

세슘원자분수에서 마이크로파 전이에 의한 Ramsey 신호 관측 Observation of Ramsey Signals from a Cesium Atomic Fountain

권택용, 이호성, 양성훈, 박상언
한국표준과학연구원 시간주파수 연구실
tykwon@kriss.re.kr

최근 정보 통신 및 우주 항공 분야 등에서 정밀한 주파수표준기 및 시계에 대한 필요성이 증가하고 있다. 이러한 요구에 부응하여 새로운 원자 주파수표준기에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 레이저 냉각된 원자를 이용하는 원자분수 주파수표준기는 그 불확도가 $10^{-15} \sim 10^{-16}$ 으로 차세대 주파수표준기로 기대되고 있다. 한국표준과학연구원에서는 1996 년부터 세슘원자분수 주파수표준기에 대한 연구를 수행하고 있는데, 레이저 냉각 실험, 원자분수 실험을 위한 레이저 시스템 제작, 그리고 원자분수용 진공조 및 정자장 발생 장치 등에 대해서 연구를 수행하고 그 결과를 발표하였다.

본 연구에서는 레이저 냉각된 원자를 연직상방으로 발사하여, 두 번의 마이크로파와 상호작용에 의해 발생하는 Ramsey 신호를 관측하는 실험을 수행하였다.

원자를 레이저 냉각한 후 optical moving molasses 방법을 이용하여 원자를 발사하였는데, 원자분수 실험의 개략도와 동작 순서는 각각 그림 1과 그림 2에 나타나있다. 원자를 레이저 냉각 및 포획한후 수직 방향의 두 레이저 주파수를 바꾸면 원자는 위쪽으로 힘을 받아 발사된다. 원자가 수평방향 레이저빔의 영역을 벗어나기 전에 레이저 주파수 편이를 크게 하여 다시 원자가 냉각되도록 하였다. 그후 모든 레이저를 차단하여 원자가 중력하에서 자유비행하도록 하였다.

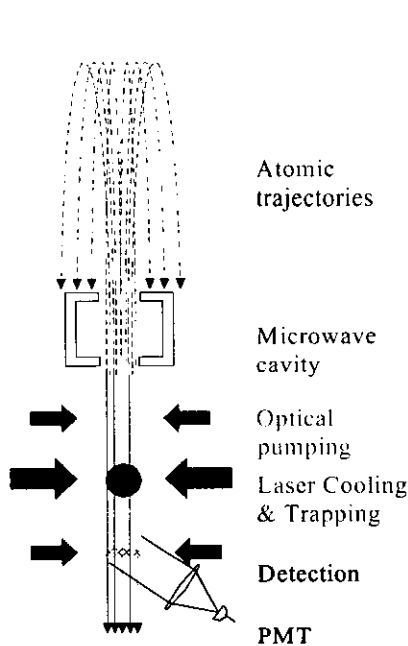


그림 1. 원자분수실험 개략도

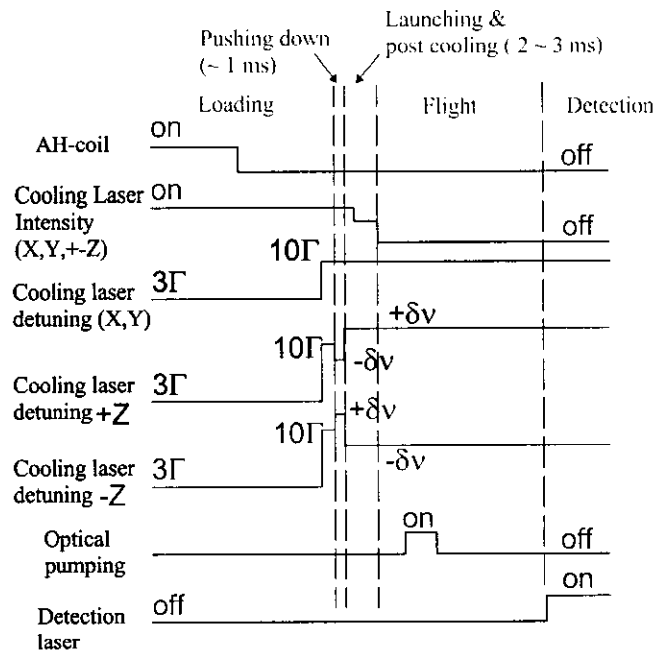


그림 2. 원자분수 동작순서도.



냉각용 레이저 중 수직 방향의 두 레이저의 주파수 편이를 변화시켜 발사 높이를 조절하였는데, 본 실험에서는 약 1 m 의 높이까지 원자를 발사하여 원자포획 지점 아래에 있는 형광측정장치로 낙하하는 원자의 형광을 관측하였다. 관측된 time-of-flight (TOF) 신호는 그림 3 에 나타내었다.

관측된 TOF 신호로부터 원자 구름의 온도를 계산할 수 있는데, 원자구름의 분포를 가우시안 분포로, 원자의 속도 분포를 맥스웰 분포로 가정하여 구한 원자구름의 온도는 약 2.5 μK 이었다(그림 4). 단, 이 때 수직방향의 레이저 주파수 편이의 변화량은 3.8 MHz 이며, 원자의 최대도달 높이는 53.5 cm 이다.

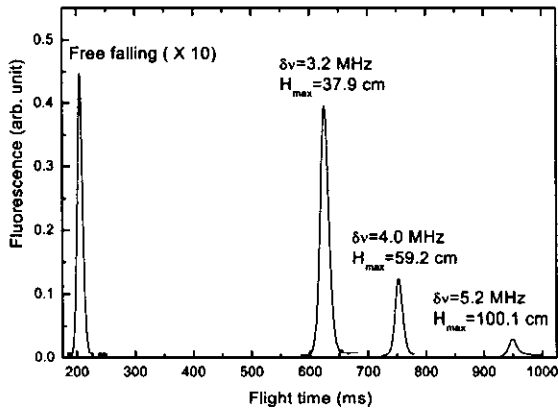


그림 3. Time-of-flight 신호.

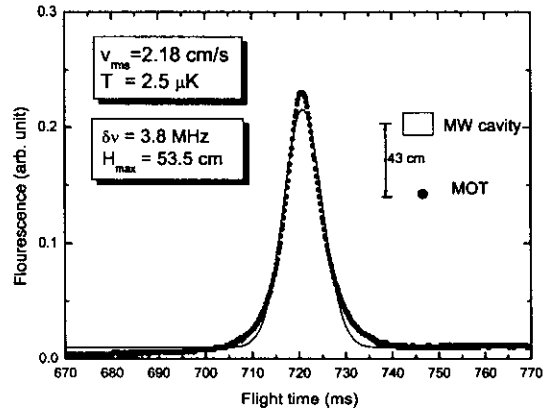


그림 4. 발사된 원자 구름의 온도 측정.

원자 포획 지점에서 약 43 cm 위쪽에 TE₀₁₁ 모드의 마이크로파 공진기를 두고 발사된 원자가 마이크로파와 상호작용하도록 하였다. 원자는 위쪽으로 올라가면서 마이크로파와 상호작용하고, 다시 내려오면서 마이크로파와 한번 더 상호작용하여, 세슘 원자의 두 바닥상태인 6S_{1/2} F=4 준위와 6S_{1/2} F=3 준위 사이에 전이가 발생하게 된다. 이때, 마이크로파 공진기가 있는 영역과 원자가 자유비행하는 영역에는 마이크로파의 자장 방향과 나란한 정자장을 형성하여 축퇴되어 있는 Zeeman 부준위를 분리하고, $\Delta m=0$ 인 전이가 일어나도록 하였다.

그림 5는 측정된 Ramsey 신호인데, 이 신호는 세슘 원자의 두 바닥상태인 6S_{1/2} F=4 (m=0) 준위와 6S_{1/2} F=3 (m=0) 준위 사이의 마이크로파 전이에 의한 것이다. 이때, 수직방향의 레이저 주파수 편이의 변화량은 3.8 MHz 이며, 원자의 최대도달 높이는 53.5 cm 이다. 마이크로파의 주파수는 9 192 631 770 Hz를 중심으로 주사하였다. 관측된 Ramsey 신호의 선폭은 약 1.9 Hz 이다.

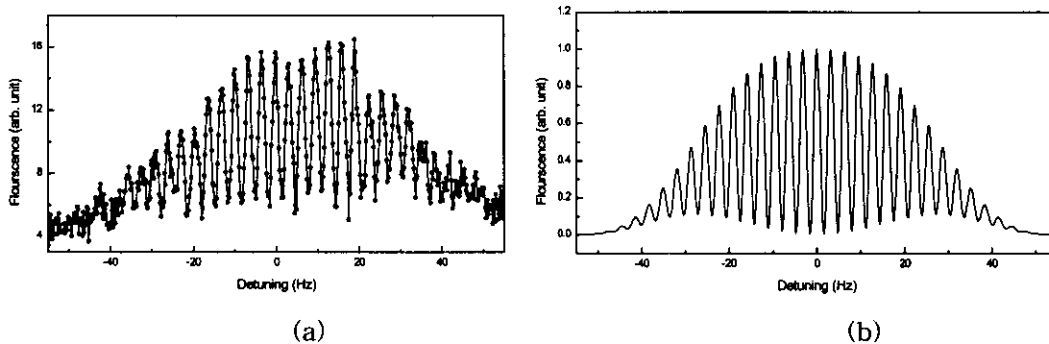


그림 5. 측정된 Ramsey 신호. (a)는 측정결과이고, (b)는 이론적인 계산결과이다.