

## 광시계 연구를 위한 Yb 원자의 자기광포획

박창용, 염진용, 윤태현

한국표준과학연구원 광주파수제어연구단

cypark@kriss.re.kr

모드락된 펄스 초 레이저와 미세구조 광섬유의 비선형 효과에 의해 만들어 지는 supercontinuum의 광빗살(comb)을 이용하면 기존 마이크로파 기반의 시간 표준과 레이저 주파수를 기반으로 하는 길이표준의 통합 및 불확도 개선이 가능하기 때문에 이를 이용한 광주파수 합성기/측정기, 광시계 등에 대한 연구가 각국의 표준연구기관에서 경쟁적으로 이루어지고 있다<sup>(1)</sup>. 광시계는 광주파수 합성/측정기의 역과정으로 매우 좁은 선폭의 광천이선에 주파수 안정화된 광주파수표준 레이저로 펄스초 레이저의 supercontinuum의 광빗살(comb)을 안정화하여 매우 높은 불확도를 가진 광 펄스와 RF 신호(clock 신호)를 만들어 내는 것을 말한다. 광주파수 표준 레이저의 절대 주파수 기준(clock transition)으로는 Ca, Sr, Yb, Ag 등이 가지고 있는 좁은 선폭을 가진 전이선 들이 주목받고 있다. 이들 원자의 특징은 최외곽 전자가 두 개인 원자 시스템으로 단일항과 삼중항으로 이루어진 에너지 구조를 하고 있다. 일반적으로 단일항과 삼중항 사이의 전기 쌍극자 전이(intercombination 전이)는 선택규칙에 의해 금지되어 있지만 이들 원자에서는 이 선택규칙이 잘 지켜지지 않으며 이런 intercombination 전이들 중 일부는 선폭이 매우 좁아서 ( 선폭 < 1Hz, Q factor ( $f/\Delta f$ ) =  $10^{15-18}$ ) 절대 주파수 기준으로서 매우 좋은 조건을 가지고 있다. 우리는  $^{171}\text{Yb}$ 의  $6^1\text{S}_0 F=1/2 \rightarrow 6^3\text{P}_0 F=1/2$  전이선을 절대 주파수 기준(clock transition line)으로 하기 위한 연구를 하고 있으며 이 전이선(선폭 40 mHz)은 Q factor가  $10^{16}$ 에 이르므로 이 숫자만 보았을 때 이상적인 조건이라면 기존의 세슘 시계의 불확도( $\sim 10^{-15}$ )를 넘어서는 광시계(all optical clock)를 만들 수 있을 것이다.

그러나 실제 실험에서는 항상 Doppler broadening, Zeeman splitting, ac Stark shift, 그리고 collisional broadening 등과 같은 불확도 요소들이 끼어들게 된다. 이런 불확도 요소 중에서 가장 큰 요소는 Doppler broadening(수백 MHz)에 의한 것이다. 이를 제거하기 위해서는 laser cooling & trapping 방법을 이용할 수 있지만 이런 극저온에서도 recoil 이동(수 kHz)에 의한 불확실성이 여전히 남아있다. 이를 해결하는 가장 현실성 있는 방법으로 주목되고 있는 것은 결맞는 두 레이저의 간섭으로 만들어진 microscopic 포텐셜 우물에 전기쌍극자 힘을 이용하여 원자를 array의 형태로 가둔 optical lattice에서 분광 신호를 측정하는 것이다. 이때 간섭무늬의 폭은 레이저 파장의 반이므로 lattice 광선이 만들어내는 포텐셜 우물의 폭은 sub-micron의 작은 크기가 된다. 만일 원자를 가두는 우물의 폭이 원자가 흡수하는 광선의 반파장보다 짧아지면(Lamb-Dicke regime) 원자는 광자의 운동량을 자신이 전달 받지 않은 채로 광자를 흡수할 확률이 증가한다(Dicke narrowing). 이러한 현상은 원자의 초정밀 스펙트럼 관측에서 문제가 되는 recoil 이동을 없앨 수 있는 것을 의미한다.

Yb 원자의 optical lattice를 구현하기 위한 첫 단계로 Yb 원자의 자기광포획(MOT)<sup>(2,3)</sup>을 시도하였다.  $6^1\text{S}_0 \leftrightarrow 6^1\text{P}_1$  전이선은 Yb 원자를 자기광포획하기에 매우 효율적인 전이선이다. 이 전이선의 자연 선폭은 28 MHz로 매우 빠르고 파장이 짧아(399 nm) 단위 광자 당 운동량 ( $\hbar k$ ) 전달이 크기 때문에 Yb 이 무거운 원자 입에도 불구하고 충분한 마찰력을 낼 수 있다. 자기광포획에 필요한 레이저는 회절격자에 의한 되먹임 방식으로 선폭 축소 및 파장 조절을

하는 다이오드 레이저를 인젝션 락 방식으로 증폭하여 얻었으며 MOT에 공급할 저속의 Yb 원자들은 390 °C의 oven에서 나오는 빠른 원자빔을 같은 399 nm 전이선을 이용한 감속 레이저로 감속시켜 공급하였다.

우리는 Yb의 7 개 동위 원소 중에서 5 개의 동위 원소를 포획하는데 성공하였다. 포획된 원자의 개수는 포획원자의 형광의 세기를 photo multiply tube (PMT)를 이용하여 측정하였다. MOT의 온도는 포획된 원자를 일정 시간 동안 포획 광선이 없는 상태에서 열적 팽창 하게 두었다가 포획 광선을 다시 가할 때 일정 부피 안에 잔존하고 있는 원자의 수를 원래 있었던 원자의 수와 비교하는 방법으로(release & recapture method) 온도를 추정하였다. 포획된 원자의 수와 측정된 온도 그리고 MOT의 time constant 특성을 표 1에 종합하였다.

Isotope	NA(%)	TN	TN/NA (relative)	T(mK)	MOT Loading time	MOT Decay time
170	3.1	$7.0 \times 10^5$	2.3	1.0	0.8	0.5
171	14.3	$1.4 \times 10^6$	1	0.7	0.7	0.6
172	21.9	$3.2 \times 10^6$	1.5	0.7	0.5	0.9
174	3108	$4.9 \times 10^6$	1.5	0.7	0.4	1.0
176	12.7	$2.8 \times 10^6$	2.2	0.7	1.0	0.9

표 3 NA: natural abundance, TN: trapped atom number, T: MOT temperature

전체적으로 우리의 자기광포획 장치는 포획량과 온도에서 optical lattice로 가기 위한 충분한 조건을 갖추지 못했다. Optical lattice의 포텐셜의 깊이에 비해 MOT 온도가(0.7 mK) 너무 높기 때문에 MOT에서 optical lattice로의 전환효율이 매우 나빠질 것이다. MOT 온도를 더 낮추기 위해서는 선폭이 182 kHz이며 도플러 온도 한계가 4  $\mu$ K 인  $^1S_0$  와  $^3P_1$  사이의 intercombination 전이선을 포획 광선으로 이용하는 방법이 있다. 그러나 이 전이선은 작은 선폭으로 인해 포획 가능한 원자의 속도 범위(capture range)가 짧아서 포획량이 작아지는 단점이 있다. 그러므로 399 nm 포획 레이저를 dark spot MOT으로 만들고 여기에 556 nm 포획 광선을 오버랩 시키는 것을 생각할 수 있는데, 399 nm 광선의 강력한 냉각 및 포획 능력을 이용하여 우선 많은 양의 Yb 원자를 채집하고 이 광선의 dark spot 부분에서 556 nm 광선이 채집된 원자의 온도를 수  $\mu$ K 까지 끌어내려 이곳에서 optical lattice로의 전환을 일으킨다면 포획된 원자의 수를 줄이지 않고도 optical lattice로의 높은 전환 효율을 얻을 것으로 기대된다.

결론적으로 우리는 모드락 된 펄스 레이저와 Yb optical lattice를 이용한 광시계 연구를 위한 첫 단계 실험으로써 Yb 원자를  $6^1S_0 \leftrightarrow 6^1P_1$  전이선을 이용하여 자기광포획하였으며 포획된 원자수와 온도 그리고 time constant 등 optical lattice 연구에 필요한 특성들을 조사하였다.

본 연구는 과학기술부 창의적연구과제를 통한 지원으로 이루어졌다.

참고문헌

1. D. J. Cundiff, S. A. Diddams, J. K. Ranka, A. Stentz, R. S. Windeler, J. L. Hall, S. T. Cudiff, Science. 28, 635-639 (2000).
2. K. Honda, Y. Takahashi, T. Kuwamoto, M. Hujimoto, K. Ishikwa, and T. Yabuzaki, Phys. Rev. A 60, R745-R748 (1999)
3. Chang Yong Park and Tai Hyun Yoon, Phys. Rev. A 68, 055401 (2003)