

전자기파 유도 투과 현상에서의 충돌효과

Collisional effect in electromagnetically induced transparency

김경대 · 문한섭 · 김봉수 · 김현아 · 김중복
한국교원대학교 물리교육과
narin@cc-sun.knue.ac.kr

국내외에서 원자 결맞음과 양자 간섭으로 설명할 수 있는 흥미로운 현상들에 대한 많은 연구들이 보고되고 있다. 전자기파 유도투과 현상(electromagnetically induced transparency : EIT)^[1]은 그러한 현상들 중 한가지이다. EIT는 공통 에너지 준위를 갖는 강한 결합광과 약한 조사광이 함께 원자에 입사했을 때, 조사광이 원자의 공진 주파수라도 원자에 의해 흡수되지 않고 투과하는 현상이다. 전자기파 유도투과 현상은 알려진 것처럼 원자에너지 준위사이의 결맞음성(atomic coherence)으로 인하여 발생하며 조사광의 상쇄간섭의 결과라고 볼 수 있다^[2]. 이 때 매질은 공진 주파수에서 굴절률 변화가 크면서도 흡수가 없는 특성을 나타낸다. 이러한 특성으로 인해서 공진 주파수에서 굴절률변화를 이용한 고굴절률 매질 생성, 고감도 자기장 측정장치, 밀도반전 없는 레이저(LWI), 양자 잡음 제거와 같은 다양한 응용이 가능하다. 그리고, EIT에 기초한 결맞음 밀도 포획(coherent population trapping : CPT)은 원자와 광자의 상호작용을 dressed picture에 의해서 기술할 때, 광자와 상호 작용할 수 없는 상태로 원자밀도가 분포하게되어 광자와 상호작용 없이 계속 그 상태에 남아 있는 현상이다.

EIT는 Harris와 Scully등에 의해서 이론적으로 연구된 이후, 3준위 원자계를 모형으로 사다리 형, Λ 형 그리고 V 형에서 연구가 이뤄졌다. 대부분의 Λ 형 EIT실험[3]은 서로 수직하게 선편광된 결합광과 조사광을 사용하여 같은 방향으로 진행하도록 중첩시킨 다음, 원자가 들어있는 셀로 입사시키고, 통과된 광 중에서 결합광 성분을 편광기를 이용해서 분리하고 조사광의 투과 정도를 측정함으로써 이루어졌다.

본 연구에서도 Λ 형 EIT실험을 수행했으며 ^{87}Rb 원자의 D_1 선에 약한 외부 자기장을 가하여 양자축을 결정하고 이 때 Rb 셀의 온도를 변화시켜줌으로써 셀 속에 들어있는 원자들의 충돌 효과에 따른 EIT 신호를 관찰하였다.

그림 1은 실험 장치의 구성을 보여주고 있다. 파장이 794nm 부근에서 발진하는 두 대의 파장 가변형 연속 발진 반도체 레이저를 사용하여 하나는 결합광으로 다른 하나는 조사광으로 사용하였다. 또, 편광광분리기(PBS)를 사용하여 두 광을 수직인 편광상태로 Rb셀로 입사하였다. 조사광으로 사용하는 레이저(model : ML64116R-01, 출력 30 mW)는 직경 1mm인 조리개와 ND 필터를 사용하여 2.8 μW 단일모드로 발진하는 레이저이다. 결합 레이저(model : LGD794100SP, 출력 100 mW)는 직경이 2mm이고 최종 출력이 2.7 mW이다. 결합광의 출력 세기를 조절하기 위해서 ND 필터를 사용하였고, 길이가 10 cm 인 Rb 셀을 사용하였다. 그리고, Rb 원자의 양자축을 결정하기 위하여 세 쌍의 헬륨홀츠 코일을 수직으로 설치하였고 지자장에 의한 효과를 보정하였다. 또한 전자기 유도투과 현상에서 결합광의 세기가 공간적으로 차이가 있어 EIF(electromagnetically induced focusing)가 발생하여 조사광에서 focusing과 defocusing에 의한 효과를 피하도록 Rb 셀을 투과한 레이저광이 검출기 앞에서 렌즈를 지나게 하였다.

Rb 셀의 온도를 변화시키고 측정하기 위해서 셀의 표면에 서미스터를 부착하고 온도를 측정하였다. 그림 2는 ^{87}Rb 의 D_1 선에서 결합광이 $F=2$ 에서 $F'=2$ 로 전이하고, 조사광이 $F=1$ 에서 $F'=2$ 로 전이할 때 셀의 온도변화에 따른 조사광의 EIT 신호를 보여준다. 그림 2(a)는 셀의 온도가 가장 높은 경우이며 단위시간당 충돌이 가장 많을 때의 EIT 신호이고 그림 2(b)는 실온인 경우로 충돌이 평균적인 것으로 볼 수 있다. 또 그림 2(c)는 셀의 온도가 가장 낮을 때이며 원자들간 충돌이 적은 경우이다. 그림 2(b)의 EIT 신호를 기준으로 볼 때, 고온일 때는 충돌효과가 크므로 전자기 유도투과가 감소하고, 저온인 경우

에는 충돌효과가 작으므로 전자기 유도투과가 증가하는 것을 관찰했다. 그리고 그림 2에서 고온의 경우 흡수 신호가 저온인 경우보다 더 크게 나타난다. 이것은 온도가 증가하면 분자들의 운동이 빨라지므로 Rb 셀 내의 상대적인 기체 밀도가 증가하기 때문이다. 또, Λ 형 3 level 원자계를 모형으로 한 이론에서 얻어지는 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

결론적으로 Rb 셀의 온도변화로 인한 EIT에서의 충돌효과를 실험으로 관찰했으며 이론 모형과 비교하였다. 그 결과는 충돌에 의해 원자 결맞음이 줄어드는 것을 알 수 있었고 이것은 이론적 예상과 잘 일치하였다.

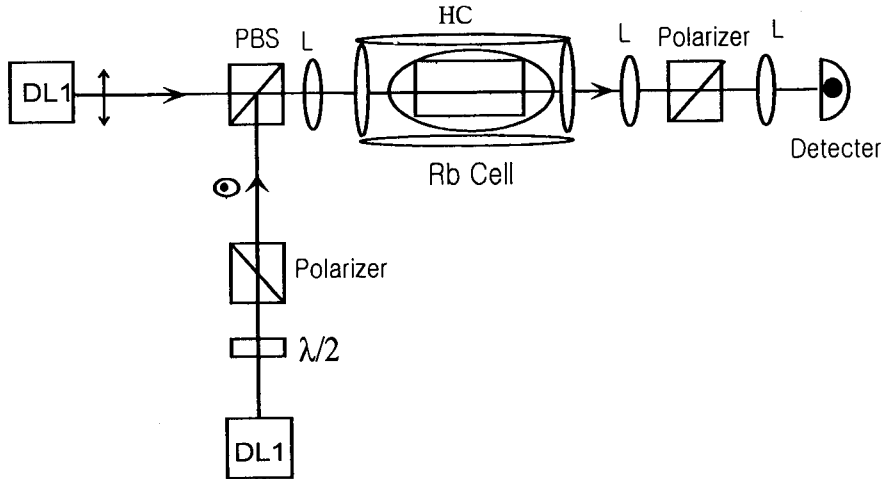


그림 1. 실험 장치의 구성

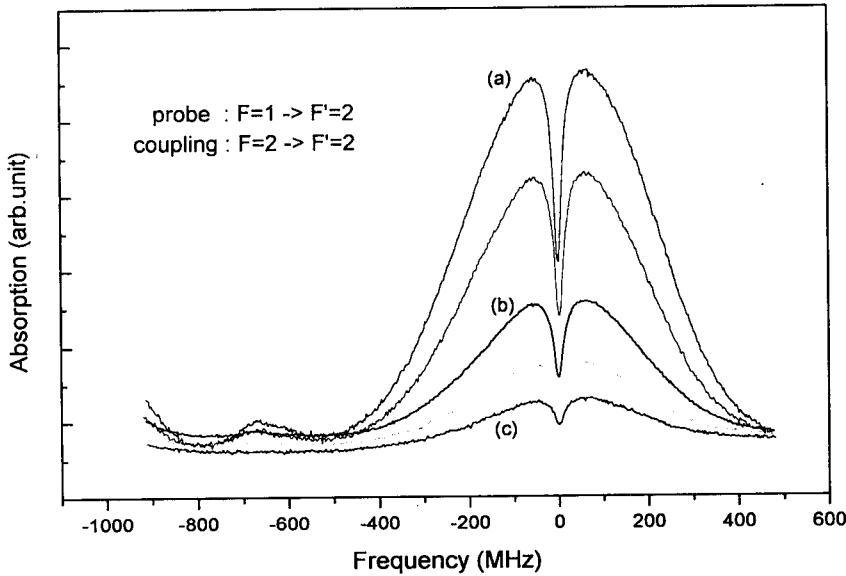


그림 2. 충돌효과에 의한 EIT 신호

[1] S. E. Harris, Phys. Today 50(7), 36 (1997)
 [2] M. Xiao, Phys. Rev. Lett. 74, 666 (1995)
 [3] Y. Li and M. Xiao, Phys. Rev. A 51, R2703 (1995)

