

전자기 유도 흡수에서의 비결맞음 펌핑 효과

문한섭

한국표준과학연구원 정보통신표준센터

Ⓣ 305-340 대전시 유성구 도룡동 1번지

김수경 · 김경대 · 이충희 · 이 립 · 김행화 · 김종복†

한국교원대학교 물리교육과

Ⓣ 363-791 충북 청원군 강내면 다락리 산 7번지

(2002년 7월 26일 받음, 2002년 9월 23일 수정본 받음)

$^{85}\text{Rb } D_1$ 전이선의 바닥준위 $F_g=2$ 에서 여기준위 $F_e=3$ 전이를 이용하여 열린 원자계에서의 전자기 유도 흡수 현상을 관측하고, 전자기 유도 흡수에서의 비결맞음 펌핑 효과를 조사했다. 비결맞음 광원의 편광과 세기의 변화에 따른 전자기 유도 흡수에 대한 연구를 통해 비결맞음 광원의 편광에 따라서 자기부준위들 사이의 원자밀도 분포의 변화를 유도할 수 있고, 이러한 원자밀도 재분포 효과에 의해서 전자기 유도 흡수의 정도가 달라짐을 확인하였다.

주제어 : EIA, EIT, atomic coherence, Rb, incoherent pumping.

I. 서 론

레이저와 원자의 상호작용은 원자의 에너지 준위간에 결맞음을 유도하고, 이러한 효과에 의해서 많은 흥미로운 현상들이 관측되고 있다. 원자결맞음 현상의 가장 대표적인 현상은 원자의 전이 주파수와 같은 공명 진동수를 갖는 레이저광이 입사했을 때 매질에 흡수되지 않고 투과하는 전자기 유도 투과 (electromagnetically induced transparency; EIT)^[1-3] 현상이다. 이러한 EIT 현상을 바탕으로 광정보 저장 및 광통신 스위치 개발과 같은 응용에 대한 연구들이 활발히 진행되고 있다.^[4-6]

최근에는 원자결맞음에 대한 새로운 현상으로 전자기 유도 흡수 (electromagnetically induced absorption; EIA)^[7-14]에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, EIA는 매질에 의한 조사광의 흡수가 결맞음 매질을 통과할 때 흡수가 급격히 증가하는 현상이다. EIA와 EIT는 현상을 이해하는 방법에 있어서는 매우 다르지만, 관측되는 현상에 있어서 대칭성을 가지고 있다. 이러한 대칭성의 관점에서 EIT현상에서 이미 다루어진 많은 연구들을 EIA에 적용하려는 연구들이 진행되고 있다. 특히, EIT에 대한 많은 연구가 진행되던 1990년대에는 기존의 EIT 구도에서 비결맞음 펌핑에 의해 원자밀도 분포가 바뀔 때, 새로운 현상인 밀도반전 없는 레이저 (lasing without inversion; LWI),^[15-17]에 대한 연구들이 진행될 수 있었다. 이러한 맥락에서 본 연구는 EIA 현상에서 펌핑광을 사용했을 때, 원자밀도 분포의 변화로 인해서 발생하는 원자결맞음 현상에 대한 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 대부분의 EIA 연구에서 사용하고 있는 닫힌 2준위 원자계가 아닌 열린 원자계인 $^{85}\text{Rb } D_1$ 전이선을 이용하

여 EIA에서의 비결맞음 펌핑 효과에 대하여 연구하였다. 본 논문의 II장에서는 열린 원자계의 EIA 구도와 본 연구에서 이용한 비결맞음 펌핑 구도에 대한 설명을 하였고, III장에서 EIA 현상과 비결맞음 펌핑의 편광과 세기에 대한 효과를 측정하기 위한 실험장치를 설명하였다. IV장에서는 비결맞음 펌핑의 세기에 따라서 EIA 스펙트럼을 측정하고, 자기부준위들의 상대적인 밀도변화에 따른 EIA 현상의 변화를 측정하기 위해서 펌핑광의 편광 상태에 따라서 EIA 현상을 조사한 결과를 제시했으며, 실험결과는 자기부준위들의 밀도변화에 의한 효과에 의한 스펙트럼의 변화로 설명할 수 있었다. 특히, 본 연구를 통해서 펌핑광의 편광 변화에 의한 자기부준위들의 상대적인 밀도변화가 EIA의 흡수정도에 결정적인 영향을 줄 수 있음을 밝힐 수 있었다.

II. $^{85}\text{Rb } D_1$ 전이선에서 비결맞음 펌핑이 포함된 EIA 구도

EIA는 자발적 원자결맞음 전이에 의해서 일어나는 현상으로 설명할 수 있는데, Akulshin과 그의 공동연구자들은 이러한 원자결맞음 전이가 효율적으로 일어나기 위한 3가지 조건을 제시하고있다.^[8] (i) 여기준위의 총 각운동량이 바닥준위 보다 커야한다. ($F_e=F_g+1$; F_g 와 F_e 는 각각 바닥준위와 여기준위의 총 각운동량이다); (ii) 바닥준위는 축퇴되어 있어야 한다; (iii) 바닥준위에서 여기준위로의 전이는 닫힌 전이어야 한다. 그래서 일반적인 EIA 연구는 알칼리 원자의 D_2 전이선 중에서 순환전이선(cycling transition)을 사용하고 있고, 이러한 경우는 EIA에 기여하는 축퇴된 2준위 원자구도를 가짐으로써 원자들이 다른 준위로 빠져나가지 않는다. 이러한 원자계를 “닫힌 계”라고 부르고, 이 때 순환전이선의 닫힌 정도는 1 된다.

†E-mail: jbkim@knue.ac.kr

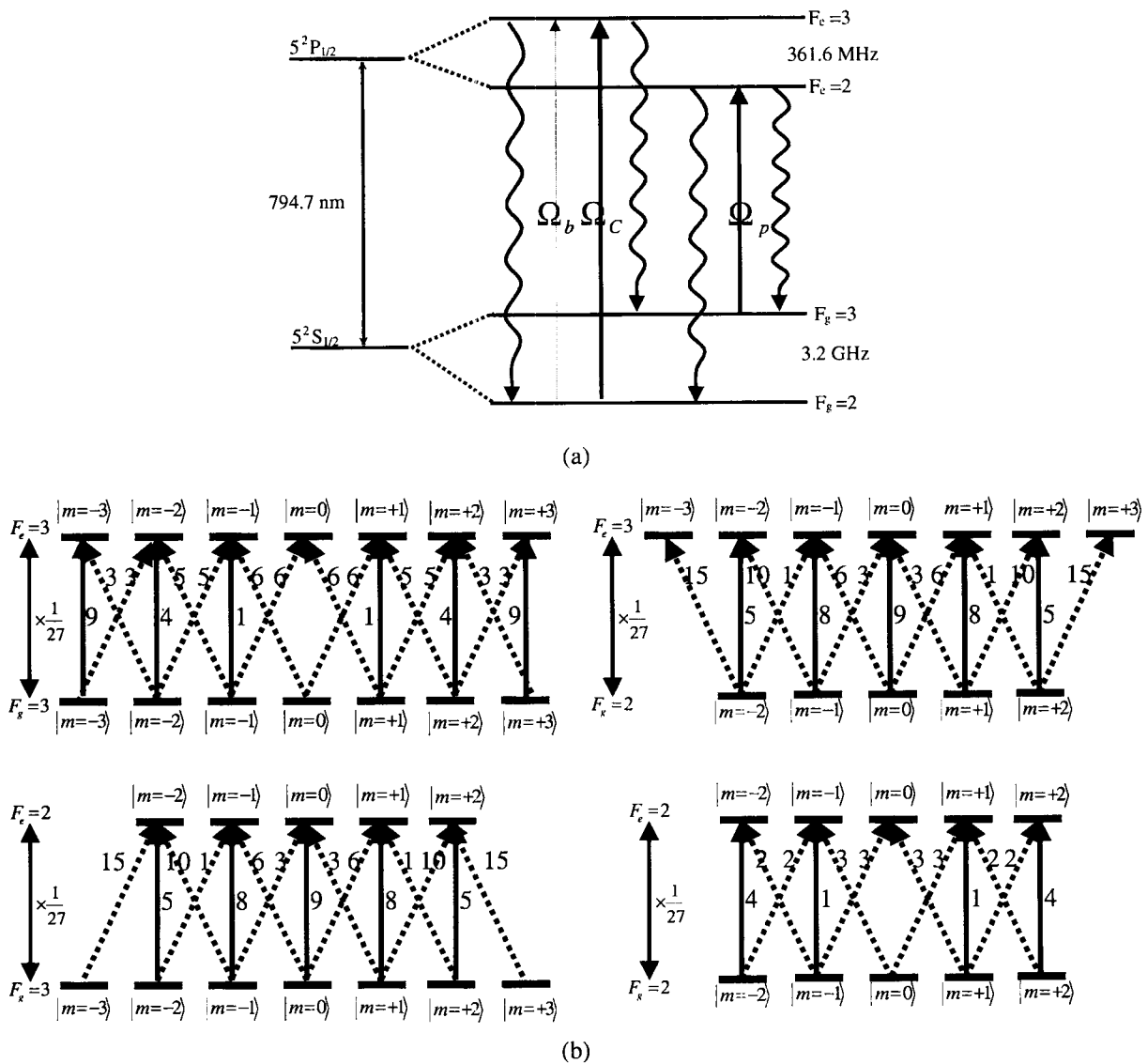


그림 1. (a) ⁸⁵Rb D1 전이선에서의 EIA 구조(결합광과 조사광; F_g=2→F_c=3, 펌프광 ; F_g=3→F_c=2), (b) ⁸⁵Rb D1 전이선의 전이확률.

그리고, 원자계의 닫힌 정도에 따라서 0에서 1사이에서 있는 원자계를 “열린 원자계”라고 하는데, 본 연구에서는 ⁸⁵Rb D₁ 전이선을 사용하고 있기 때문에 세 번째 조건이 만족되지 않는 열린 원자계가 된다.

EIA에 대한 연구를 위한 원자준위와 레이저의 구조는 그림 1(a)에서 보는 것처럼 조사광과 결합광은 F_g=2 → F_c=3 전이선과 공진하도록 되어있다. 이러한 구조는 EIA 연구에서 일반적이다. 그러나 그림 1(a)와 같은 열린 원자계인 Rb D1 전이선 구조에서는 여기준위 F_c=3로 전이된 원자들이 두 바닥준위 (F_g=2와 F_g=3)로 동시에 자발적 전이가 일어나고, 강한 결합광에 의해서 F_g=2준위에 있던 원자들이 F_g=3 준위로 광펌핑이 된다. 한편, 비결맞음 펌핑을 위하여 사용된 펌핑광은 F_g=3 → F_c=2 전이선과 공진하도록 되어있어, F_g=3 준위에 있던 원자들이 F_c=2 준위로 여기된 후 자발방출에 의해서 일정 비율로 두 바닥준위로 전이가 이루어짐으로 F_g=2로 비결맞음 펌핑이 이루어진다. 그러나, 펌핑광은 선폭이 좁은 결맞음성이 좋

은 광원이기 때문에 바닥준위간의 결맞음에 약간의 영향을 줄 수 있고, 실제 증기 셀을 이용한 실험에서는 여기준위간의 에너지 간격이 도플러 선폭 보다 작기 때문에 특정한 속도 성분을 갖는 원자들의 바닥준위간 결맞음에 영향을 줄 수 있다.

그림 1(a)와 같은 간단한 EIA 구조에서조차도 조사광과 결합광의 편광이 서로 수직인 선편광 조합에 대한 상호작용 구조는 각 초미세준위들의 자기부준위들을 모두 고려할 때 복잡하다. 그림 1(b)는 ⁸⁵Rb D₁ 전이선의 전이확률을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것처럼 여기준위 F_c=3에서 바닥준위 F_g=2로의 전이할 수 있는 확률은 5/9이고, F_g=3으로 전이할 확률은 4/9로 주어짐을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 사용하고 있는 ⁸⁵Rb D₁ 전이선의 F_g=2 → F_c=3 전이선의 닫힌 정도는 5/9라는 것을 알 수 있다. 열린 원자계를 이용한 EIA 연구는 조사광과 결합광에 의해서 다른 바닥준위(F_g=3)로의 광펌핑이 일어나고 이로 인해 F_g=2 준위의 원자밀도가 줄어들기 때문에 EIA 현상 관측에 어려움이 있다. 여기서 F_g=3에 있는 원

자들을 $F_g=2$ 로 보낼 수 있으면 광펌핑으로 발생하는 문제를 해결할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 $F_g=3$ 에서 원자들을 $F_g=2$ 로 보내기 위하여 비결맞음 펌핑을 시도하였다. 특히, 비결맞음 펌핑에 의한 원자계의 밀도 변화가 원자결맞음으로 발생된 EIA 현상에 어떤 영향을 미치는지에 대하여 연구하였다.

펌핑광의 세기가 일정한 경우에 그림 1(b)에서 보는 것과 같이 $F_g=3 \rightarrow F_c=2$ 전이선에서 펌프광에 따른 전이상태(σ^+ , π , σ^- , σ^+)에 따라서 여기준위($F_c=2$)로 여기될 확률이 달라지고, 자발 방출에 의해 $F_c=2$ 에서 $F_g=2$ 로 전이될 때 $F_c=2$ 준위의 자기부 준위들 사이에 원자 밀도가 달라질 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 펌핑광의 편광상태를 조절함으로써 $F_g=2$ 의 자기부 준위들 사이에서 원자 밀도의 상대적인 비를 조절할 수 있고, EIA 신호를 통하여 비결맞음 펌핑의 효과를 실험적으로 관측하였다.

III. 실험장치

EIA를 위한 일반적인 실험 장치는 그림 2에서 보는 것과 같다. 우리는 조사광과 결합광이 서로 수직인 선편광 상태에서 같은 방향으로 상온의 10 cm 길이의 Rb 증기 셀을 통과시킨 후 analyzer(P4)를 이용하여 결합광을 제거함으로써 약한 조사광의 흡수정도를 측정하였다. 외부자기장에 의한 효과를 차폐하기 위해서 셀은 μ -metal로 감쌌다. 실험에 사용한 조사광, 결합광, 그리고 펌프광은 Littman형 외부공진기로 구성된 반도체 레이저이고, 1 MHz이하의 선폭을 갖는 단일 모드로 발진 하며 약 15 mW의 출력을 가지고 있다. 조사광은 직경 1.5 mm aperture(AP1)를 사용하였고, 결합광은 3 mm aperture(AP2)를 사용함으로써 결합광의 효과를 충분히 얻을 수 있도록 정렬하였으며, 결합광과 조사광은 ND filter와 반파장 위상지연기 및 편광빔 분할기(PBS)를 사용하여 광의 세기를 조절하였다. 셀을 통과하기 전에 조사광과 결합광의 세기는 각각 약 $7 \mu\text{W}/\text{mm}^2$ 와, 약 $0.24 \text{ mW}/\text{mm}^2$ 이다. 펌프광은 광검출기에 들어가지 않도록 조사광에 대해서 약 5° 정도의 각도를 가지도록 정렬하였고, 셀 내부에서 조사광과 결합광과 겹치도록 정렬하였다. 펌프광의 세기는 $\lambda/2$ -plate(HWP3)와 편광기(P3)를 사용하여 $0\sim 0.2 \text{ mW}/\text{mm}^2$ 까지 조절하면서 펌프광의 세기에 따른 EIA의 변화

를 측정할 수 있도록 하였다. 그리고, 펌프광이 편광기(P3)를 통과한 후, $\lambda/4$ -plate(QWP)에 의해서 펌프광의 편광상태를 변화시키면서 EIA 스펙트럼의 변화를 측정할 수 있도록 하였다.

IV. 실험결과 및 토의

그림 3은 ^{85}Rb D₁의 $F_g=2 \rightarrow F_c=2, 3$ 전이선 근처에의 조사광의 흡수 스펙트럼이다. 스펙트럼 (a)는 강한 결합광과 약한 조사광만이 있을 때 얻은 스펙트럼으로 강한 결합광에 의한 광펌핑 효과로 주공진선($F_g=2 \rightarrow F_c=2, 3$) 근처에서 대부분의 조사광이 흡수하지 않고 투과가 일어난다. 그러나 스펙트럼 (a)에서 보는 것처럼 $F_g=2 \rightarrow F_c=3$ 공진주파수에서 작지만 좁은 선폭을 가진 흡수신호를 볼 수 있다. 이것이 ^{85}Rb D₁의 $F_g=2 \rightarrow F_c=3$ 전이선에서의 EIA 스펙트럼이다.

그림 3의 스펙트럼 (b)는 결합광, 조사광, 그리고 펌프광이 동시에 있는 경우에 얻어진 스펙트럼이다. 스펙트럼 (b)에서 전체적인 조사광의 흡수정도는 스펙트럼 (a)와 (c) 중간에 해당한다. 이것은 결합광에 의한 $F_g=2$ 로의 광펌핑 효과와 펌핑광에 의한 $F_g=3$ 로의 광펌핑 효과가 경쟁하고 있기 때문이다. 이때 조사광의 흡수의 증가량은 펌핑광과 결합광의 세기에 관계되는데, 그림 3(b)의 $F_g=2 \rightarrow F_c=3$ 전이선에서의 조사광의 흡수는 펌프광에 비해서 결합광의 세기가 세기 때문에 조사광의 흡수가 크게 증가하지 않는다. 그리고, 펌프광에 의한 광펌핑 효과가 있을 때 $F_g=2 \rightarrow F_c=3$ 전이선에서 조사광의 배경선폭이 줄어드는 것은 펌프광, 결합광, 그리고 조사광과 상호작용하는 원자들의 속도선택 효과로 설명할 수 있다. 특히, 조사광의 주파수가 $F_g=2 \rightarrow F_c=3$ 공진주파수와 일치하는 곳에서 펌핑광에 의해서 $F_g=2$ 로 광펌핑된 원자들에 의해서 조사광의 흡수가 증가하면서 동시에 좁은 선폭을 가진 EIA 스펙트럼을 볼 수 있다. 그림 3의 (a)와 (b)를 비교하면, 펌핑광이 있을 때 EIA 효과가 증가된 것으로 볼 수 있다. 이것으로 비

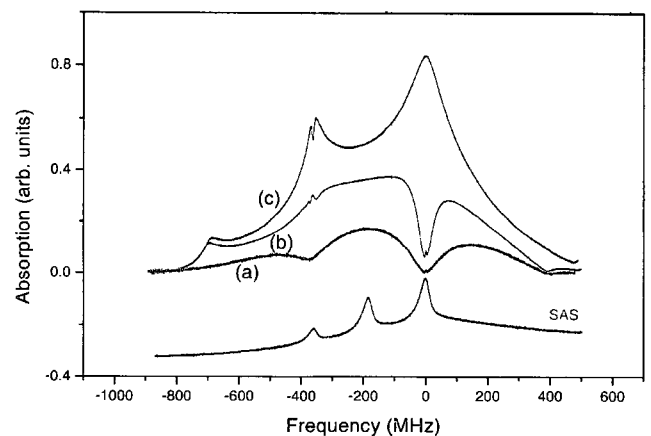


그림 3. ^{85}Rb D₁의 $F_g=2 \rightarrow F_c=2, 3$ 전이선 근처에의 조사광의 흡수 스펙트럼. (a) 조사광은 $F_g=2 \rightarrow F_c=2, 3$ 으로 전이하고, 결합광은 $F_g=2 \rightarrow F_c=3$ 전이선에 고정, (b) 조사광은 $F_g=2 \rightarrow F_c=2, 3$ 으로 전이하고, 결합광은 $F_g=2 \rightarrow F_c=3$, 펌프광은 $F_g=3 \rightarrow F_c=2$ 전이선에 고정, (c) 조사광은 $F_g=2 \rightarrow F_c=2, 3$ 으로 전이하고, 펌프광은 $F_g=3 \rightarrow F_c=2$ 전이선에 고정(SAS는 조사광의 포화흡수분광 신호).

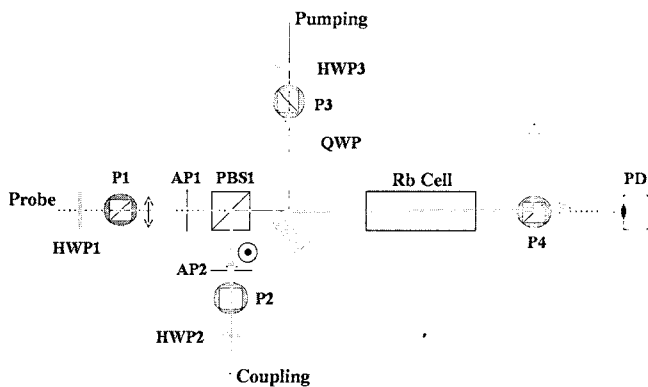


그림 2. 실험장치도(HWP; $\lambda/2$ 위상지연기, QWP; $\lambda/4$ 위상지연기, P; 편광기, PBS; 편광빔분리기, AP; 조리개, PD; 광검출기).

결맞음 펌핑에 의해서 EIA 효과에 변화가 있다는 것을 알 수 있다. 그러나, 이 스펙트럼에는 펌핑광에 의한 광펌핑효과로 $F_g=2$ 의 원자밀도가 증가함으로 인한 EIA 신호의 증폭효과가 포함되어있기 때문에 비결맞음 펌핑에 의한 EIA 효과의 변화를 정량적으로 분석하기 위해서는 규격화를 통하여 광펌핑에 의한 효과의 제거가 필요하다. 그러나 본 연구에서 정확한 규격화를 통해서 광펌핑효과를 완전히 제거할 수는 없었지만, 전체 흡수 스펙트럼의 흡수정도가 같도록 만드는 방법으로 규격화를 시도했을 때도 비결맞음 펌핑에 의한 EIA 변화를 관측할 수 있었다. 한편, 조사광의 주파수가 $F_g=2 \rightarrow F_c=2$ 공진주파수와 일치하는 곳에서는 결합광($F_g=2 \rightarrow F_c=3$), 조사광($F_g=2 \rightarrow F_c=2$), 그리고, 펌프광 ($F_g=3 \rightarrow F_c=2$)에 의해서 만들어지는 4준위 N형 구도가 만들어지면서, EIT 현상을 볼 수 있다.

그림 3(c)는 $F_g=3 \rightarrow F_c=2$ 에서 공진하는 강한 펌프광과 조사광만 있을 때 얻어진 조사광의 흡수 스펙트럼이다. 이 때는 펌프광에 의해서 $F_g=3$ 에 있던 원자들은 $F_g=2$ 로 광펌핑이 일어나면서 전체적으로 조사광의 흡수가 증가한다. 특히, 이 경우는 펌프광과 조사광에 의해서 $F_g=2 \leftrightarrow F_c=2 \leftrightarrow F_g=3$ 의 구도를 갖는 Λ 형 EIT 조건이 만들어지면서 전형적인 EIT 구도를 가지게 됨으로 $F_g=2 \rightarrow F_c=2$ 공진주파수에서 조사광의 흡수가 줄어드는 EIT 스펙트럼을 볼 수 있다.

그림 4는 펌프광의 세기에 따른 EIA 스펙트럼이다. 이 때 조사광과 결합광의 편광 및 세기 등 실험조건은 그림 3과 같고, 펌프광의 편광 상태는 타원편광이다. 펌프광의 세기는 0~200 $\mu\text{W}/\text{mm}^2$ 로 변화시켰을 때, 펌프광이 없는 스펙트럼과 펌프광이 있는 스펙트럼에는 EIA 현상의 변화를 관찰할 수 있다. 그러나, 펌프광이 있을 때는 펌프광의 세기에 따라서 스펙트럼의 크기는 변하지만, EIA 효과에는 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다. 이것은 펌프광이 EIA 현상에 미치는 영향이 펌프광의 세기에 무관하다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 펌프광의 편광에 따른 EIA 스펙트럼이다. 이 때 펌프광의 세기는 약 0.2 mW/mm^2 로 고정했고, $\lambda/4$ -plate의 각도를 바꾸면서 EIA 스펙트럼을 관측한 것이다. 그림 5에서 보는 것처럼 펌프광의 편광상태에 따라서 EIA 신호의 크기가

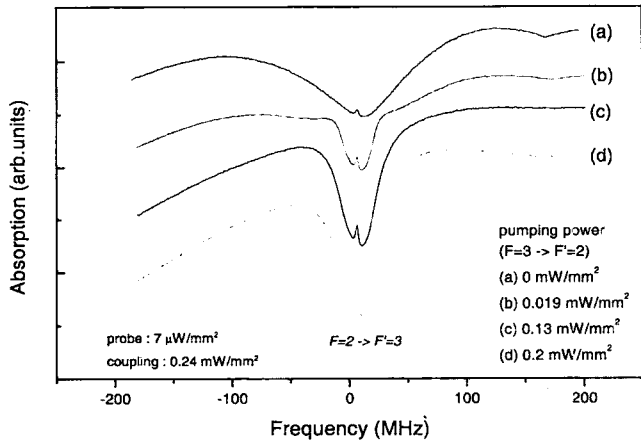


그림 4. 펌프광의 세기에 따른 EIA 스펙트럼(조사광의 세기; 7 $\mu\text{W}/\text{mm}^2$, 결합광의 세기 ; 0.24 mW/mm^2)

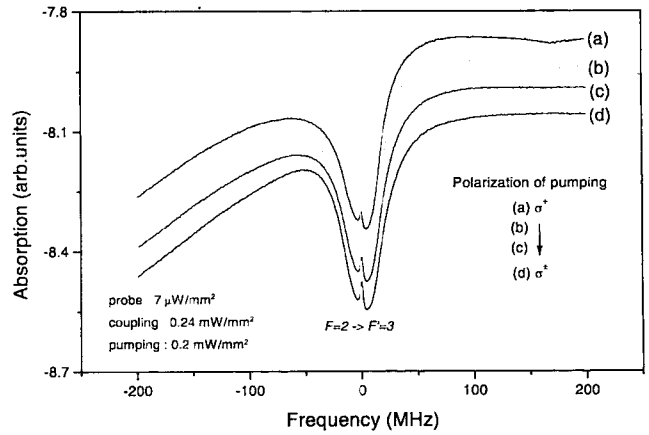


그림 5. 펌프광의 편광에 따른 EIA 스펙트럼(조사광의 세기; 7 $\mu\text{W}/\text{mm}^2$, 결합광의 세기; 0.24 mW/mm^2 , 펌프광의 세기; 0.2 mW/mm^2)

달라짐을 확인할 수 있다. 펌프광의 편광은 조사광과 평행한 선편광 상태에서 $\lambda/4$ -plate를 통과하면서 $\lambda/4$ -plate의 각도에 따라서 타원편광에서 원편광으로 변한다. 이 때 펌프광의 편광에 따라서 그림 1에서 보는 것과 같이 $F_g=3 \rightarrow F_c=2$ 로의 각 자기부준위의 전이율이 달라지고, 여기준위($F_c=2$)의 각 자기부준위에서 원자밀도가 달라짐으로 $F_c=2$ 에서 $F_g=2$ 로의 자발방출에 의한 $F_g=2$ 의 자기부준위들에서의 원자밀도 분포의 변화가 생기게 된다. 이러한 비결맞음 펌핑에 의한 $F_g=2$ 의 자기부준위들의 밀도변화는 $F_g=2 \rightarrow F_c=3$ 전이선에서 일어나는 EIA 현상에 영향을 주게된다.

그림 5에서 펌프광의 편광상태가 선편광인 경우에 EIA 효과가 가장 크게 나타남을 알 수 있는데, 이것은 펌프광의 편광상태에 따라서 바닥준위 $F_g=3$ 에서 여기준위 $F_c=2$ 로 전이될 때 자기부준위들 사이의 전이율이 달라지고 이로 인해서 바닥준위 $F_g=2$ 의 자기부준위들의 상대적인 원자밀도가 달라져 EIA 신호에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 비결맞음 펌핑을 통해서 EIA 신호를 제어할 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러므로 우리는 비결맞음 펌핑이 $F_g=2$ 준위의 자기부준위들의 원자밀도 분포에 변화를 일으켜 EIA 효과에 영향을 준다는 것을 실험적으로 밝힐 수 있었다.

V. 결 론

우리는 ^{85}Rb D_1 전이선에서 비결맞음 펌핑에 따른 EIA 현상에 대한 연구를 수행하였다. 서로 수직인 선편광을 가진 약한 조사광과 강한 결합광을 같은 방향으로 Rb 셀을 통과시켜서 조사광의 흡수 스펙트럼을 조사한 결과 결합광의 광펌핑효과와 더불어 EIA현상이 나타나게 되고, 이 때 펌프광을 이용한 자발방출에 의한 비결맞음 펌핑이 일어났을 때 EIA 신호에 변화를 관측할 수 있었다. 우리는 펌핑광의 세기와 편광상태를 변화시키는 방법으로 비결맞음 펌핑이 EIA 효과에 미치는 영향과 원인을 조사하였다. 실험결과에서 EIA 효과는 펌프광의 세기보다는 편광 상태에 의해서 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있었고, 펌프광의 편광이 σ^\pm 인 경우에 EIA 효과

가 증가되었는데, 이것은 $F_g=2$ 의 자기부준위들의 원자밀도에 재분포가 일어나기 때문이다. 우리는 본 연구를 통해서 펄핑 광의 편광 상태에 따라서 비결맞음 펄핑에 의해서 원자밀도 분포에 변화를 줌으로써 EIA 효과에 영향을 준다는 것을 밝힐 수 있었다. 본 연구는 비결맞음 펄핑에 의한 원자밀도 재분포가 원자결맞음 현상에 미치는 영향을 밝히는 중요한 결과이며, 앞으로 원자결맞음을 이용한 다양한 연구에 응용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단(2001-041-D00057)의 지원하에 이루어졌음을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] S. E. Harris, "Electromagnetically induced transparency," *Phys. Today*, vol. 50, no. 7, pp. 36-42, 1997.
- [2] K. J. Boller, A. Imamoglu, and S. E. Harris, "Observation of electromagnetically induced transparency," *Phys. Rev. Lett.* vol. 66, no. 1, pp. 2593-2596, 1991.
- [3] H. S. Moon, H. A. Kim, B. S. Kim, and J. B. Kim, "Electromagnetically Induced Transparency in an ideal three level system in 87Rb Atoms," *J. Korea Phys. Soc.* vol. 35, no. 3, pp. 207-211, 1999.
- [4] H. Schmidta and R. J. Ram, "All-optical wavelength converter and switch based on electromagnetically," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, no. 22, pp. 3173-3175, 2000.
- [5] B. S. Ham and P. R. Hemmer, "Coherence Switching in a Four-Level System: Quantum Switching," *Phys. Rev. Lett.* vol. 84, no. 18, pp. 4080-4083, 2000.
- [6] Chien Liu, Zachary Dutton, Cyrus H. Behroozi, and Lene Vestergaard Hau, "Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses," *NATURE*, vol 409, pp. 490-493, 2001.
- [7] A. M. Akulshin, S. Barreiro, and A. Lezama, "Electromagnetically induced absorption and transparency due to resonant two-field excitation of quasidegenerate levels in Rb vapor," *Phys. Rev. A* vol. 57, no. 4, pp. 2996-3002, 1998.
- [8] A. Lezama, S. Barreiro, and A. M. Akulshin, "Electromagnetically induced absorption," *Phys. Rev. A* vol. 59, no. 6, pp. 4732-4735, 1999.
- [9] A. V. Taichenachev, A. M. Tumaikin, and V. I. Yudin, "Electromagnetically induced absorption in a four-state system," *Phys. Rev. A* vol. 61, no. 1, pp. 011802/1-4, 1999.
- [10] A. Lezama, S. Barreiro, A. Lipsich, and A. M. Akulshin, "Coherent two-field spectroscopy of degenerate two-level systems," *Phys. Rev. A* vol. 61, no. 1, pp. 013801/1-11, 1999.
- [11] A. M. Akulshin, S. Barreiro, and A. Lezama, "Steep anomalous dispersion in coherently prepared Rb vapor," *Phys. Rev. Lett.* vol. 83, no. 21, pp. 4277-4280, 1999.
- [12] A. Lipsich, S. Barreiro, A. M. Akulshin, and A. Lezama, "Absorption spectra of driven degenerate two-level atomic systems," *Phys. Rev. A* vol. 61, no. 1, pp. 053803/1-10, 2000.
- [13] Mirang Kwon, Kyoungdae Kim, Han Seb Moon, Hyun Deok Park, and Jung Bog Kim, "Dependence of Electromagnetically Induced Absorption on two combinations of the orthogonal polarized beams," *J. Phys. B* vol. 34, pp. 2951-2961, 2001.
- [14] Kyoungdae Kim, Mirang Kwon, Han Seb Moon, Hyun Deok Park, and Jung Bog Kim, "Measurements of normal and abnormal dispersions in coherently driven Cs vapors," *J. Korea Phys. Soc.* vol. 38, no. 6, pp. 666-669, 2001.
- [15] E. Arimondo, in *Progress in Optics*, edited by E. Wolf, (Elsevier, Amsterdam, 1996), Vol. 35, pp. 257-354.
- [16] H. S. Moon, Y. S. Choe, H. A. Kim, B. S. Kim, K. D. Kim, and J. B. Kim, "Amplification without Inversion in the Four-Level N-Type of ^{87}Rb D₁-line", *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 39, no. 1, pp. 301-305, 2000.
- [17] H. A. Kim, Y. S. Choe, B. S. Kim, H. S. Moon, and J. B. Kim, "Theory of Amplification without inversion in a Trapped Four-Level Atomic System," *J. Korea Phys. Soc.* vol. 35, no. 3, pp. 203-206, 1999.

The Effect of Incoherent Pumping in Electromagnetically Induced Absorption

H. S. Moon*, S. K. Kim, K. Kim, C. H. Lee, L. Lee, H. H. Kim, and J. B. Kim[†]
Dept. of Physics Education, Korea National University of Education, Chungbuk 363-791, KOREA

**Center for Information and Telecommunication Standards,
Korea Research Institute of the Standards and Science, Daejeon 305-600, KOREA*

[†]E-mail: jbkim@knue.ac.kr

(Received July 26, 2002; Revised manuscript received September 23, 2002)

We have studied the effects of incoherent pumping on EIA at the transition between the $F_g=2$ ground state and the $F_e=3$ excited state in ^{85}Rb D₁-line. Generally, the studies about EIA have been done in the cycling transition, where the population has no loss to other states. In the case of EIA by using the ^{85}Rb D₁ transition line, the population is transferred to the other hyperfine state due to optical pumping. We incoherently pumped the atoms from $F_g=3$ to $F_g=2$ with the pumping beam, which is resonant at the transition from $F_g=3$ to $F_e=2$. We were able to observe the effects of incoherent pumping depending on the power and the polarization of the pumping beam.

Classification codes : NL.010, OC.010, QO.010, SP.010.