

Rb-87 원자 D1선에서의 밀도 반전 없는 증폭 Amplification without inversion in Rb-87 D1-line

문한섭 · 최용수 · 김봉수 · 김현아 · 김중복
 한국교원대학교 물리교육과
 최안성* · 이종민*
 한국원자력연구소 양자광학실*
 lovemhs@kriss.re.kr

최근에 레이저광들에 의한 3준위 원자계의 비선형효과들은 이론과 실험을 통해서 다양하게 연구되어졌다. 특히, coherent population trapping(CPT)이 관찰된 이후에 전자기파 유도 투과(EIT : electromagnetic induced transparency)에 대하여 많은 연구가 이루어졌으며, 여기에 비결맞음 펌핑을 이용하여 밀도 반전 없는 증폭(AWI : amplification without inversion)이 연구되었다. 최근에 Rb 원자에서 V형태^[1]와 A형태^[2]의 AWI를 얻었으며, 이러한 현상들은 dressed state상에서 숨겨진 밀도 반전현상이 존재함으로써 일어나는 것으로 알려졌다. 또한 이 현상은 가능한 흡수 및 방출과정에서의 양자간섭으로 이해되어질 수 있다. 본 연구에서는 다중모드로 동작하는 펌핑광을 사용해서 그림1에서 보는 것과 같은, 4준위 A 형태의 ⁸⁷Rb 원자의 D1 선에서의 AWI현상을 실험적으로 관찰하고, 펌핑광의 세기, 결합광의 세기와 주파수편이(detuning)에 대한 이득(gain)을 연구하였다.

그림 1과 같이 $|2\rangle$ 에서 $|3\rangle$ 로 강한 결합광이 걸릴 때, 원자에 의한 $|1\rangle$ 와 $|3\rangle$ 에 공명하는 약한 조사광의 흡수는 두 바닥준위의 원자의 결맞음으로 인해 줄어든다. 최근에 이러한 Rb원자에서 A형태의 전자기파 유도 투과 현상에 대한 연구가 이루어졌다^[3]. EIT의 경우는 강한 결합광에 의해서 $|2\rangle$ 에 있는 대부분의 원자들이 광펌핑효과로 인해 $|1\rangle$ 로 전이된다. 그러나, 작지만 $|2\rangle$ 에 남아있는 원자들 때문에 두 바닥준위 사이의 결맞음 ρ_{12} 가 존재하게 되며, 이 ρ_{12} 에 의해서 조사광이 투과하게 된다. 이러한 EIT조건 아래서 비결맞음 펌핑에 의해서 원자들이 다시 $|2\rangle$ 나 $|3\rangle$ 으로 펌핑이 된다면, $|1\rangle$ 과 $|3\rangle$ 사이에 밀도 반전이 없어도 조사광의 증폭(amplification)이 일어날 수 있다.

정상 상태 광증폭(AWI)은 비결맞음 펌핑(incoherent pumping)에 의한 확률밀도 ρ_{33} 의 증가(ρ_{11} 은 감소됨)와 이광자 결맞음(coherence) ρ_{12} 효과에 의해 일어난다. 이득(gain) G는 밀도 행렬 요소

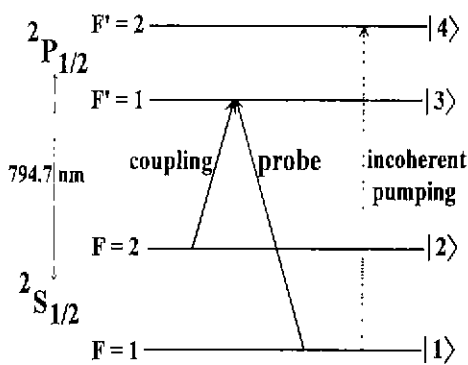


그림 1 ⁸⁷Rb D1선의 전이선

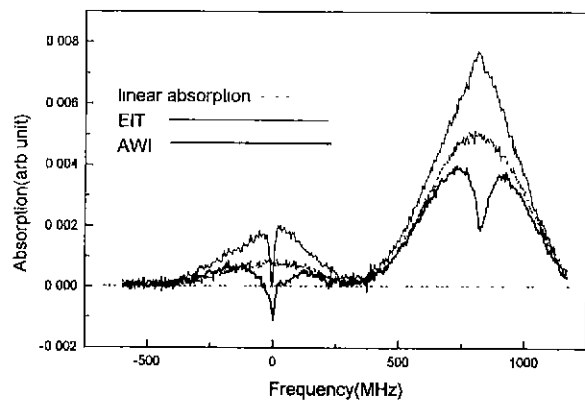


그림 2 밀도 반전 없는 증폭 신호

$Im \rho_{13}$ 에 의해 주어지고, $G = \gamma_{31} Im[\frac{\rho_{13}}{g}]$ 로 표현 될 수 있으며^[4], 결합광이 조사광에 비해 충분히 강하다고 하면, 즉, $\Omega \gg g$ 이면 $|2\rangle$ 준위의 원자 대부분은 $|1\rangle$ 준위로 펌핑되어 각 준위들의 밀도 분포는 $\rho_{11} = \frac{\Lambda + \gamma_{31} + \gamma_{41}}{4\Lambda + \gamma_{31} + \gamma_{41}} \rho_{22} = \rho_{33} = \rho_{44} = \frac{\Lambda}{4\Lambda + \gamma_{31} + \gamma_{41}}$ 근사할 수 있고, 정상 상태 조건하에 서의 블로흐 공식으로부터 밀도행렬 성분 $Im \rho_{13}$ 를 얻을 수 있다. 여기서 $\gamma_j (j=1-4)$ 는 소멸율, $\Omega(g)$ 는 결합광 (조사광)의 라비 진동수, Λ 는 비결맞음 펌핑률이다.

AWI 실험장치에서는 Λ 형태의 EIT현상에 대한 실험장치^[3]에서 펌핑광을 조사광과 결합광에 대하여 10° 어긋난 반대방향으로 입사시켰다. 사용한 레이저들은 외부공진기(Littman형과 Littrow형)를 이용하여 제작되었다. 조사광으로 사용하는 레이저(model : ML64116R-01, 출력 30 mW)는 직경 1mm인 aperture와 ND filter를 사용하여 2.8 μ W 단일모드로 발진하는 레이저이다. 결합 레이저(model : LGD794100SP, 출력 100 mW)는 직경이 2mm이고 최종 출력이 20 mW이다. 결합의 출력의 세기를 조절하기 위해서 $\lambda/2$ 위상지연기와 편광기를 사용했다. 일반적으로 외부공진기가 형성된 레이저의 경우는 단일모드에 선풍이 축소된 광을 얻을 수 있으나, 외부공진기를 어긋난 정렬을 함으로써 다중모드 상태로 발진하는 비결맞음 펌핑광을 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 실온에서 길이가 10 cm 인 Rb cell을 사용하였으며, 외부 자기장을 차폐하기 위해서 μ -meter로 cell을 감쌌다.

결합광은 $F=2 \rightarrow F'=1$ 로, 조사광은 $F=1 \rightarrow F'=1,2$ 로 공진하고, 각 레이저의 출력이 20 mW, 2.8 μ W인 조건에서 전형적인 EIT 결과를 얻었다. 이것은 그림2의 가는 실선과 같다. 이때 공진주파수($F=1 \rightarrow F'=1$)를 벗어난 곳에서 선풍수보다 큰 흡수가 있으며, 이것은 결합에 의한 광펌핑 효과에 의해서 $F=1$ 로 원자들 펌핑이 일어났기 때문이다. EIT와 같은 조건 아래에서 $F=1 \rightarrow F'=2$ 의 비결맞음 펌핑이 가해졌을 때, 그림 2의 짙은 실선과 같은 AWI 현상을 관찰할 수 있었다. 이때 펌핑광의 출력은 9.4 mW이다. 여기서 EIT현상에서 나타난 결합광에 의해 증가된 흡수는 펌핑광에 의해서 다른 준위로의 펌핑이 일어나기 때문에 흡수가 전체적으로 줄어서 dip이 나타난다. 그리고 $F=1$ 에서 $F'=1$ 공진된 부분에서 Doppler 효과가 제거된 신호가 나타나고, 여기에서 흡수가 0 이하로 내려간 조사광의 증폭 신호를 얻을 수 있다. 그림 2에 나타난 AWI 신호로부터 조사광의 이득(gain)이 1.9 %라는 것을 알 수 있었다.

우리는 AWI에서 나타나는 이득(gain)의 정도는 펌핑광의 세기, 결합광의 세기, 및 주파수 편이에 따라서 조사하고, Zeeman 부준위를 포함하지 않은 그림 1과 같은 간단한 4준위 원자계에서 이론적인 분석을 할 수 있었다. 펌핑광의 세기가 이득에 주는 영향으로서 광의 세기가 강할수록 이득이 증가하는 것을 실험결과를 통해서 알 수 있었다. 그러나 광의 세기가 증가할수록 이득의 증가폭은 줄어드는 경향을 보였다. 즉 펌핑의 세기가 어느 정도 이상이 되면 더 이상 이득은 증가하지 않을 것을 예상할 수 있다. 결합광의 세기와 주파수 편이에 대한 효과로서 결합의 세기가 클수록 이득이 증가하고, 주파수 편이가 작을수록 이득이 증가한다는 것을 알 수 있었다. 이러한 실험결과는 이론적인 결과와 일치하였다.

우리는 ^{87}Rb 원자 D1-line에서 Λ 형태의 확률밀도 반전 현상을 조사하였다. 대부분의 연구에서 비결맞음 펌핑을 위해서 다른 전이선(D2-line)사용하고 있는데, 본 연구에서는 다중모드로 발진하는 펌핑광을 D1-선에서 비결맞음 펌핑하여 AWI를 관찰할 수 있었으며, 본 연구에서 얻은 최대 이득은 1.9% 였다. 그리고, 이득을 펌핑광의 세기와 결합광의 세기 및 주파수 편이에 따라서 조사하였고, 이 결과를 이론과 비교하였다. 확률밀도반전 없는 증폭에 대한 연구는 이광자 결맞음과 관련된 비선형효과의 이해에 도움이 될 것이다.

- [1] A. S. Zibrov, M. D. Lukin, D. E. Nikonov, M. O. Scully, V. L. Velichansky, and H. G. Robinson, Phys. Rev. Lett. **75**, 1499 (1995).
- [2] Y. Zhu and J. Lin, Phys. Rev. A **53**, 1767 (1996).
- [3] H. A. Kim, K. A. Kim and J. B. Kim, JKPS **30**, 407 (1997).
- [4] Gautam Vemuri and Donald M. Wood **50**, 741 (1994)

