

밀도행렬방정식을 이용한 5-준위 원자에서의 전자기 유도 흡수

Electromagnetic Induced Absorption in 5-level Atom using Density Matrix Equation

권미량, 문한섭, 김정대, 박현덕, 김중복
한국교원대학교 물리교육과
kmr0811@edunet4u.net

원자와 빛의 결맞음 효과로서 나타나는 많은 흥미로운 현상들 중에서 전자기과 유도 투과(Electromagnetic Induced Transparency ; EIT)는 원자가 공진주파수를 가진 레이저와 상호작용하였을 때, 광자를 흡수하지 않고 투과하는 현상으로서, 주로 3준위 구도에서 연구되어왔다. 그러나 최근 축퇴된 2준위 구도에서 원자와 빛의 결맞음 효과가 연구되면서 EIT와 정반대의 현상인 전자기 유도 흡수(Electromagnetic Induced Absorption ; EIA)의 관측이 보고되었고 그것과 연관된 물리적 특성들의 연구가 시도되고 있다.

지금까지 알려진 바로는 전자기 유도흡수는 다음의 조건⁽¹⁾이 만족되어야 한다. 첫째, 에너지 준위는 축퇴된 상태이어야 한다. 둘째, 닫힌 계이어야 한다. 셋째 여기준위의 총각운동량이 바닥준위의 총각운동량 보다 커야한다. 이런 조건 아래에서 여기준위의 결맞음 자발방출이 바닥준위로 전달되는 것이 반드시 고려되어야 하는데, 이와 관련되어 4준위 N-type에서의 EIA의 이론적 연구결과⁽²⁾가 보고 된 적이 있다, 우리는 그러한 상황을 실제 원자에 좀더 접근시키기 위해 5준위 원자에서의 EIA효과를 이론적으로 분석하고 세 번째 조건이 EIA 현상에 실제로 어떻게 작용하는지를 보이하고자 하였다.

5-준위 에너지 구도를 W-type[그림1(c)]와 M-type[그림2(c)]의 형태로 구분하여 일반적인 밀도행렬 방정식에 결맞음 항의 자발방출을 고려하여 흡수 정도를 조사하였다.⁽²⁾

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho = -\frac{i}{\hbar} [H, \rho] - \frac{1}{2} \Gamma \{P_e, \rho\} + op\Gamma \sum_{q=-,+} Q_q^\dagger \rho Q_q \quad (1)$$

식 (1)에서 마지막 항은 바닥준위에서 연계되는 자발방출을 나타내 주는데, EIA 신호에 결정적 기여를 하는 것은 여기준위의 결맞음 항으로부터 연계되는 자발방출이다. 이때 op는 계의 열린 정도를 의미한다. 즉, op=1인 경우가 완전히 닫힌 계이고, op=0인 경우가 완전히 열린 계이다.

W-type의 경우, 결맞음 자발방출을 연계 되는 밀도행렬요소는 ρ_{42} 이다. 식(1)의 마지막 항은

$$\begin{aligned} \sum_{q=-,+} Q_q^\dagger \rho Q_q = & \langle 4|(|2\rangle\langle 1| + b |4\rangle\langle 3|)\phi \rangle \langle \phi|(|1\rangle\langle 2| + b |3\rangle\langle 4|)|2\rangle \\ & + \langle 4|(a |2\rangle\langle 3| + |4\rangle\langle 5|)\phi \rangle \langle \phi|(a |3\rangle\langle 2| + |5\rangle\langle 4|)|2\rangle \end{aligned} \quad (2)$$

와 같이 계산되므로 ρ_{42} 에 해당하는 밀도방정식은 다음과 같다.

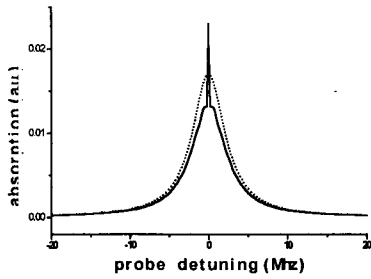
$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{42} = i(\Delta_1 - \Delta_2)\rho_{42} - \frac{i}{2} b\Omega_1\rho_{32} - \frac{i}{2} \Omega_2\rho_{52} + \frac{i}{2} \Omega_1\rho_{41} + \frac{i}{2} a\Omega_2\rho_{43} + op\Gamma(a\rho_{53} + b\rho_{31}) \quad (3)$$

[그림1]은 W-type에서의 밀도행렬방정식을 계산한 결과 얻어진 조사광의 흡수 스펙트럼이다. 여기서 Ω_1 , $b\Omega_1$ 는 조사광의, $c\Omega_2$, Ω_2 는 결합광의 Rabi진동수이고, a, b는 전이확률진폭이다. [그림1(a)]는 결맞

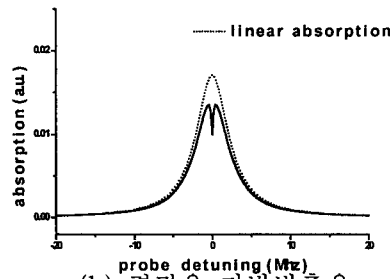
음 자발방출을 고려해 준 경우이고($op=1$), [그림1(b)]는 결맞음 자발방출을 고려하지 않은 경우($op=0$)이다. [그림1(b)]의 경우에는 EIT가 나타나지만 [그림1(a)]의 경우에는 자연선평보다 매우 좁고 큰 흡수 스펙트럼이 나타난다.

M-type의 에너지 구도[그림2(c)]에서는 W-type와 비교할 만한 결과가 나온다. 이 경우 결맞음 자발방출을 더해 주어야 할 바닥준위 결맞음 항은 ρ_{13}, ρ_{35} 이다. 각각의 경우, 결맞음 항의 자발방출을 고려하여 얻은 조사광의 흡수 스펙트럼은 [그림2]와 같다. 완전히 닫힌 계로서 자발방출이 모두 바닥준위로 간 경우이지만 공명주파수에서 전혀 EIA가 나타나지 않고 EIT만 보이고 있다. 여기서, $b\Omega_1, d\Omega_1$ 는 조사광의, $a\Omega_2, c\Omega_2$ 는 결합광의 Rabi 진동수이며, a,b,c,d는 전이 확률 진폭이다.

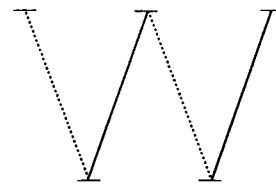
본 연구에서 제시한 W와 M-type 원자계는 최근에 서로 반대로 회전하는 두 원편광된 레이저와 상호작용하는 축퇴된 2준위 원자에서 실험적으로 관찰되었고, 본 연구는 이러한 실험결과에서 나타나는 원자결맞음 현상의 물리적 특성을 이해하는 도움이 될 것이다. 본 연구는 한국 원자력 연구소 중장기 위탁과제와 한국교원대학교 기성회계의 일부 지원에 의해 수행되었음을 밝힌다.



(a) 결맞음 자발방출을 고려할 때

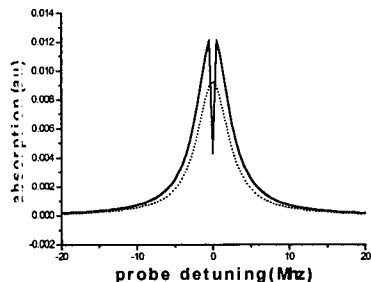


(b) 결맞음 자발방출을 고려하지 않을 때

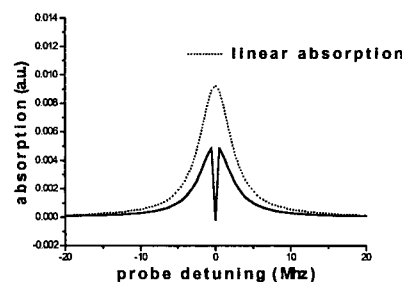


(c) W-type 원자계의 에너지 준위도

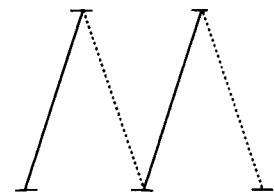
[그림1] W-type 에너지 구도에서의 조사광의 예상 흡수 스펙트럼 ($\Omega_1=0.1\text{Mhz}$, $\Omega_2=1.0\text{Mhz}$)



(a) 결맞음 자발방출을 고려할 때



(b) 결맞음 자발방출을 고려하지 않을 때



(c) M-type 원자계의 에너지 준위도.

[그림2] M-type의 에너지 구도에서 조사광의 예상 흡수 스펙트럼 ($\Omega_1=0.1\text{Mhz}$, $\Omega_2=1.0\text{Mhz}$)

참고문헌

1. A. M. Akulshin, Phys. Rev. A 61, 013801(1999)
2. V. I. Yudin, Phys. Rev. A 61, 011802(R)(1999)