

◆ 특집 ◆ 신개념 레이저 기반 초정밀/초고속 가공시스템

# 광펄스 파라미터 가변 LD 를 이용한 복합형 DPSSL 개발

## Development of a Hybrid DPSSL with a Pulse Parameter Variable LD Seed

노영철<sup>1,✉</sup>, 신우진<sup>1</sup>, 유봉안<sup>1</sup>, 이영락<sup>1</sup>, 정창수<sup>1</sup>  
Young-Chul Noh<sup>1,✉</sup>, Woojin Shin<sup>1</sup>, Bong-Ahn Yu<sup>1</sup>, Yeung Lak Lee<sup>1</sup> and Changsoo Jung<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 광주과학기술원 고등광기술연구소 (Advanced Photonics Research Institute, GIST)

✉ Corresponding author: ycnoh@gist.ac.kr, Tel: 062-715-3386

Manuscript received: 2010.8.11 / Accepted: 2010.8.27

*We report a hybrid DPSSL with a pulse parameter variable LD seed, all-fiberized polarization-maintained pulsed Yb-doped fiber preamplifier chains, and a bulk Nd:YVO<sub>4</sub> power amplifier. Pulse parameter of LD seed was controlled by direct current modulation. The hybrid DPSSL generates 1064 nm laser pulses with an average power of 40W, a pulse duration of 20-40ns, and a repetition rate of 100-500kHz.*

Key Words: Variable Pulse Parameter (펄스 파라미터 가변), DPSSL (다이오드 여기 고체 레이저), MOPA (마스터 공진기 파워 증폭기), Hybrid Laser (복합형 레이저)

### 1. 서론

레이저 가공 기술은 전자산업 등의 정밀 부품 가공을 위해 점점 더 초정밀화, 초고속화, 대면적화 가공으로 기술 발전이 이루어지고 있다. 특히, 반도체, 디스플레이, 태양전지, 차세대 고부가/고기능 PCB(Printed Circuit Board), 차세대 패키징 산업 등을 포함하는 마이크로 전자산업 분야에서는 수 마이크로 크기의 초정밀 가공이 필요하다.

이러한 마이크로 크기의 초정밀 가공을 위해서 극초단 펄스 레이저 또는 단파장의 자외선(UV) 레이저를 활용할 수 있다. 펄스폭이 짧은 극초단(펨토초) 펄스 레이저를 이용한 초미세 가공의 경우 다광자 흡수를 이용하여 재료에 크게 상관하지 않고 마이크로 크기의 가공이 가능하지만, 레이저 시스템의 광학계가 기존의 나노초 레이저에 비해서 매우 복잡한 단점을 갖는다.<sup>1,3</sup> 광학계의 복잡한 구성에 따라, 극초단 펄스 레이저는 안정성 및 사

용자 편의성, 유지보수 측면에서 산업용으로 사용하기에 부족한 면이 있다. 자외선 레이저는 파장이 짧기 때문에 초정밀 가공이 가능하고, 펨토초 레이저에 비해 광학계 구성이 간결하다. 또한, 고속화 및 대면적 가공을 위해서 요구되는 고반복률, 고출력화가 용이하다. 이와 같은 필요에 따라 고품질 고출력의 자외선 레이저가 초미세 레이저 가공기의 광원으로 사용되고 있다.<sup>4,5</sup>

고품질의 자외선 펄스 레이저는 일반적으로 Nd:YAG 나 Nd:YVO<sub>4</sub> 등을 이득 매질로 하여, 높은 출력의 적외선(1064nm) 펄스를 발생하고, 이를 비선형 파장 변환 방법(SHG, THG)으로 355nm 의 자외선 펄스로 변환하여 출력하는 방식으로 구성된다. 여기 방식으로는 기존의 flash lamp 방식에 비해 비교적 부피가 작으면서도 높은 출력 안정성과 뛰어난 광효율을 가진 LD(laser diode) 여기 방식이 주를 이루고 있다. 펄스 동작을 위해서 일반적으로 Q 스위칭 방법을 이용하고 있다.

최근에는 bulk 크리스탈(crystal)을 대체하여 광섬유 기반의 UV 레이저가 발표되고 있다. 저출력의 경우 광섬유 레이저의 출력을 UV 파장으로 변환시키고, 고출력의 경우 광섬유 레이저의 출력을 bulk 크리스탈로 고출력으로 증폭하여 파장변환을 통해 UV 출력을 내고 있다.<sup>6,7</sup> 이와 같은 광섬유와 bulk 크리스탈을 이용한 복합형 UV DPSSL(Diode Pumped Solid State Laser)은 광섬유 레이저의 장점인 뛰어난 안정성, 우수한 빔 품질, 구성의 간결함, 유지보수의 용이성 등의 특성을 활용할 수 있고, 동시에 bulk 크리스탈을 이용한 고출력이 가능한 특성을 갖는다.

복합형 DPSSL 은 전단부를 광섬유 기반의 증폭기로 구성함으로써 다양한 펄스 발생 방식을 적용할 수 있는 장점을 갖는다. 씨앗빔(seed beam) 발생기를 광섬유로 구성된 Q 스위치 공진기로 구성하거나, 연속출력의 빔을 광 변조기를 통하여 변조하거나, 또는 전류 변조를 통한 펄스 동작하는 LD 로 구성할 수 있다. 외부변조기 또는 펄스 동작 LD 를 이용할 경우에 Q 스위치 공진기 방식에 비해 출력은 낮지만, 고반복률 및 초단 펄스가 가능하고, 펄스폭, 펄스 반복률, 펄스 모양 등의 펄스 파라미터를 독립적으로 변화시킬 수 있는 장점이 있다. 이러한 펄스 파라미터의 가변은 각 레이저 가공 공정에 최적화된 맞춤형 가공기에서 요구하는 펄스 파라미터를 갖는 레이저의 공급을 가능하게 할 것이다.

본 논문에서는 맞춤형 초미세 레이저 가공기를 위하여, 펄스 파라미터 변조가 가능한 LD 씨앗빔 발생기와 광섬유 전치증폭기 및 bulk 크리스탈 증폭기로 구성된 복합형 MOPA(Master Oscillator Power Amplifier) 구조의 DPSSL 개발 결과에 대하여 기술한다.

**2. LD 를 이용한 씨앗빔 발생기**

반도체 레이저를 기반으로 하는 씨앗빔 발생기를 전류 직접변조 방식으로 구현하였다. 직접 변조방식으로 LD 를 구동할 경우 입력되는 전기신호의 특성에 따라 출력되는 레이저 펄스가 직접 영향을 받기 때문에 펄스 형성을 위한 전기신호의 생성 및 제어가 매우 중요하다. 본 연구개발에서는 전류의 차동 스위칭 방법을 이용하여 직접 변조 방식의 씨앗빔 발생기를 구성하였다. Fig. 1 은 본 과제에서 개발된 직접변조 방식의 씨앗빔 발생

기의 구성도이다. Fig. 1 에서 보는 바와 같이 펄스폭 가변을 위한 제어기와 3 개의 MOSFET 로 구성되며 상단의 2 개의 MOSFET 는 차동 스위칭을 통하여 펄스를 생성하고 하단의 MOSFET 에 의해 반도체 레이저 다이오드에 인가되는 전류의 양을 조정하게 된다. 이와 같은 차동 스위칭 방식을 통하여 펄스폭을 조절할 수 있고, 출력 및 반복률을 독립적으로 제어할 수 있었다.

개발된 씨앗빔 발생기는 최대 2A 의 펄스 전류구동이 가능하고 약 1.5 나노초에서 수마이크로미터의 펄스폭의 생성이 가능하며 최대 17MHz 까지 펄스의 반복구동이 가능하다. Fig. 2 에 개발된 씨앗빔 발생기를 사용하여 생성된 펄스의 2nsec 에서 1msec 의 펄스폭 가변 제어 특성을 나타내었다. Fig. 2 에서 보는 바와 같이 약 2nsec 에서 1msec 까지 자유로운 펄스폭의 가변이 가능하며 출력된 펄스의 폭은 출력의 세기와 상관없이 제어된다. 펄스의 전단부의 peak 는 순간적으로 전류를 가함에 따른 transient 효과로 여겨진다. 저항 및 capacitance 값의 변경을 통하여 최적화를 위한 추가적인 연구를 진행하고 있다. 출력광의 중심파장은 1064nm 이며 온도 조절을 통하여 ~1nm 정도의 조절이 가능하고, 파장 선포는 0.12nm 정도였다. 최대 200mW 이상의 점두 출력이 발생하였다.

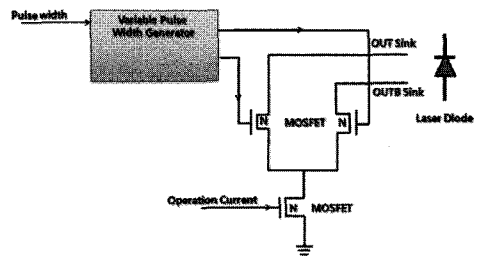


Fig. 1 Schematic diagram of seed LD

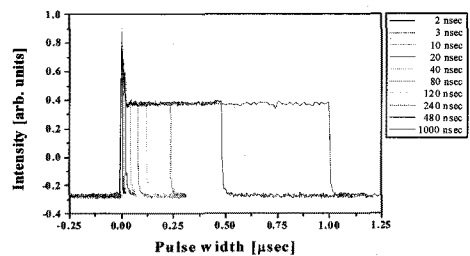


Fig. 2 Pulse width variation of seed LD

Fig. 3 은 펄스폭을 대략 3ns 로 고정시키고, 펄스 반복률을 변화에 따른 출력 특성을 나타낸 것이다. 펄스 반복률을 증가함에 따라 거의 선형적으로 평균 출력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것으로 펄스 반복률을 증가시키더라도, 각 펄스당 에너지 및 펄스의 침투 출력의 변화가 거의 없다는 것을 보여준다. 따라서 반복률, 출력, 펄스폭 등의 펄스 파라미터를 독립적으로 제어가 가능함을 나타낸다.

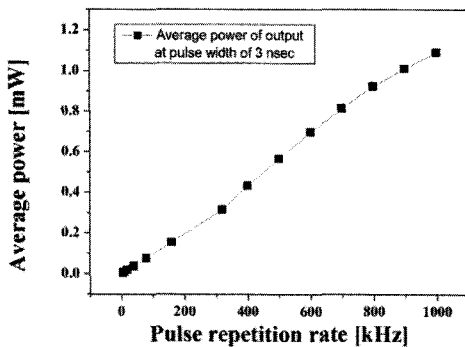


Fig. 3 Average power as a function of pulse repetition rate

### 3. 광섬유 전치 증폭기

씨앗빔 발생기로부터의 1mW 이하의 평균 출력을 bulk 크리스탈 주 증폭기를 통해 고출력으로 증폭하기 위해서는 그 사이에 전치 증폭단이 필요하다. 또한, 레이저 크리스탈에서의 높은 이득과 파장 변환 크리스탈에서의 높은 변환 효율을 위해서는 씨앗빔에서 나오는 선형 편광 특성을 유지해야 한다. 이를 위해서 모든 구성품들이 편광유지 광섬유로 연결된 광섬유 전치 증폭기를 구성하였다. Fig. 4 는 광섬유 전치 증폭기의 구성을 나타낸다. 효율적이고 우수한 광 증폭 특성을 갖는 광섬유 전치 증폭기를 구현하기 위해 수백 mW 급 단일 모드 광섬유 증폭기로 구성된 전치 증폭기 1 과 고출력 증폭을 위한 10W 급 이중 클래드 (double-clad) 광섬유로 구성된 전치 증폭기 2 를 광 고립기를 통해 연결하는 구조로 설계하였다. 광섬유 전치 증폭기의 출력단은 collimator 와 고출력 광 고립기를 결합한 구조로 bulk 크리스탈에 공간적으로 입사하게 된다. 전치 증폭기 1 은 ASE 를 제거하고, 증폭효율을 높이기 위하여 2 단의 단일 모드 광섬유 증폭기를 연결하여 구성하였다. 첫

번째 단에 사용된 단일 모드 Yb-doped 광섬유는 코어/클래드 지름 6/125 $\mu$ m, 코어 NA 0.11, 코어 흡수율 250dB/m@975nm 를 갖는 편광유지 광섬유이다. 두 번째 단에 사용된 Yb-doped 광섬유는 이중 클래드 구조의 단일 모드 광섬유로 코어/클래드 지름 10/125 $\mu$ m, 코어/클래드 NA 0.08/0.46, 최대 클래드 펌프 흡수율 6.9dB/m@976nm 특성을 갖는다. 전치증폭기 2 의 광섬유는 이중 클래드 구조이고, 코어/클래드 지름 25/250 $\mu$ m, 코어/클래드 NA 0.07/0.46, 최대 클래드 펌프 흡수율 11.2dB/m@976nm 특성을 갖는 LMA(Large-Mode Area) 광섬유이다. 전치증폭기 1 의 첫번째 단일모드 증폭단은 975nm 파장의 단일모드 pigtailed LD 를 이용하여 코어 펌프 방법을 이용하였고, 단일모드 DCF 와 LMA-DCF 는 다중모드 pigtailed LD 를 이용하여 클래드 펌프 방법을 이용하였다. 표 1 에 광섬유 전치증폭기의 구성품을 나타내었다.

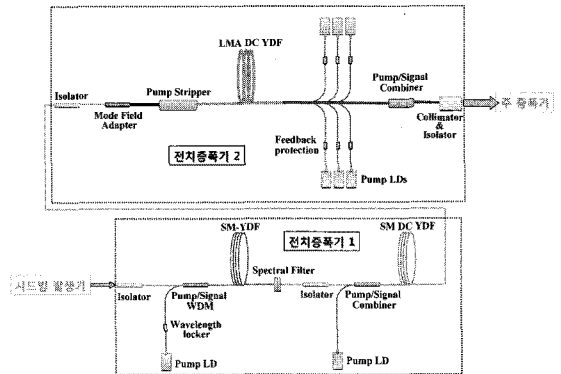


Fig. 4 Schematic diagram of optical fiber preamplifier

Table 1 Components of optical fiber preamplifiers

Amplifier	Active fiber	Pumping source
Preamplifier 1	Single Mode 6/125 $\mu$ m	Single Mode 975nm
	Single Mode DCF 10/125 $\mu$ m	Multimode 975nm
Preamplifier 2	LMA-DCF 25/250 $\mu$ m	Multimode 975nm

Fig. 5 는 광섬유 전치 증폭기의 최종 출력 특성을 나타낸다. 씨앗빔 발생기로부터 평균 출력 300 $\mu$ W, 20ns, 100kHz 펄스열이 입사할 때, 전치 증

폭기 1 으로부터 360mW 로 증폭되고, 이를 다시 증치증폭기 2 에서 증폭한 것이다. 최대 20W 정도의 펄스 평균 출력을 얻을 수 있었다. 펌프광의 크기에 대하여 선형적으로 증가하지 않는 것은 펌프 LD 의 파장 이동에 따른 것이다. 펌프 LD 를 저출력으로 작동할 경우에는 Yb-doped 광섬유의 흡수 중심 파장인 975nm 보다 짧은 파장에서 작동하여 흡수 효율이 떨어지는데 비하여, 고출력으로 작동할 시에는 흡수 중심파장과 펌프 LD 의 파장이 일치하게 되어 흡수효율이 증가하게 된다. 이에 따라, 펌프의 세기가 커짐에 따라 출력 효율이 증가하는 것을 볼 수 있다.

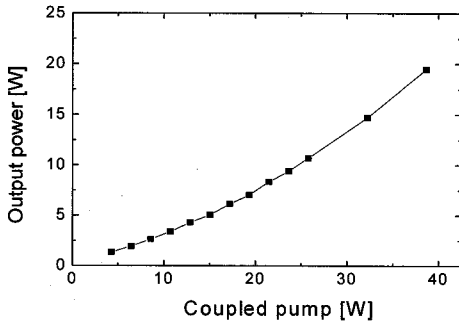
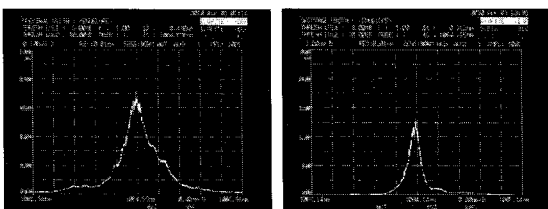


Fig. 5 Output power of fiber preamplifier as varying coupled pump power

Fig. 6 은 펄스폭이 40ns 로 동일하고 펄스 반복률이 100kHz 와 500kHz 로 다르게 생성된 펄스열들이 광섬유 전치 증폭기를 통해 평균 출력 15W 정도로 각각 증폭되었을 때의 광 스펙트럼을 나타낸다. 100kHz 반복률에서 파장 선포이 0.43nm, 500kHz 에서는 0.11nm 정도였다. 100kHz 펄스열이 500kHz 펄스열과 똑같은 평균 출력을 가지기 위해서 높은 침투 출력을 가지게 되는데, 이로 인해 광섬유 내에서 비선형 현상에 의해 스펙트럼이 넓어지는 것을 확인할 수 있다.



(a) 100 kHz PPR (b) 500 kHz PPR

Fig. 6 Output spectrum of fiber preamplifier at 40 ns pulse width

Fig. 7 은 씨앗빔 발생기로부터 40ns, 500kHz 펄스가 들어올 때, 광섬유 전치 증폭기의 출력단에서 나오는 빔의 프로파일이다. 상단 왼쪽부터 시계방향으로 CCD 이미지와 이의 3 차원 분포, y 축 및 x 축 방향에 대한 Gaussian 함수 fitting 을 나타낸다. 거의 Gaussian 분포에 근접한 단일 모드임을 보여주고 있다. 즉, 씨앗빔 발생기로부터 나오는 단일 모드 빔이 광섬유 전치 증폭기를 통해 증폭되는 과정에서 모드 특성이 유지됨을 알 수 있다.

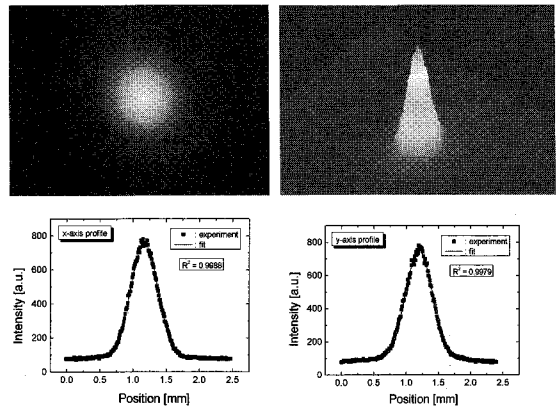


Fig. 7 Output beam profile of fiber preamplifier

#### 4. 크리스털 주증폭기

광섬유 전치증폭기에서 발진한 평균 출력 15W 의 레이저 광을 증폭시키기 위해, 레이저 발진 단면적(emission cross section)이 큰 장점을 가진 Nd:YVO<sub>4</sub> 크리스털을 이득 매질로 사용한 크리스털 증폭기를 구성하였다(Fig. 8). 펌핑 방법은 고품질의 증폭된 레이저 빔을 얻기 위하여 종방향 여기(end-pumping) 방법을 선택하였고, 이때 양방향 펌프를 이용하여 Nd:YVO<sub>4</sub> 크리스털의 전체 길이에서 비교적 균일하게 증폭된 레이저 빔을 획득하도록 구성하였다. 펌프 LD 는 최대 출력 100W 인 다중모드 광섬유 pigtailed 구조이고, 중심파장은 808nm 이다. 펌프광의 안정적 구동을 위해 수냉식 구조의 아래판과 열전소자로 구성된 윗판이 결합된 복합형 온도 제어부를 설계 제작하였고, 이를 통하여 펌프 LD 의 냉각 및 온도 제어를 수행하였다. 실험에 사용된 이득 매질은 약 0.3 atm%의 Nd 가 첨가되어 있는 길이 17mm 의 Nd:YVO<sub>4</sub> 크리스털이었다. 일반적으로 강한 808nm 의 펌프광이 Nd:YVO<sub>4</sub> 크리스털에 입사되면, 이득매질의 온도가 변화하게 된다. 이로 인하여

크리스털의 중심 증폭 파장 및 이득율에도 변화가 발생한다. 이러한 문제를 최소화하기 위해 Nd:YVO<sub>4</sub> 크리스털을 indium foil 을 이용하여 감싼 다음, 수냉식 냉각 마운트에 장착시켰다. 냉각수 온도는 12℃ 를 유지하였고, 크리스털 표면 온도는 펌프광의 세기에 따라 변화를 보였다. 1064nm 신호광을 입사시켜 증폭할 경우에는 크리스털의 표면 온도가 약 23℃ 이하로 유지되었다.

광섬유 전치 증폭기에서 발생한 1064nm 파장의 출력빔과 808nm 의 펌프 LD 빔을 이색거울 및 렌즈 광학계를 통하여 Nd:YVO<sub>4</sub> 크리스털에 집속시켜 공간적 진행 경로를 중첩시켰다. 이때 1064nm 빔의 편광 방향은 광섬유 레이저 앞단에 설치된 λ/2 판을 이용하여 크리스털의 결정축과 일치시켰다. 1064nm 빔과 808nm 빔의 공간적 중첩도를 조절하기 위해 각각의 레이저 출사부에 렌즈 광학계를 구성하였다. 초점에서의 FWHM(Full Width at Half Maximum)은 약 480μm 였고, 약 10mm 정도의 이동 범위에서는 값에 큰 변화가 없었다. 입사되는 1064nm 신호빔은 초점에서 열렌즈 효과에 의한 빔 품질저하를 방지하기 위하여 펌프빔의 크기보다 작게 하여 입사하였다. 레이저 매질에서 신호광의 빔 크기는 약 300μm 로 조절하였다.

1064nm 입사광의 세기를 15W 로 고정시키고, 808nm 펌프 LD 의 출력을 증가시키면서 측정한 최종 출력을 Fig. 9 에 나타내었다. 40ns 펄스폭, 100kHz 반복률로 작동할 때, 90W 펌프광 세기에서 약 41W 의 광출력을 얻을 수 있었다. 펌프광의 세기에 따른 출력의 변동성은 크리스털의 온도가 최적화되지 않아서 생겨난 결과이다. 기율기 효율은 대략 29% 정도였다. 500kHz 로 구동 시에는 출력이 소폭 증가하여 90W 펌프광 세기에서 44W 정도의 출력이 가능하였다.

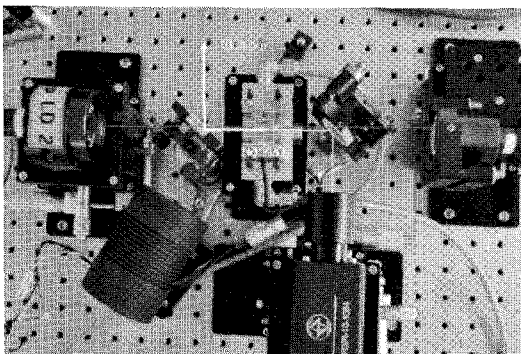


Fig. 8 Photograph of the bulk crystal amplifier

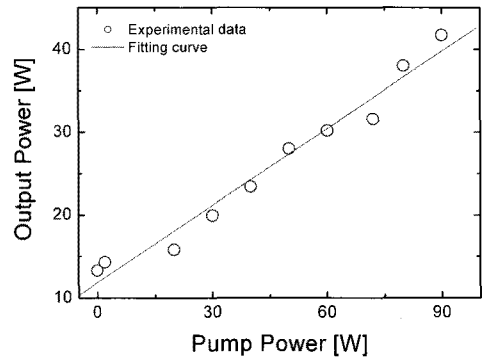


Fig. 9 Output power of bulk crystal amplifier as varying pump power

이때의 출력광 스펙트럼을 OSA(optical spectrum analyzer)로 측정한 그래프를 Fig. 10 에 나타내었다. 중심파장은 대략 1064.6nm 였고, 파장 선폭은 약 0.2nm 정도였다. 이때의 펄스폭은 대략 34ns 정도였다. 펄스폭이 씨앗빔보다 소폭 줄어든 것은 이득고갈(gain depletion)에 의한 것으로 여겨진다. Fig. 11 에 photodiode 와 오실로스코프를 이용하여 측정한 최종 출력단의 펄스 모양을 나타내었다.

최종 출력광의 빔 프로파일을 CCD 로 측정하여 3D 맵핑한 결과를 Fig. 12 에 나타내었다. 그림에서와 같이 단일 모드에 가까운 빔특성을 보인다. 빔 품질을 수치적으로 확인하기 위하여 M<sup>2</sup> 값을 측정하였다. 수평 방향의 측정 그래프를 Fig. 13 에 나타내었다. 그래프로부터 계산된 M<sup>2</sup> 값은 대략 1.66 정도였다. 광섬유로부터의 신호 입사광과 펌프광의 중첩을 최적화하고, 크리스털 냉각을 최적화하면 출력광의 M<sup>2</sup> 값은 단일모드에 가깝게 개선될 것으로 여겨진다.

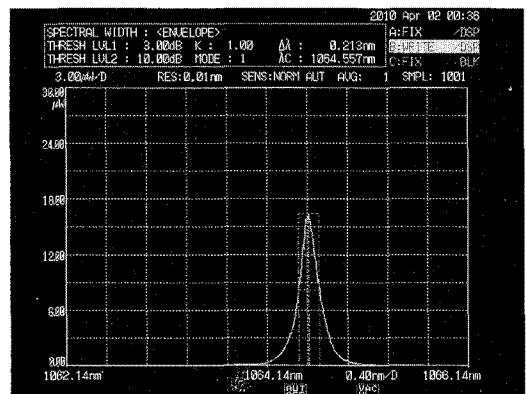


Fig. 10 Output spectrum of bulk crystal amplifier

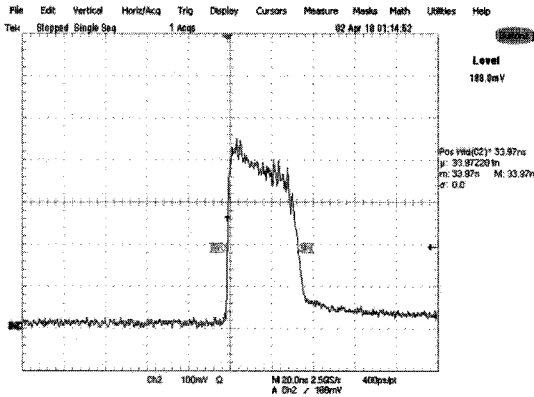


Fig. 11 Pulse shape of bulk crystal amplifier

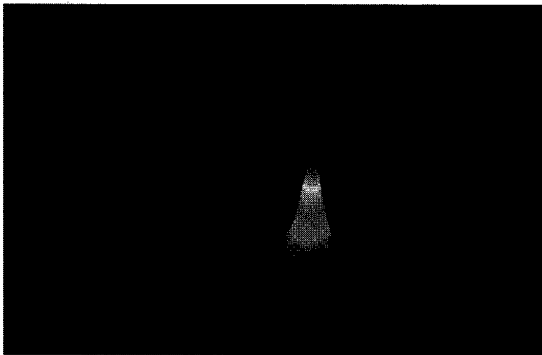


Fig. 12 Output beam profile of bulk crystal amplifier

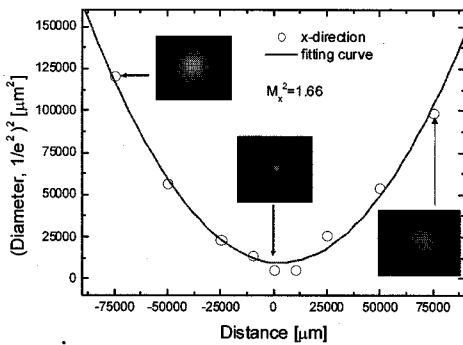


Fig. 13 Output beam diameter square and  $M^2$  fitting curve

### 5. 결론

LD 씨앗빔 발생기와 광섬유 전치증폭단 및 bulk 크리스탈 주증폭기로 구성된 복합형 MOPA 형식의 DPSSL 을 개발하였다. 씨앗빔 발생기는 LD 에 가해지는 전류를 직접 변조하는 방식으로 펄스 폭, 펄스 반복률 등의 광펄스 파라미터를 독립적

으로 변조할 수 있었다. 광섬유 전치증폭기의 출력은 최대 20W 정도까지 가능하였다. 최종 출력광의 파장은 대략 1064nm 이고, 반복률은 100-500kHz 가변이 가능하고, 펄스폭은 20-40ns 로 작동하였다. 최대 출력은 40W 이상까지 가능하였다. 개발된 복합형 DPSSL 을 UV 파장변환을 통하여 초정밀/초고속 가공시스템에 활용할 예정이다. 펄스 파라미터 가변을 통하여 각각의 가공공정에 필요한 광펄스 파라미터를 최적화 함으로써, 다양한 맞춤형 가공시스템에 적용이 기대된다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 (과제번호 : 10033786)의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Pronko, P. P., Dutta, S. K., Squier, J., Rudd, J. V., Du, D. and Mourou, G., "Machining of sub-micron holes using a femtosecond laser at 800 nm," *Opt. Comm.*, Vol. 114, No. 1, pp. 106-110, 1995.
2. Korté, F., Serbin, J., Koch, J., Egbert, A., Fallnich, C., Ostendorf, A. and Chichkov, B. N., "Towards nanostructuring with femtosecond laser pulses," *Appl. Phys. A*, Vol. 77, No. 2, pp. 229-235, 2003.
3. Sohn, I.-B., Ko, M.-J., Kim, Y. S. and Noh, Y.-C., "Femtosecond laser lithography for maskless PR patterning," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 26, No. 6, pp. 36-41, 2009.
4. Bae, H. S., Park, H. C., Ryu, K. H. and Nam, G. J., "Study on high speed laser cutting of rigid flexible printed circuit board by using UV laser with nanosecond pulse width," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 20-24, 2010.
5. Lee, Y.-H. and Choi, K.-J., "Analysis of silicon via hole drilling for wafer level chip stacking by UV Laser," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 11, No. 4, pp. 501-507, 2010.
6. Urata, Y., Shinozaki, T., Wada, Y., Kaneda, Y., Wada, S. and Imai, S., "Deep UV light generation by a fiber/bulk hybrid amplifier at 199 nm," *Appl. Opt.*, Vol. 48, No. 9, pp. 1668-1674, 2009.

7. Starodoumov, A. N., Dudley, D., McLean, S., Steinmetz, A. and Hodgson, N., "Hybrid fiber MOPA-bulk amplifier system for frequency conversion," Proc. of SPIE, Vol. 6871, pp. 68710V-1-68710V-8, 2008.