

광펌핑 세슘 원자 주파수 표준기의 공진기 위상 조절

Controlling the Cavity Phase Difference in an Optically Pumped Cesium Beam Frequency Standard

박영호, 이수형, 박상언, 이호성, 권택용

한국표준과학연구원

mr-psi@kriss.re.kr

램지 방식을 이용하는 원자 빔 주파수 표준기는 램지 공진기의 양 끝 위상차를 최소화할 경우 최적의 성능을 나타낸다. 램지 공진기는 가공 과정에서의 불완전함과 도체 표면의 유한한 전도도 때문에 양 끝에서의 진동 필드의 위상이 달라진다. 원자의 공진 주파수에 대한 마이크로파 주파수의 디튜닝을 Δ , 원자가 표류 영역을 통과하는 데 걸리는 시간을 T , 공진기 양 끝의 필드 위상차를 \varnothing 라 할 때 원자가 표류 영역을 통과하는 동안 원자 결맞음의 위상과 진동 필드의 위상은 $\Delta T + \varnothing$ 만큼 벌어진다. 이 값이 0이 되는 디튜닝에서 최대 전이 확률을 가지게 되므로 램지 신호에는 $-\varnothing/T$ 만큼의 각주파수 편이가 유도된다. 이와 같은 주파수 편이는 열 원자 빔 형태의 원자 시계에서 가장 제어하기 어려운 항목 중의 하나이다.

공진기 양 끝 위상차의 측정은 빔 반전 실험 (beam reversal experiment)에 의한 방법과 선맞춤 (fitting)을 이용한 방법이 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 본 연구에서는 빔 반전 실험을 통해 램지 공진기의 양 끝 위상차를 측정 후 공진기 양팔의 길이를 조절하는 과정을 반복함으로써 공진기 위상차를 최소화하였다. KRISS-1으로 명명된 광펌핑 세슘 원자 시계^(5,6)는 동서 방향으로 놓여져 있다. 그리고 빔 반전 실험을 위해 진공조 양 끝에 세슘 오븐이 대칭적으로 설치되어 있다. 동쪽 오븐을 작동시키면 원자 빔은 동에서 서로 진행하게 되고 서쪽 오븐을 작동시키면 그 반대가 된다. 원자가 공진기의 두 상호작용 영역을 통과하는 동안 겪게 되는 위상의 변화는 빔을 반전시킬 경우 그 부호가 바뀐다. 따라서 두 빔 방향에 대해 램지 신호의 중심 주파수 값을 비교하면 양 끝 위상차를 계산할 수 있다.

열 원자 빔이 만들어내는 램지 신호는 다양한 속도의 원자 앙상블에 의한 것이므로 공진기 위상차에 의한 주파수 편이는 $f_{\varnothing} = -F\varnothing$ 의 형태로 쓸 수 있다. 여기서 F 는 원자의 속도 분포, 마이크로파 세기 등에 의존하는 양이다. 원자 빔의 진행 방향이 동에서 서인 경우, 디지털 서보가 찾은 램지 무늬의 중심 주파수 값에서 공진기 양 끝 위상차 이외의 다른 항목들에 의한 주파수 편이를 제거한 값을 f_{EW} 라 하면

$$f_{EW} = f_k - F\varnothing \quad (1)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 $-f_k/v_{\text{hfs}}$ 는 기준 발진기로 사용되고 있는 수소 메이저의 상대 주파수가 된다. 서편 오븐에 의한 주파수 측정에서도 식 (1)에 대응하는 식을 세울 수 있다.

$$f_{WE} = f_k + F'\varnothing \quad (2)$$

만약 빔 반전 실험을 하는 동안 기준 발진기의 주파수가 변하지 않았다면 f_k 와 f'_k 는 같은 값을 가지며, 공진기 양 끝 위상차 \varnothing 는 다음과 같이 계산된다.

$$\varnothing = \frac{f_{WE} - f_{EW}}{F + F'} \quad (3)$$

세슘 오븐의 온도가 100°C일 경우 F 값은 약 100 정도의 값을 가지며 그 불확도가 0.3%가 되는데 이것은 원자 앙상블의 속도 분포를 결정하는 과정에서 비롯된다. 공진기 위상차에 의한 주파수 편이의 불확도는 F 값의 불확도로부터 전파되는데, 상대주파수의 불확도가 10^{-14} 이하가 되기 위해서는 \varnothing 값이 300 μrad 보다 작아야 한다. 최근 새로 조립된 원자 시계에서 빔 반전 실험을 수행한 결과 동편 끝단의 위상이 서편보다 751 μrad 만큼 앞선 것으로 측정되었다. 이 위상차를 줄이기 위하여 원자빔 튜브를 해체한 후 램지 공진기의 서편 끝단을 450 μm 연삭하였다. 이 값은 단위 길이 당 위상 변화율의 이론식을 구리 재질의 공진기에 적용함으로써 도출한 것이다. 원자빔 튜브를 재조립하여 또다시 빔 반전 실험을 한 결과 이번에는 서편 끝단이 동편보다 224 μrad 만큼 앞선 것으로 측정되었다. 이 같은 결과는 위상 변화율의 실제 값이 이론 값보다 1.3 배 크다는 것을 의미하며, 위상 변화율의 실제 값을 사용하여 새롭게 계산된 조절 길이는 동편 끝단을 100 μm 연삭하는 것이다. 현재 공진기 가공 후 빔튜브를 재조립하고 있으며 최종 위상차는 수십 μrad 정도가 될 것으로 예상하고 있다. 공진기 양 끝 위상차가 충분히 작은 경우 주파수 편이의 불확도는 원자시계의 장기 안정도에 의해 결정되는데 KRISS-1의 경우 약 8×10^{-15} 정도의 값이다.

램지 공진기의 위상 측정 및 조절은 원자 시계 개발의 마지막 단계에서 수행된다. 왜냐하면 위상차에 의한 주파수 편이 이외의 다른 모든 항목, 예를 들어 2차 제만 효과, 2차 도플러 효과, 공진기 당김, 라비 당김, Bloch-Siegert 편이 등의 주파수 편이 값들이 모두 보정되어야 공진기 위상차를 측정할 수 있기 때문이다. 이러한 여러 가지 주파수 편이 값들을 정확히 알아내기 위해서는 원자의 속도 분포와 라비 주파수에 대한 정확한 정보가 필수적이다. 본 연구에서는 램지 신호로부터 원자의 속도분포와 라비 주파수를 도출하는 방법과 이로부터 제 주파수 편이를 계산하고 보정하여 최종 공진기 위상차 및 위상차에 의한 주파수 편이 값과 그 불확도를 결정하는 방법에 대하여 기술한다.

참고문헌

1. L. Chassagne, F. Hamouda, G. Théobald, and P. Cerez, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr. **48**, 1513 (2001).
2. S.-I. Ohshima, Y. Nakadan, T. Ikegami, and Y. Koga, IEEE Tran. Instrum. Meas. **38**, 1100 (1989).
3. A. Makdissi and E. d. Clercq, IEEE Trans. Instrum. Meas. **48**, 500 (1999).
4. A. Makdissi, J.-P. Berthet, and E. d. Clercq, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr. **47**, 461 (2000).
5. H. S. Lee, S. H. Yang, J. O. Kim, Y. B. Kim, K. J. Baek, C. H. Oh and P. S. Kim, Metrologia **35**, 25 (1998).
6. H. S. Lee, T. Y. Kwon, S. E. Park, S.-K. Choi, and Y.-H. Park, J. Kor. Phys. Soc. **45**, 256 (2004).