

헤테로다인 방법을 이용한 펄스 증폭된 레이저빔의 주파수 Chirping 연구

김진태*

조선대학교 공과대학 광기술공학과

☎ 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

(2001년 11월 19일 받음, 2002년 1월 15일 수정본 받음)

좁은 선폭을 갖는 연속 레이저 빔이 제이조화된 Nd:YAG 레이저빔과 Bethune 셀을 사용하여 좁은 선폭을 갖는 펄스 레이저빔이 생성되었다. 증폭된 펄스빔의 주파수 chirping 정도는 헤테로다인 방법을 이용하여 측정되었으며, 헤테로다인 맥놀이 신호로부터 순간적인 위상 변화량을 추출함으로써 분석되었다. 10 ns 펄스에 의해 MHz 이하의 선폭을 가지는 연속 레이저 빔으로부터 증폭된 주파수 chirping은 80 MHz 정도로 매우 좁은 선폭의 증폭된 펄스 레이저빔이 얻어졌다.

주제어 : laser applications, optical sciences.

I. 서 론

레이저 선폭 줄임은 분광학뿐만 아니라 계측분야, 원자 및 분자 구조 연구 분야, 생명공학 및 의학분야에서 유용한 수단으로 사용되어 지고 있다.¹⁻⁴ 위에서 언급한 분야들은 고출력, 좁은 선폭과 가변 주파수를 가지는 안정한 레이저들이 요구되기 때문에 이러한 레이저 개발은 매우 중요하다. 좁은 선폭을 갖는 펄스빔을 얻기 위하여, 입사한 좁은 선폭을 갖는 연속 발진 레이저가 펄스레이저에 의해 펄핑될 때 대부분이 입사빔의 주파수로 발진함을 Ganiel 등⁵이 보인 바 있다. 상업용 펄스 레이저 선폭은 GHz 정도의 넓은 선폭을 가지고 있기 때문에 분자나 원자의 초미세구조를 연구하는데 많은 어려움이 있다. 특히, 원자의 동위원소들 간의 에너지 차이는 수백 MHz이므로 매우 가깝게 있다. 이러한 이유 때문에 선폭이 넓은 레이저를 사용하면 특정 동위원소들을 선택적으로 이온화시킬 수 없는 단점이 있다.

본 연구에서는 677 nm의 파장을 가지는 MHz 이하의 선폭을 가진 CW 레이저가 Bethune 셀로 입사하고, 제이조화된 Nd:YAG 레이저로 Bethune 셀을 펄핑할 때 나온 CW 레이저 파장을 가지고 좁은 선폭을 가지는 펄스 레이저 빔이 생성되고, 이 생성된 빔이 이단계 증폭셀을 이용하여 출력 증폭되었다. TEM₀₀의 매우 좋은 공간 모드를 가지는 CW빔이 Nd:YAG 빔에 의해 펄핑될 시 생기는 불균일한 빔 모양이 모세관 모양을 가진 Bethune 셀과 이미징 광학계를 사용함으로써 극복되어져, 가우시안 공간모드를 가진 매우 좁은 선폭의 펄스레이저를 생성할 수가 있었다. 증폭된 펄스빔의 주파수 chirping 정도는 헤테로다인 방법⁶을 이용하여 측정되었으며, 헤테로다인 맥놀이 신호로부터 순간적인 위상 변화량을 추출함으로써 분석되어졌다.

II. 실험 방법

펄스 증폭방법에 관한 실험 방법 및 실험 구성도를 설명하면 다음과 같다. Coherent 회사의 연속 발진 고리형 색소 레이저 (Coherent 699-29)로부터 생성된 레이저빔(파장: ~677 nm)이 삼단계 증폭 색소셀로 입사된다. 색소셀내의 직경은 1 mm, 길이는 10 mm의 Bethune 셀⁷로 구성되어져 있다. 이 Bethune 셀의 특성은 연속 발진 레이저 방향에 수직으로 입사된 약 8 ns의 펄스폭을 가지는 제이조화된 Nd:YAG 펄스빔이 균일하게 연속 레이저와 색소가 만나는 지점을 균일하게 펄핑함으로써 증폭된 펄스 레이저 공간 모드를 매우 좋게하는 장점을 가지고 있다. 일종의 셋업 레이저로 부여된 연속 발진 레이저는 증폭된 자발 방출을 매우 작게 가진 증폭된 단색광을 형성하게 된다. 이렇게 형성된 펄스빔은 연속 발진 레이저 모드를 보존 시키기 위한 이미징 광학계를 지나 두 번째, 세 번째 색소셀을 지나면서 120 mW의 출력에서 약 2 mJ의 고 에너지를 가진 펄스빔으로 증폭하게 된다. 본 연구에서는 이렇게 증폭된 펄스빔의 펄스폭 및 펄스 위상이 어떻게 변화하는가를 이해하는데 주안점을 둔다. 본 실험에서 사용한 헤테로다인 실험 방법을 소개하고 실험 결과에서 얻어진 펄스의 선폭 변화에 관해 주안점을 두고자 한다.

본 연구에서 사용한 헤테로다인 방법의 실험도는 그림 1에 나타나 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 색소셀을 통과하지 않은 출력기 매우 작은 연속 발진 레이저가 AOM(Acoustic-Optic Modulator)에 의해 400 MHz 편조된다. 참조빔은 증폭된 펄스 레이저 공간 경로보다 장거리를 이동하여 매우 빠른 실리콘 핀다이오드(RCA/EG&G사 C30971E 모델)에 입사된다. 이러한 장거리 이동 경로는 셀에서 나오는 ASE 신호가 포토다이오드에 들어오는 것을 방지함으로써 맥놀이 신호를 보다 명확히 관측하기 위함이다. 이러한 핀다이오드는 나노초 이하의 반응 시간을 가지고 있으며, 매우 넓은 파장 영역에 반응하여 나노초 펄스들의 헤테로다인 측정용 용이하게 해준다. 펄

*E-mail: kimjt@chosun.ac.kr

스 레이저 빔은 증성 필터를 이용하여 연속 발진 레이저와 비슷한 정도의 출력을 갖도록 하였다. 시간과 공간적으로 동시에 편 다이오드에 입사한 두 레이저빔은 맥놀이 신호를 형성 해주며, 이렇게 형성된 맥놀이 신호는 디지털 신호로 컴퓨터에 입력된 후 분석되어진다.

III. 실험 결과 및 토론

헤테로다인 신호가 어떻게 얻어지는가에 대해 설명하면 다음과 같다. 그림 1에서 보여준바와 같이 연속 발진 레이저빔이 AOM에 의해 $\omega_m = 400$ MHz 만큼 변위 되어진다. 이러한 변조된 레이저빔과 증폭 색소셀을 통해 나온 빔이 동시에 포토다이오드에 입사할 때 두 레이저빔 간의 전기장의 합에 의해 포토다이오드에서 나오는 신호는 방정식 (1)과 같이 표현되어진다.

$$V \propto E_{cw}^2 + E_p^2(t) + E_{cw}E_p(t)[e^{i(\psi - \omega_m t)}] \quad (1)$$

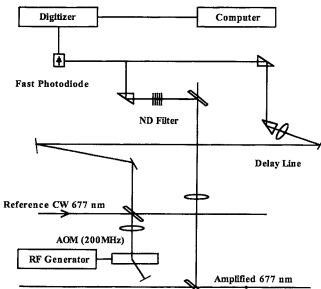


그림 1. 헤테로다인 측정 실험도.

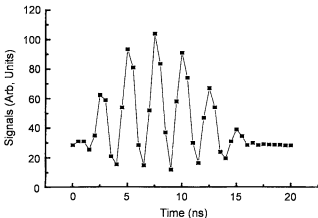


그림 2. 얻어진 전형적인 맥놀이 신호.

여기서 E_m 는 연속 발진 레이저 전기장의 진폭이며, E_p 는 증폭된 펄스 레이저의 진폭을 나타낸다. 두 레이저빔의 맥놀이 효과로 나타나는 맥놀이 신호는 세 번째항으로서 표현되어질 수 있다. 전형적인 관측된 맥놀이 신호가 그림 2에 보여진다. 그림 2에서 보는바와 같이 맥놀이 신호의 대비가 명확하게 보여줌을 알 수 있다. 방정식 (1)에 나타난 신호를 푸리에 변환을 통해 주파수 영역으로 변환 시키면 방정식 (2)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \tilde{V}(\omega) &\propto \int_{-\infty}^{\infty} [E_p^2(t) + E_{cw}E_p(t)e^{i(\psi - \omega_m t)}] e^{i\omega t} dt \\ &= \tilde{E}_p^2(\omega) + \mathcal{J}[E_p(t)e^{i(\psi + \omega_m t)}] + \mathcal{J}[E_p(t)e^{i(\psi - \omega_m t)}] \quad (2) \end{aligned}$$

여기서 \mathcal{J} 는 푸리에 변환을 나타내며, 첫 번째 항은 $\omega = 0$ 에서 $\tilde{E}_p^2(\omega)$ 펄스포락션을 나타내고 둘째 및 세 번째항은 $\omega = \pm \omega_m$ 에서의 $\tilde{E}_p^2(\omega)$ 펄스 포락션을 나타낸다. 이러한 펄스포락션을 필터링에 의해 하나($\omega = +\omega_m$)만 선택하면

$$\tilde{V}(\omega) \propto \mathcal{J}[E_p(t)e^{+i\psi}] \quad (3)$$

와 같은 방정식으로 나타내진다. 그러므로 방정식 (3)을 역 푸리에 변환을 하게 되면 펄스 진폭 $E_p(t)$ 와 위상 ψ 를 알 수 있게 해준다. 또한, 이러한 위상의 순간적인 시간 변화량은 순간적인 주파수 변화를 주게 된다. 그러므로 이러한 헤테로다인 방법에 의해 얻어진 맥놀이 신호로부터 변형된 펄스의 위상변화를 통해 연속발진 레이저로부터 펄스로 증폭 시 순간적인 주파수 변화량을 알 수 있는 방법임을 알 수가 있다.

이 분석방법을 사용하여 하여 얻은 펄스의 위상에 대한 시간 변화량이 그림 3에 보여진다. CW 레이저빔이 10 ns 펄스에 의해 펄스빔으로 푸리에 변환 시 푸리에 변환 한계 선폭은 44 MHz로 예상되나 이 값보다 큰 값인 80 MHz는 부수적인 주파수 chirping이 일어난 것으로 볼 수 있다. 그림 3은 10 ns 펄스 형태와 선폭의 반치폭(FWHM)이 실제로 나타나 있다. 또한, 순간적인 주파수 chirping이 원점과 선으로 나타나 있으며 펄스의 반치폭에 대한 주파수 chirping이 굵은 가로선으로 표시되어 있다. 그러므로 그림 3에서 반치폭에 해당하는

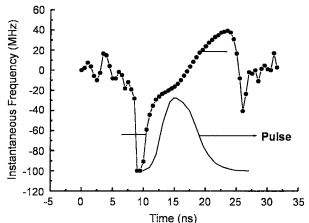


그림 3. 시간에 따른 레이저 주파수 chirping 정도: 10 ns 펄스폭을 가지는 펄스와 순간적인 주파수 chirping이 원점과 선으로 나타나 있으며 펄스의 반치폭에 대한 주파수 chirping이 굵은 가로선으로 표시되어 있다.

펄스 주파수의 순간적인 변화량은 약 80 MHz임을 알 수 있다. 실질적으로 푸리에 한계보다 더 chirping이 일어났음을 알 수 있다. 이러한 주파수 chirping이 일어나는 원인은 매우 복잡한 과정을 통해 일어난다. 본 논문에서는 이러한 복잡한 과정에 관한 해석보다는 주파수 chirping의 추출 방법으로 헤테로다인 측정 방법을 소개하고자 한다. 그러나 간단히 이러한 현상에 대해 설명하면 비선형 단결정을 통해 주파수 혼합이 일어나는 경우와 유사하나 Bethune 셀에서의 펄스 증폭시는 색소 분자의 여기준위의 비울방정시과 연계된 색소의 감수율(χ^3)에 의한 효과에 의해 주로 나타나게 된다. 그러므로 연속 레이저의 푸리에 변환 시 부가적인 주파수 chirping을 줄이기 위해선 색소들의 혼합을 통해 (χ^3)에 의한 효과를 줄임으로서 chirping 정도를 줄일수가 있다.

IV. 결 론

푸리에 변환 한계에 가까운 매우 좁은 선폭, 매우 균일한 가우시안 공간 모드, 고풍력을 가지는 펄스빔이 연속 발진 레이저를 제어조화된 Nd:YAG 레이저에 의해 횡편평 함으로서 생성되어 졌다. 이러한 펄스빔의 선폭을 측정하기 위해 헤테로다인 기술을 적용하여 연속 발진 레이저로부터 펄스빔이 형성될때의 선폭 변환 정도를 정확히 측정할 수가 있었다. 이러한 좁은 선폭을 가지는 펄스빔은 원자 및 분자의 분광학적 연구, 의생명 공학에 매우 유용하게 사용되어질 수 있다. 또한, CARs를 이용한 대기중의 산소의 분광선을 측정함으로써 대

기 오염 정도를 측정 하는 경우에도 사용되어질 수 있다.

참고문헌

- [1] J. R. M. Barr, J. M. Girkin, J. M. Tolchard, and A. I. Ferguson, "Interferometric measurement of the $1S_{1/2}$ - $2S_{1/2}$ transition frequency in atomic hydrogen," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 56, pp. 580-583, 1986.
- [2] R. L. Farrow and D. J. Rakestraw, "Degenerate four-wave mixing diagnostics on OH and NH radicals in flames," *Appl. Phys. B*, vol. 50, no. 6, pp. 479-485, 1990.
- [3] J. T. Kim, C. C. Cheng, and E. E. Eyller, "Optical multiple resonance spectroscopy of H_2 , D_2 , and HD ," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 33, no. 3, pp. 233-235, 1998.
- [4] T. Bouche, T. Dreier, B. Lange, and J. Wolfrum, "Collisional narrowing and spectral shift in coherent anti-Stokes raman spectra of molecular nitrogen up to 2500 bar and 700 K," *Appl. Phys. B*, vol. 50, no. 6, pp. 527-553, 1990.
- [5] U. Ganiel, A. Hardy, and D. Treves, "Analysis of injection locking in pulsed dye laser systems," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-12, no. 11, pp. 704-715, 1976.
- [6] Cromwell, T. Trickle, Y. T. Lee, and A. H. Kung, "Ultra-narrow bandwidth VUV-XUV laser system," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 60, no. 9, pp. 2888-2892, 1989.
- [7] D. S. Bethune, "Dye cell design for high-power low-divergence excimer-pumped dye lasers," *Appl. Opt.*, vol. 20, no. 11, pp. 1897-1899, 1981.

Study of frequency chirping of pulse amplified laser beam by using heterodyne method

Jin-Tae Kim[†]

Department of Photonic Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, KOREA

[†]E-mail: kimjt@chosun.ac.kr

(Received November 19, 2001 ; revised manuscript received January 15, 2002)

Amplified pulsed laser beam with narrow linewidth was generated from CW laser beam with narrow linewidth by using frequency doubled Nd:YAG laser beam and Bethune cell. The degree of the frequency chirping of the amplified pulse laser was measured by using the heterodyne method and obtained by calculating instantaneous phase change from heterodyne beating signals. The frequency chirping of amplified pulsed laser beam from CW laser beam with sub-MHz linewidth by 10 ns pulse was 80 MHz so that pulsed laser beam with very narrow linewidth was obtained.

Classification codes : LO.050, OS.010.