
색소레이저의 다단 증폭 및 SHG 특성

이영우*

Characteristics of multi-stage dye laser amplification and Second Harmonic Generation

Young-Woo Lee*

요 약

분포궤환 색소레이저(DFDL: Distributed Feedback Dye Laser)로부터 80 uJ의 단일 극초단 펄스를 얻고, 이를 2단의 증폭기와 betune cell에 의한 다단 증폭으로 높은 출력을 얻은 후 BBO를 사용, 자외선 영역의 제 2고조파를 얻었다.

ABSTRACT

We obtained ultra-short single pulse with an energy of 80 uJ from Distributed Feedback Dye Laser. Using three stages of amplifiers constructed by two stages of dye amplifiers and one bethune cell amplifier, we obtained high power pulse and second harmonic generation with BBO in ultraviolet region.

키워드

dye laser, ultrashort pulse laser, SHG

1. 서 론

극초단 레이저의 발생 및 고출력화에 관한 연구가 선진각국에서 활발히 진행되고 있다[1-3].

본 연구에서는 최종적으로 엑시머 레이저의 단계적 극초단펄스화와 고출력화를 위한 전단계 실험을 행한다. 우선 sub-ns의 단펄스를 발생시키기 위한 전단 발진기부를 분포궤환 색소 레이저(DFDL : Distributed Feedback Dye Laser)로 구성하여 약 100 ps의 단펄스를 얻었고, DFDL 여기원인 XeCl 레이저의 입력 에너지와 DFDL 출력 에너

지 관계를 이론 및 실험적으로 고찰 하여 발진기 특성을 규명하였고, 개발된 모델의 타당성도 확인하였다. 또한 분포궤환 색소 레이저의 외부에 quenching cavity를 구성하여 얻은 616 nm의 단일 펄스(single-pulse)를 XeCl 레이저로 여기되는 3 단의 dye 증폭기에서 증폭하였고 증폭 특성을 조사하였다. 3 단의 증폭기열에 의해 얻은 616 nm의 단펄스 레이저를 308 nm의 자외 영역에서 증폭시키기 위한 SHG(Second Harmonic Generation) 실험을 행하여 파장 및 출력 에너지 특성등을 조사하였다.

II. Subnano초 레이저 단펄스의 발생

본 연구에서 극초단 펄스 발생부의 시스템으로 독일의 Max-Planck 연구소와 헝가리의 Jate 대학교가 공동 개발 제작한 분포제한형 색소 레이저(DFDL)를 채용하였다. DFDL를 극초단 펄스 발생기로 사용한 시스템은 다음과 같은 장점을 갖고 있다.

첫째, THG(Third Harmonic Generation)에 의한 3배파를 이용하는 모드 록크 dye 레이저에 비하여 SHG(Second Harmonic Generation)의 2배파에서 동작하므로 보다 높은 변환 효율을 갖고 있다. 둘째, DFDL 출력에너지는 모드 록크 dye 레이저의 출력보다 10배 정도 크기 때문에 증폭기에서의 증폭율을 낮출 수 있다. 셋째, DFDL은 최종적으로 엑시머 레이저 증폭기와의 시스템 구성에 있어서 전치증폭기와의 사이에 수백 ps 이하의 동기를 실현할 수 있다. 이는 전치 엑시머 레이저에 입력되는 극초단 펄스의 시간을 조정하여 적당한 이득의 시간에 입력 시킴으로서 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 발생의 주된 요인이 되는 전치 증폭기에서의 ASE 억제에 기여할 것으로 기대된다. 넷째로, DFDL은 부가적인 전자광학 장치없이 단일펄스 동작을 하며 실제로, DFDL을 발진기로 선택한 시스템이 현재 자외선 파장영역에서 가장 짧은 레이저 펄스를 발생시키고 있다. 마지막으로 SCDL(Short Cavity Dye Laser), QCCL(Quenched Cavity Dye Laser) 등의 레이저 기술의 축적 및 발전과 함께 단계적으로 펄스 폭을 subnanosecond에서 subpicosecond까지 줄일 수 있다.

DFDL 시스템의 여기에는 XeCl 레이저를 사용하였다. 서론에서도 언급하였듯이 대부분의 극초단 자외 레이저 시스템은 색소 레이저에 의한 발생부, 다단의 색소 레이저 증폭부, 주파수 변환부 및 2단 또는 3단의 엑시머 레이저 증폭부로 구성되는 복합형(hybrid dye/excimer)이다. DFDL 여기용으로 사용된 XeCl 레이저는 다시 3단의 색소 레이저 증폭기를 여기하는데 사용되었다. 색소 레이저와 엑시머 레이저는 서로 두개의 개별적 파장에 대한 단펄스 증폭기를 구성하지만 두개의 증폭단 사이에서 비선형 결정에 의한 주파수 변환을 행하여 줌으로서 가시영역의 초단 발생부 및 증폭단에서 성장하는 ASE의 크기를 줄여주는 장점이 있다.

효과적이고 최적화된 DFDL 여기 및 발진특성을 얻기 위하여 DFDL 시스템의 설계 및 제작 전에 시뮬레이션 코드를 개발하였다.

본 연구에서는 분포제한 색소레이저 출력의 입력 에너지 의존성을 조사하고 실제 실험에서의 결과와 비교하여 타당성을 조사하였다. 분포제한 색소레이저의 출력은 여기 레이저의 입력 에너지 및 펄스폭에 크게 의존하고, 레이저 자신의 색소 농

도 및 이득 길이 등에 의해 특성 지워진다.

위에 열거한 파라미터 중에서 여기원인 XeCl 레이저의 펄스폭과 색소 레이저의 농도 및 이득 길이 등, 구조적 형태는 실제적으로 일정하다. 그러나 분포제한 색소레이저의 출력은 결국 여기 에너지에 의한 공진기 내의 광자 밀도에 비례하고, DFDL의 펄스열 생성 원리인 자기 Q-스위칭 효과(Self-Q-switching effect)를 발생시키는 공진기 수명(Cavity lifetime)의 변화에 의존한다. 이는 Q-switched 레이저의 공진기 수명 역할과 같으며 공진기 감쇄 시간의 빠른 변화가 분포 제한 색소 레이저의 짧은 출력 펄스를 발생시킨다.

컴퓨터 시뮬레이션 코드에 의한 DFDL의 시간적 펄스 출력 특성을 여기 레이저 펄스 및 상준위 밀도, 공진기 수명등은 우리가 수행한 실험한 결과와 좋은 일치율을 보여 주고 있다. 시뮬레이션에 사용한 값들은 발진 실험에 사용한 값과 동일하다. 이상의 결과들로부터 알 수 있듯이 여기 펄스 에너지의 크기에 따라 발생 펄스열의 수가 결정되고 각 펄스의 발진 문턱 (Oscillation threshold)에 차이가 있으므로 입력 에너지를 낮게 조절함으로써 여기 레이저의 펄스 폭보다 1/50 정도의 분포제한 색소레이저의 단일 펄스를 모드 록킹등과 같은 장치없이 얻을 수 있다. 분포제한 색소 레이저와 3단의 색소 레이저 증폭기는 20 ns (FWHM)의 펄스 폭과 약 100mJ의 출력 에너지를 갖는 Questek社 (Model 2560)의 XeCl 레이저를 프리즘과 beam splitter로 나누어 펌핑하였다. 엑시머 레이저의 출력 빔은 프리즘을 이용하여 펌핑 빔의 단면중 5 mm의 폭을 취한 다음 이를 다시 1mm X 5mm의 aperture와 초점거리 15cm의 cylindrical lens를 통해 DFDL 시스템에 입사된다. 입사에너지는 XeCl 레이저의 출력에너지가 100mJ일때 300μJ 정도가 됨을 실험적으로 확인하였다.

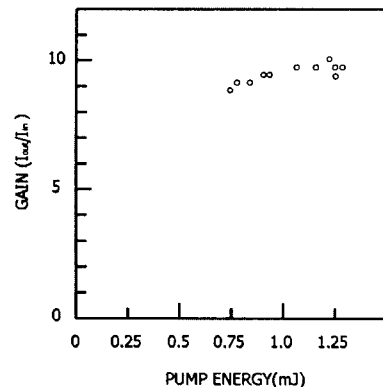


그림 1. 제 1 증폭기 이득
Fig.1 1st amplifier gain

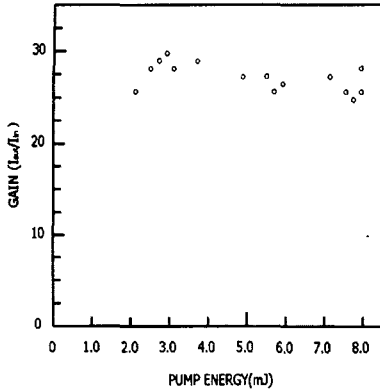


그림 2 제 2증폭기 이득
Fig2 2nd amplifier gain

III. 색소레이저 증폭기의 증폭특성

본 증폭실험에서는 증폭기 1과 증폭기 2의 dye cell 표면 반사빔과 출력빔을 calibration된 두개의 biplanar phototube(R1193U-02)로 측정하였다. 그림 1과 그림 2에 색소 레이저 증폭기 1 과 증폭기 2의 XeCl 펌프 레이저 에너지에 대한 증폭을 특성을 보인다. 증폭기 1 에서는 여기 에너지가 1.0 mJ 이상에서 증폭기 2에서는 2.5 mJ이상에서 증폭율이 포화되었고 증폭율은 각각 10배와 30배정도를 기록하였다.

본 실험으로 펌핑에너지의 크기가 충분함을 알 수 있고 증폭율이 포화되는 이상의 에너지를 최종

증폭단으로 보낼 수 있음을 확인하였다. 또한 증폭기 2로 부터의 최대 출력에너지가 증폭기 1과 2의 ASE를 제외하고 2.4 μ J이다. 두 증폭기의 증폭율이 약 300배이므로 DFDL 발진기로부터 증폭기 1에 입력되는 에너지가 10 nJ 이하임을 시사한다.

횡방향으로 여기되는 dye 레이저는 색소의 이득이 매우커서 몇가지 문제점을 갖고있다. 횡여기 방식은 반복 동작시 색소의 고속 순환이 어렵고 집속된 빔(<1.5 mm)으로 여기하므로 입사면에 광학적인 손상을 입히게된다. 또한 여기 빔은 dye cell의 수직 방향으로 지수함수적으로 흡수되어 활성매질내에 불균일한 이득분포를 형성하므로 증폭되는 레이저 빔의 공간적 분포가 불균일하게 된다. 그러므로 증폭기 1과 증폭기 2에 입력되는 에너지는 한계가 있으며 입사되는 빔의 침투도도 상당히 중요하다. 펌핑 레이저의 공간적 침투 특성은 증폭되는 seed pulse의 far-field 상태를 관측하며 증폭기 위치 (cylindrical lens로 부터의 거리)를 조정하였다. 또한 증폭기 1 과 증폭기 2 사이에 직경 100 μ m의 pinhole과 증폭기 2의 출력후 직경 300 μ m의 pinhole을 설치하여 불필요한 빔의 증폭을 차단하였다. 이 빔을 차단하지 않고 3단 증폭기인 Bethune cell에 집속시켜 입사할 경우 출력 빔의 공간적 불균질성이 관측되었다. 증폭기 1 및 증폭기 2는 횡방향 여기 방식을 취함으로써 XeCl 여기광에 대해 앞 면에 위치한 부분의 여기와 dye cell안쪽의 여기가 불균일하다. a와같은 레이저 빔의 공간적 불균일 증폭은 3단의 최종 증폭기를 Bethune cell 방식[4]으로 설치함으로써 해결하였다. 그림 3에 bethune cell을 포함한 전체 장치의 구성도를 보인다.

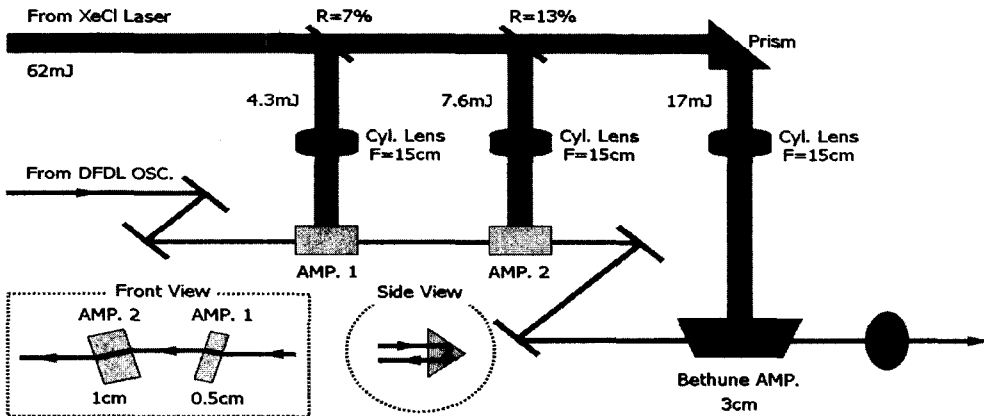


그림 6 색소레이저 다단증폭기 개략도

Fig. 3 multistage amplifier chain with front view of the Amp. 1, Amp. 2, and side view of bethune cell

IV. 제 2 고조파 발생

색소 레이저의 최종 증폭단인 Bethune cell로 부터 얻은 616nm의 출력빔을 XeCl 엑시머 레이저 증폭기에서 증폭시키기 위한 주파수 변환 실험 즉, 제2고조파 발생(Second Harmonic Generation) 실험과 자외 영역에서의 증폭실험을 위한 SHG 펄스 및 XeCl 레이저 펄스에 대한 스펙트럼 특성을 조사하였다. 제2고조파 발생을 위한 비선형 결정은 5mm x 5mm x 1mm 와 5mm x 5mm x 5mm의 크기를 갖는 BBO를 사용하였다. 1mm 두께의 것 보다는 5mm 두께의 BBO 결정의 변환효율과 공간적 특성이 우수했다. BBO 결정(두께 5mm)은 입사빔에 대하여 5도의 각도를 가질 때 최대 변환효율을 기록했다. 제 2 고조파 출력은 12 - 15 μ J 정도이고 최대 10 %의 변환 효율을 갖고 있음을 확인하였다.

V. 결 론

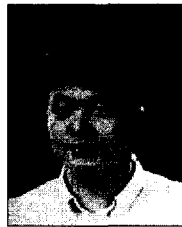
3단의 색소레이저 증폭기의 특성을 조사하여 DFDL의 발진 에너지를 추정하였다. 2단의 횡방향 여기 색소레이저 증폭기와 빔의 공간적 균질성을 얻기 위하여 4방향에서 여기 할 수 있는 Bethune Cell을 포함, 총 3단의 색소 레이저 증폭기를 구성하여 약 20000배에 가까운 증폭율과 공간적 균질 증폭 특성을 얻었다.

참고문헌

- [1] W.Kaiser, ed., Ultrashort Laser Pulses and amplification Springer-Verlag(1987).
- [2] A.Endoh, M.Watanabe, N.Srukura, and Watanabe, Opt. Lett., 14, 353(1989).
- [3] S.Watanabe, A.Endoh, M.Watanabe, N.Sarukura, and K.Hata, J. Opt. Soc. Am.B, 6.1870(1989).
- [4] D.S. Bethune, Appl. Opt., 20, pp1897-1899 (1981).

저자소개

이영우(Young-Woo Lee)



1990년 일본 Keio 대학 전기공학과 박사
 1990~1992 독일 Max-Planck Institut fur biophysikalische Chemie 연구원
 1992~현재 대전 목원대학교 정보전자영상공학부 교수
 ※관심분야 : 극초단레이저 발생과 응용, 생체응용 photonics, 정밀광계측 등