레이저 냉각된 세슘원자빔의 분리

Splitting of laser-cooled Cesium atomic beam

문한섭* . 김중복* . 박상언** . 조혁** . 권택용*** . 양성훈*** . 이호성***
*한국교원대학교 물리교육과, **충남대학교 물리학과, ***한국표준과학연구원 시간주파수 그룹
lovemhs@kriss.re.kr

중성 원자의 냉각 및 포획 그리고 원자빔의 조작이 가능해지면서 원자의 물질파를 이용한 원자간섭계에 대한 연구가 국내외에서 활발해지고 있다. 이것은 원자간섭계가 중력 및 회전에 대한 초정밀 측정 등이 가능하고, 응용 범위가 다양하기 때문이다. 원자간섭계를 구성하기 위해서 원자를 조작할 수 있는 원자 광학 소자 즉, 거울, 렌즈, 원자빔 분리기에 대한 연구가 선행되어야한다. 그러나, 원자간섭계는 전자나 중성자를 이용한 물질파 간섭계와는 달리 원자의 내부상태(atomic internal state)를 가지고 있기 때문에 소자를 제작하는 방법에 근본적인 차이가 있다[1].

특히, 원자간섭계에서 고대비 간섭신호를 얻기 위해서는 원자 광학 소자와 원자가 결맞는 상호작용을 해야하고, 간섭계에서 원자의 분리가 잘 되어야한다. 최근, 원자 결맞음을 유지하는 원자 광학 소자 개발을 위해 다음과 같은 몇 가지 방법이 연구되었다. (1) 한 방향으로 진행하는 레이저나 양방향으로 진행하는 정상파에 의해 바닥준위에서 준안정 여기준위로 전이하는 단일광자 여기를 이용하여 원자빔 분리기를 실현시킬 수 있었다. (2) $\hbar\vec{k_1}$ 와 $\hbar\vec{k_2}$의 운동량을 가진 두 레이저광에 의해서 유도되는 바닥준위들 사이에서의 Raman 전이는 원자에 두 레이저광의 운동량 차이 $\hbar(\vec{k_1}-\vec{k_2})$에 해당하는 운동량을 전달할 수 있고, 이를 이용한 원자 광학 소자가 개발되었다. (3) 두 레이저광을 이용한 단열적 전이 방법(adiabatic transfer method)[2]이 있는데, 이 방법 역시 두 레이저광의 운동량 차이 $\hbar(\vec{k_1}-\vec{k_2})$를 원자에 전달하여 원자거울을 만들 수 있다. (4) Dark 공진 방법은 광자의 되튀김 운동량(recoil momentum)보다 좁은 운동량 분포 폭을 가지고, $2\hbar\vec{k}$의 차이를 가진 운동량 상태의 결맞음 중첩에 의한 원자빔 분리기가 연구되었다. (5) 두 레이저의 어긋남 주파수가 바닥준위들 사이에서의 Raman 전이를 최적으로 일으키도록 조절함으로써 고효율의 원자 광학 소자를 개발을 제안된 최적주파수 편이법 (Optimal detuning method)[3]이 있다.

본 논문에서는 고대비 원자간섭을 일으키기 위해서 단열적 전이 방법과 최적 주파수 편이법을 이용한 결맞음 원자 광학 소자에 대한 연구에 대해서 보고한다. 본 연구에서는 그림 1과 같이 세슘원자를 모형화한 5준위 원자계에서 최적 주파수 편이법에 대한 이론적인 연구를 하였으며, 이를 근거로 저속 세슘원자빔에서 원자 광학 소자인 원자빔 분리기와 거울을 만드는 연구를 수행하고 있다.

Cs 원자는 핵 스핀 양자수 I=7/2로 바닥상태 $6^2S_{1/2}$ 에는 F=3과 4의 두 초미세 준위가 있고, D_2 전이선의 여기준위 $^2P_{3/2}$ 에는 F′=2, 3, 4, 5의 초미세 준위들이 있다. 결맞음 원자 광학 소자를 만들기 위해서 Cs 원자들은 광펌핑으로 바닥준위 F=4의 자기부준위 m_F=+4(또는 m_F=-4)에 모은다. 이 때, F=4에서 F′=5로 전이하는 σ^+와 σ^- 편광된 두 레이저를 사용하여 단열적 전이 방법과 최적 주파수 편이법에 의해서 원자들 확률의 분포는 m_F=-4로 전이하게 되고, 이 때, 원자들은 $8\hbar k$의 운동량을 전달받게된다.

3준위 원자계에서 최적 주파수 편이법은 이광자공명 조건하에서의 회전파 근사된 헤밀토니안으로부

터 최적 주파수 편이를 다음과 같이 얻을 수 있다.

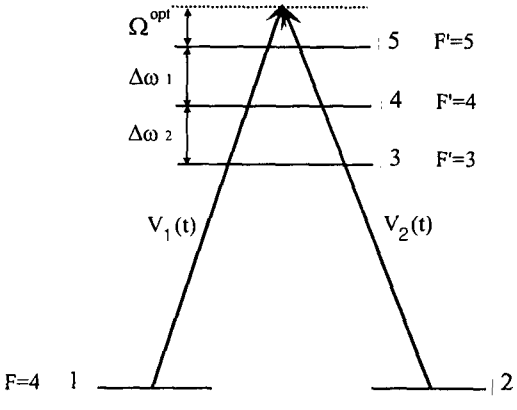
$$\Omega_{3level} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{V(t')^2}{2\pi}\, dt' \tag{1}$$

여기서, Ω_{3level}는 완전 밀도 전이를 위한 최적 주파수 편이이고, V(t)는 원자와 상호작용하는 두 레이저의 Rabi 주파수이다. 그러나, 실제 Cs 원자의 준위는 인접한 다른 초미세 준위들 때문에 상호작용하는 원자계를 3준위계로 완전히 설명될 수 없다. 그래서 우리는 그림 1과 같이 레이저와 상호작용할 수 있는 다른 초미세준위들을 고려한 5준위 원자계에서 완전 밀도 전이를 위한 최적 주파수 편이를 회전파 근사된 헤밀토니안으로부터 계산한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

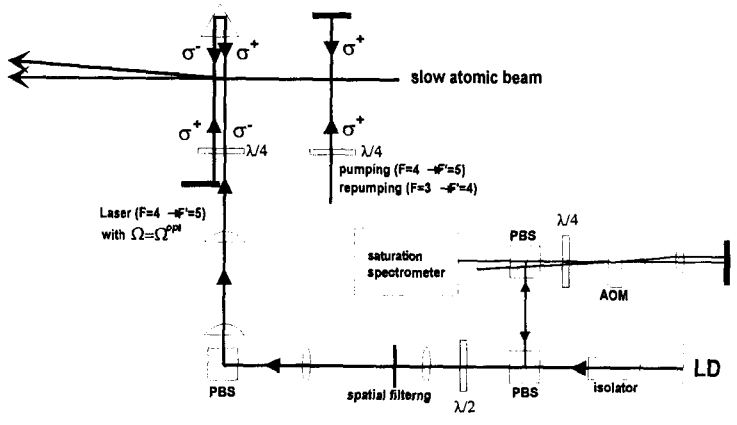
$$\frac{1}{\Omega_{3level}} = \frac{1}{\Omega^{opt}} + \frac{1}{\Omega^{opt} + \Delta\omega_1} + \frac{1}{\Omega^{opt} + \Delta\omega_2} \tag{2}$$

여기서, Ω_{3level}은 3준위 원자계에서의 최적 주파수 편이값이고, $\Delta\omega_1$, $\Delta\omega_2$는 F′=5와 F′=4 그리고 F′=3 사이의 주파수 차이이며, Ω^{opt}는 F′=5에서부터의 주파수 편이값으로 완전 밀도 전이를 얻을 수 있는 최적 주파수 편이값이다. 식 (2)는 전기에서 저항의 병렬연결과 같은 형태를 가지고 있다. 또한 Optical Bloch 방정식을 이용하여 여기준위의 자발방출을 고려했을 때, 3준위 원자계보다 5준위 원자계에서 자발방출에 의한 loss가 줄어드는 것을 알 수 있었다. 이것은 3준위 원자계에서 얻어진 주파수 편이값보다 5준위 원자계에서의 최적 주파수 편이값이 크게 나타나기 때문에 단일 광자 전이 효과가 줄어든다는 것으로 이해된다.

이러한 이론적인 결과를 이용하여 원자 광학 소자 개발에 필요한 실험을 그림 2와 같은 실험장치에서 수행하고 있다. 초기에 열 원자빔 상태의 Cs는 저속에 좁은 속도폭을 가진 원자빔으로 만들었고, 슬릿을 사용해서 원자빔 공간적인 분포폭을 좁혔다. 통과된 원자빔은 펌핑과 재펌핑광을 사용해서 원자들



[그림 1] 5준위 원자계의 도식도



[그림 2] 저속 세슘원자빔 분리를 위한 실험장치도

을 F=4의 자기 부준위 m_F=+4에 모은 후,
단열적 전이법과 최적주파수 편이법을 이용한 원자빔 분리기와 거울에 대한 실험연구를 수행하고 있다.

[1] Paul R. Berman *Atom interferometry* (Academic PRI, London) 1997.
[2] P. D, Featonby *et al*, Phys. Rev. A **53**, 373 (1996).
[3] A. S. Choe, Y. Rhee, J. Lee and P. S. Han, S. K. Borisov, M. A. Kuzmina and V. A. Mishin, Phys. Rev. A **52**, 382 (1995).