

세슘원자에서의 전자기-유도-흡수

김경대 · 권미량 · 문한섭 · 박현덕 · 김종복*

한국고원대대학교 물리교육과

(363-791) 충북 청원군 강내면 다락리 산7번지

(2000년 7월 10일 받음, 2000년 8월 30일 수정본 받음)

세슘 D_2 의 $F=4 \rightarrow F'=5$ 전이선에서 전자기-유도-흡수(EIA) 현상을 조사하였다. 축퇴된 2준위 원자계의 공명 주파수에서 발견하는 두 레이저광과 상호작용하는 원자매질에서 결맞음 상호작용에 기인한 원자흡수의 급격한 증기를 보였다. 세슘원자에서 EIA가 가능한 조건을 조사하였으며 이러한 흡수 신호의 크기는 레이저 선폭이 좁을수록, 결합광의 세기가 클수록 현저하였다. 또한, 결맞음 레이저에 의한 펄핑이 있는 경우에 흡수 신호가 증폭되는 것을 볼 수 있었다.

OCIS codes : 030.1640, 300.1030, 300.3700.

I. 서 론

최근 수년동안 원자-빛 상호작용에서 양자 간섭현상은 매우 흥미롭고 중요한 현상들을 보이고 있음을 많은 연구를 통해 알 수 있었다. 특히, 전자기-유도-투과(Electromagnetically Induced Transparency; EIT)^[1,2]와 결맞음 밀도포획(Coherent Population Trapping; CPT)^[3] 밀도반전 없는 증폭(Amplification Without Inversion; AWI)^[4,5] 등과 같은 현상들에서 원자 준위들 사이에 레이저광에 의해 유도된 결맞음이 나타남을 보였다. 이들 중에서 전자기-유도-투과(EIT)는 여러 가지 응용가능성을 제시하며 많은 연구가 수행되었는데 대부분의 EIT 연구에서는 3준위 Λ -형^[7,8]이 많이 수행되었고 축퇴된 경우와 3준위 이상의 여러 준위에 관한 연구^[10-12]는 미비한 상태이다.

EIT에 의한 흡수의 감소현상은 관측되고 이해되었으나 반대 효과라 할 수 있는 원자결맞음에서 기인한 흡수의 증가현상에 대한 연구는 없었다. 그러나, 최근에 Akulshin 등은 $^{85}\text{Rb } D_2$ 전이선에서 전자기장에 의한 유도 흡수 현상을 관측하고, 이론적인 결과를 얻었다.^[13-15] 그들은 루비듐 증기셀에서 조사광과 결합광이 같은 방향으로 진행할 때 조사광의 흡수정도와 형광을 측정하는 방법으로 전자기장에 의한 Zeeman 바닥 에너지 준위들간의 결맞음효과에 대한 연구를 수행했다. Akulshin 등은 조사광과 결합광이 같은 주파수로 공진할 때, 다음과 같은 특별한 조건에서 EIT 신호와는 반대로 양의 공명신호를 관측했고, 이것을 이름하여 전자기-유도-흡수(Electromagnetically Induced Absorption)^[13]라고 하였다. 이러한 전자기-유도-흡수가 일어나기 위한 조건^[14]은 축퇴된 2준위 원자계가 다음 3가지 조건을 만족할 때 발생한다고 보고하였다: (i) $F_c = F_g + 1$ (F_g 와 F_c 는 각각 바닥준위와 여기준위의 총각운동량이다); (ii) 바닥준위에서 여기준위로의 전이는 닫힌 전이어야 한다; (iii) 바닥준위는 축퇴되어 있어야 한다. 이러한 조건

이 만족되는 경우에 들뜬 준위들 사이의 원자결맞음이 바닥준위의 원자결맞음으로 자발 전이(spontaneous transfer)하여 EIA가 발생한다는 이론적 모형이 Taichenachev 등에 의해 제시되고 있다.^[16]

하지만, 지금까지 이러한 연구들의 결과에서는 전자기-유도-흡수가 일어날 때 사용하는 레이저의 선폭효과 및 결합광에 대한 여러 가지 조건을 탐색하는 구체적인 연구가 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 전자기-유도-흡수 현상에 대해서 상온의 세슘 증기 셀을 이용하여 레이저의 선폭 차이에 따른 EIA 신호를 비교 분석하였고, 전자기-유도-흡수 신호의 발생조건을 이해하기 위하여 선폭 축소된 레이저를 사용하여 결합광의 세기에 따른 신호의 차이를 분석하였다. 그리고 또 다른 레이저를 사용하여 광펄핑효과에 의한 신호의 변화를 측정하였다.

II. 실험장치

본 연구에서 사용한 Cs D_2 전이선의 에너지 준위는 그림 1과 같다. 들뜬 상태의 에너지준위는 604.19 MHz 떨어져 있는데 이것은 상온에서의 도플러선폭(약 3.7 GHz) 보다 작은 값이다. 초미세 준위 각각의 자연선폭은 6 MHz이다. Cs D_2 전이선에서 EIA 현상에 대한 연구는 Akulshin 등이 제시한 조건을 만족하는 $F=4 \rightarrow F'=5$ 전이선으로 가능하다.

그림 2는 EIA 실험을 위한 장치도이다. LD1(조사광)은 상용의 DBR 반도체 레이저(SDL-5712-H1; 100 mW)로 광분할기, PZT를 부착한 mm당 1200개의 격자를 갖는 회절격자를 이용하여 외부공진기를 구성함으로써 선폭을 축소하고 레이저 다이오드로 피드백되는 광에 대해 민감하지 않고 안정적인 발진을 하도록 했다. Anamorphic 프리즘을 사용하여 광의 모양을 조정한다 다음 직경 1 mm인 조리개(AP)와, 필요에 따라 ND 필터를 사용하였다. 이 때 조사광 레이저의 선폭은 1 MHz 이하이다. LD2(결합광) 역시 상용의 DBR 레이저로서 선폭이 약 3 MHz로 측정되었고, 여기에 회절격자를 이용한 외부공진

*E-mail: jbkim@knucss-sun.knue.ac.kr

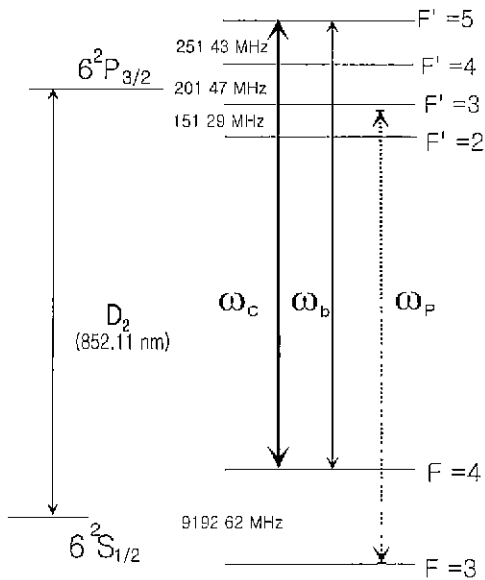


그림 1 Cs 원자 에너지 준위도(ω_c , 결합광의 주파수, ω_b , 조사광의 주파수, ω_p : 결합맞는 펌핑광의 주파수).

기로 선폭축소를 했을 때 레이저의 선폭은 1 MHz 이하로 축소되었다. 그리고, LD3(펌핑광)은 선폭축소 없이 상용의 DBR 반도체 레이저를 사용했다. 결합광과 조사광의 직경은 각각 3.5 mm와 1 mm이다.

먼저, 조사광과 결합광을 이용하여 원자결맞음 현상을 관측하기 위해서 선형편광기를 사용하여 결합광과 조사광을 서로 수직인 편광이 되도록 한 다음, 편광 광분할기를 사용하여 두 광이 잘 겹쳐지도록 하였다. 그림 2에서 보는 것과 같이 결합광 앞에 $\lambda/2$ 위상지연판을 두어서 결합광의 세기를 조절하였고, 레이저에 의한 광피막으로 인한 레이저 주파수 불안정을 막기 위해서 조사광과 결합광 앞에 isolator를 설치하였다. 조사광과 결합광은 편광 광분할기에 의해 서로 수직인 선편광으로 합해지고 렌즈를 통과하여 세슘 셀의 중앙에 집광된다. 셀에서 원자와 상호작용이 있었던 광은 렌즈를 지나면서 평행광이 되어 선형편광기를 통해 조사광만을 광검출기로 검출한

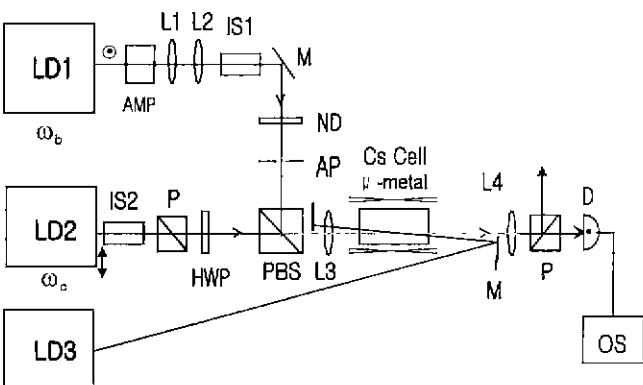


그림 2. 실험장치도. AMP; anamorphic prism, ND; neutral density filter, IS; isolator, M; 거울, L; 렌즈, AP; 조리개, HWP; $\lambda/2$ 위상지연판, PBS; 편광 광분할기, P; 선형편광기, D; 광검출기, OS; 오실로스코프, LD; 반도체 레이저.

다. 본 연구에서는 실온에서 길이가 2 cm인 세슘 증기 셀을 사용하였으며, 지구자기장을 차폐하기 위해서 μ -metal 속에 셀을 넣었다.

레이저 선폭이 전자기-유도-흡수 신호에 미치는 효과를 보기 위해서 결합광 레이저에 외부 공진기를 형성시켜 선폭을 축소 한 것과 선폭 축소 없이 발진하는 것을 이용하여 실험을 수행 하였다. 이 단계의 실험에서는 결합광과 조사광만을 사용하였으며 펌핑광은 사용하지 않는다. 그리고, EIA에서 광펌핑 효과를 측정하기 위하여 그림 2에서 보는 것과 같이 조사광과 결합광은 같은 방향으로 진행하고, 펌핑광은 이들의 진행방향과 반대방향으로 진행하도록 렌즈 앞에 거울을 장치하였다. 두 번째 단계의 실험에서는 그림에 보이는 μ -metal을 제거한 다음, Helmholtz 코일을 놓고 그 속에 셀을 위치시켰다. 이를 통해서 레이저의 진행방향에 대해 수직 윗방향으로 자기장을 가하여 원자들의 양자축을 정확하게 정의하였다. 자기장을 가한 상태에서 펌핑광이 있는 경우와 없는 경우에 실험 결과를 비교하였다.

III. 실험결과

그림 3은 Cs원자 D_2 전이선에서 결합광이 $F=4 \rightarrow F'=5$ 로 작용할 때, 조사광의 주파수를 $F=4 \rightarrow F'=3$ 전이선 근처에서 $F=4 \rightarrow F'=5$ 전이선 근처까지 변화시키면서 얻은 신호이다. 결합광의 세기가 각각 0.41 mW, 0.86 mW, 11.5 mW, 30.0 mW일 때 나타나는 신호를 비교해 놓은 것이다. 조사광의 detuning이 0인 위치, 즉 조사광이 $F=4 \rightarrow F'=5$ 인 경우, 즉 결합광과 조사광이 모두 같은 전이에 공명된 경우에는 결합광의 세기에 따라서 조사광의 흡수신호가 매우 특이하게 변화하는 것을 관측하였다 여기에는 몇 가지의 모양이 함께 나타나고 있는데, 결합광이 약한 경우는 펌핑에 의해 dip이 나타난다. 결합광의 세기를 조금 더 크게 하면 그 dip의 크기가

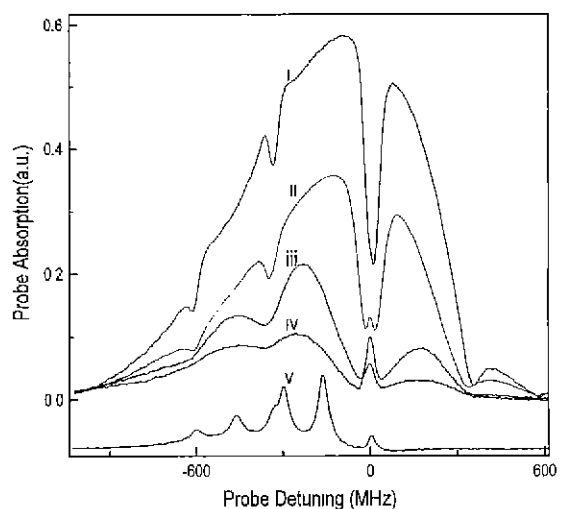


그림 3. 선폭이 넓은 레이저에 의한 EIA 스펙트럼 Cs D_2 의 $F=4 \rightarrow F'=3,4,5$ 전이에서 결합광의 세기가 (i) 0.41 mW (ii) 0.86 mW (iii) 11.5 mW (iv) 30.0 mW인 경우이고, (v) 는 조사광의 포화흡수 신호이다.

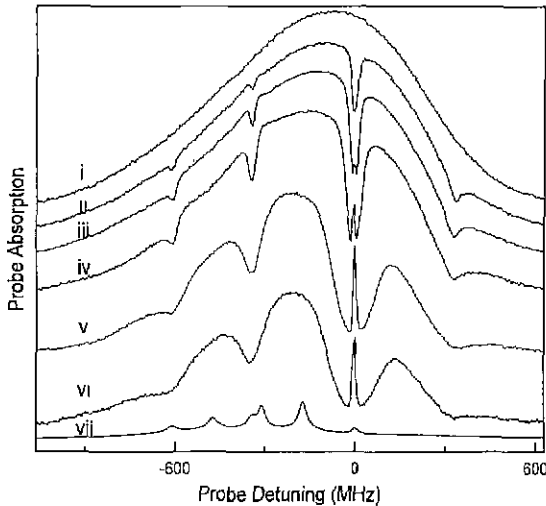


그림 4. 선폭이 축소된 레이저들에 의한 EIA 스펙트럼. (i)은 선행 흡수 신호이고, 결합광의 세기에 따라 (ii) 0.33 mW (iii) 1.04 mW (iv) 1.92 mW (v) 6.71 mW (vi) 25.3 mW이고, (vii)은 조사광의 포화흡수분광 신호이다.

증가한다.

그런데 흥미로운 점은 그림 3의 (ii) 스펙트럼에서 보이는 것처럼 결합광의 세기가 충분히 커지면 dip이 증가하다가 그 dip 속에 흡수 peak이 조그맣게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 3의 (iii)과 (iv)는 흡수 peak이 나타난 경우에 결합광의 세기를 더 증가시키면 흡수 peak의 크기가 더욱 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 외부공진기를 장치한 선폭축소된 조사광 레이저와 선폭축소되지 않은 결합광 레이저로부터 얻은 결과이다. 이 흡수 신호의 증가 현상을 연구함에 있어 선폭 확대에 의해 신호를 분석하고 이해하는데 어려움이 있었다. 이에 결합광 레이저에도 회절격자와 거울, PZT를 이용한 외부 공진기를 설치하여 선폭을 축소한 후 보다 고분해능의 신호를 얻게 되었다.

그림 4는 결합광 레이저의 선폭을 축소한 경우에 대한 결과이다. 그림 3의 (ii)와 그림 4의 (iii)을 비교해 볼 때, power broadening 만을 고려한다면 조사광의 주파수가 $F=4 \rightarrow F'=5$ 에 공명된 경우, 그림 3의 (ii)보다는 그림 4의 (iii)의 선폭이 더 넓어야 하지만 결합광 레이저의 선폭 축소효과로 인해서 오히려 그림 4의 (iii)의 선폭이 더 좁은 것을 확인할 수 있다. 그림 3의 (iv)와 그림 4의 (vi)을 비교할 때, 결합광의 선폭축소로 인해서 결합광의 세기가 커질수록, $F=4 \rightarrow F'=5$ 전이 주파수에서 흡수되는 조사광 신호가 커짐을 볼 수 있다.

셀을 통과한 조사광의 흡수신호를 보면, 그 배경신호가 광펌핑에 의해 흡수가 감소하는 가운데에 결합광의 세기가 커지면서 급격한 흡수의 증가를 볼 수 있다. 즉, 공명전이선 부근에서 전체적인 배경신호는 광펌핑에 의해 흡수가 감소하는 경향을 보이고 있고, 원자결맞음에 의해 공명전이선에서만 흡수 신호가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 그들이 제시한 세 가지 조건에 모두 부합하는데 첫째, 바닥준위에서 여기준위로의 전이는 $F_g=4, F_e=5$ 인 경우로 $F_e=F_g+1$ 을 만족하고 둘째, 바닥준위에서 여기준위로의 전이는 닫힌 전이이다. 이

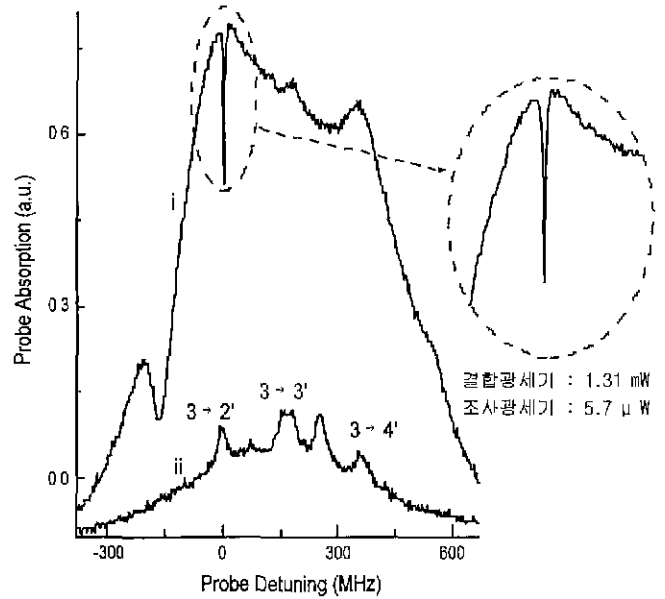


그림 5. 결합광이 $F=3 \rightarrow F'=2$ 전이선에 고정되고, 조사광이 $F=3 \rightarrow F'=2$ 에서 $F=3 \rightarrow F'=4$ 전이선까지 변화할 때의 흡수 분광 신호.

조건 또한 $F=4 \rightarrow F'=5$ 전이의 경우에는 다른 바닥 준위가 $F=3$ 이므로 $F'=5$ 에서 $F=3$ 으로의 전기쌍극자 전이는 금지되어 있다. 그러므로 닫힌 전이 조건을 만족한다. 셋째, 바닥준위는 축퇴되어 있어 전형적인 A형의 원자계를 구성할 수 있다.

그러면 과연 전자기-유도-흡수 현상은 $F_e=F_g+1$ 인 경우에만 발생하는가를 확인하기 위하여 Cs D₂ 전이선에서 결합광이 $F=3 \rightarrow F'=2$ 로 발진할 때, 조사광의 주파수를 $F=3 \rightarrow F'=2$ 전이선 근처에서 $F=3 \rightarrow F'=4$ 전이선 근처까지 변화시키면서 조사광의 흡수분광 신호를 조사하였다. 그림 5는 조사광의 흡수분광신호를 나타내고 있으며 조사광이 $F=3 \rightarrow F'=2$ 에서

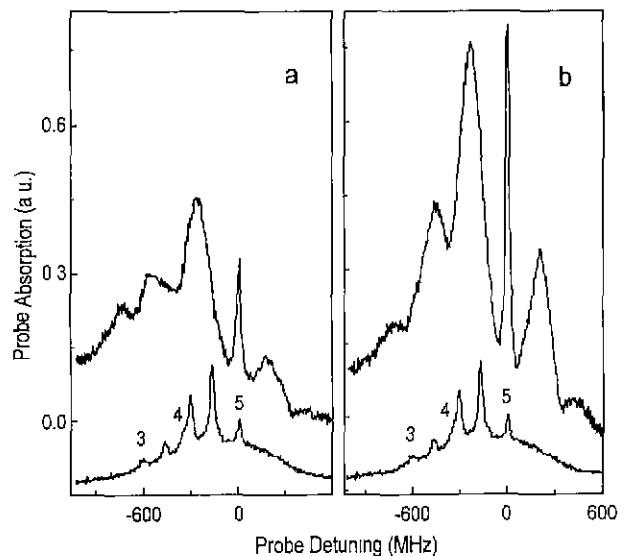


그림 6. 펌핑광의 유무에 따른 EIA 신호 (a)는 펌핑광이 없는 경우 (b)는 펌핑광이 있는 경우의 EIA 신호.

정확하게 발전하는 경우에 EIA 신호는 관측되지 않는 것을 볼 수 있다. 그림에서 점선 안의 신호를 확대하여 보면 EIA 신호가 아닌 EIT 신호를 볼 수 있다. 이는 앞에서 언급한 EIA 현상이 일어날 수 있는 세 가지 조건 중에서 닫힌 전이 임에도 불구하고 여기준위가 바닥준위보다 크지 않다는 점에서 이러한 차이가 나타난다고 할 수 있다.

그림 6은 펌핑광이 있는 경우와 없는 경우에 EIA 신호의 크기에 차이가 있음을 보여주고 있다. 펌핑광이 없는 경우인 그림 6(a)와 비교할 때, 펌핑광이 있는 경우인 그림 6(b)를 보면 전체적인 흡수신호의 형태가 증가하였을 뿐만 아니라 EIA 신호의 크기도 증가한 것을 볼 수 있다. 두 번째 실험단계에서 수행한, 전자기-유도-흡수 신호에서 결안맞는 레이저에 의한 펌핑효과를 측정하기 위하여 결합광을 세기가 10.6 mW이며 $F=4 \rightarrow F'=5$ 으로 전이하는 공명주파수에 맞춰서 발전시키고, 조사광은 그 세기가 $32 \mu\text{W}$ 이며 역시 $F=4 \rightarrow F'=5$ 인 공명전이선에서 발전시켰다. 이 때 포화 세기(3 mW/cm^2) 보다 더 큰 세기(600 mW/cm^2)의 펌핑광을 $F=3 \rightarrow F'=3$ 부근으로 맞추어 펌핑하면 원자밀도는 $F'=3$ 에서 $F=4$ 인 바닥준위로 자발방출에 의해 비결맞음 펌핑으로 닫힌전이로 이동하게 된다. 원자밀도 분포는 바닥 준위의 원자밀도와 들뜬 준위의 원자밀도가 거의 같게 되거나 또는 들뜬 준위의 원자밀도가 더 큰 상태인, 밀도반전된 분포를 이룬다. 이러한 과정은 마치 LWI(Lasing Without Inversion)에서 밀도반전 없는 상황에서 레이징되는 것과는 역의 과정으로 밀도반전된 상태에서 흡수가 증폭되는 결과이다.

IV. 결 론

본 연구를 통해서 세슘원자의 D2 전이선에서 결합광과 조사광이 $F=4 \rightarrow F'=5$ 의 공명 전이선에 작용할 때, 축퇴된 2 준위 원자계에서 전자기-유도-흡수 신호를 관측하였다. 결합광의 세기가 클수록, 레이저의 선폭이 좁을수록 전자기-유도-흡수 신호의 크기가 커짐을 관찰하였다. 그런데 결합광과 조사광이 $F=3 \rightarrow F'=2$ 의 공명 전이선에 작용하는 경우에는 EIA 신호를 관찰할 수 없었다. 이러한 관측 결과로부터 세슘원자에서도 EIA 현상은 Akulshin 등의 예측과 같이 $F_g = F_g + 1$ 이고 닫힌 전이에서 발생함을 확인할 수 있었다.

또한 결안맞는 펌핑광에 의한 EIA 신호의 변화를 관찰하였고 이것으로부터 포화 또는 밀도 반전된 원자계에 대해서 EIA 신호가 증폭될 수 있음을 제안한다. 이러한 원자매질에서 흡수의 급격한 변화^[17]는 이것에 기초한 여러 가지 흥미로운 응용가능성이 있음을 시사한다. 예를 들면 원자 매질의 급격

한 굴절을 변화는 광스위치로의 응용이 가능하며 또한, 매우 큰 분산 특성을 갖는 매질은 고감도 자기장 측정장치를 만드는 데 쓰일 수 있다. 포화 또는 밀도 반전된 원자계에서 증폭된 흡수신호는 효과적인 양자간섭계 제작에 응용될 수 있을 것이다. 현재 EIA의 발생 메커니즘에 대한 이론적 분석을 수행 중에 있으며 원자매질에서 양자 간섭현상에 기인한 흡수의 급격한 변화인 EIA 현상과 EIT 현상의 상호관련성을 명확하게 규명하는 것이 앞으로의 연구과제라 하겠다.

감사의 글

본 연구는 한국원자력연구소 중장기 위탁과제와 한국고원대학교 기성회계의 일부 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] S. E. Harris, Phys. Today **50**(7), 36 (1997).
- [2] K. J. Boller, A. Imamoglu, and S. E. Harris, Phys. Rev. Lett. **66**, 2593 (1991)
- [3] E. Arimondo, Prog. Opt. **XXXV**, 257 (1996).
- [4] S. E. Harris, Phys. Rev. Lett. **62**, 1033 (1989).
- [5] M. O. Scully and S. Y. Zhu, Phys. Rev. Lett. **62**, 2813 (1989).
- [6] H. S. Moon, Y. S. Choe, H. A. Kim, B. S. Kim, K. D. Kim, and J. B. Kim, Jpn. J. Appl. Phys. **39**, 301 (2000).
- [7] D. J. Fulton, S. Shepherd, R. R. Moseley, B. D. Sinclair, and M. H. Dunn, Phys. Rev. A **52**, 2302 (1995).
- [8] Y. Li and M. Xiao, Phys. Rev. A **51**, R2703 (1995).
- [9] H. S. Moon, H. A. Kim, B. S. Kim, and J. B. Kim, J. Korean Phys. Soc. **35**, 207 (1999).
- [10] H. Y. Ling, Y. Q. Li, and M. Xiao, Phys. Rev. A **53**, 1014 (1996).
- [11] K. Hakuta, L. Marment, and B. P. Stoicheff, Phys. Rev. Lett. **66**, 596 (1991).
- [12] J. Gea-Banacloche, Y. Li, S. Jin, and M. Xiao, Phys. Rev. A **51**, 576 (1995).
- [13] A. M. Akulshin, S. Barreiro, and A. Lezama, Phys. Rev. A **57**, 2996 (1998).
- [14] A. Lezama, S. Barreiro, and A. M. Akulshin, Phys. Rev. A **59**, 4732 (1999).
- [15] A. Lezama, S. Barreiro, A. Lipsich, and A. M. Akulshin, Phys. Rev. A **61**, 013801 (1999).
- [16] A. V. Taichenachev, A. M. Tumaikin, and V. I. Yudin, Phys. Rev. A **61**, 011802(R) (1999).
- [17] A. M. Akulshin, S. Barreiro, and A. Lezama, Phys. Rev. Lett. **83**, 4277 (1999).

Electromagnetically induced absorption in Cs vapor

Kyoungdae Kim, Mirang Kwon, Han Seb Moon, Hyun Deok Park, and Jung Bog Kim¹

Dept. of Physics Education, Korea National University of Education, Chungbuk 363-791, KOREA

¹*E-mail: jbkim@knucss-sun.knu.ac.kr*

(Received July 10, 2000, Revised manuscript received August 30, 2000)

The electromagnetically induced absorption (EIA) in the transition line, $F=4 \rightarrow F'=5$, of Cs D_2 line was investigated. We observed the large increase in atomic absorption due to coherent interaction with two resonant laser fields. The requirements of EIA in the Cs atoms were investigated experimentally. The magnitude of EIA signal depending on both laser linewidth and the intensity of coupling laser was measured. Also we are able to observe the amplified absorption signal by incoherent optical pumping of atoms into the closed system.

OCIS codes : 030.1640, 300.1030, 300.3700.