

## 시중경로 Ti:sapphire 레이저 증폭기의 증폭 특성과 자발방출에 의한 증폭

김규욱<sup>†</sup> · 추한태

금오공과대학교 자연과학부  
(730-701) 경북 구미시 신평동 188번지

(2000년 8월 10일 받음, 2000년 9월 18일 수정본 받음)

편광특성을 이용하여 일직선 위에서 네 번 통과하는 Ti:sapphire 레이저 증폭기를 구성하였다. 증폭기를 펌핑하는 Q-스위칭된 Nd:YAG 레이저의 제2차 고조파 에너지가 188 mJ일 때 450 mW의 연속 발진 Ti:sapphire 레이저가 34 mJ의 에너지, 25 ns의 반치폭을 갖는 펄스로 증폭되었다. 한편 Ti:sapphire 결정의 방향을 조절하는 간단한 방법으로 자발방출에 의한 증폭을 최소화할 수 있었다.

OCIS codes : 140.3460, 140.5560, 140.3280, 140.3590, 140.6630.

### I. 첫머리에

Ti:sapphire 레이저는 1983년 P. Moulton이<sup>[1]</sup> 처음으로 발진에 성공한 고체 레이저로 가시광선 영역에서 근적외선 영역(600~1100 nm)에 이르기까지 넓은 파장가변 특성을 가지고 있다. 이에 따른 극초단 펄스 발생 특성이 뛰어나고, 기존의 색소 레이저보다 출력 안정성이 우수하다.<sup>[2,3]</sup> 따라서 여러 분야에 널리 사용되어 오던 색소 레이저를 대체할 수 있을 것으로 기대를 모아오고 있으며, 현실로 나타나고 있다. Ti:sapphire 레이저의 연구 개발 초기에는 파장가변에 초점을 맞추어 연속 발진하는 레이저 연구에 주력하였으나, 1990년 이후에는 모드록킹을 이용한 극초단 펄스 발생에 대한 연구<sup>[4-6]</sup>와 이를 증폭하여 소규모의 극초단 고출력 레이저 시스템(수 TW) 개발에 대한 연구<sup>[7,8]</sup>가 주류를 이루고 있다. 80년대 후반부터 현재까지 미국의 AT & T Bell 연구소,<sup>[9]</sup> Washington 대학,<sup>[10]</sup> 영국의 Rutherford Appleton 연구소<sup>[11]</sup> 및 일본의 NTT 연구소<sup>[12]</sup> 등과 같은 선진국의 연구소와 여러 대학에서 활발하게 연구가 진행되고 있다. 특히 최근에는 약 수십 fs에 이르는 극초단 펄스 발생<sup>[13]</sup>과 이를 이용한 초고분해 분광학, 초정밀 계측, 반도체 등의 첨단 소재의 특성 분석 등과 같은 분야에서 Ti:sapphire 레이저가 사용되고 있다.

Ti:sapphire 레이저를 이용하기 위해서 경우에 따라서는 출력을 높여야 하고 이를 위하여 증폭 시스템을 구성하여야 한다. 이때 많이 사용하고 있는 방법 중의 하나는 CPA(chirped pulse amplification)이다. 이것은 Ti:sapphire 레이저를 자체 모드록킹이나 음향광학 모드록킹시키고 이때 발생하는 레이저 펄스 폭을 늘리고, 재생 증폭기를 이용하여 증폭한 후 이를 다시 다중 통과 증폭기로 증폭한 후 최종적으로 얻어진 레이저 펄

스의 펄스 폭을 줄이는 것이다.

모드록킹된 Ti:sapphire 레이저 펄스의 출력은 일반적으로 레이저 펄스가 증폭기 안을 여러번 통과하면서 증폭되도록 하는 다중 통과 증폭기를 이용하여 높이고 있다. 다중 통과 증폭기에는 크게 시간 다중화(time multiplexing) 형<sup>[7,14]</sup>과 각 다중화(angle multiplexing) 형<sup>[10,15]</sup>의 두 종류가 있다. 시간 다중화 형은 소위 재생 증폭기(regenerative amplifier)로, 이것은 증폭기 매질의 이득이 낮은 경우라도 레이저 펄스가 증폭기 매질을 수십 번 왕복하면서 증폭되므로 높은 증폭 이득을 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 증폭된 레이저 펄스를 증폭기 밖으로 뽑아내기 위해서는 복잡하고 값비싼 전기적 광학적 장치가 필요한 단점을 가지고 있다. 다중 증폭기의 또 다른 형태인 각 다중화 형은 재생 증폭기의 단점을 보완한 것으로, 증폭기 매질의 이득이 비교적 높은 경우에 사용한다. 이것은 레이저 빔이 증폭기 내를 X-자로 왕복하도록 되어 있다. 따라서 증폭기에 입사하는 레이저 빔의 직경을 증폭기 매질의 직경보다 작게 하여야 하기 때문에 펌핑된 증폭기 매질 전체를 효과적으로 활용하지 못하는 단점이 있을 뿐 아니라 광 정렬이 쉽지 않다.

위에서 언급한 다중 통과 증폭기의 일반적인 단점을 보완하기 위하여 최근 한국과학기술원<sup>[16]</sup>과 한국표준과학연구원<sup>[17,18]</sup>에서 레이저 빔의 편광을 이용하여 레이저 빔을 증폭기를 4번 왕복시키면서 증폭하는 방법을 연구하였다. 즉, 레이저 빔의 편광 상태가 두 가지, 진행 방향이 두 가지인 점을 고려하면 증폭기 내에서 가질 수 있는 상태가 4가지인 것에 착안하여, 레이저 빔이 증폭기 매질을 일직선 위에서 4번 왕복하도록 증폭기를 구성하였다. 한국과학기술원에서는 Nd:YLF 레이저 빔을 시중경로 Nd:glass 증폭기로 증폭하여  $2.5 \times 10^5$  정도의 이득을 얻었으며, 한국표준과학연구원에서는 연속 발진하는 색소 레이저를 증폭하여  $2 \times 10^6$  정도의 이득을 얻었다.

본 연구에서는 연속 발진 레이저를 펄스로 증폭하기 위하여 Ti:sapphire 레이저 빔이 증폭기를 일직선 위에서 네 번 통과

본 연구는 1997년 한국학술진흥재단 학술연구조성비에 의하여 지원되었음.

<sup>†</sup>E-mail: gukim@knu.ac.kr

하면서 효과적으로 증폭되도록 하는 Ti:sapphire 증폭기를 구성하였다. 레이저 증폭기를 효율적으로 동작시킬 때 고려하여야 할 것 중의 하나가 자발방출에 의한 증폭(ASE; amplified spontaneous emission)이다. 본 논문에서는 사중 경로 증폭기에서 연속 발진 Ti:sapphire 레이저의 증폭 특성과 자발방출에 의한 증폭과 이의 최소화 방법 등에 대하여 기술한다.

## II. 사중경로 Ti:sapphire 레이저 증폭기의 구성

그림 1은 편광 특성을 이용하여 증폭기 매질을 일직선 위에서 4번 왕복하도록 구성한 사중경로 Ti:sapphire 레이저 증폭기이다. 이것의 구조와 동작원리는 한국표준과학연구원에서 발표한 논문에서<sup>[17-19]</sup> 설명하였기 때문에 여기에서는 간단히 언급하고자 한다.

Z-자형 Ti:sapphire 레이저는 본교에서 제작한 것으로 6 W의 Ar<sup>+</sup> 레이저(Coherent Innova 90)로 펌핑하고 출력은 최대 1 W 이고, 수평으로 편광되어 있다.<sup>[20]</sup> Ti:sapphire 레이저 빔은 시준기(collimator)를 통과한 다음 사중경로 증폭기에 들어간다. 그림 1에서 P1(CVI, MGLA-SW-8-HEAR), P2, P3(CVI, MGLA-DW-8-HEAR)는 편광 프리즘으로 수평으로 편광된 빔은 통과하고, 수직으로 편광된 빔은 반사시킨다. FR은 페러데이 돌개(Faraday rotator, Optics for Research, IO-5-NIR-I)이고, PR1(CVI, RT-10-800-135)과 PR2(CVI, RT-10-800-90)는 편광 돌개(polarization rotator)이다.

수평으로 편광된 Ti:sapphire 레이저 빔은 그림 1에서 오른쪽으로 진행하면서 P1을 그대로 통과하고, FR을 지나면서 편광이 45도 돌아간다. PR1을 지나면서 편광이 135도 더 돌아가서 이것을 지난 다음 Ti:sapphire 레이저 빔의 편광은 다시 수평이 된다. 이것이 P2를 지난 후 증폭기용 Ti:sapphire 결정에 들어가고, 결정은 회전시킬 수 있도록 하였다. Ti:sapphire 결정을 통과한 후의 레이저 빔은 P3을 통과하여 PR2를 왼쪽으로 지나면서 편광이 90도 돌아가고, 수직편광으로 바뀐다. 이것이 P2에 들어가면 증폭기 결정 방향으로 반사하게 된다. 반사되는 빔을 처음 수평편광인 빔이 P2를 지나는 경로와 일직선으로 일치하도록 거울 M3, M4, M5 등을 이용하여 정렬한다. 이때 레이저 빔은 증폭기 결정을 두 번 통과한 후 P3에서 거울 M6 방향으로 반사된다. 거울 M6를 이용하여 다시

P3 방향으로 반사시키면 P3에서 다시 증폭기 결정 방향으로 반사되고, 증폭기 결정을 세 번 통과한다. 이때 레이저 빔은 수직편광 상태이므로 P2에서 다시 반사해서 거울 M5로 향하고, PR2를 오른쪽으로 지나면서 수평편광으로 바뀐다. 그 결과 P3을 통과하여 증폭기 결정을 네 번 지나면서 P2를 왼쪽으로 통과하고 처음 입사한 방향으로 되돌아간다. 이것이 PR1을 지나게 되는데 처음 PR1을 오른쪽으로 통과할 때 편광이 135도 돌아간 것과 반대 방향으로 135도 되돌아간다. 그리고 FR을 왼쪽으로 지나면서 처음 FR을 오른쪽으로 통과한 것과 같은 방향으로 45도 더 들어가 수직편광으로 바뀌게 되고, 이 빔은 P1에서 그림 1에 표시한 것(amplified signal)과 같은 방향으로 반사된다. 위에서 설명한 것과 같이 그림 1과 같은 증폭기를 구성하면 일직선 위에서 증폭기 매질을 네 번 지나가도록 할 수 있어서 증폭기 매질을 효율적으로 활용할 수 있다.

그림 1에서 Ti:sapphire 증폭기 결정은 지름이 3 mm, 길이가 20 mm, FOM이 150 이상이고, 양쪽 면은 평면으로 되어 있으며, 650~950 nm의 파장 범위에 대하여 무반사 코팅을 하였다. Ti:sapphire 결정의 펌핑은 10 Hz로 동작하는 Q-스위칭된 Nd:YAG 레이저(Quantronix Brilliant B)의 제2차 고조파인 532 nm로 하였다. 532 nm 펄스의 반치폭은 5 ns이고, 펄스당 최대 출력 에너지는 400 mJ이다. 532 nm 빔을 초점거리가 각각 100 mm인 구형의 평면오목(spherical planoconvex) 렌즈와 원통형 평면오목(cylindrical planoconvex) 렌즈를 결합해서 선 모양으로 집속하여 Ti:sapphire 결정을 횡펌핑(transverse pumping)하였다. 그리고 Ti:sapphire 레이저 결정은 360도 회전시킬 수 있도록 하였으며, 효율적인 펌핑과 펌핑 레이저가 집속될 때 Ti:sapphire 결정의 모서리나 표면이 입는 손상을 피하기 위하여 Bethune 셀<sup>[21]</sup> 안에 넣었다. Bethune 셀은 본 연구에서 직접 제작한 것으로 용융 석영(fused silica)으로 되어 있으며 안쪽 구멍의 지름은 3.1 mm이고, 모든 면은 532 nm에 대하여 무반사 코팅하지 않았다. Ti:sapphire 결정을 10 Hz로 계속 펌핑하면 열렌즈 효과 등에 의하여 펌핑(혹은 증폭) 효율이 떨어지는데 이를 줄이기 위하여 Bethune 셀 주변에 PC용 냉각 날개를 설치하였다. 그림 1과 같이 구성한 증폭기에서 M6-P3-P2 사이의 각, P3-P2-M5 사이의 각은 약 69도 정도이었다.

## III. 연속 발진 Ti:sapphire 레이저의 증폭 특성과 자발방출에 의한 증폭 특성

그림 2(a)는 Ti:sapphire 발진기에서 나오는 수평 편광인 레이저 빔을 다른 광학 부품을 통과시키지 않고 증폭기용 Ti:sapphire 결정에 입사시킬 때 결정의 방향을 돌리면서 측정할 출력이다. 여기에서 Ti:sapphire 결정의 각도는 본 연구에서 제작한 결정 지지대에 표시되어 있는 임의의 값으로 상대적인 것이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 증폭기용 Ti:sapphire 결정을 그대로 통과하는 레이저 출력은 결정의 방향에 거의 영향을 받지 않는다. 그러나 그림 1과 같이 구성한 사중 경로 증폭기에서 P3까지 통과한 Ti:sapphire 레이저 빔의 출력을

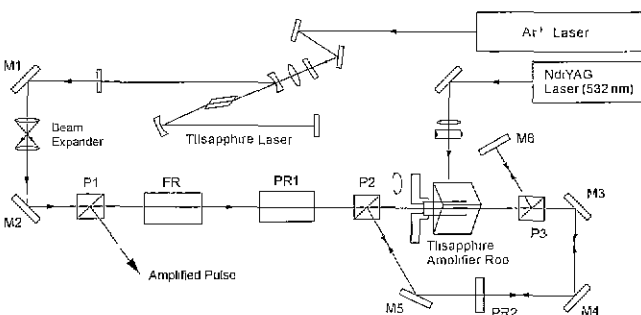


그림 1. 편광 특성을 이용한 사중 경로 Ti:sapphire 레이저 증폭기 구성도. M1-M6: 거울, P1-P3: 편광 프리즘, PR1-PR2: 편광 돌개, FR: Faraday 돌개.

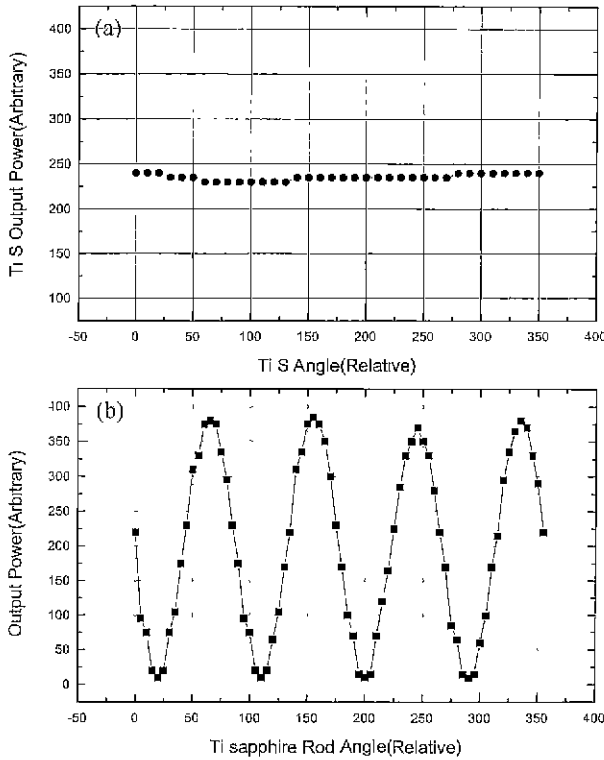


그림 2. 증폭기용 Ti:sapphire 결정의 방향에 따른 Ti:sapphire 레이저 빔의 출력 변화. (a) 발진기에서 나온 레이저를 증폭기 결정에 바로 입사시켜 측정된 결과, (b) 그림 1의 P3 뒤에서 측정된 결과.

Ti:sapphire 결정을 돌리면서 측정하면 다른 현상을 보인다.

그림 2(b)는 Ti:sapphire 결정을 그림 1과 같이 P2와 P3 사이에 설치한 다음 결정의 방향을 돌리면서 그림 1의 거울 M6 앞에서 Ti:sapphire 레이저 출력을 측정된 결과이다. 그림 2(b)를 보면 Ti:sapphire 결정이 20도 근처에서 Ti:sapphire 결정을 통과하는 레이저 출력이 가장 낮고, 65도 근처에서 가장 높게 나타나며, 약 90도의 주기를 갖는 것을 볼 수 있다. 또한 P3을 통과한 후 거울 M3 앞에서 레이저 출력을 측정하면 20도 근처에서 가장 높고 이 역시 약 90도의 주기를 갖는 것으로 나타났다. 이러한 사실은 수평 편광된 Ti:sapphire 레이저 빔이 증폭기 결정을 통과한 후의 편광은 20도 근처에서 수평 성분을, 65도 근처에서 수직 성분을 많이 가지고 있다는 것을 의미한다.

사중 경로 증폭기를 구성한 후 증폭기 매질을 532 nm로 펌핑하면서 수평으로 편광된 연속 발진 Ti:sapphire 레이저 빔을 증폭기에 입사시켜 증폭기 매질을 한 번 통과할 때의 증폭 특성을 조사하였다. 이를 위하여 그림 2(b)의 결과를 바탕으로 증폭기용 Ti:sapphire 결정을 20도로 하여 수평으로 편광된 레이저 빔이 프리즘 P3을 잘 통과하도록 하였고, 에너지를 측정할 수 있는 열전 감지기(pyroelectric detector, Scientech P-05, 2.91 V/mJ)를 거울 M3 앞에 두었다. 이 경우 펌핑 에너지를 증가시켜도 증폭된 출력 에너지가 작아서 측정하지 못하였고, 연속 발진 레이저가 그대로 출력되었다.

연속 발진 Ti:sapphire 레이저 빔이 증폭기 매질을 두 번

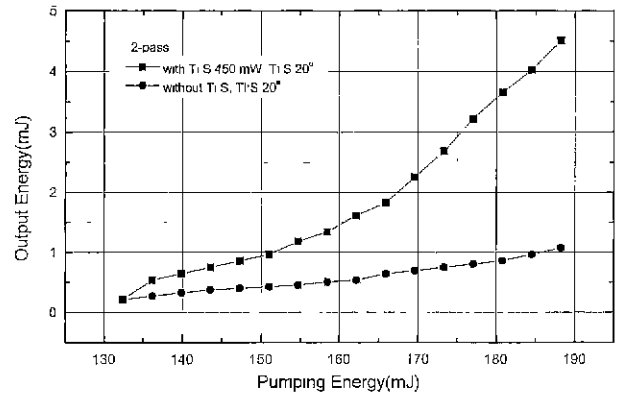


그림 3. 사중 경로 증폭기에서 Ti:sapphire 결정을 두 번 통과한 후의 출력 에너지. 450 mW의 연속 발진 Ti:sapphire 레이저가 입사한 경우(■)와 입사하지 않은 경우(●).

통과하도록 한 후의 출력 에너지를 측정하였다. 이를 위하여 Ti:sapphire 결정을 20도로 하였고, 열전 감지기를 그림 1의 거울 M6 앞에 두었다. 그림 3은 그 결과로 450 mW의 연속 발진 Ti:sapphire 레이저 빔을 증폭기 매질에 입사시킨 경우(■)와 입사시키지 않은 경우(●)의 출력 에너지를 나타낸 것이다. 그림 3에 표시한 펌핑 에너지는 Bethune 셀 바로 앞에서의 532 nm 에너지로 이것이 Bethune 셀을 통과하여 Ti:sapphire 결정을 펌핑하는데 쓰이는 실제 에너지는 측정할 수 없었다. Ti:sapphire 레이저가 증폭기 매질에 입사하지 않았을 경우에도 펌핑 에너지가 증가하면 증폭기 자체에서 나오는 출력 에너지를 측정할 수 있고, 펌핑 에너지가 약 188 mJ일 경우 펄스 한 개의 에너지는 약 1 mJ 정도이었다. 이것은 증폭기에서 발생하는 자발 방출 중 오른쪽으로 진행하는 것들이 증폭기 매질을 두 번 지나면서 증폭되기 때문이다.

그림 3을 보면 연속 발진 Ti:sapphire 레이저 빔이 증폭기 매질에 입사한 경우 펌핑 에너지가 증가할수록 증폭된 에너지는 급격하게 증가하고 증폭이 크게 일어나고 있음을 알 수 있다. 펌핑 에너지가 188 mJ일 때 증폭된 Ti:sapphire 레이저의 펄스 한 개의 에너지는 4.5 mJ 정도이었다. 그리고, Ti:sapphire

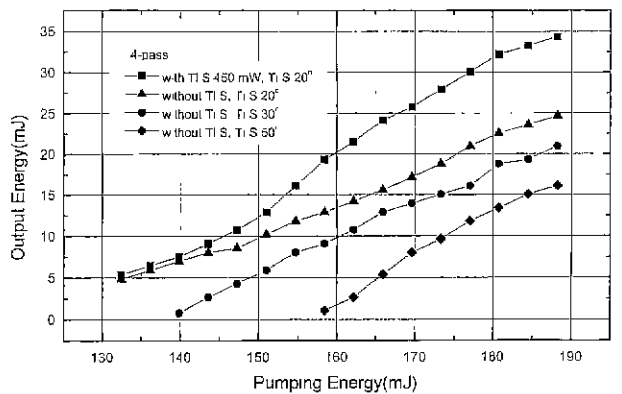


그림 4. 사중 경로 증폭기에서 Ti:sapphire 결정을 네 번 통과한 후의 출력 에너지. 450 mW의 연속 발진 Ti:sapphire 레이저가 입사한 경우(■)와 입사하지 않을 때 Ti:sapphire 결정이 50도(◆), 30도(●), 20도(▲)인 경우.

결정의 각도를 25도 이상으로 할 때 자발방출에 의한 출력 에너지는 측정할 수 없었다.

그림 4는 Ti:sapphire 레이저 빔이 증폭기 매질을 네 번 통과한 후의 출력 에너지를 측정한 결과이다. 이때 열전 감지기를 그림 1에 표시한 것(amplified signal)과 같은 방향으로 반사된 빔을 측정할 수 있도록 두었다. 450 mW의 연속 발진 Ti:sapphire 레이저 빔을 증폭기 매질에 입사시킨 경우(■)에는 증폭기 결정을 20도로 하여 Ti:sapphire 레이저 빔이 증폭기 매질을 네 번 통과하도록 하였다. 이때 출력 에너지는 펄핑 에너지가 증가함에 따라 급격히 증가하고, 펄핑 에너지가 188 mJ일 때 펄스 하나 당 약 34 mJ의 에너지를 얻을 수 있었다. 이 결과와 Ti:sapphire 레이저 빔이 증폭기 매질을 두 번 지난 후의 출력 에너지가 4.5 mJ인 것을 비교하면, 출력 에너지는 증폭기를 네 번 지나면서 지수 함수적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 증폭기가 효율적으로 동작하고 있음을 의미한다.

연속 발진 Ti:sapphire 레이저 빔을 증폭기에 입사시키지 않은 경우 결정의 각도를 20도(▲), 30도(●) 50도(◆)로 변화시키면서 자발방출에 의하여 증폭된 출력 에너지를 조사하였다. 결정의 각도가 커질수록 같은 펄핑 에너지에 대해서도 출력 에너지는 작아진다. 또한 출력 에너지를 측정할 수 있는 펄핑 에너지의 문턱 값도 결정의 각도가 커짐에 따라 높아지는 것을 볼 수 있으며, 55~75도 범위에서는 출력 에너지를 측정할 수 없었다.

이러한 결과를 다음과 같이 이해할 수 있다. Ti:sapphire 결정을 펄핑하면 자발방출이 일어나고 이것은 특정한 방향으로 편광되어 있지 않으며, 결정의 오른쪽과 왼쪽의 모든 방향으로 진행해 나가면서 증폭된다. Ti:sapphire 결정을 20도로 하고 열전 감지기를 그림 1에 표시한 부분(amplified pulse)에 둔 경우 결정의 오른쪽 끝에서 발생하는 자발방출이 오른쪽으로 진행하여 증폭되는 것은 없다. 그리고 왼쪽 방향으로 진행하는 것은 결정을 수평 편광 성분이 한 번만 통과하면서 증폭되는 것을 측정할 수 있지만 실험적으로는 에너지를 측정할 수 없었다. 한편 결정의 왼쪽 끝에서 발생하는 자발방출 중 왼쪽으로 진행하여 증폭되는 것은 없다. 그리고 오른쪽으로 진행하는 것 중 결정이 수평 편광된 것을 잘 통과시키므로 수직 편광 성분의 에너지는 측정할 수 없다. 따라서 결정의 왼쪽 끝에서 발생하는 자발방출 중 수평 편광 성분이 Ti:sapphire 결정을 네 번 통과하면서 크게 증폭될 수 있다. 그림 2(b)의 결과에 의하면 결정의 각도가 20도 일 때 그림 1의 M6 앞에서 수직 편광된 Ti:sapphire 레이저 빔의 출력이 가장 작고, 결정의 각도가 커짐에 따라 점점 커진다. 즉 결정의 각도가 커질수록 P3을 통과하는 수평 편광 성분의 출력이 작아진다. 이때 Ti:sapphire 결정의 각도가 커질수록 P3을 통과하는 자발방출의 수평 편광 성분도 작아지게 되고, 이것이 증폭기 매질을 통과하면서 증폭되는 것도 잘 일어나지 못하게 된다.

일반적으로 레이저 증폭기를 효율적으로 운영하기 위해서는 ASE를 최소화하는 것이 바람직하다. 이를 위하여 한국표준과학연구원에서는 색소레이저를 위한 시중경로 증폭기에 여과 유리(filter glass)나 회절격자(grating)를 이용하기도 하였다.<sup>[18,19]</sup>

그림 4의 결과를 이용하면 본 연구에서 구성한 시중경로 Ti:sapphire 레이저 증폭기의 경우에는 특별한 장치를 이용하지 않고 Ti:sapphire 결정의 방향만 잘 조절하여도 자발방출에 의한 증폭을 최소화할 수 있다. 즉 Ti:sapphire 결정의 각도를 55~75도(또는 90도 주기)의 범위로 하고 펄핑 에너지를 낮추면 P3를 통과하는 수평 성분의 자발방출을 최소화할 수 있어서 ASE를 줄일 수 있다.

그림 5는 시중경로 증폭기에서 나오는 펄스의 모양을 나타낸다. 펄스의 모양을 관찰하기 위하여 실리콘 PIN 감지기(Electro-Optics Technology Inc., ET-2000)를 그림 1의 표시

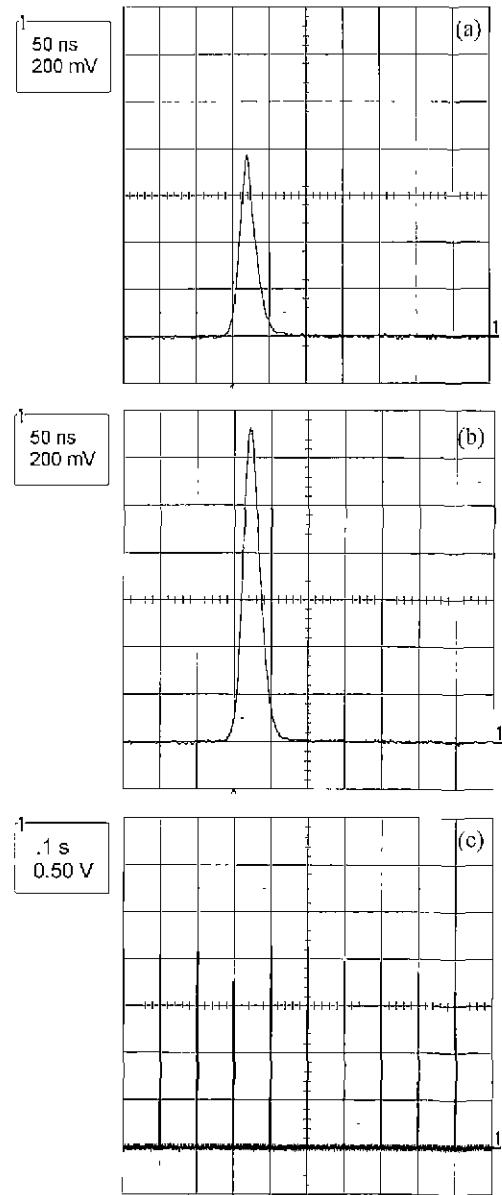


그림 5. 시중 경로 증폭기에서 나오는 레이저 펄스 모양. (a)는 연속 발진 Ti:sapphire 레이저 입력이 없는 경우, (b)는 연속 발진 Ti:sapphire 레이저 입력이 400 mW인 경우이다. (c)는 Ti:sapphire 레이저 입력이 없을 때 시중 경로 증폭기에서 10 Hz의 펄스가 나오고 있는 것을 보여준다. 이때 펄핑 에너지는 188 mJ이다.

한 부분(amplified pulse)에 두었다. 감지기 앞에는 800 nm의 대역 투과 여과기(band pass filter)를 설치하여 주변에서 난반사되어 감지기에 들어가는 532 nm의 펄핑 레이저 펄스를 차단하였다. 그림 5에서 (a)는 연속 발진 Ti:sapphire 레이저를 증폭기에 입력시키지 않은 경우 증폭기에서 자체적으로 발생하는 펄스의 모양으로 펄스의 반치폭(FWHM; full width at half maximum)은 약 25 ns 정도이어서 이때 펄스의 첨두 출력(peak power)는 180 kW이다. (b)는 400 mW의 Ti:sapphire 레이저를 입사시킨 경우로 이때에도 펄스의 반치폭은 약 25 ns 정도이고, 첨두 출력은 1.36 MW이다. (a)와 (b)에서 보듯이 증폭기를 통과하여 나오는 펄스는 단일 펄스의 모양을 하고 있다. 이러한 결과는 증폭기에서 연속 발진 Ti:sapphire 레이저가 증폭되거나 자발방출에 의하여 증폭되는 펄스가 위에서 설명한 것과 같은 사중 경로만을 통해서 이루어지고, 다른 방법에 의한 것이 아님을 나타낸다. (c)는 Ti:sapphire 레이저의 입력이 없을 때 증폭기에서 펄핑 레이저와 같은 반복률의 10 Hz 펄스가 나오고 있는 것을 보여준다.

#### IV. 끝 맺으며

본 연구에서는 편광 특성을 이용하여 사중경로 Ti:sapphire 레이저 증폭기를 구성하고 연속 발진 Ti:sapphire 레이저의 증폭 특성 및 자발방출의 증폭 특성에 대하여 조사하였다. 일반적으로 증폭기 매질에서의 자발방출은 특정한 방향으로 편광되어 있지 않다. 본 실험의 결과에서 증폭기에서 발생한 자발방출 중 수평 편광 성분이 증폭기를 두 번 통과하는 경우(그림 3)와 네 번 통과하는 경우(그림 4)를 비교하면 증폭 매질의 이득이 단일 통과 이득의 제곱으로 커지는 것을 알 수 있다. 자발방출의 또 다른 특징은 상당히 긴 시간 폭을 가진다는 것이다. 본 실험에서는 그림 5와 같이 증폭기에서 나오는 펄스의 모양은 Ti:sapphire 레이저가 입력이 없을 경우나(a) 있을 경우(b) 모두 25 ns 정도의 반치폭을 갖는 것으로 나타났다. 청주대학교에서 수행한 Z-자형 Ti:sapphire 레이저 공진기의 펄스 동작에 대한 연구에서 18%의 낮은 반사율의 출력 거울과 3 mJ의 펄핑 에너지로 펄스당 에너지가 822  $\mu$ J, 반치폭이 5 ns인 펄스를 얻었다고 발표하였다.<sup>[22,23]</sup> 본 연구에서 구성한 사중경로 Ti:sapphire 레이저 증폭기는 공진기의 구조를 가지고 있지 않다. 그러나 Ti:sapphire 결정의 방향을 20도로 잘 조절하여 수평 편광 성분이 증폭기 매질을 네 번 지나가도록 하고 특히 펄핑 레이저가 높을 경우 위에서 설명한 결과로 미루어 보면 자발방출에 의한 증폭에 의하여 레이저가 자체적으로 발진한다고 생각할 수 있다. 이것이 레이저의 발진인 것을 확인하기 위해서는 시간적인 모양과 스펙트럼의 분포, 빔 세기의 공간적 분포, 발산각 등의 조사가 동시에 이루어져야 하며 현재 이를 진행 중에 있다.

그리고 본 연구에서 구성한 사중경로 Ti:sapphire 레이저 증폭기의 경우에는 특별한 장치를 이용하지 않고 Ti:sapphire 결정의 방향만 잘 조절하여도 자발방출에 의한 증폭을 최소화할

수 있다. 즉 Ti:sapphire 결정의 각도를 55~75도(또는 90도 주기로) 하고 펄핑 에너지를 낮추면 P3를 통과하는 수평 성분의 자발방출을 최소화할 수 있어서 ASE를 줄일 수 있으며, 현재 이것을 최소화한 후 연속 발진 레이저의 펄스 증폭에 대한 실험을 진행 중에 있다.

#### 감사의 글

본 연구에 사용한 Bethune 셀을 제작하여준 한국표준과학연구원원의 이재협씨에게 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] P. F. Moulton, *J. Opt. Soc. Am.* **B3**, 125 (1986).
- [2] A. J. Alfrey, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-25**, 760 (1989).
- [3] A. Sanchez, A. J. Strauss, R. L. Aggarwal, and R. E. Fahey, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-24**, 995 (1988).
- [4] T. Barbec, P. F. Currely, Ch. Spielmann *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.* **B10**, 1029 (1993).
- [5] M. Lai, *Opt. Lett.* **19**, 722 (1994).
- [6] D. E. Spence, P. N. Kean, and W. Sibbett, *Opt. Lett.* **16**, 42 (1991).
- [7] J. Squier, F. Salin, and G. Mourou, *Opt. Lett.* **16**, 324 (1991).
- [8] J. Zhou, C. Huang, C. Shi *et al.*, *Opt. Lett.* **19**, 126 (1994).
- [9] U. Keller, G. W. 'tHooft, W. H. Knox, and J. E. Cunningham, *Opt. Lett.* **16**, 1022 (1991).
- [10] J. Zhou, C. P. Huang *et al.*, *Opt. Lett.* **19**, 126 (1994).
- [11] I. N. Ross, Technical Note, unpublished.
- [12] N. Sarukura, Y. Ishida, and H. Nakano, *Optics Comm.* **77**, 49 (1990).
- [13] A. Stügl, C. Spielmann, and F. Krausz, *Opt. Lett.* **19**, 204 (1994).
- [14] K. Yamanaka, A. Magana, and P. H. Chiu, *Appl. Phys.* **B58**, 323 (1994).
- [15] P. Georges, F. Estable, F. Salin *et al.*, *Opt. Lett.* **16**, 144 (1991).
- [16] K. G. Han and H. J. Kong, *Jpn. J. Appl. Phys Part 2*, **34**, L994 (1995).
- [17] Eun Seung Lee and Jae Won Hahn, *Opt. Lett.* **21**(22), 1836 (1996).
- [18] Jae Won Hahn and Yong Shim Yoo, *Appl. Opt.* **37**(21), 4867 (1998).
- [19] 이재용, 이해용, 유용심, 한재원, *한국광학회지* **10**(2), 162 (1999).
- [20] 추한테, 금오공과대학교 부속 생산기술연구소 논문집 제13집, 169 (1997)
- [21] D. S. Bethune, *Appl. Opt.* **20**(11), 1897 (1981).
- [22] 김병태, 이형권, *한국광학회지* **7**(4), 390 (1996).
- [23] 김병태, 이형권, *한국광학회지* **8**(6), 450 (1997).

## Characteristics of four-pass Ti:sapphire laser amplifier and amplified spontaneous emission

Gyu Ug Kim<sup>\*</sup> and Han Tae Choo

*School of Natural Science, Kumoh National University of Technology, Kyungbuk, 730-701, KOREA*

*<sup>\*</sup>E-mail: gukim@knu.kumoh.ac.kr*

(Received August 10, 2000. Revised manuscript received September 18, 2000)

We have constructed a collinear four pass Ti:sapphire laser amplifier by using polarization effect. When we pumped the amplifier with 188 mJ second harmonics of Q-switched Nd:YAG laser, we observed that a 450 mW incident cw Ti:sapphire laser beam is amplified to pulse with energy of 34 mJ and pulse width (FWHM) of 25 ns. We could minimize the amplified spontaneous emission by simple method of rotating the Ti:sapphire amplifier rod.

*OCIS codes* : 140.3460, 140.5560, 140.3280, 140.3590, 140.6630.