 파장영역이 일치 할 때, 이를 겹친 광매개 처프증폭(degenerate OPCPA)라 부른다. 차주파수가 씨앗광의 주파수와 일치 하지 않고 증폭 후 다른 주파수영역의 광이 추가로 방출될 때 이를 쪼개진(non-degenerate) OPCPA라 한다. 광매개 증폭 시 대체로 signal 주파수에서 씨앗광을 넣어 주는 것이 일반적이지만, idler 주파수영역에서 넣어 주는 경우도 종종 있다. 겹친 OPCPA의 경우, signal 과 idler광이 일치하여 쪼개진 OPCPA 경우보다 단일주파수 변환효율이 높다. 또한 두 스펙트럼이 서로 겹쳐지므로 이 겹친점에서 증폭띠폭은 무척 넓기 때문에 재압축 후 아주 짧은 펄스(sub-50 fs) 방출을 가능하게 한다. 반면 쪼개진 OPCPA 경우, 위상정합 시 씨앗광 주파수영역에서의 증폭 외에 다른 파장영역에서 동시에 새로운 펄스방출이 가능하여 두 주파수영역에서 동시에 발전하는 하나의 증폭 시스템 구현이 가능하다는 장점을 지닌다. 스펙트럼의 증폭띠폭은 겹친 OPCPA 경우보다 좁으나, 재 압축 과정을 통해 경우에 따라 100 fs 영역의 펄스방출이 가능하다.

3. 준위상정합 광매개 처프펄스 증폭기술 연구현황

표 1은 QPM OPCPA 개발에 관련된 주요 연구 현황을

준위상정합 기반의 광매개 처프 펄스 증폭 기술 현황

표 1. 준위상정합(QPM) 기반의 광매개 처프펄스 증폭(OPCPA)시스템 개발연구 현황

수행기관 [참고문헌]	수행 연도	OPCPA 종류	펌프 파장 [nm]	씨앗 파장 [nm]	펌프 펄스길이 [ns]	펌프 에너지 [μJ]	변환 효율 [%]	증폭 후 펄스에너지 [μJ]	압축 후 펄스길이 [fs]	OPCPA 매질 (길이 [mm])	반복률 [kHz]
IMRA [6,7]	1998 2000	degenerate non-degenerate	786 1064	1560 1560	0.5 0.75	5000 250	20 32	1000 80 @1560nm	680 1600	PPLN (5) PPLN (20)	0.01 1
MBI/Ajou Univ. [8-10]	2002 2003 2004	non-degenerate	1064 1064 1064	1573 1570 1570	1 1 1	850 1000 600	2.4 8.5 6.6	20 85 39.5	320 270 315	PPKTP (15) PPKTP (5) / PPKTP (7)	1 1 1
LLNL [11]	2003	degenerate	532	1053	6	700	6.5	45	390	PPKTP (15)	0.01
MPQ [12]	2006	degenerate	1053	2100	0.03	5000	2.0	80	20	PPLN (3) / PPLT (3)	1
Ajou Univ. [13]	2007	non- degenerate	532	1235	8	390	6.2	24.1 @1235nm, 1kHz 15.6 @1235nm, 5kHz	530	PPSLT (20) / PPSLT (20)	1-5
ETH [14]	2009	degenerate	1064	3500	0.01	52	1.8	0.95	92	MgO:PPLN (3) / MgO:PPLN (1.4)	100

정리한 도표를 보여준다.

지금까지 보고된 주기적으로 분극반전된 QPM 물질을 이용한 OPCPA 시스템 개발 연구의 주된 목표는 kHz 이상의 고반복률에서 발진되고 μJ-mJ 급 에너지를 방출하는 소규모 극초단 펄스 증폭시스템의 구현이다. 극초단 광섬유 레이저/증폭시스템 개발업체로 잘 알려진 미국의 IMRA사는 1998년 처음으로 주기적으로 분극반전된 비선형 물질을 이용한 OPCPA 시스템 구현 가능성을 제시

하였다. 그림 2은 그 시스템 구성도를 보여준다.

이 QPM OPCPA 연구에서는 1550 nm 파장영역에서 발진되는 펄토초 Er-광섬유 레이저가 씨앗 레이저로 사용되었으며, 회절격자 펄스늘림기를 통해 700 fs 펄스를 350 ps로 늘렸고 광섬유 증폭기를 통해 최종적으로 100 nJ의 에너지를 지닌 OPCPA 씨앗 펄스를 얻을 수 있었다. 펌프광원으로는 786 nm에서 발진되는 10 Hz 반복률의 Alexandrite 레이저 증폭기가 사용되었으며, 방출된 펄

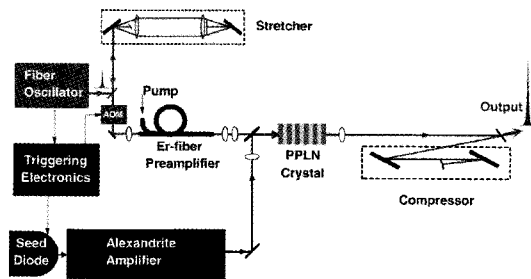


그림 2. PPLN을 이용한 10 Hz OPCPA의 구성도^[6]

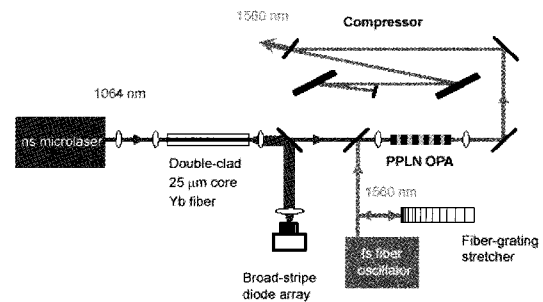


그림 3. PPLN을 이용한 1 kHz OPCPA의 구성도^[7]

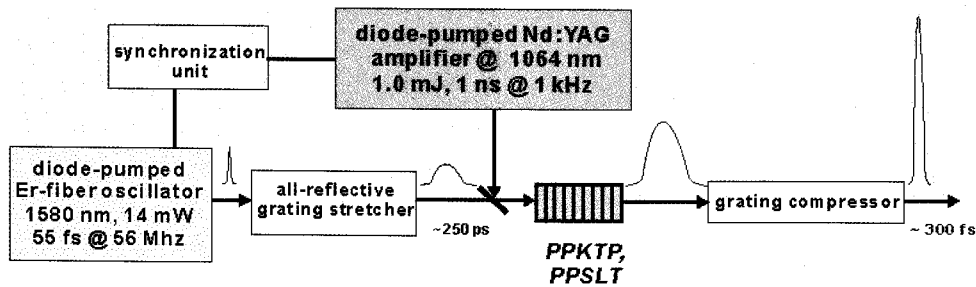
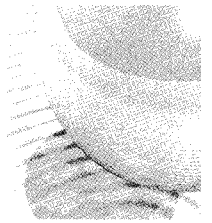


그림 4. PPKTP 과 PPSLT를 이용한 1-kHz OPCPA의 기본 개략도¹⁰⁾

스의 길이는 0.5 ns, 에너지는 5 mJ 이었다. 시간, 공간적으로 동기화된 씨앗펄스와 펌프펄스는 증폭매질인 PPLN에 입사되고, 준위상정합을 통해 1550 nm 영역에서 씨앗펄스의 증폭이 가능하였다. 증폭 후 signal 파장에서의 얻을 수 있는 최대 펄스 에너지는 1 mJ 이었다. 증폭된 펄스는 다시 펄스압축기를 통해 압축되어 10 Hz 반복률의 680 fs 펄스를 얻을 수 있었다.

이 결과를 기반으로 차 후 IMRA사는 1560 nm에서 발진되는 또 다른 1 kHz 소규모 OPCPA 시스템을 소개하였다. 이 때 다이오드로 펌핑된 1064 nm 영역의 나노초 마이크로 레이저와 Yb-광섬유 증폭기로 구성된 펌프광원이 사용되었으며, 기존의 회절격자 기반의 펄스늘림기는 광섬유 펄스늘림기로 대체되었다 (그림 3). 본 연구에서는 증폭 후 1 kHz 반복률에서 1 mJ 급 펄스 에너지를 얻을 수 있었으나, 광섬유를 통한 펄스늘림 및 증폭과정을 통해 축적된 고차분산(higher-order dispersion)을 회절격자 펄스압축기를 하나만으로 모두 보상할 수 없어 재 압축 후의 펄스길이는 원래 씨앗펄스의 길이보다 훨씬 긴 1.6 ps 였다.

IMRA사 외에 독일의 Max-Born 연구소와 아주대학교 팀은 PPKTP, PP stoichiometric LT(PPSLT) 등의 QPM 단결정을 기반으로 1 kHz에서 동작하는 소규모의 쪼개진(non-degenerate) OPCPA 개발연구를 수행하였다. 연구에 활용된 PPKTP의 경우, type-0 준위상정합에 이용되는 유효 비선형 계수(effective nonlinear coefficient)인 d_{eff} 값이 PPLN에 비해 다소 작지만 광매개 증폭 시 효율을 저하시키는 광굴절 현상이 PPLN에 비해 현저히 작고, 광손상 문턱은 PPLN보다 더 높다는 장점을 지니고 있다. PPSLT의 경우, d_{eff} 값은 PPKTP보다 다소

크고, 광손상 문턱도 PPLN이나 PPKTP보다 높으며, 특히 분극반전에 필요한 전기장의 크기는 PPKTP의 경우보다도 낮아서 두꺼운 시료제작이 가능하다.

그림 4는 1 kHz OPCPA의 기본 구성도를 보여준다. 펌프광원으로 1 ns Nd:YAG 재생 증폭기가 사용되었으며, 씨앗광원은 1580 nm에서 발진되는 55 fs, 56 MHz Er-광섬유 레이저가 사용되었다. 회절격자로 구성된 펄스늘림기를 통해 250 ps로 늘어난 펄스의 pJ 수준의 에너지는 단일통과 증폭 후 signal 파장영역에서 20 μJ 까지 증폭되었다.

차 후 증폭된 펄스의 에너지를 더욱 높이기 위한 방법으로 두 개의 PPKTP 증폭단으로 시스템을 보완 하였으며, 이를 통해 85 μJ 이상의 펄스 에너지 방출이 가능하였다. 이렇게 증폭된 에너지는 각각 3.3×10^6 (단일 증폭단)와 1.4×10^6 (이중 증폭단)의 광매개 이득값에 해당되며, 증폭 후 570 nm 영역에서 재 압축을 통해 얻은 펄스의 길이는 약 300 fs 이었다.

본 증폭시스템은 쪼개진 OPCPA 시스템이므로 signal 파장영역에서의 펄스증폭과 더불어 동시에 idler 파장에 해당되는 3.3 μm 중적외선 영역에서 새로운 펄스 방출을 가능하게 하였으며, 단일 증폭단의 경우 9.5 μJ , 이중 증폭단에서는 40 μJ 이상의 idler 펄스 에너지를 얻을 수 있었다.

앞에서 언급했듯이 현재 일반적으로 사용되는 QPM 단결정들의 두께는 대부분 1 mm를 넘지 못하지만, SLT의 경우 낮은 인가 전기장으로 인해 더 두꺼운 주기적으로 분극반전된 시료제작이 가능하다. 본 연구팀에서는 2 mm 두께로 제작된 PPSLT를 사용하여 보다 높은 펌프에너지의 변환 및 씨앗펄스의 이득을 시도하였으며, 단일 증폭단

준위상정합 기반의 광매개 처프 펄스 증폭 기술 현황

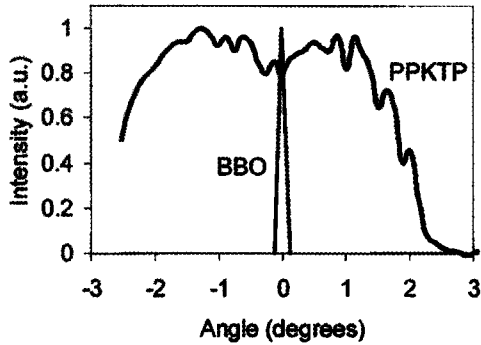


그림 5. PPKTP 와 BBO의 각허용도(angular acceptance) 비교⁽¹¹⁾

을 통해 signal 파장영역에서 pJ 수준의 seed 펄스 에너지를 최고 39.5 μJ까지 증폭 할 수 있었다. 시스템 기본 구성은 PPKTP OPCPA와 유사하고 이를 다소 보완해 사용하였으며, 증폭 후 얻은 에너지 크기는 1.9×10⁶ 이상의 광매개 이득값에 해당되며, 현재까지 OPCPA 연구에서 보고된 단일통과 이득 중에서 가장 높은 수치를 보여준다.

QPM 기반의 OPCPA 연구는 대부분이 kHz 이상의 고반복률에서 동작하고 다양한 파장영역에서 μJ 이상의 에너지를 지닌 극초단 펄스 방출이 가능한 소규모 증폭시스템 개발에 초점을 맞추고 있지만, TW급 고출력 OPCPA의 초기 증폭단으로 사용하기 위한 연구도 수행되고 있다. 미국의 LLNL에서는 PPKTP를 광매개 증폭매질로 사용한 10 Hz 급 OPCPA 시스템 개발연구를 소개하였으며, 복굴절 단결정 BBO와의 비교를 통해 PPKTP의 장점을 보여주었다. 기존에 증폭매질로 사용되던 BBO는 상대적으로 낮은 변환효율 및 복굴절에 의한 퍼짐(walk-off) 현

상과 위상정합이 단결정 각도에 매우 민감하다는 단점들을 지닌 반면에 이 QPM 단결정의 경우, 큰 유효 비선형계수에 의한 훨씬 더 높은 이득효율과 퍼짐현상이 없다는 장점을 지니고 있다. 증폭 후 품질 좋은 빔 단면모양을 얻을 수 있었으며, 펄스의 안정성 역시 BBO의 경우보다 높은 것을 실험결과를 통해 제시하였다. 그림 5는 PPKTP와 BBO의 각허용도(angular acceptance) 비교를 보여준다. PPKTP를 사용했을 경우에 BBO를 사용한 type-I OPA보다 10° 이상의 큰 각허용도를 지니며, 이로 인해 펌프빔의 단면모양과 빔평행 정도는 증폭과정에서 덜 영향을 주며 최종적으로 높은 품질의 빔을 얻을 수 있음을 보고하였다.

본 OPCPA의 기본 구성도를 살펴보면 (그림 6, 왼쪽), 펌프광원으로는 10 Hz의 반복률에서 Q-스위칭 발진되는 6 ns, 532 nm Nd:YAG 레이저가 사용되었으며, 씨앗펄스로는 1053 nm 영역의 Nd:glass 레이저에서 방출되어 펄스늘림기를 통해 1.2 ns로 늘어난 처프펄스가 사용되었다. 이 때 씨앗펄스의 스펙트럼 반치폭은 7 nm 이었다. 펌프레이저와 씨앗레이저의 발진 파장영역에 의해 본 증폭시스템은 거의 겹친 OPCPA임을 알 수 있다.

그림 6의 오른쪽 그림은 증폭된 펄스의 안정성 측정 결과와 CCD 카메라로 찍은 빔의 횡모드 단면모양을 보여주고 있다. 증폭 후 1053 nm 파장영역에서 45 μJ의 펄스 에너지 방출이 가능하였으며, 이는 ~10° 이상의 광매개 이득에 해당된다. 이 때 펌프에서 signal과 idler 펄스로의 변환효율은 13 % 이었으며, 회절격자 압축기를 통해 390 fs 까지 펄스 압축이 가능하였다.

몇 년 전부터 독일의 막스 플랑크 연구소에서는 고차 조화파 발생의 다양한 기본광원 개발을 목적으로 추가적으

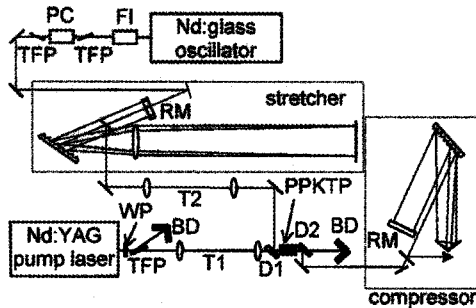
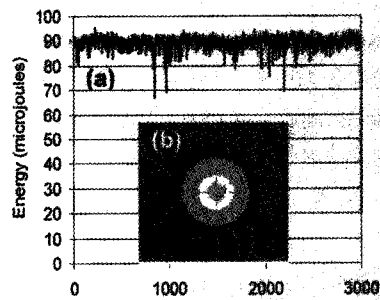


그림 6. PPKTP 과 PPSLT를 이용한 1-kHz OPCPA의 구성도⁽¹¹⁾



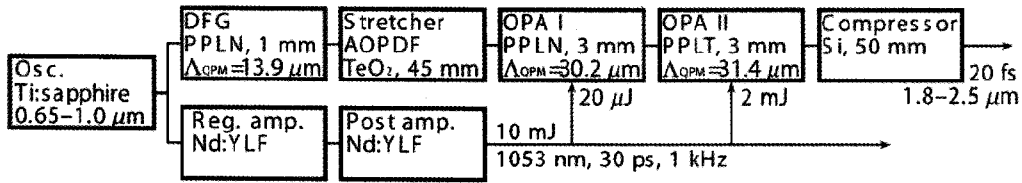
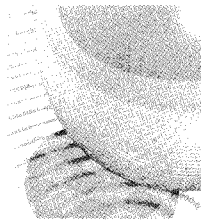


그림 7. MgO:PPLN과 MgO:PPLT를 이용한 근적외선 OPCPA의 개략도⁽¹²⁾

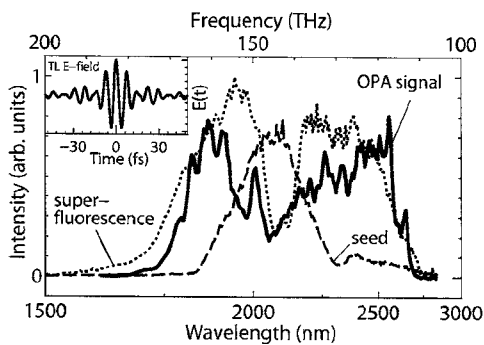


그림 8. 씨앗펄스, 첫 증폭단으로부터의 자발 광매개 형광 및 최종 증폭 후의 signal 스펙트럼⁽¹²⁾

로 OPCPA 개발연구를 추진하고 있으며, 얼마 전에는 2.1 μm 영역에서 80 μJ , 20 fs 펄스를 방출하는 CEP(carrier-envelope phase) 안정화된 OPCPA 시스템을 소개하였다. 그림 7은 QPM 단결정을 기반으로 구성된 두 개의 증폭단을 지닌 기본 OPCPA 시스템 개략도를 보여 준다.

사용된 펌프광원은 Nd:YLF 재생 증폭기와 추가 증폭기로 구성되었으며, 이를 통해 1053 nm 파장영역 및 1 kHz의 반복률에서 10 mJ의 에너지를 지닌 30 ps 펄스를 방출이 가능하였다. 이 때 초광대역(ultra-broadband) 타이타늄 사파이어 레이저에서 방출된 펄스의 일부는 펌프광원의 씨앗펄스로 사용되었으며, 대부분의 펄스에너지는 OPCPA의 씨앗광원인 차주파수 발생(DFG)단에 사용되었다. DFG 매질은 MgO:PPLN을 사용하였으며, 타이타늄 사파이어 레이저에서 방출된 펄스 스펙트럼의 단파장

과 장파장 성분의 차주파수 발생을 통해 2 μm 파장영역의 씨앗펄스 방출을 가능하게 하였다. 기본 증폭단(pre-amplifier)과 본 증폭단(power-amplifier)에서 증폭매질로 사용된 QPM 단결정은 각각 MgO:PPLN과 MgO:PPLT 이었으며, 이 때 증폭된 signal과 idler 파장은 일치하고, 따라서 겹친 OPCPA임을 보여준다. 본 연구에서는 광대역 준위상정합이 가능하도록 매질의 분극반전 주기 및 길이를 적절히 선택하여 2.1 μm 영역에서 700 nm 이상의 반치폭을 지닌 펄스의 스펙트럼을 얻을 수 있었다. 비선형 계수값과 위상정합 가능한 이득띠폭이 MgO:PPLN보다 다소 작음에도 불구하고 두 번째 증폭단에서 MgO:PPLT를 사용한 이유는, 이 QPM 단결정이 더 높은 광손상 문턱값과 현저히 작은 광굴절 현상을 지니고 때문에 더 높은 펌프에너지를 효과적으로 입사시킬 수 있었기 때문이다. 그림 8은 씨앗펄스 및 첫 번째 증폭 후 얻은 자발 광매개 형광(spontaneous parametric fluorescence) 스펙트럼과 두 증폭단을 통과한 후 증폭된 펄스의 스펙트럼을 보여준다. 삽입된 내부 그림은 증폭된 스펙트럼 반치폭으로부터 유추한 이상적으로 압축된 펄스의 전기장, 즉 펄스의 길이를 보여준다.

펄스늘림기와 압축기로는 각각 Dazzler와 Si 블럭이 사용되었으며, 최종적으로 압축된 펄스의 길이는 단 3개의 광사이클에 해당하는 20 fs, 펄스의 에너지는 80 μJ 이었다. 본 OPCPA시스템은 지속적으로 보완되고 있으며, 고차 조화파 방출과 이토초 응용에 쓰일 계획이다.

현재까지 보고된 대부분의 OPCPA 시스템들은 발전하는 반복률이 고정되어 있는 반면에 최근 아주대학교 연구팀은 kHz 영역에서 손쉽게 반복률 조절이 가능한 쪼개진

준위상정합 기반의 광매개 처프 펄스 증폭 기술 현황

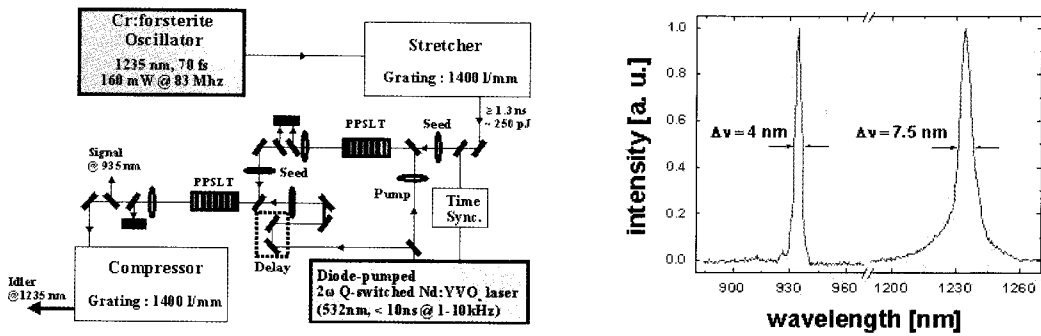


그림 9. Multi-kHz 반복률의 OPCPA 구성도 및 증폭 후 signal 과 idler의 스펙트럼^[13]

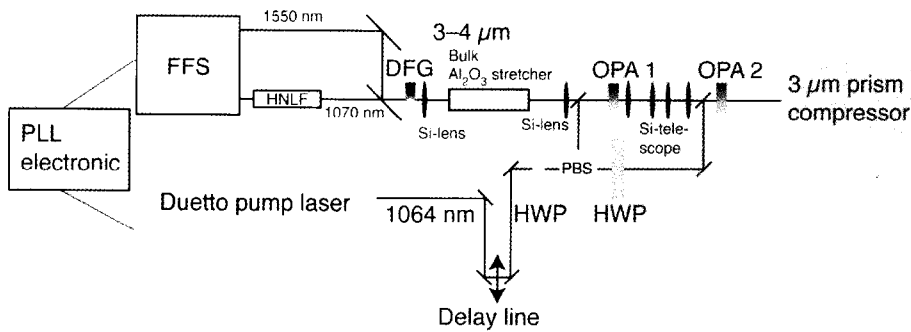


그림 10. 100 kHz MgO:PPLN OPCPA 구성도^[14]

OPCPA 개발연구를 수행하였다. 그림 9는 1235 nm와 935 nm 두 파장영역에서 작동하는 이중 증폭단 OPCPA의 구성과 증폭 후 측정된 스펙트럼을 보여준다.

80 MHz에서 동작하고 중심파장이 1235 nm인 Cr:forsterite 레이저를 씨앗광원으로 사용하였으며, 10 ns 이하의 펄스를 방출하는 Nd:YVO₄ 녹색레이저를 펌프 레이저로 사용하였다. 증폭 매질로는 PPSLT를 사용하였으며, 증폭 후 1235 nm와 935 nm 영역의 펄스방출이 가능하였다. 70 fs의 씨앗펄스의 길이는 펄스늘림기를 통해 1.3 ns 이상까지 늘릴 수 있었으며, 첫 증폭단에서 씨앗 펄스로 사용된 펄스의 에너지는 <math>< 250\text{ pJ}</math> 이었다. 펌프레이저와 씨앗레이저의 시간 동기화는 주파수 분할기 (frequency divider)와 시간 지연 생성기(delay generator)로 구성된 전자 동기화 장치를 통해 kHz 영역에서 손쉽게 동기화시킬 수 있었으며, OPCPA의 동작 반

복률은 전자 동기화 장치로부터 외부 트리거링되어 동작하는 펌프 레이저의 반복률 조절을 통해 1-5 kHz 반복률 변환이 손쉬운 OPCPA 시스템을 제작하였다. 펌프펄스의 길이가 펄스늘림기를 통과한 씨앗 펄스의 길이에 비해 상당히 길어 증폭 시 펌프펄스로부터 씨앗펄스로의 에너지 전환 효율이 높지는 않으나, 이를 보완하기 위해 두번째 증폭단을 구성하여 증폭 후 signal 과 idler 펄스의 총 에너지는 1 kHz에서 55.9 μJ , 5 kHz에서 36.2 μJ 이었다. 측정된 idler 에너지(24.1 μJ @ 1 kHz, 15.6 μJ @ 5 kHz)로부터 계산된 광매개 증폭값은 각각 1.2×10^6 과 0.8×10^6 였다. 1235 nm 영역에서 압축된 초기 펄스의 길이는 530 fs로 이론값 (280 fs)과 다소 차이를 보였으나 차후 보완작업을 통해 350 fs까지 줄일 수 있었다. 본 연구를 통해 kHz 영역에서 손쉽게 펄스 반복률 조절이 가능한 multi-kHz 증폭시스템 개발의 가능성을 제시하였다.

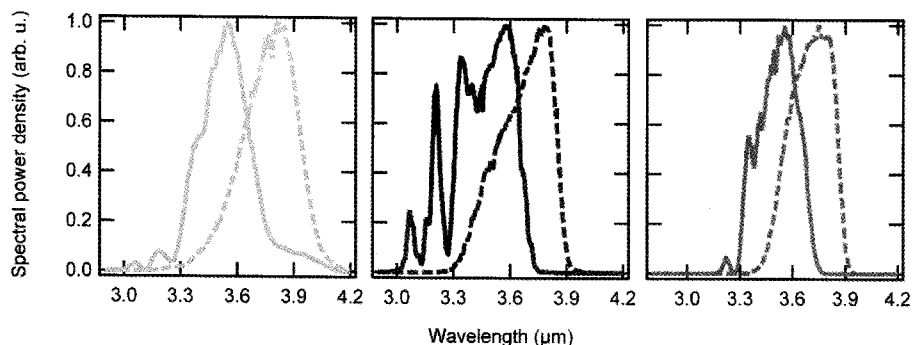


그림 11. 3.5 μm 와 3.7 μm (점선)에서 발진하는 씨앗 펄스 스펙트럼과 단일, 이중 증폭단에서의 증폭 후의 펄스 스펙트럼⁽¹⁴⁾

이 외에도 가장 최근 스위스 연방공대(ETH)로부터 100 kHz 반복률로 동작하여 3-4 μm 의 중적외선 파장영역에서 μJ 급 에너지를 지닌 100 fs 이하의 펄스 방출이 가능한 OPCPA 개발 연구가 보고된 바 있다 (그림 10).

두 개의 증폭단으로 이루어진 본 OPCPA 시스템에서 씨앗광원으로는 부채꼴 모양의 구조로 손쉽게 QPM 격자 주기 변환이 가능한 MgO:PPLN을 기반으로 구성된 차주파수 발생단이 사용되었다. 이 차주파수 발생단에서 Er-광섬유 레이저 증폭기로부터 방출된 1550 nm 펄스와 비선형 광섬유를 통과해 1070 nm 영역으로 파장 변환된 펄스 간의 차주파수 방출을 통해 3.4 - 4.8 μm 영역에서 스펙트럼 반치폭이 360 nm에 이르는 중적외선 씨앗펄스를 뽑아낼 수 있었다. 이때 씨앗펄스의 길이는 82 MHz 반복률에서 60 fs였으며, OPA의 씨앗펄스로 사용하기 위한 이 펄스는 다시 사파이어 결정 덩어리를 통해 2.4 ps로 늘어졌다. 씨앗으로 사용될 펄스의 최종 에너지는 9.8 pJ이다. 펌프레이저로는 Nd:YVO₄ 증폭기가 사용되었으며, 이는 100 kHz에서 100 μJ 급의 펄스에너지를 방출하였다. 펌프와 씨앗광원은 위상잠금(phase-locking)을 통해 시간상 떨림(jitter)을 현저히 줄이고 서로 안정화를 시킬 수 있었다. 첫 번째 증폭단에서는 MgO:PPLN의 서로 다른 7 개의 QPM 분극반전 주기를 이용하여 1064 nm에서 펌핑할 때 2.5 - 4.0 μm 영역에서의 광대개 증폭을 가능하게 하였다. 두 번째 증폭단 역시 MgO:PPLN로 구성되었으며, 증폭 후 최종적으로 3.5 μm 영역에서 1 μJ 급 펄스를 방출할 수 있었다. 이 에너지 크기는 10⁴의 광대개 이득 값에 해당된다. 그림 11은 각각 DFG를 통해 얻어낸 씨앗

광원 및 첫 번째, 두 번째 증폭단에서 증폭된 펄스의 스펙트럼들을 보여준다. 증폭 후 재 압축된 펄스의 길이는 92 fs 이었다.

4. 결론

OPCPA 기술은 현재 널리 사용되고 있는 재생증폭, 다중통과증폭 이외에 처프펄스증폭 기술을 기반으로 하는 또 다른 하나의 새로운 극초단 펄스 증폭기술을 제시하므로 많은 연구팀의 연구주제가 되고 있으며, 현재 이러한 OPCPA 기술은 초고출력(ultrahigh-peak power), 극초단 레이저 개발 및 응용 연구에 없어서는 안 될 핵심기술로 자리 잡았다. 그 외에도 QPM 비선형 단결정이 갖는 우수한 비선형 특성의 도움으로 다양한 파장영역과 고반복률에서 발전되는 소규모 극초단 펄스 증폭기 개발의 가능성이 여러 연구결과를 통해 제시되었다. 그리고 출력을 더욱 높이기 위한 연구가 현재 활발히 진행되는 동시에 부분적으로는 이러한 증폭시스템이 응용연구의 광원으로 직접 투입되어 사용되고 있다.

본문에서 약 10년 이상에 걸쳐 수행되어 온 QPM 기반의 주요 OPCPA 기술에 대해 간단히 정리하였는데, 자세히 언급하지 못한 각 연구에 사용된 QPM 단결정들의 주요 특성 및 변수, 펄스느림과 압축 기술, 펌프 및 씨앗 펄스의 동기화 기술, 광대개 증폭 원리 등에 대한 세부 사항들은 참고문헌을 참조하기 바란다.

참고문헌

- (1) D. Spence, P. Kean, W. Sibbett, *Opt. Lett.* 16, 42 (1991)
- (2) R. Butkus, R. Daniellius, A. Dubietis, A. Piskarskas, A. Stabinis, *Appl. Phys. B*, 79, 693 (2004)
- (3) A. Dubietis, R. Butkus, A. P. Piskarskas, *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.* 12, 163 (2006)
- (4) A. Dubietis, G. Jonuaukas, A. Piskarskas, *Opt. Commun.* 88, 437 (1992)
- (5) S. A. Akhmanov, V. A. Vysloukh, A. S. Chirkin, "Optics of Femtosecond Laser Pulses," (AIP, New York 1992)
- (6) A. Galvanauskas, A. Hariharan, D. Harter, M.A. Arbore, M.M. Fejer, *Opt. Lett.* 23, 210 (1998)
- (7) A. Galvanauskas, A. Hariharan, F. Raksi, K. K. Wong, D. Harter, G. Imeshev, M. M. Fejer, *CLEO 2000, Paper CThB4* (2000)
- (8) F. Rotermund, V. Petrov, F. Noack, V. Pasiskevicius, J. Hellstrom, F. Laurell, H. Hundertmark, P. Adel, C. Fallnich, *Electron. Lett.* 38, 561 (2002)
- (9) V. Petrov, F. Noack, F. Rotermund, V. Pasiskevicius, A. Fragemann, F. Laurell, H. Hundertmark, P. Adel, C. Fallnich, *Jpn. J. Appl. Phys.* 42, L1327 (2003)
- (10) F. Rotermund, C. J. Yoon, V. Petrov, F. Noack, S. Kurimura, N. Yu, K. Kitamura, *Opt. Express* 12, 6421 (2004)
- (11) I. Jovanovic, J.R. Schmidt, C.A. Ebberts, *Appl. Phys. Lett.* 83, 4125 (2003)
- (12) T. Fuji, N. Ishii, C. Y. Teisset, X. Gu, Th. Metzger, A. Baltuska, N. Forget, D. Kaplan, A. Galvanauskas, F. Krausz, *Opt. Lett.* 31, 1103 (2006)
- (13) W. B. Cho, K. Kim, H. Lim, J. Lee, S. Kurimura, F. Rotermund, *Opt. Lett.* 32, 2828 (2007)
- (14) C. Emy, C. Heese, M. Haag, L. Gallmann, U. Keller, *Opt. Express* 17, 1340 (2009)

약 령



이상민(F. Rotermund)

- 현재 근무처 : 2002~현재 아주대학교 물리학과/에너지시스템학부 조교수, 부교수
- 최종학력 : 2000 Technical University of Berlin, 물리학 (이학박사)
- 1997 University of Regensburg, 물리학 (diploma)
- 1993 University of Regensburg, 물리학 (prediploma)
- 주요경력 : 1997~2002 Max-Born-Institute(MBI) Research Assistant, Research Scientist
- E-mail : rotermun@ajou.ac.kr