

Rabi pedestal shifts를 이용한 원자시계의 주파수 편이 계산

Estimation of the frequency biases in an atomic clock

by measuring Rabi pedestal shifts

박영호, 오차환, 김필수, 김중복*, 권택용**, 이호성**
 한양대학교, *한국교원대학교, **한국표준과학연구원
 hslee@kriss.re.kr

1950년 Norman Ramsey는 시간적으로 분리된 두 진동 자장을 사용한 마이크로파 전이 방법을 개발했다. 이 방법을 사용할 경우 그림 1과 같이 넓은 선폭을 가지는 공진선 ("Rabi pedestal") 위에 좁은 선폭의 분광 신호 ("Ramsey fringe")를 얻을 수 있다. 램지 방법은 정밀한 분광 측정에 많이 사용되고 있으며, 특히 원자 시계를 구현하기 위한 기본 기술이 되고 있다.

본 연구에서는 Ramsey fringe와 Rabi pedestal의 중심 주파수 편이량을 여러가지 조건에 따라 측정하였다. 측정된 주파수 편이량의 자장, 마이크로파 출력, 변조 주파수 폭 등에 대한 의존도를 분석함으로써 자장 불균일, Cavity pulling, Rabi pulling 등에 의한 효과를 계산 하였다.

자장 불균일 : Rabi pedestal은 세슘 원자가 마이크로파 영역(excitation region)을 통과할 때의 전이 확률을 나타낸다. 따라서 pedestal의 Zeeman 편이는 공진기 팔에서의 평균 자장에 의해 결정된다. 반면 Ramsey fringe는 세슘 원자가 자유 전개 영역(drift region)을 통과하는 동안 원자의 위상과 마이크로파가 만드는 위상의 차에 의해 발생한다. 따라서 Ramsey fringe의 중심 주파수는 자유 전개 영역에서의 평균 자장에 의해 결정 된다. 자장의 불균일 정도는 원자 빔 튜브 내에 여러가지 구조물이 조립되어 있으므로 직접적인 측정이 어렵다. 그러나 자장에 민감한 전이선($|m_F = 1\rangle \rightarrow |m_{F'} = 1\rangle$)의 fringe 및 pedestal의 중심을 측정함으로써 두 영역에서의 평균 자장의 차이를 계산할 수 있다. 이 값으로부터 Zeeman 주파수 및 2차 Zeeman 주파수 편이 등을 계산 하였다.

Cavity pulling : 마이크로파 공진기가 mistune 된 경우, 주입되는 마이크로파 주파수에 따라 원자가 느끼는 진동 자장의 세기가 변하게 된다. 이러한 detuning slope에 의한 중심 주파수의 편이량은 다음 식으로 주어진다.

$$\delta\nu_c = \frac{\partial S / \partial p}{\partial S / \partial f} \times \frac{dp}{df} \times f_m \tag{1}$$

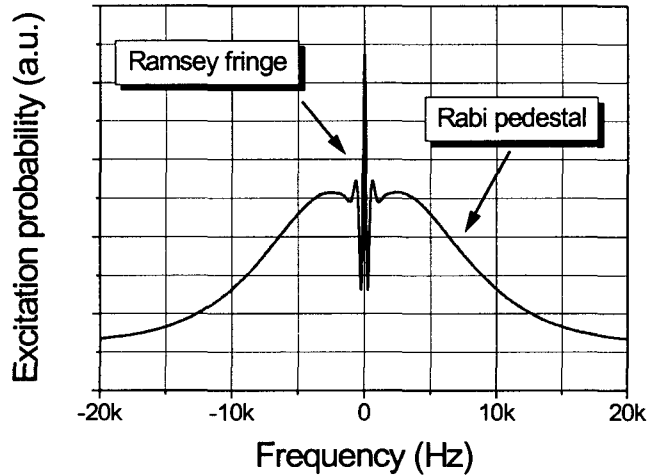


그림 1. 광펌핑 세슘 원자시계의 마이크로파 전이 신호

여기서 f 는 시계 주파수로부터의 detuning, p 는 마이크로파 파워, S 는 lineshape 함수, f_m 은 변조 주파수 폭을 나타낸다. 공진기 detuning이 Zeeman 주파수 보다 충분히 큰 경우, cavity pulling에 의한 주파수 편이는 전이선에 무관한 값이 된다. 그리고 이 값은 f_m 에 비례하므로 fringe에서 보다 pedestal의 경우 훨씬 큰 값이 된다. 본 실험에서는 detuning slope(dp/df)을 구하기 위해, 램지 공진기의 공진 신호를 측정하는 직접적인 방법과 pedestal의 기울기와 중심 주파수를 측정하는 간접적인 방법을 상호 비교해 보았다.

Rabi pulling : Zeeman 전이선들의 중첩에 의해 Rabi pulling이 발생한다. 특히 전이선의 크기가 비대칭적인 경우 주파수 편이는 커진다. 그리고 이 값은 마이크로파 출력 및 변조 주파수 폭에 비례하고, fringe 보다 pedestal에서 크게 나온다. 이상의 주파수 편이에 대한 내용을 도표로 나타내면 그림 2와 같다.

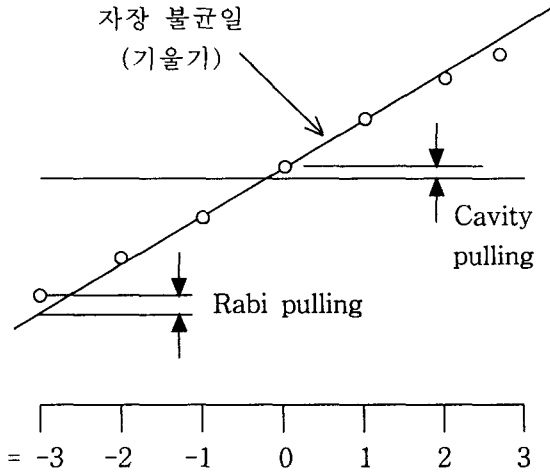


그림 2. 7개 전이선의 pedestal shifts

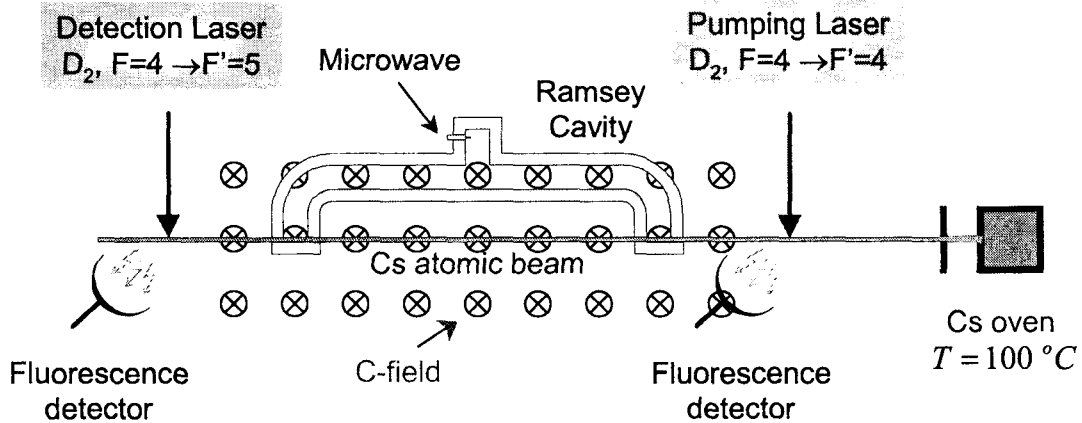


그림 3. 광펌핑 세슘 원자 시계의 구성도

참고 문헌

1. Jon H. Shirley, W. D. Lee, G. D. Rovera and R. E. Drullinger, "Rabi Pedestal Shifts as a Diagnostic Tool in Primary Frequency Standards", IEEE Trans. Inst. Meas., Vol. 44, No. 2, April 1995, 136-139
2. W. D. Lee, J. H. Shirley, J. P. Lowe and R. E. Drullinger, "The Accuracy Evaluation of NIST-7", IEEE Trans. Inst. Meas., Vol. 44, No. 2, April 1995, 120-123