

AC Zeeman 이동을 이용한 마이크로파 세기 측정

Microwave Power Measurement by Using AC Zeeman Shift

박영호, 박상언, 최상경, 권택용, 유성규, 이호성
 한국표준과학연구원 광기술표준부
 hslee@kriss.re.kr

1초를 정의하고 있는 세슘 원자 바닥 상태의 두 초미세 준위 간 전이 주파수는 다양한 물리적 요인에 의해 편이된다. 이 편이 주파수를 정확히 알아내기 위해서는 원자의 속도 분포, 자장의 세기, 마이크로파의 세기 등에 대한 정보가 필수적이다. 특히 마이크로파 세기에 대한 정보는 2차 Zeeman 효과, 중력 편이, 흑체 복사를 제외한 거의 모든 항목의 주파수 편이 계산을 위해 필수적이다. 마이크로파 세기는 자기 쌍극자 전이에서의 라비 주파수(Rabi frequency)를 정의하고 있으며, 이 값은 램지 신호를 여러 번 미분하거나 Cepstrum을 분석하는 방법⁽¹⁾, 램지 신호를 푸리에 변환하는 방법⁽²⁾ 등의 간접적인 방법에 의해 구해지는데 대체로 1% 정도의 불확도를 갖는다. 본 연구에서는 AC Zeeman 효과에 의한 공진 주파수 편이를 측정함으로써 마이크로파 세기 즉 원자가 느끼는 라비 주파수를 측정하였다.

그림 1은 AC Zeeman 주파수 편이 실험을 위한 장치도를 나타낸다. 램지 공진기에 시계 전이 주파수 성분 외에 비공명(off-resonant) 성분을 주입하기 위해 두 대의 주파수 합성기와 전력 결합기(power combiner)를 사용하였다. 비공명 성분의 라비 주파수를 b , 디튜닝 Δ 라 할 때 AC Zeeman 효과에 의한 주파수 이동은 $\delta\omega = -b^2/2\Delta$ 로 표현된다⁽³⁾. 여기서 Δ 는 수소메이저에 의해 아주 잘 정의된 값을

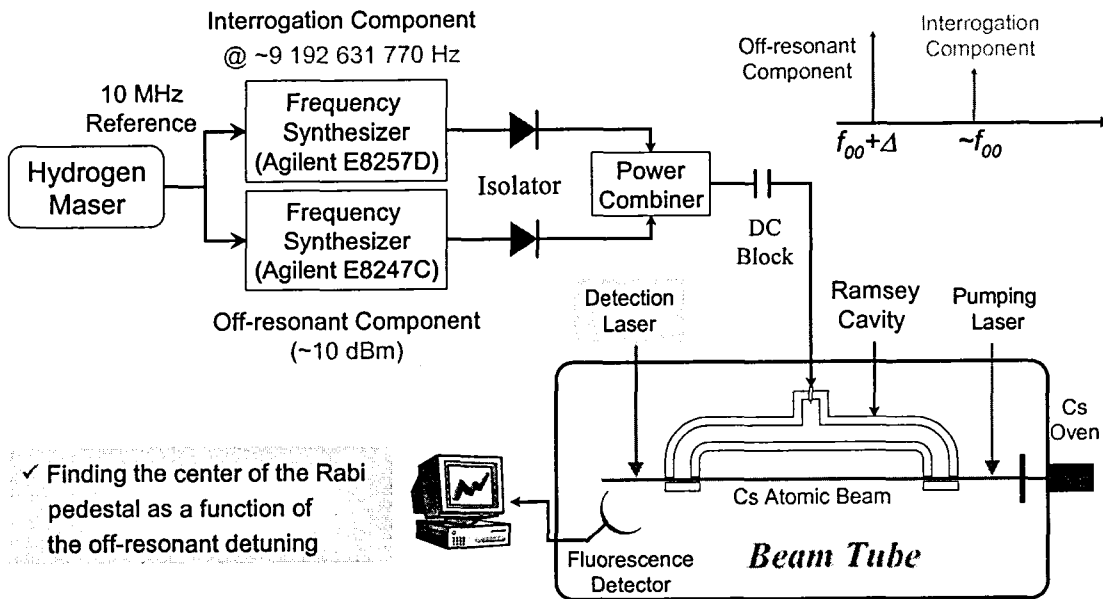


그림 1: AC Zeeman 주파수 편이 측정을 위한 실험 장치.

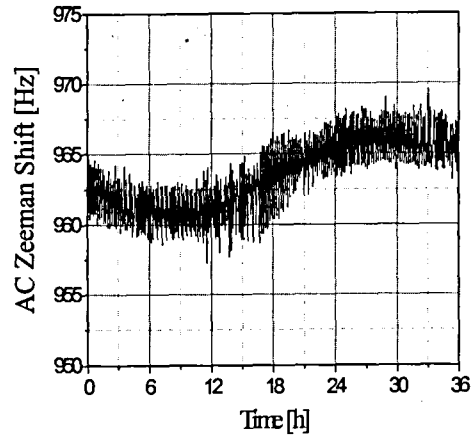
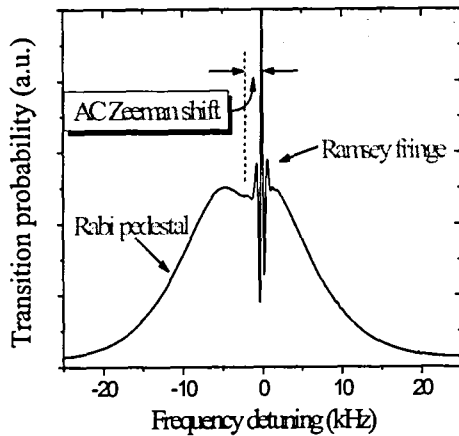


그림 2: 비공명 성분에 의한 라비 페데스탈의 이동.

그림 3: AC Zeeman 주파수 편이의 유동.

가하므로 주파수 이동량 $\delta\omega$ 를 측정함으로써 라비 주파수 b 를 곧바로 알아낼 수 있다. 그림 2는 비공명 성분이 존재할 경우의 램지 방법에서의 전이 신호를 나타내는데, AC Zeeman 효과는 램지 무늬가 아닌 라비 페데스탈의 중심 주파수를 이동시킨다. 이것은 필드가 존재하는 공진기 내부에서만 원자의 공진 주파수가 편이되기 때문이다.

그림 3은 비공명 성분의 세기를 10 dBm으로, 디튜닝 주파수를 약 400 kHz로 하여 라비 페데스탈의 중심을 약 1.5일 동안 측정한 결과를 나타낸다. 이로부터 마이크로파의 출력 변동은 약 1% (0.043 dB) 이내의 값을 가짐을 알 수 있다. 원자가 느끼는 라비 주파수는 $b = \sqrt{-2\delta\omega \cdot \Delta} \cong 27.8$ kHz로 계산된다. 라비 페데스탈의 중심 주파수 측정 시 알란 편차는 적분 시간 1 초에서 약 1×10^{-10} 정도이므로 1회의 주파수 측정시 불확도는 1 Hz 정도가 된다. 따라서 AC Zeeman 주파수 편이량이 1 kHz 정도가 되도록 디튜닝 주파수를 맞출 경우, 마이크로파 세기는 약 0.1% (0.0043 dB)의 불확도로 측정된다.

이상의 방법은 두 대의 주파수 합성기 및 전력 결합기 등을 필요로하므로 장치 구성이 다소 복잡하나 마이크로파를 위상 변조하는 경우 주파수 스펙트럼에 sideband의 비공명 성분이 발생하므로 이를 이용하면 1대의 주파수 합성기로도 동일한 실험 셋업을 구성할 수 있다. 결론적으로 본 연구에서는 AC Zeeman 주파수 편이를 측정함으로써 기존 방법보다 약 10 배 우수한 정확도로 램지 공진기 내부에 축적된 마이크로파 세기를 측정할 수 있었다. 이 방법은 불확도 분석 단계에서 매우 유용하게 활용될 수 있으며⁽⁴⁾, 원자시계의 정상 동작시 주기적으로 라비 주파수를 측정함으로써 마이크로파 세기의 변동에 의한 시계 전이 주파수의 유동을 보정할 수 있다.

참고문헌

- [1] Ala'a Makdissi and Emeric de Clercq, "A Signal Approach Analysis of the Ramsey Pattern in Cesium Beam Frequency Standards", IEEE Trans. Instrum. Meas. 46, 112-116 (1997).
- [2] Jon H. Shirley, "Velocity Distribution Calculated from the Fourier Transforms of Ramsy Lineshapes", IEEE Trans. Instrum. Meas. 46, 117-121 (1997).
- [3] Norman F. Ramsey, "Resonance Transitions Induced by Perturbations at Two or More Different Frequencies", Phys. Rev. 100, 1191-1194 (1955).
- [4] Y.-H. Park *et al.*, "Cavity Pulling Shift Evaluated From AC Zeeman Shift in an Optically-Pumped Cs Beam Standard", IEEE Trans. Instrum. Meas. 54, 780-782 (2005).

T
C