

# 요오드 분자에 안정화된 Nd:YAG 레이저의 절대주파수 측정

## Absolute Frequency Measurement of an Iodine-stabilized Nd:YAG Laser with a Mode-locked laser

김억봉, 윤태현

광주파수 제어 연구단, 한국표준과학연구원, 대전시 유성구 도룡동 1  
ubkim@kriss.re.kr

2원자 선형 분자인 요오드 분자는 가시광 영역에서 많은 진동·회전 천이선을 가지고 있고, 상온에서 초미세 구조선 관측이 가능하기 때문에 고분해 레이저 분광학의 주요 연구대상이 되어 왔다. 특히, 미터의 정의가 빛 속도에 근거를 둔 새로운 정의로 채택됨에 따라 요오드 분자의 초미세 구조선에 주파수 안정화된 레이저는 초정밀 길이 측정 및 원자, 분자 물리 연구 분야 등에서 중요한 역할을 해오고 있다.

본 논문에서는 주파수 표준기인 9.2 GHz 세슘 원자시계에 위상 잠금된 펄스 모드 레이저를 이용하여 요오드 분자내의 초미세 구조선에 안정화된 Nd:YAG 레이저의 절대주파수 측정에 관한 연구 결과를 발표한다. 펄스 모드 레이저는 주파수 공간에서 광빔의 주파수 성분들이 일정한 간격을 이루는 반복율 ( $f_{rep}$ )과 공진기내에 균속도와 위상속도의 차이로 인해 발생하는 주파수 편이 ( $f_{ceo}$ )를 조절하여 안정화 할 수 있다. 이때 광빔의 스펙트럼은  $f_n = nf_{rep} + f_{ceo}$  ( $n$ 은 정수)로 나타낼 수 있다. 이 두자유도를 독립적으로 조절하였을때, 위상 안정화된 펄스 모드 레이저의 반복율과 주파수 편이의 표준편차는 각각 88.3  $\mu$ Hz 와 17.6 mHz였고, Allan 분산은 1초의 적분시간에서 반복율은  $7.5 \times 10^{-13}$ , 주파수 편이는  $9 \times 10^{-10}$ 의 안정도를 가졌다.

도플러 효과제거 변조 전달 분광법을 이용하여 Nd:YAG 레이저를 요오드 분자내의 초미세 구조선에 주파수 안정화하는 과정을 그림 1에 나타내었다. 실험에 사용된 Nd:YAG 레이저는 온도와 주파수 조절을 통해 연속적으로 10 GHz까지 변환이 가능하고, 532 nm의 제2차 조화파를 생성하기 위하여 약 470 mW의 펌프광을 링 공진기내의 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 결정에 조사하였다. 광음향 변조기 (AOM)를 이용하여 펌프광에 80 MHz의 주파수 편이를 주었다. 이는 펌프광과 조사광의 간섭에 의해 발생하는 잡음을 제거하기 위함이다. 그리고 레이저의 위상(주파수) 변조를 위하여 전기광학 위상 변조기 (EOM, 250 kHz)를 사용하였다. 요오드 흡수 셀의 길이는 약 30 cm이고, 냉지 (cold finger)의 온도는 2단계 열전기 냉동기 (TEC)를 이용하여 3 °C에서 -20 °C 까지 조절 할 수 있도록 하였다.

그림 2는 요오드 분자의 R(56)32-0 천이선내에 존재하는 초미세 성분의 분산 신호이다. R(56)32-0 천이선은 바닥상태의 회전 양자수가 우수 (even number)이므로 전체 초미세 성분은 15개가 나타난다. 이 천이선중  $a_{10}$  천이선은 국제 표준 천이선으로 사용되고 있다<sup>(1)</sup>. 이때의 펌프광의 출력은 4.6 mW이고 조사광의 출력은 0.4 mW였으며, 냉지의 온도는 -10 °C로 안정화 하여 요오드 셀내의 증기압을 일정하게 유지시켰다. 15개 초미세 구조선의 주파수 간격은 약 857 MHz였고, 이 천이선들 중  $a_{10}$ 의 선폭은 2.5 MHz로 측정되었다.

주파수를 측정하기 위해서는 Cs 원자시계에 위상 동기된 신호발생기를 이용하여 반복률과 주파수 편이를 안정화하여 측정하는 방법<sup>(2)</sup>과 그림 3에서와 같이 펄스 모드 레이저와 R(56)32-0 천이선내

의  $a_{10}$  초미세 구조선에 주파수 안정화된 Nd:YAG 레이저 사이의 맥놀이 주파수를 측정한 후 이를 세습 시계에 위상동기 시키는 광시계 방식 측정법이 있다. 두 번째 방법을 사용하게 되면 모드록 레이저의 주파수 편이 변화에 무관하게 Nd:YAG 레이저의 주파수를 측정할 수 있고, 신호발생기의 위상잡음 문제를 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. 그림 4는 주파수 안정화된 Nd:YAG 레이저 와 모드록 레이저 사이의 맥놀이 주파수를 펨토초 모드록 레이저의 주파수 편이로 더하고 뺀 것을 270 kHz의 분해능을 가지고 측정한 결과이다.

결론적으로 펨토초 모드록 레이저를 위상 안정화 하여 광주파수를 측정할 수 있는 자로써 광주파수 합성기를 완성하였고, 이를 이용하여 요오드 분자내의 초미세 구조선에 안정화된 Nd:YAG 레이저의 절대 주파수 측정 실험이 진행 중이다. 본 연구는 과학기술부의 창의적 연구 과제를 통한 지원으로 이루어졌다.

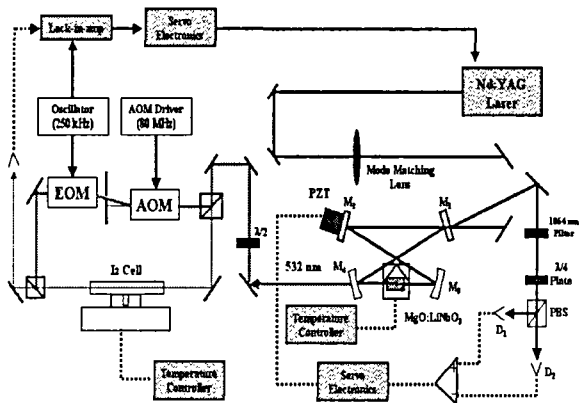


그림 1. Nd:YAG 레이저의 주파수 안정화를 위한 실험 장치도.

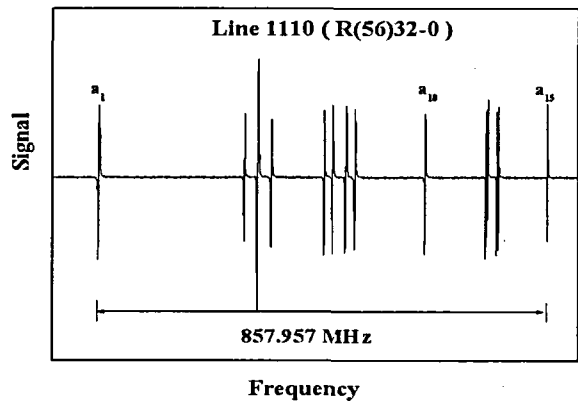


그림 2. 요오드 분자의 R(56)32-0 천이선내에 존재하는 초미세 성분의 분산 신호.

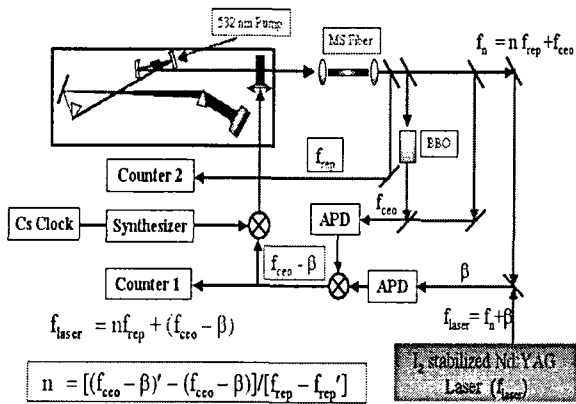


그림 3. 펨토초 모드록 레이저를 이용하여 Nd:YAG 레이저의 절대 주파수 측정을 위한 실험 장치도.

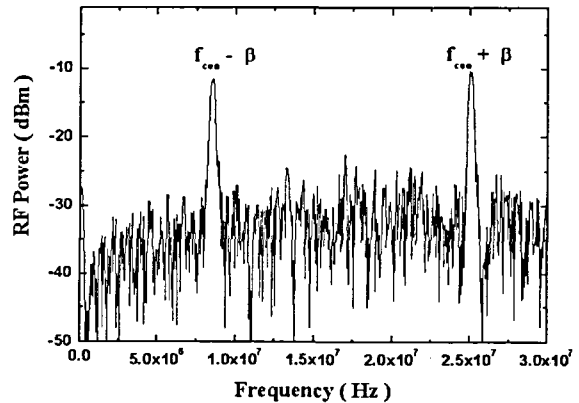


그림 4. Nd:YAG 레이저 와 모드록 레이저 사이의 맥놀이 주파수를 mixer를 이용하여 모드록 레이저의 주파수 편이와 합과 차이를 측정한 결과.

참고문헌

1. T. J. Quinn, Metrologia 40, 103-133 (2003).
2. T. H. Yoon, S. T. Park, E. B. Kim, et al., IEEE J. Select. Top. Quant. Elect. 9, 1025-1029 (2003).