

세슘원자분수시계 개발을 위한 편광 기울기 냉각 실험

Polarization Gradient Cooling for Cesium Atomic Fountain Clock

권택용, 이호성, 양성훈

한국표준과학연구원, 전자기연구부

e-mail: tykwon@kriss.re.kr

최근 레이저를 이용한 원자의 포획 및 냉각에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 원자를 아주 낮은 온도까지 레이저 냉각할 수 있게 됨에 따라 그 응용의 폭도 점차 확대되고 있다. 레이저 냉각된 원자를 이용하는 연구 분야중 대표적인 것으로 원자시계를 들 수 있다. 정보통신 및 우주항공 분야에서 정밀한 시간 측정의 필요성이 증가함에 따라 현재의 원자시계보다 더 정밀한 원자시계가 요구되고 있다. 이 때문에 세계 각국의 표준기관이나 대학 등에서는 레이저 냉각된 원자를 이용하는 원자분수시계에 관한 연구를 수행하고 있다.⁽¹⁻²⁾

정밀한 원자시계를 구현하기 위해서는 낮은 평균속도와 좁은 속도분포폭을 가진 원자빔을 만들어야 한다. 이는 원자와 마이크로파의 상호작용으로부터 선풍이 좁고, 신호대 잡음비가 큰 공진신호를 얻음으로써 정밀한 원자시계를 제작할 수 있기 때문이다. 이러한 원자빔을 만드는 방법 중 한가지로 원자분수 방식을 들 수 있다. 원자분수방식은 많은 수의 원자를 수 μK 정도의 온도로 레이저 냉각한 후 연직상방으로 쏘아 올려 원자가 운동하는 궤도의 정점 근처에서 저속 원자빔을 얻는 방법이다. 이때 원자의 운동 궤도의 정점 근처에 마이크로파 공진기를 설치하면, 원자는 올라갔다가 내려오면서 두 번 마이크로파와 상호작용하게 된다. 원자분수방식에서는 원자의 속도가 낮기 때문에 마이크로파와의 상호작용 시간이 길뿐 아니라, 한 지점에서 마이크로파와 두 번 상호작용하기 때문에 위상차가 없으므로 보다 정밀한 원자시계를 구현할 수 있다.

본 연구에서는 원자분수시계 개발을 위하여 광자기 트랩으로 세슘원자를 포획 및 냉각한 후, 편광 기울기 냉각 (PGC; Polarization Gradient Cooling)으로 온도를 더 낮추었다. 이때 원자의 온도는 time of flight (TOF) 방법으로 측정하였다.

본 실험 장치의 개략도는 그림 1과 같다. 냉각 및 포획용 레이저로는 150 mW 출력의 DBR 다이오드 레이저(모델 SDL-5722-H1)를, 리펄핑 레이저로는 5 mW 출력의 DBR 다이오드 레이저(모델 YL85XNW/S)를 사용하였다. 포획용 레이저는 세슘원자의 두 흡수선 ($F=4 \rightarrow F'=4$)와 ($F=4 \rightarrow F'=5$)의 교차 공진선에 안정화 시킨 후 110 MHz 광음향 변조기를 이용하여 세슘원자의 흡수선 ($F=4 \rightarrow F'=5$) 보다 약 15 MHz 낮은 주파수를 가지도록 하였다. 세 축 방향으로 입사되는 레이저 빔의 출력은 각각 약 10 mW이며, 빔의 직경은 약 1 cm 이다. 이때 리펄핑 레이저 빔은 x 축과 y 축 방향에서 포획용 레이저와 합쳐지도록 하였으며, 총 출력은 약 3 mW이다.

편광 기울기 냉각을 하기 위해서는 레이저의 주파수를 세슘원자의 흡수선 ($F=4 \rightarrow F'=5$) 보다 약 50 MHz 낮은 주파수로 이동시켜야 하는데, 이를 위하여 세슘셀에 코일을 감아 흡수선을 Zeeman 이동시키는 방법을 사용하였다. 광음향 변조기에 입력되는 RF 신호의 세기를 변화시켜 레이저 빔의 세기를 조절하였고, 편광 셔터를 이용하여 레이저 빔을 차단하였다.

TOF 실험을 통하여 측정된 광자기 트랩 (MOT)에 포획된 원자구름의 온도는 약 42 μK 이었다. 이때 트랩을 끄는 순간의 원자구름은 가우시안 분포를, 원자구름의 속도는 맥스웰 분포를 가진다고 가정하였다. 트랩 위치에서 밑으로 약 2.4 cm 떨어진 지점과 약 18.4 cm 떨어진 지점에서 각각 TOF 신호를 측정 후 원자구름의 온도를 구하였는데, 측정된 온도는 모두 약 42 μK 으로 같은 결과를 얻었다.

편광 기울기 냉각 실험을 위하여 레이저 주파수 이동, 레이저 빔의 세기 조절, anti-Helmholtz 코일의 전류 조절, 그리고 형광신호의 관측 등의 순서대로 자동적으로 동작하는 장치를 제작하였다. 그림 2는 편광 기울기 냉각된 원자구름에서 얻은 TOF 신호인데 온도는 약 $6.5 \mu\text{K}$ 으로 측정되었다.

[참고문헌]

1. A. Clairon, P. Laurent, G. Santarelli, S. Ghezali, S.N. Lea, and M. Bahoura, " A Cesium Fountain Frequency Standard: Preliminary Results", IEEE Trans. Instru. Meas. 44, 128-131 (1995).
2. Shin-ichi Ohshima, Takayuki Kurosu, Takeshi Ikegami, and Yasuhiro Nakadan, "Cesium Atomic Fountain with Two-Dimensional Molasses", Jpn. J. Appl. Phys. 34, L1170-L1173 (1995).

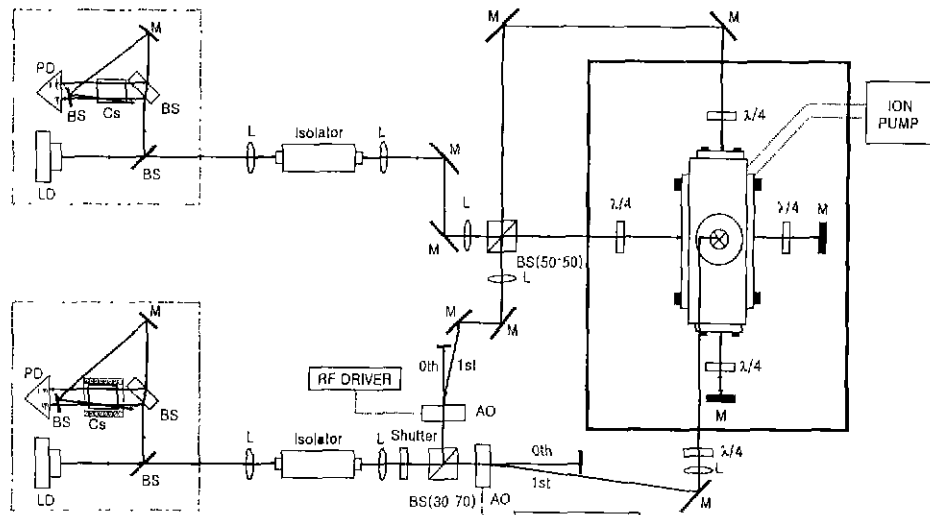


그림 1. 세슘원자분수 실험을 위한 레이저 시스템의 개략도.

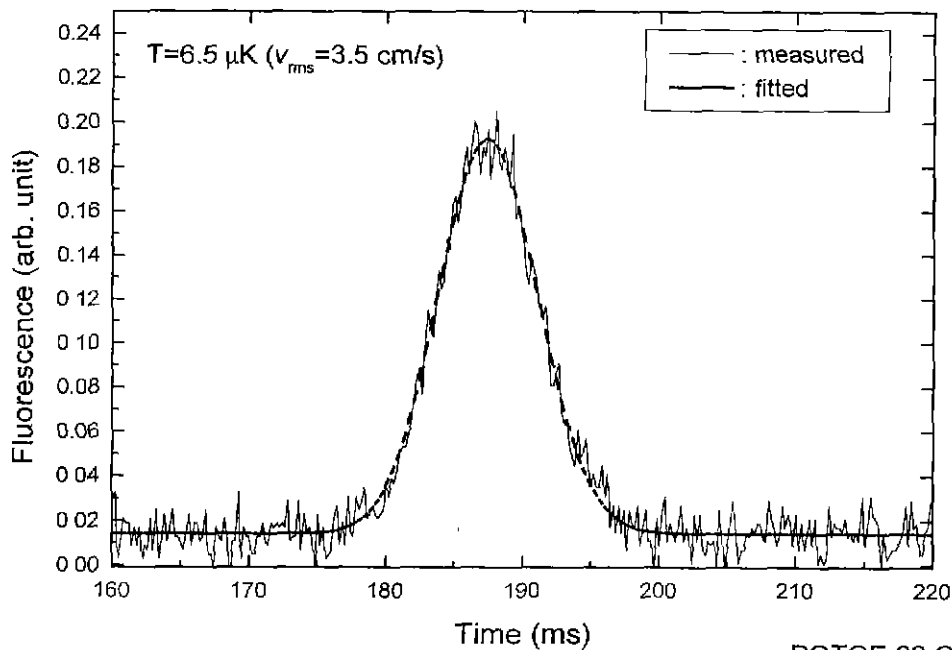


그림 2. 편광 기울기 냉각된 원자의 TOF 신호.

PGTOF-02.OPJ