

루비듐 증기 셀에서의 광-마이크로파 이중 공진 신호와 CPT 신호의 특성 비교

The Comparison of Characteristics between the Microwave-Optical Double Resonance and the Coherent Population Trapping Signal in the Rubidium Vapor Cell

최인호^{1,2}, 박상언^{*}, 박영호¹, 권택응¹

¹한국표준과학연구원 기반표준부

²한국과학기술원 물리학과

*parkse@kriss.re.kr

원자시계나 극미세 자장측정에 사용되는 루비듐 광-마이크로파 이중 공진(microwave-optical double resonance: MODR)과 결맞음 밀도 포획(coherent population trapping: CPT) 방식을 이용하여 마이크로파 전이 신호를 측정 비교하였다. CPT방식이 MODR 방식 보다는 전이신호가 작지만 RF 공진기가 필요 없기 때문에 소형화 할 수 있는 장점 때문에 최근 많은 연구가 진행되고 있다. 반면 MODR 방식은 기존의 램프에 의한 펌프방식에 비해 주파수안정도가 뛰어나기 때문에 고성능 원자시계로 개발이 되고 있다.

MODR 방식은 그림 1. (a)와 같이 바닥상태의 초미세준위에 해당하는 RF 주파수를 가해주면 바닥상태의 밀도 변화가 생기게 되고, 이 변화가 여기상태 주파수에 맞추어진 레이저의 흡수 신호의 변화로 나타난다. 레이저의 흡수 신호가 최대가 될 때 RF 주파수가 공진 주파수 임을 알 수 있다. 그림 1. (b)는 두 개의 바닥 상태와 한 개의 들뜬 상태가 주파수 ω_1, ω_2 인 두 레이저광과 상호작용하고 있는 Λ 형 원자계를 나타낸다. 이 원자계는 다음과 같이 원자의 고유 상태인 $|1\rangle$ 과 $|2\rangle$ 의 선형 중첩상태인 $|+\rangle = A|1\rangle + B|2\rangle$,와 $|-\rangle = B|1\rangle - A|2\rangle$ 로 나타낼 수 있다.

이때 두 레이저광의 주파수 차가 바닥상태 주파수 차이와 같다면 원자의 밀도는 $|+\rangle$ 상태에서부터 빠져나와서 $|-\rangle$ 상태에 포획된다. 이와 같이 원자들이 결맞음 어둠상태($|-\rangle$)로 광핍되는 과정을 CPT라고 한다.

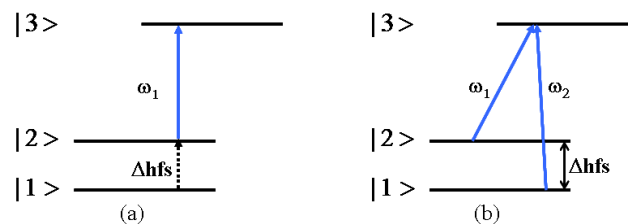


그림 1. (a) 광-마이크로파 이중 공진(MODR)과 (b) 결맞음 밀도 포획(CPT) 방식의 기본 원리

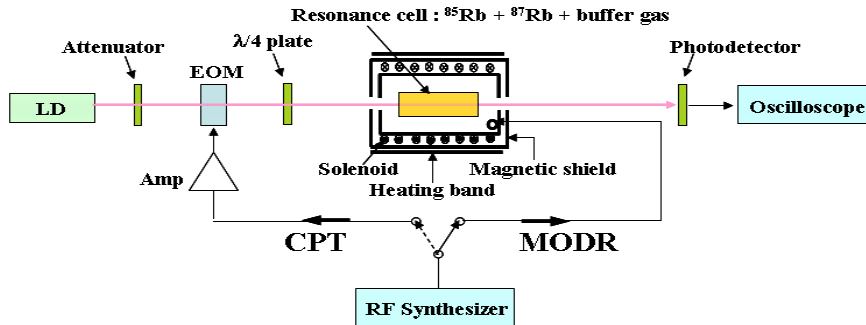


그림 2. 실험장치도. (LD: Diode Laser, EOM: Electro-Optic Modulator, Amp: Amplifier)

그림 2.는 실험장치도를 나타낸다. 광원으로는 Rb원자의 D1 전이선에 해당하는 파장 795 nm인 DFB (Distributed FeedBack) 반도체 레이저를 사용하였다. 레이저 세기는 MODR과 CPT방식에서 각각 2.4mW/cm^2 와 6.9mW/cm^2 을 사용하였다. CPT방식에서는 EOM에 의해 위상 변조되면서 발생하는 두 개의 측파대(side mode)만 신호에 관여한다. 따라서 반송파(carrier)와 측파대 크기의 비를 측정하여 측파대의 세기와 MODR에서의 레이저 세기를 같게 한 후 비교하였다. 루비듐 증기 셀에는 버퍼가스와 함께 ^{87}Rb 와 ^{85}Rb 이 들어 있다. 루비듐 셀 밖으로는 솔레노이드 코일을 감고 전류를 흘려 일정한 크기의 정자장을 형성시켰으며 μ -메탈로 감싸 외부로 부터의 자기장을 차폐하였다. 또한 열선을 감아 일정한 온도를 유지시켰다.

MODR 방식에서는 RF Synthesizer에서 발생된 6.834 687 870 GHz 주파수를 Δhfs 부근에서 변화시켜 가면서 루비듐 셀로 인가하여 바닥상태의 밀도변화를 일으키게 한다. 이때 레이저 광의 흡수신호가 최대가 될 때 RF 주파수는 공진주파수와 같게 된다. 그림 3. (a)는 70°C 에서 중심주파수 6.834 687 870 GHz를 100 kHz로 변화시키면서 측정하였고 RF power는 -5 dBm 을 사용하였다.

CPT 방식에서는 RF Synthesizer에서 발생된 3.4 GHz를 RF Amp로 증폭한 후 EOM을 구동하였고, EOM은 6.8 GHz 떨어진 두 주파수의 레이저광을 만들어 CPT 신호를 얻는데 사용된다. 레이저 광의 편광은 $\lambda/4$ 를 사용하여 선편광으로부터 원편광으로 변화시킬 수 있도록 하였다. 그림 3. (b)는 60°C 에서 두 개의 모드를 중심주파수 3.417 343 935 GHz 부근에서 변화시켜 가면서 측정하였고 RF power는 16 dBm 을 사용하였다. 루비듐 셀의 온도와 레이저 세기에 따른 흡수신호의 FWHM와 진폭의 변화를 기술할 것이며 신호 대 잡음비에 영향을 주는 요소들을 거론할 예정이다.

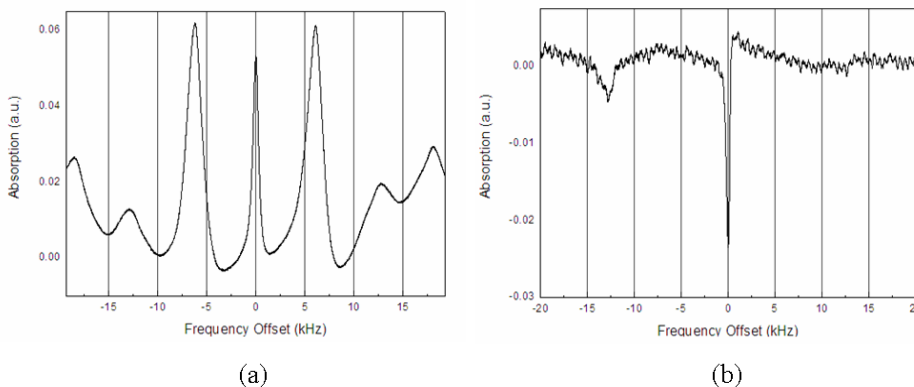


그림 3. (a) 광-마이크로파 이중 공진 신호와 (b) CPT 신호.