

# PPLN 비선형 결정과 이중통과법을 이용한 DOFA 시스템에서 증폭된 연속발전형 파장가변 적외선 레이저광의 제 2고조파 발생

유길상 · 조재홍<sup>†</sup>

한남대학교 이과대학 광·전자물리학과  
Ⓣ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133번지

고광훈 · 임 권 · 정도영

한국원자력연구원 양자광학연구부  
Ⓣ 305-353 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

(2008년 5월 7일 받음, 2008년 6월 16일 수정본 받음, 2008년 6월 16일 게재 확정)

주기적으로 분극 반전된 비선형 결정 중에 하나인 PPLN(Periodically Poled MgO(5%) doped Lithium Niobate)과 수 W급의 고출력 연속발전형 파장가변 적외선 레이저 시스템인 DOFA(Diode Laser Oscillator & Fiber Amplifier) 시스템을 이용하여, 이 결정에서 펄핑광을 한번 통과시키는 단일통과와 두 번 통과시키는 이중통과에서의 효율적인 제 2고조파 발생 조건을 실험적으로 구하였다. 단일통과에서는 최적의 위상정합온도 108.9°C에서 최대 출력 2.45 W의 적외선(파장 = 1070 nm) 펄핑광을 사용하여 최대 245 mW의 녹색광원(파장 = 535 nm)인 제 2고조파를 만들었고, 이때의 주파수 변환 효율은 10%였다. 또한 제 2고조파 발생의 효율을 증가시키기 위해서 뒤 반사용 오목거울과 위상보정을 위한 췌기유리편을 이용하여 이중통과의 제 2고조파 발생장치를 구성하였다. 이때 최적의 위상정합온도 108.5°C에서 최대 출력 2.45 W의 적외선(파장 = 1070 nm) 펄핑광을 사용하여 최대 383 mW의 녹색광원(파장 = 535 nm)인 제 2고조파를 만들었다. 이때의 변환 효율은 15.6%로써 단일통과에서의 제 2고조파 발생 효율보다 크게 증가함을 확인하였다.

주제어: PPLN, 제 2고조파, 이중통과

## I. 서 론

근 자외선에서부터 청색, 녹색의 가시광선의 파장영역에서 발전하는 레이저 광원은 광 정보처리, 디스플레이, 복사 기술, 고분해 분광학, 생명공학, 레이저 가공, 의료, 홀로그래픽 기억장치 등의 응용 분야 연구와 빛의 상호작용 세계를 탐구하는 기초 학문 분야의 도구로 오랫동안 사용되었다. 특히 광화학 반응이나 고분해 원자 분광학 분야에서는 레이저 선평축소, 주파수 안정성, 파장가변성 및 빠른 주파수 변조 특성을 가진 수 백 mW에서 수 W급의 연속발전형 파장가변 레이저 광원이 필요하다. 최근에는 이 분야에서 비교적 장비의 수명이 짧고 부피가 큰 가스 레이저나 고체 레이저 등을 대신한 MOPA(Master Oscillator & Power Amplifier) 시스템<sup>[1-3]</sup>과 준 위상정합(Quasi-Phase Matching; QPM)<sup>[4]</sup> 주기를 가진 주기분극형 비선형 결정(PPLN,<sup>[5-7]</sup> PPSLT,<sup>[8-10]</sup> PPKTP<sup>[2,11]</sup>)들을 이용하여 필요한 광 주파수로 변환시키는 방법들, 특히 제 2고조파 발생(Second Harmonic Generation; SHG)을 실현하였으며, 이에 따른 SHG의 변환 효율이 중요한 연구주제가 되었다.<sup>[12]</sup>

또한 이러한 비선형 광 주파수 변환 효율을 증가시키기 위

한 방법으로는 기본 입사파의 세기를 높이거나 비선형 결정의 통과 경로를 길게 하는 방법, 즉 내부 공진기형 구조를 이용하는 방법<sup>[13]</sup>이나 다중통과법<sup>[14]</sup>이 있다. 본 논문에서는 후자의 방법을 선택하여 약 2.45 W 출력의 광원을 사용하여 다중통과에 의한 광 주파수 변환(SHG) 실험 장치를 구성하였다. 그러나 광 주파수 변환 효율을 높이기 위한 장치들은 제 2고조파가 발생하는 동안 결정의 양 끝 단면의 폴리싱 부분이나 공기 중의 분산 등에 의해 생기는 두 파들의 상대적인 위상차이를 정밀히 보정하는 것이 가장 중요하다.<sup>[15]</sup>

본 논문에서는 고품질의 적외선 레이저광을 발생시키기 위하여 Littrow형 외부공진기 다이오드 레이저(External Cavity Diode Laser; ECDL)를 주 발진기(Master Oscillator)로 사용하였고, 이테르븀(Ytterbium; Yb)이 첨가된 광섬유 증폭기(Yb doped Fiber Amplifier; YDFA)를 출력 증폭기(Power Amplifier)로 사용하여 연속발전형 파장가변 적외선광원인 DOFA(Diode Laser Oscillator & Fiber Amplifier) 시스템을 구성하였다. 또한 광 주파수 변환소자로서 준 위상정합 주기를 가진 주기분극형 비선형 결정(Periodically Poled MgO(5%) doped Lithium Niobate; PPLN)을 사용하여 고효율의 녹색광원(파장 = 535 nm)을 만들어내고자 한다. 또한 SHG의 효율을 높이기 위해서 결정을 통과한 펄핑광을 뒤 반사시키는 오목거울과 이로 부터 발생된 두 개의 SHG에 대한 위상차이를 위상일치형태

<sup>†</sup>E-mail: jhjo@hnu.kr

로 보정하기 위한 썬기유리판을 이용하여 이중통과 장치를 구성하고자 하며, 이 경우 단일통과와 이중통과에서의 SHG 변환 효율을 서로 비교하고자 한다.

### II. DOFA 시스템

최근에 파장이 1  $\mu\text{m}$  대역인 적외선 광원을 발생시키며 레이저 선폭이 좁고 파장가변성이 우수한 고출력 레이저로써 Ring Cavity Ti:Sapphire/Dye Laser, Fiber Oscillator and Fiber Amplifier, Tapered Diode Laser 등을 구성하여 많이 사용하고 있다. 그러나 본 논문에서는 빠르고 연속적인 주파수 변환이 가능한 단일모드 적외선 레이저를 발생시키기 위하여 ECDL을 주 발진기로 사용한 연속발진형 파장가변 고출력 적외선 레이저인 DOFA 시스템을 그림 1과 같이 구성하였다.

이 DOFA 시스템에서 주 발진기로는 Littrow형 외부공진 구조를 하고 있는 다이오드 레이저 모듈(Toptica Photonics; DL100L)을 사용하였고, 출력 증폭기로는 Yb이 첨가된 광섬유 레이저 증폭기(Keopsys; KPS-BT2-YFA-1083-50-FA)를 사용하였다. 이때 다이오드 레이저의 선폭은 약 3 MHz(5 ms) 이내이고, 출력은 150 mW 이상이다. 이 레이저를 평균적으로 12시간 정도 동작시키면 파장의 변화는 약 300 MHz가 된다. 그리고 온도 당 선폭파장 흐름은 약 400 MHz/°C이다. 레이저 광속의 편광비율(s파)은 약 100 : 1 정도이다. 광섬유 증폭기는 V 형태의 측면 펌핑 방식<sup>[16,17]</sup>으로 다이오드 레이저에서 나오는 레이저 광원은 Yb이 첨가된 YDFA를 펌핑한다. 증폭기로서 이용이 가능한 파장 영역은 1060 nm에서 1090 nm이다. 입력단의 광섬유는 발진기의 출력을 바로 연결하여 입력시키기에 알맞는 직경 7  $\mu\text{m}$ 의 코어를 갖는 단일모드 광섬유이다. 출력단의 광섬유 코어 크기는 20  $\mu\text{m}$ 이며, 편광이 유지되지 않는 단일모드 광섬유이다. 다음의 그림 2는 증폭기의 LD의 전류량에 따른 DOFA 시스템의 출력 특성 및 세기를 보여주고 있다. 특히 삽입 부분은 Fabry-Perot 에탈론을 이용한 DOFA 시스템의 단일모드 특성을 잘 보여주고 있다. 이때 펌핑하는 전류량은 최대 5.7 A이고 정상동작시에 전류량은 5.6 A로 최대 출력이 5.5 W인 임의의 편광 상태를 갖는 출력광이 나온다.

### III. PPLN에 의한 제 2고조파 발생

보통 SHG와 같은 주파수 변환 과정에서의 효율적인 에너지 변환은 매질을 통해 전파하는 동안 발생하는 제 2고조파와 기본파가 굴절률 분산에 의해 두 파의 위상 속도가 다르므로 나란히 진행하지 않고, 특히 기본파의 진행 방향과 같은 방향으로 효율적인 SHG가 어렵기 때문에 두 파의 위상정합(Phase Matching) 조건을 필요로 한다. 위상정합의 경우 지금까지는 복굴절위상정합(Birefringence Phase Matching; BPM)을 이용하는 방법이 널리 사용 되었으나, 이 방법은 비선형 결정에서 제 2고조파가 발생할 때 기본파와 제 2고조파는 Walk-off 각으로 갈라진다. 따라서 이러한 한계 때문에 BPM을 이용할 경우에는 위상정합 길이가 제한되므로, 입사광의 파장이 제한되고, 많은 무기물 결정에서 비선형광학계수의 가장 큰 텐서성분인  $d_{33}$ 을 사용할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 강유전체 결정으로 대표되는 비선형 결정의 자발분극의 방향을 결맞음 길이(coherence length)마다 180도 교대로 구역 반전(domain inversion)시켜주거나 비선형 매질 위에 얇은 웨이퍼를 쌓아올려 그 웨이퍼를 180도 교대로 구역 반전시켜 비선형 계수의 부호를 바꾸어서 제 2고조파의 진폭을 계속 증가시켜주는 QPM이 발전되었고, 이러한 방법은

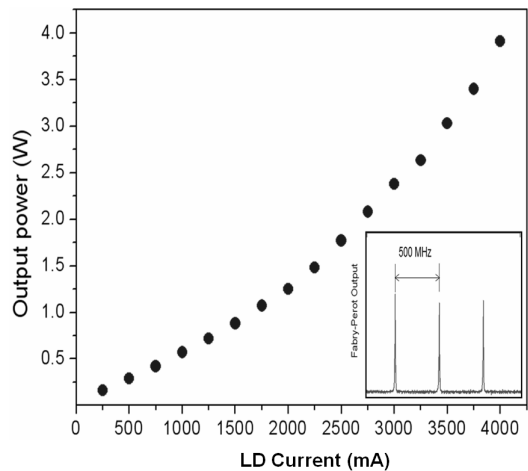


그림 2. 광섬유 증폭기의 LD 전류량에 따른 DOFA 시스템의 적외선(파장 = 1070 nm) 출력 특성 및 세기.

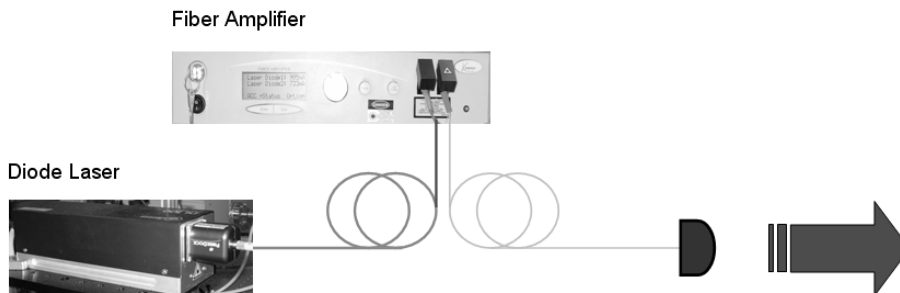


그림 1. Littrow형 외부공진기 다이오드 레이저와 Yb가 첨가된 광섬유 레이저 증폭기를 이용한 DOFA 시스템 장치 구성도.

구역 반전된 길이를 결맞음 주기에 맞게 조절하여 거의 모든 파장에 대해 비 임계 위상정합이 가능하게하고, 제 2고조파가 기본파의 전파경로에서 벗어나는 Walk-off 현상이 없어 SHG 변환 효율을 극대화할 수가 있다. 따라서 본 논문에서는 파장가변소자로서 PPLN(HC Photonics사 제품)을 사용하였으며, 크기는 길이가 50 mm, 두께가 0.5 mm, 폭이 3 mm 이었다. QPM의 주기는 6.968  $\mu\text{m}$ 이었으며, 양끝 면은 파장 535 nm와 1070 nm에 대한 무반사 코팅처리가 되어있다. 또한 다른 주기분극형 비선형 결정들보다 PPLN의 3차 비선형 계수가 25 pm/V로 가장 높기 때문에 제 2고조파 변환 효율이 상대적으로 크다.<sup>[18,19]</sup> 첨가물로서 MgO가 5%가 첨가되면 광전도도가 증가하여 광학손상이 크게 줄어든다.<sup>[20,21]</sup> SHG에서 PPLN의 위상정합 조건용 최적온도를 찾고 이를 제어하기 위해서 0.1°C 단위로 최대 200°C까지 온도를 조절할 수 있는 결정 오븐(crystal oven)에 PPLN을 넣었다.

**3.1 단일통과에서의 제 2고조파 발생**

그림 3은 PPLN을 이용한 단일통과의 SHG(파장 = 535 nm)를 위한 실험장치도이다. DOFA 시스템에서 나오는 파장 1070 nm의 입력광이 실험부품들에서 반사하여 다시 DOFA 시스템으로 들어가는 것을 막기 위하여 광 차폐기(optical isolator)를 사용하였고, 이때 이 부품들을 지나면서 입력광의 출력이 5.5 W에서 2.45 W로 약 43% 줄어든다. 또한 반파장판을 광 차폐기 뒤에 놓아서 PPLN에 입사하는 기본파의 편광을 수직으로 바꾼다. PPLN에 입사하는 적외선 입사광을 초점거리 200 mm인 초점 렌즈(focusing lens)로 집속시키고, 이색성 거울(dichroic mirror) 3개를 사용하여 펌핑광인 적외선 광과 SHG

로 발생된 파장 535 nm의 신호광을 분리하였다. PPLN을 넣은 오븐의 온도 제어를 사용하여 PPLN의 온도를 일정하게 유지함으로써 출력을 최적화하였고, 펌핑시키는 적외선광의 출력 변화에 따라 온도정합조건을 바꾸어,<sup>[6,11,22,23]</sup> 고효율의 제 2고조파를 만들었다.

**3.2 이중통과에서의 제 2고조파 발생**

SHG 효율을 높이기 위한 방법으로는 첫째, 기본 입사파의 세기를 증가시키는 방법과 둘째, 결정의 통과 경로를 증가시켜서 발생효율을 증가시키는 방법이 있다. 본 실험 장치에서는 광 차폐기를 지난 후의 기본 입사파(펌핑광)의 세기가 2.45 W로 제한되어 있기 때문에, 후자의 방법을 선택하였다. 이 경우 처음 통과 시 발생하는 제 2고조파와 두 번째 통과 시 발생하는 제 2고조파 사이의 위상차이를 보정하기 위한 썸기유리판과 반사용 오목거울을 추가하여 이중통과 배열을 구성함으로써 제 2고조파 발생의 변환 효율을 높였다.

그림 4는 DOFA 시스템의 적외선 펌핑광을 PPLN에 이중 통과 방식으로 입사시켜서 SHG(파장 = 535 nm)를 측정하는 실험장치도이다. 이러한 이중통과 방식을 배치하기 위해서 오목거울을 사용하여 PPLN의 중심에 펌핑용 기본파와 이로 부터 발생하는 제 2고조파를 다시 반사시켜 PPLN의 중심에 초점이 맺히도록 하였다. 이때, 입사된 적외선광의 출력은 2.45 W가 되었다. 그리고 썸기각이 0.5도인 썸기유리판 2개를 그림 5(a)에서 보는 것처럼 배열하여 PPLN에 입사되는 파와 오목거울에 의해서 반사된 파가 서로 PPLN 내에서 중첩되는 부분의 비율을 최대한 크게 되도록 광 경로 길이를 바꾸었다.

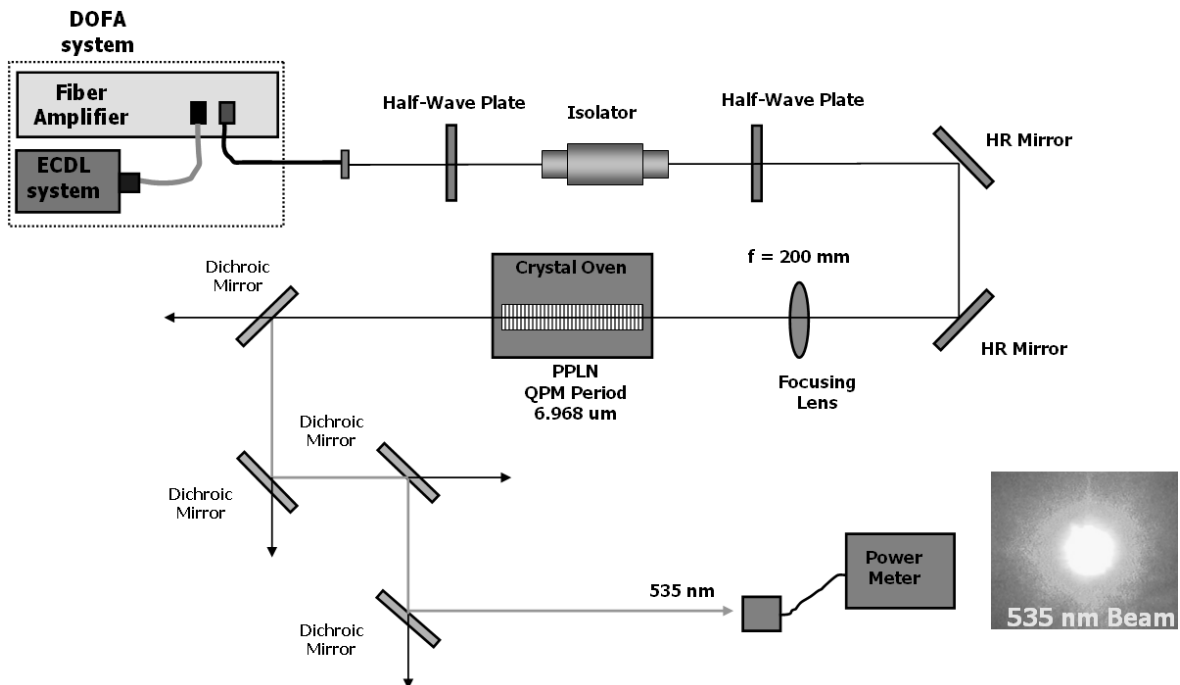


그림 3. DOFA 시스템의 적외선 펌핑광을 PPLN에 단일통과법으로 입사시키는 SHG(파장 = 535 nm) 발생 실험장치도.

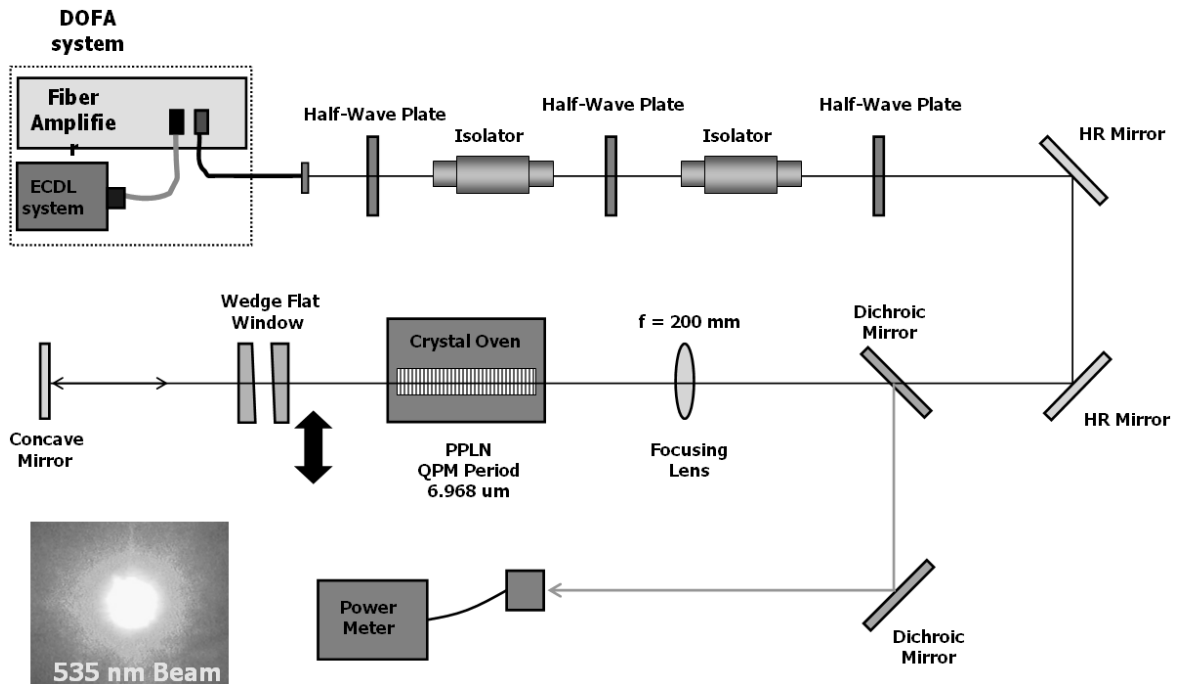


그림 4. DOFA 시스템의 적외선 펌핑광을 PPLN에 이중통과법으로 입사시키는 SHG(파장 = 535 nm) 발생 실험장치도.

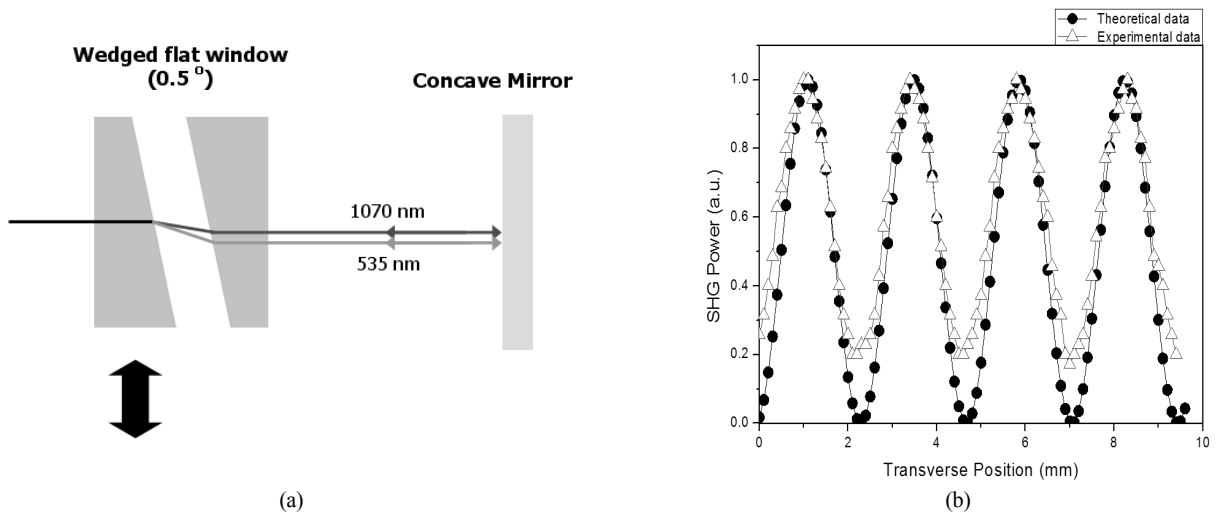


그림 5. 광 경로차를 이용한 입사 펌핑광과 SHG 파에 대한 위상보정.

(a) 두 파장의 위상을 보정하기 위한 썩기유리판의 구성도

(b) 썩기유리판의 횡 방향이동(위상차 변화)에 따른 제 2고조파 세기 변화

이 경우 단일통과에서 발생한 파장 535 nm의 제 2고조파와 이중통과 후에 발생하는 파장 535 nm의 제 2고조파 사이의 위상이 서로 바뀌면서 두 파의 보강간섭과 소멸간섭에 의하여 제 2고조파 세기가 그림 5(b)에서처럼 바뀌는 것을 확인하였다. 이때 세모모양의 점은 실제로 측정된 이중통과에서의 SHG 출력으로 썩기의 횡 이동의 주기는 2.1 mm이다. 그리고 그림 5(b)의 원모양의 점은 참고문헌 [13]에서 주어진 아래와 같은 제 2고조파 위상보정식을 이용하여 실험적으로 구한 두 파의 상대적인 위상차이  $\delta\phi$  값에 따른 이중통

과에서의 제 2고조파 출력을 그린 값이다.

$$I_2^{DP} = \frac{4\omega^2}{n_2 n_1^2 c^3 \epsilon_0} d_Q^2 I_1^2 L^2 [1 - \cos(\delta\phi)] \quad (1)$$

(1) 식에서  $I_1$ 과  $I_2$ 는 각각 기본 입사파의 세기와 제 2고조파의 세기이고,  $n_1$ 과  $n_2$ 는 펌핑용 기본 입사파와 PPLN에서 발생한 제 2고조파에 대한 각각의 굴절률들이다.  $d_Q$ 는 유효 비선형계수이고  $L$ 은 매질의 통과경로길이이다. 그리고  $\delta\phi$

는 기본 입사파와 제 2고조파의 상대적인 위상차로써  $\delta\phi = (2m-1)\pi$ 에서 두 제 2고조파의 총합이 최대(보강간섭)가 되며,  $\delta\phi = 2m\pi$ 에서 두 제 2고조파의 총합이 0(소멸간섭)이 된다. 그림 5(b)의 실험결과에서는 매우 작은 폭의 PPLN에 레이저광을 렌즈로 초점을 모으는 정렬이 완벽하지 않고 분산에 의하여 SHG와 기본파가 불일치하여 실험값들이 완전 소멸간섭이 되지 못하고 있다.

#### IV. 결과 및 토의

그림 6은 단일통과의 SHG 실험에서 PPLN이 들어있는 오븐의 온도, 즉 온도에 따른 PPLN의 정상굴절률과 비정상굴절률 변화에 따른 제 2고조파 출력을 측정하여 얻은 것으로, 이를 이용하여 최적화된 오븐 온도를 결정한다. 그림 6은 그림 7

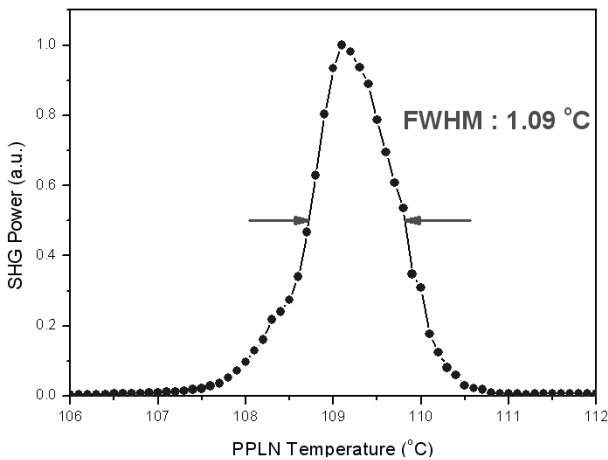


그림 6. 그림 3의 단일통과 실험장치에서 입력광의 세기가 0.5 W에서 PPLN의 오븐 온도 변화에 따른 제 2고조파의 세기 변화.

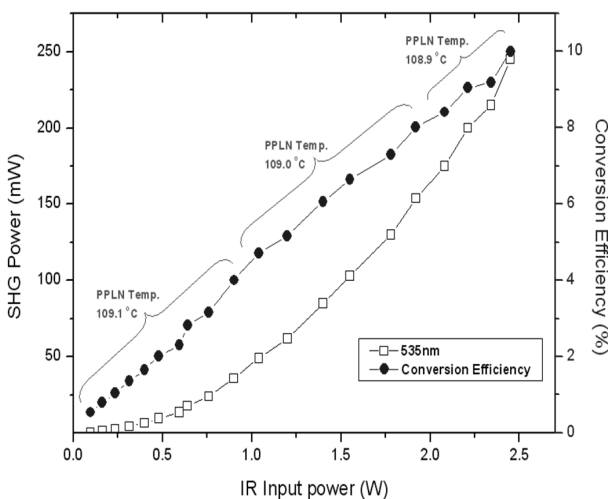


그림 7. 그림 3의 단일통과 실험장치에서 PPLN에 입사하는 적외선 펌핑광의 세기에 따른 제 2고조파의 세기 변화와 위상정합용 최적온도 영역.

의 입사파의 출력이 0.5 W인 저출력의 입력광에 대한 PPLN의 온도에 따른 SHG의 출력을 보여주는 것으로, 최적의 위상정합조건을 만족하는 최적온도는 109.1°C임을 보여준다. 그리고 SHG 출력의 온도별 반치폭(full width at half maximum; FWHM)은 1.09°C이다. 그림 7은 펌핑용 적외선 입사파의 출력이 0.1 W에서 2.5 W까지 커질수록 SHG 출력이 커지면서 위상정합용 최적온도가 세 그룹으로 나뉘어져서 0.1 W에서 1.0 W 미만에서는 109.1°C이고, 1.0 W에서 2.0 W 미만에서는 109.0°C이며, 2.0 W부터 2.5 W 사이에서는 108.9°C가 위상정합용 최적온도임을 보여준다. 특히 파장 1070 nm의 적외선 입력광의 최대 출력 2.45 W에서 SHG에 의한 파장 535 nm의 제 2고조파의 출력이 최대 245 mW일 때, 위상정합에 대한 최적온도 조건은 108.9°C이며, 단일통과법에서의 SHG 최대 변환 효율은 10%이다.

제 2고조파의 출력을 증대시키기 위하여 적외선 입사파를 PPLN의 중심에 이중통과시켰다. 이를 위하여 그림 5처럼 썬기유리판을 광축의 횡 방향으로 이동하면서 거울을 통해 되 반사되는 적외선광의 광경로를 조절해서 처음 PPLN을 통과하여 발생한 제 2고조파와 되 반사하여 매질을 통과하면서 발생한 제 2고조파 사이의 위상차이를 보정하기 위해서 썬기유리판 중에 하나를 광축의 횡 방향으로 이동시켰다. 입사하는 기본파의 세기에 따라 초점 위치가 변하기 때문에 이때마다 오목 거울과 썬기유리판의 조건을 바꾸어야 한다. 그리고 펌핑용 입력파의 세기가 높아질수록 PPLN의 온도가 변하기 때문에 온도 위상정합 조건을 찾기 위해 PPLN의 오븐 온도를 맞추어가며 최적 조건을 찾아야 한다. 그림 8은 이러한 과정을 거쳐서 입력파의 세기를 변화시켰을 때 PPLN의 온도 위상정합조건 변화의 변화를 보여준다. 그림 8의 위쪽 데이터(적색 원형)는 그림 3의 단일통과법에서 입사파의 세기에 따른 온도위상정합조건을 측정한 결과이며, 아래쪽 데이터(흑색 사각형)들은 그림 4의 이중통과법에서 입사파의 세기

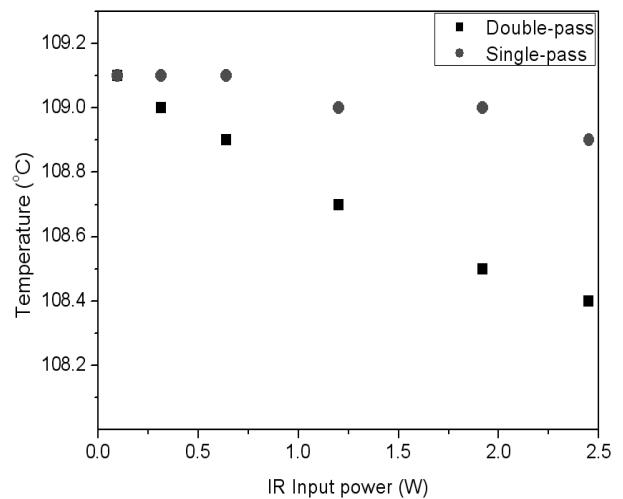


그림 8. 단일통과법과 이중통과법에서 적외선 입사파 세기에 따른 PPLN의 온도정합조건 변화.

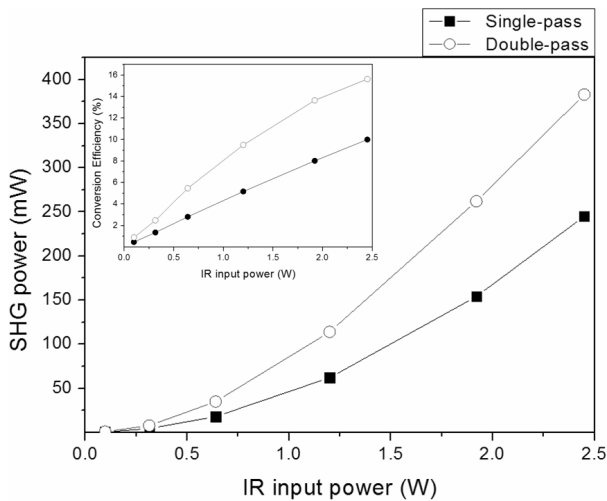


그림 9. 입사파 세기에 따른 단일통과법과 이중통과법에서의 제 2고조파 세기 및 변환 효율 비교.

에 따른 온도위상정합조건을 측정된 결과이다. 그림 8에서 보면 0.1 W에서 2.5 W까지로 입사파의 세기를 증가시키면 이중통과법이 단일통과법보다 입사파의 세기가 크기 때문에 PPLN 결정내의 온도의 상승이 커지고, 이로 인하여 위상정합이 더 크게 깨진다. 이를 보정하기 위해서는 이중통과법에서의 온도정합조건을 단일통과법보다는 더 크게 변화시켜야 한다는 것을 알 수 있다.

그림 9는 그림 8의 온도정합조건들에서 단일통과법의 SHG 출력(검은색 사각형)과 위상을 보정한 이중통과법의 SHG 출력(적색의 속이 빈 원형)을 서로 비교한 결과이다. 그림 9의 왼쪽 상단의 결과는 단일통과법과 이중통과법을 이용한 SHG 펄핑용 입사 적외선광의 출력에 대한 변환 효율로 나타낸 것이다. 단일통과법에서 입사파의 세기가 2.45 W에서 245 mW의 SHG 출력을 얻었고, 이때 변환 효율은 10%였다. 이때 PPLN의 온도를 제어하는 오븐의 온도는 108.9°C이다. 그러나 이중통과법에서는 2.45 W의 입사파 출력에서 383 mW의 SHG 출력을 얻었고, 이때 변환 효율은 15.6%였다. 이때의 PPLN의 온도정합조건은 108.5°C이다. 즉 이중통과법에서 처음 매질을 통과하여 발생한 제 2고조파와 오목거울에 되 반사하여 매질을 통과하면서 발생한 제 2고조파 사이의 위상차이를 보정하기 위하여 썬키유리판을 이용함으로써 단일통과법에서의 SHG에 비하여 보다 높은 효율을 얻을 수 있음을 확인하였다. 특히 0.5 W 이하의 저출력에서는 단일통과에서의 SHG 출력보다 이중통과에서의 SHG 출력이 2.5배 정도가 크다는 것을 확인하였다. 그러나 그림 5(b)에서 말한 바와 같이 실험결과가 (1)식의 이론과 정확히 일치하지 않는데, 그 원인으로는 고출력의 연속발진형 레이저 빔을 PPLN의 한 지점에 집속시켰기 때문에 열적인 효과가 추가로 발생하여 위상정합이 결정 내에서 공간적으로 일부 깨졌기 때문이라고 추측된다. 그러므로 이중통과법에서 되 반사되는 SHG에 의한 파장 535 nm의 두 파의 공간적 중첩을 높일 수 있

는 기하적 구조를 더욱 보완하고 결정의 양 끝 단면을 좀 더 세밀하게 연마하고, 공기 중의 분산적인 요소 등을 제거하면 보다 완벽하게 위상 차이를 보정할 수 있기 때문에 더욱 높은 효율을 얻을 수 있을 것이다.

## V. 결 론

본 논문에서는 단일모드의 선폭이 좁은 파장가변의 연속발전 적외선(파장 = 1070 nm) 레이저 시스템을 구성하여 PPLN을 이용하여 단일통과법과 이중통과법에서의 SHG 출력을 최대로 내기 위한 최적조건들을 실험적으로 구하였다.

단일모드의 선폭이 좁은 수 W급의 높은 출력의 연속발전 적외선 레이저를 구성하기 위하여 다이오드 레이저를 주 발진기로 사용하고, 광섬유 증폭기를 출력 증폭기로 사용하는 DOFA 시스템을 구성하여 중심파장 1070 nm이고 최대 5 W인 연속발전형 고출력 파장가변 적외선 레이저 시스템을 구성하였다. 이것은 기존의 좁은 선폭의 높은 출력을 가진 다른 MOPA 시스템 레이저들보다 장비와 장치의 구성이 간편하고 효율이 높으며, 빠른 주파수 변환이 가능하다는 장점을 얻을 수 있다.

또한 기존의 비선형 매질을 이용한 낮은 효율을 가진 SHG에 비해서 비선형 광학계수가 매우 높고 QPM 주기를 가진 주기분극형 비선형 결정인 PPLN을 사용함으로써 2.45 W의 출력을 가진 적외선 레이저를 펌핑광(파장 = 1070 nm)으로 사용하여 250 mW 급의 녹색광원(파장 = 535 nm)을 만들었다. 상대적인 두 제 2고조파들의 위상차이를 보정하기 위한 썬키유리판과 빔을 되 반사시키기 위한 오목거울을 사용하여 이중통과시킴으로써 단일통과에서의 변환 효율(10%)보다 더 높은 변환 효율(15.6%)을 성공적으로 구하였다. 이러한 QPM 주기를 가진 주기분극형 비선형 결정을 이용하여 SHG하기 위하여 원하는 광 주파수 변환 대역에 따라 적절한 분극반전의 주기를 선택하여 주기분극형 비선형 결정을 제작한다면 보다 높은 효율의 가시광선 전 영역의 단파장을 얻을 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- [1] S. V. Popov, S. V. Chernikov, and J. R. Taylor, "6-W Average power green light generation using seeded high power ytterbium fiber amplifier and periodically poled KTP," *Opt. Commun.*, vol. 174, pp. 231-234, 2000.
- [2] H. Furuya, A. Morikawa, Kiminori Mizuuchi, and Kazuhisa Yamamoto, "High-Beam-Quality Continuous Wave 3 W Green-Light Generation in Bulk Periodically Poled MgO:LiNbO<sub>3</sub>," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 8B, pp. 6704-6707, 2006.
- [3] T. Riesbeck and H. J. Eichler, "A high power laser system at 540 nm with beam coupling by second harmonic generation," *Opt. Commun.*, vol. 275, pp. 429-432, 2007.

- [4] M. M. Fejer, G. A. Magel, D. H. Jundt, and R. L. Byer, "Quasi-Phase-Matched Second Harmonic Generation: Tuning and Tolerances," *IEEE J. Quantum Electronics.*, vol. 28, no. 11, pp. 2631-2654, 1992.
- [5] G. D. Miller, R. G. Batchko, W. M. Tulloch, D. R. Weise, M. M. Fejer, and R. L. Byer, "42%-efficient single-pass cw second-harmonic generation in periodically poled lithium niobate," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 24, pp. 1834-1836, 1997.
- [6] G. W. Ross, M. Pollnau, P. G. R. Smith, W. A. Clarkson, P. E. Britton, and D. C. Hanna, "Generation of high-power blue light in periodically poled LiNbO<sub>3</sub>," *Opt. Lett.*, vol. 23, no. 3, pp. 171-173, 1998.
- [7] N. Pavel, I. Shoji, T. Taira, K. Mizuuchi, A. Morikawa, T. Sugita, and K. Yamamoto, "Room-temperature, continuous-wave 1-W green power by single-pass frequency doubling in a bulk periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystal," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 8, pp. 830-832, 2004.
- [8] N. E. Yu, S. Kurimura, and K. Kitamura, "Higher-Order Quasi-Phase Matched Second Harmonic Generation in Periodically Poled MgO-Doped Stoichiometric LiTaO<sub>3</sub>," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 47, no. 4, pp. 636-639, 2005.
- [9] S. V. Tovstonog, S. Kurimura, and K. Kitamura, "Continuous-wave 2 W green light generation in periodically poled Mg-doped stoichiometric lithium tantalate," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 34, pp. L907-909, 2006.
- [10] S. V. Tovstonog, S. Kurimura, and K. Kitamura, "High power continuous-wave green light generation by quasi phase matching in Mg stoichiometric lithium tantalate," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 051115, pp. 1-3, 2007.
- [11] Z. M. Liao, S. A. Payne, J. Dawson, A. Drobshoff, C. Ebbers, D. Pennington, and L. Taylor, "Thermally induced dephasing in periodically poled KTP frequency-doubling crystals," *J. Opt. Soc. Am. B.*, vol. 21, no. 12, pp. 2191-2195, 2004.
- [12] S. Spiekermann, F. Laurell, V. Pasiskevicius, H. Karlsson, and I. Freitag, "Optimizing non-resonant frequency conversion in periodically poled media," *Appl. Phys. B.*, vol. 79, pp. 211-219, 2004.
- [13] I. Juwiler, A. Arie, A. Skliar, and G. Rosenman, "Efficient quasi-phase-matched frequency doubling with phase compensation by a wedged crystal in a standing wave external cavity," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 17, pp. 1236-1238, 1999.
- [14] G. Imeshev, M. Proctor, and M. M. Fejer, "Phase correction in double-pass quasi-phase-matched second-harmonic generation with a Wedged crystal," *Opt. Lett.*, vol. 23, no. 3, pp. 165-167, 1998.
- [15] I. Juwiler and A. Arie, "Efficient frequency doubling by a phase-compensated crystal in a semimonolithic cavity," *Appl. Opt.*, vol. 42, no. 36, pp. 7163-7169, 2003.
- [16] L. Goldberg, J. P. Kopolow, R. P. Moeller, and D. A. V. Kliner, "High-power superfluorescent source with a side-pumped Yb-doped double-cladding fiber," *Opt. Lett.*, vol. 23, no. 13, pp. 1037-1039, 1998.
- [17] L. Goldberg, J. P. Kopolow, and D. A. V. Kliner, "Highly efficient 4-W Yb-doped fiber amplifier pumped by a broad-stripe laser diode," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 10, pp. 673-675, 1999.
- [18] D. N. Nikogosyan, *Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey*, (Springer, New York, USA, 2005), pp. 35-48.
- [19] HC Photonics Co. web. site : "<http://www.hcphotonics.com>".
- [20] E. O. Ammann and S. Guch, "1.06-0.53 μm second harmonic generation using congruent lithium niobate," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 52, no. 17, pp. 1374-1376, 1988.
- [21] D. H. Jundt, M. M. Fejer, and R. L. Byer, "Optical properties of lithium-rich lithium niobate fabricated by vapor transport equilibration", *IEEE J. Quant. Electron.*, vol. 26, no. 1, pp. 135-138, 1990.
- [22] Z. M. Liao, S. A. Payne, J. Dawson, A. Drobshoff, C. Ebbers, D. Pennington, and L. Taylor, "Thermally induced dephasing in periodically poled KTP frequency-doubling crystals," *J. Opt. Soc. Am. B.*, vol. 21, no. 12, pp. 2191-2195, 2004.
- [23] N. E. Yu, C. S. Jung, D. K. Ko, and J. M. Lee, "Thermal Dephasing of Quasi-Phase-Matched Second-Harmonic Generation in Periodically Poled Stoichiometric LiTaO<sub>3</sub> at High Input Power," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 49, no. 2, pp. 528-532, 2006.

## Double-pass Second Harmonics Generation of Tunable CW Infrared Laser Beam of DOFA System in Periodically Poled LiNbO<sub>3</sub>

Kil Sang Yoo and Jae Heung Jo<sup>†</sup>

*Dept. of Applied Optics and Electromagnetics, Hannam University, Daejeon, 306-791, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: jhjo@hnu.kr*

Kwang-Hoon Ko, Gwon Lim, and Do-Young Jeong

*Quantum Optics Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon, 305-353, Korea*

(Received May 7, 2008; Revised manuscript June 16, 2008; Accepted June 16, 2008)

The optimum conditions of second harmonic generation (SHG) can be successfully achieved experimentally using single pass and double pass methods of a pumping beam. The beam has a power of several Watts radiated by a DOFA (Diode Laser Oscillator & Fiber Amplifier) system, which is a high power CW wavelength tunable infrared laser system, in a PPLN (Periodically Poled MgO doped Lithium Niobate) nonlinear crystal. In the case of a single pass method, the parameters are the wavelength of 535 nm for SHG and the output power of 245 mW generated from the pumping input beam with wavelength of 1070 nm and the power of 2.45 W at phase matching temperature of 108.9°C. The conversion efficiency of SHG was 10%. In order to enhance the output of SHG, the double pass method of the SHG system of a PPLN using a concave mirror for the retro-reflection and a pair of wedged flat windows for phase compensation was also presented. In this double pass system, we obtained the SHG output beam with the wavelength of 535 nm and the maximum power of 383 mW at optimum phase matching temperature of 108.5°C by using an incident pumping beam with wavelength of 1070 nm and the power of 2.45 W. The maximum conversion efficiency is 15.6%, which is more than that of the single pass method.

OCIS codes: (190.4400) Nonlinear optics, materials; (190.2620) Frequency conversion; (160.4330) Nonlinear optical materials.