

EIT, LWI, 그리고 Slow Light

이 해 응

한국과학기술원 물리학과

1. 서 론

물질의 광학적 특성은 그 물질을 구성하는 원자(또는 분자)들의 준위구조에 의하여 결정된다. 따라서, 그 물질이 처해있는 환경을 변화시켜 원자들의 준위구조에 변화를 야기하면 그 광학적 특성도 달라지게 된다. 원자들의 준위구조에 변화를 유도하는 편리한 방법은 강력한 빛(전자파)을 입사시키는 방법이다. 강력한 빛의 영향하에 있는 원자는 보통 원자와는 전혀 다른 광학적 특성을 가질 수 있다. 이 논문의 주제인 EIT(electromagnetically induced transparency)^[1,2], LWI(lasing without inversion), Slow Light은 물질의 광학적 특성을 나타내는 양들 중, 특히, 흡수계수(absorption coefficient)와 굴절률(refractive index)이 빛의 영향하에 어떻게 변화하는지와 밀접한 관련이 있다.

강력한 빛의 영향하에 있는 원자, 다시 말하면 강력한 빛과 상호작용하고 있는 원자는 빛에 의하여 '단장'된 원자라 하여 단장원자(dressed atom)^[3,4]라 불린다. 단장원자의 세 기본단위는 원자, 빛, 그리고 그들간의 상호작용이다. 마치 수소원자의 세 기본단위가 양성자, 전자 및 그들간의 상호작용인 점과 유사하다. (이런 관점에서 수소원자는 전자에 의하여 단장된 양성자라고 볼 수도 있다.) 이 논문의 주 관심사는 단장원자의 흡수계수와 굴절률이 빛이 없을 때의 보통 원자의 흡수계수와 굴절률과 어떻게 다른가에 있다. 특히 원자를 단장하는 빛이 가간섭성 빛(coherent light), 즉 레이저일 때, 그리고 이 레이저가 원자의 어떤 두 준위와 공명조건을 (거의) 만족시킬 때는 레이저의 간섭성이 원자에 전달된다. 이렇게 야기되는 원자 간섭성(atomic coherence)은 흡수계수나 굴절률의 급격한 변화를 초래할 수 있으며, 이것이 이 논문에서 논의하고자 하는 현상이다.

EIT는 강력한 레이저로 단장된 단장원자의 흡수계수가 보통 원자의 흡수계수보다 훨씬 더 작을 수 있으며 0으로까지도 감소시킬 수 있다는 사실에 기인한다. 흡수계수가 0에 가까우면 마치 투명체같이 입사한 빛을 그대로 통과시키게 되는데, 이러한 투명성이 빛 다시 말하여 전자파에 의하여 유도되었다하여 이 현상을 전자적 유도 투명성(electromagnetically induced

transparency), 간단히 EIT라 부른다.

LWI는 밀도반전 없는 레이저작동(lasing without inversion)이란 뜻으로 그 기본원리는 EIT현상에 있다. 레이저 작동을 위해서는 레이저매질 내에 밀도반전(population inversion)이 이루어져 있어야 한다고 보통 알려져 있다. 흡수보다 유도방출(stimulated emission)이 더 강하게 일어나야 레이저작동이 가능하며, 그러기 위해서는 레이저 위 준위에 있는 원자 수가 아래 준위에 있는 원자 수보다 더 많아야 하기 때문이다. 그러나 이것은 흡수확률과 유도방출확률이 같다는 조건하에서 성립되는 이론이다. 레이저로 단장되어 원자간섭성이 존재하는 단장원자에서는 EIT현상에 의하여 흡수확률은 감소하나 유도방출확률은 변화가 없을 수 있다. 즉 흡수확률이 유도방출확률보다 훨씬 더 작을 수 있다. 이런 조건하에서는 밀도반전이 없더라도 유도방출이 흡수보다 더 강하게 일어날 수 있으며 따라서 레이저작동이 가능하게 된다. 이같이 밀도반전 없이 레이저작동이 일어나는 현상을 LWI라 한다.

Slow Light이란 c 보다 훨씬 더 작은 속도, 거시세계에서의 보통물체들의 속도 정도로 느리게 진행되는 빛을 의미한다. Slow Light은 레이저로 단장된 원자에서 EIT로 인하여 흡수계수는 감소하고 동시에 굴절률은 상당히 증가하는 조건이 만족될 때 실현될 수 있다. EIT를 이용하지 않더라도 원자의 임의의 두 준위와 공명조건을 (거의) 만족시키는 주파수의 빛에 대하여는 굴절률이 10 또는 100정도까지의 큰 값을 가질 수 있으나, 그와 동시에 흡수가 강하게 일어나서 빛이 사라지게 되므로 감소된 속도는 그다지 큰 의미를 줄 수 없다. 그러나 EIT를 이용하면 흡수가 거의 일어나지 않으면서 동시에 굴절률이 상당히 큰 값을 가질 수 있게되어 Slow Light이 존재하게 된다.

이 논문에서는 EIT, LWI, Slow Light의 기본원리를 소개하고 이와 관련된 실험들을 간단히 기술하고자 한다.

2. EIT의 기본원리

EIT의 기본원리를 설명하기 위하여 우선 그림 1(a)의 2준위 원자를 생각하자. 원자가 아래 준위 $|1\rangle$ 에 있다고 공명조건

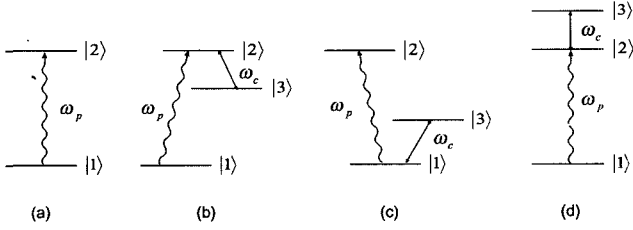


그림 1. 2준위원자와 3준위원자. (a) 2준위원자 (b) Λ형 3준위원자 (c) V형 3준위원자 (d) cascade형 3준위원자. ω_p 와 ω_c 는 각각 조사레이저와 결합레이저의 주파수이다.

($\omega_p = E_2 - E_1 / \hbar = \omega_{21}$)을 만족시키는 주파수 ω_p 의 빛이 입사하면 빛이 흡수되고 원자가 위 준위 $|2\rangle$ 로 올라갈 확률은 일반적으로 상당히 크다. 그러나 준위 $|1\rangle$ 또는 $|2\rangle$ 를 제3의 준위 $|3\rangle$ 과 결합시켜주는 강력한 결합레이저(coupling laser)(주파수 ω_c)를 원자에 입사시킨 상태에서 또다시 주파수 ω_p 의 빛을 입사시키면, 이 빛이 흡수될 확률은 위 1(a)의 경우보다 훨씬 더 작을 수 있다는 것이 EIT의 핵심이다. 준위 $|3\rangle$ 을 결합시키는 방법은 여러 가지 있으나 대표적인 경우는 그림 1(b)의 Λ형 3준위, 그림 1(c)의 V형 3준위, 그림 1(d)의 cascade형 3준위 등이다. 이 논문에서는 현재까지 실험이 가장 많이 수행된 Λ형 3준위를 대상으로 논의하고자 한다.

그림 1(a)의 2준위원자의 경우, 공명조건이 만족된다고 가정하고($\omega_p = \omega_{21}$) 초기시각 $t=0$ 에 원자가 아래 준위 $|1\rangle$ 에 있을 때 시각 $t > 0$ 에 원자를 위 준위 $|2\rangle$ 에서 발견할 확률, 즉 ω_p 의 광자가 흡수될 확률은

$$P_2(t) = \sin^2 \frac{\Omega_{12} t}{2} \quad (1)$$

으로 주어지는 것은 잘 알려져 있다^[4,5]. 여기서 Ω_{12} 는 라비주파수(Rabi frequency)라 부르는데 입사한 빛의 전기장 진폭에 비례하고 또한 두 준위 $|1\rangle$, $|2\rangle$ 간의 쌍극자 행렬요소(dipole matrix element)에 비례한다(준위 $|1\rangle$ 과 $|2\rangle$ 사이의 전이가 쌍극자 전이라고 가정함). 식 (1)에서 보듯이 공명조건을 만족시키는 빛이 2준위원자에 입사하면 원자는 두 준위사이에서 라비진동수로 진동한다. 여기서 특히 시각 $t = \{(2m+1)\pi\} / \Omega_{12}$ ($m = 0, 1, 2, \dots$)에서는 흡수확률이 1이 됨을 유의하도록 한다.

이제 그림 1(b)와 같이 준위 $|2\rangle$ 와 제3의 준위 $|3\rangle$ 을 결합시키는 강력한 결합레이저가 $|1\rangle - |2\rangle$ 전이의 흡수를 모니터링하는 조사레이저(probe laser)와 함께 원자에 입사할 때 조사레이저 광자의 흡수확률이 1(a)의 경우와 어떻게 다른지를 계산하여 보자. 이 계산은 양자광학 책들에 나와있는 2준위원자에 대한 계산을 그대로 연장시켜 쉽게 수행할 수 있으나, EIT의 기본원리를 이해하기 위한 출발점이 되므로 여기에 간단히 기술하겠

다. 준고전이론(semiclassical theory)을 택하여 결합레이저, 조사레이저를 고전적으로 취급하면 그 전기장은 각각

$$E_c(t) = \epsilon_c \cos \omega_c t, \quad E_p(t) = \epsilon_p \cos \omega_p t \quad (2)$$

로 표시된다(두 전기장은 일반적으로 위상이 다르나 본 논의에서는 중요하지 않으므로 여기서는 위상이 같다고 가정함). 편위상 두 레이저가 모두 공명조건

$$\omega_c = \frac{E_2 - E_3}{\hbar} = \omega_{23}, \quad \omega_p = \frac{E_2 - E_1}{\hbar} = \omega_{21} \quad (3)$$

을 만족시킨다고 가정하자. 시각 t 에서의 원자의 상태를

$$\Psi(t) = a_1(t)e^{-iE_1 t/\hbar} + a_2(t)e^{-iE_2 t/\hbar} + a_3(t)e^{-iE_3 t/\hbar} \quad (4)$$

라 하고 슈레딩거 방정식으로부터 확률진폭 $a_1(t)$, $a_2(t)$, $a_3(t)$ 에 대한 방정식을 구하면

$$\frac{da_1(t)}{dt} = -\frac{i}{2} \Omega_{12} a_2(t) \quad (5)$$

$$\frac{da_2(t)}{dt} = -\frac{i}{2} \Omega_{21} a_1(t) - \frac{i}{2} \Omega_{23} a_3(t) \quad (6)$$

$$\frac{da_3(t)}{dt} = -\frac{i}{2} \Omega_{32} a_2(t) \quad (7)$$

이 된다. 여기서 $\Omega_{12} = \Omega_{21}^*$, $\Omega_{23} = \Omega_{32}^*$ 는 각각 $|1\rangle - |2\rangle$ 전이, $|2\rangle - |3\rangle$ 전이에 대한 라비진동수로

$$\Omega_{12} = -\vec{d}_{12} \cdot \hat{u}_p \epsilon_p, \quad \Omega_{23} = -\vec{d}_{23} \cdot \hat{u}_c \epsilon_c \quad (8)$$

이고 \vec{d}_{12} , \vec{d}_{23} 는 쌍극자 모멘트, \hat{u}_p , \hat{u}_c 는 각각 조사레이저, 결합레이저의 편광벡터이다. 편위상 Ω_{12} 와 Ω_{23} 를 실수라 가정하고 식 (5)-(7)을 $a_1(0)=1$, $a_2(0)=a_3(0)=0$ 의 초기조건에 대하여 풀면

$$a_1(t) = \frac{\Omega_{23}^2}{\Omega^2} + \frac{\Omega_{12}^2}{\Omega^2} \cos \frac{\Omega t}{2} \quad (9)$$

$$a_2(t) = -i \frac{\Omega_{12}}{\Omega} \sin \frac{\Omega t}{2} \quad (10)$$

$$a_3(t) = -\frac{\Omega_{12} \Omega_{23}}{\Omega^2} + \frac{\Omega_{12}^* \Omega_{23}}{\Omega^2} \cos \frac{\Omega t}{2} \quad (11)$$

의 해를 얻는다. 여기서 Ω 는

$$\Omega = \sqrt{\Omega_{12}^2 + \Omega_{23}^2} \quad (12)$$

이다. 시각 t 에 원자가 준위 $|2\rangle$ 에 있을 확률은

$$P_2(t) = |a_2(t)|^2 = \frac{\Omega_{12}^2}{\Omega^2} \sin^2 \frac{\Omega t}{2} \quad (13)$$

이며 그 최대값은 Ω_{12}^2/Ω^2 이다. 특히 $\Omega_{12} \ll \Omega_{23}$ 인 경우, 즉 결합 레이저는 강력하나 조사레이저는 약한 경우 확률 $P_2(t)$ 는 시간에 관계없이 항상 작은 값에 머물러 있게 된다. 이 결과를 2준 위원자의 식 (1)과 비교하면 단순히 강력한 결합레이저를 입사 시킴으로써 조사레이저의 흡수확률이 급격히 감소된 것을 볼 수 있다. 이것이 A형 3준위원자에서의 EIT현상의 기본원리이다.

3. EIT의 물리적 해석

2장에서 간단한 계산결과로 본 EIT현상의 물리적 이해는 암흑상태(dark state)의 개념을 통하여 가능하다. 암흑상태란 외부에서 들어온 빛에 반응하지 않는 상태, 즉 빛을 흡수하지 않고 그대로 통과시키는 원자의 상태를 의미한다. 우선 암흑상태를 설명하기 위하여 그림 1(b)의 A형 3준위계를 생각하고 공명조건을 만족시키는 결합레이저와 조사레이저가 입사하였다고 하자. 단 여기서는 2장의 경우와 달리 원자가 초기시간 $t=0$ 에 준위 $|1\rangle$ 과 $|3\rangle$ 의 중첩상태

$$|\Psi(t=0)\rangle = \cos \theta |1\rangle + \sin \theta e^{-i\eta} |3\rangle \quad (14)$$

에 준비되어 있다고 가정한다. 식 (14)의 초기조건하에 식 (5)~(7)은 쉽게 풀 수 있으며 $a_2(t)$ 에 대한 해는

$$a_2(t) = -\frac{i}{\Omega} (\Omega_{12} \cos \theta + \Omega_{23} \sin \theta e^{-i\eta}) \sin \frac{\Omega t}{2} \quad (15)$$

로 주어진다. 이 식에서 알 수 있듯이 만일 $\Omega_{12} \cos \theta + \Omega_{23} \sin \theta e^{-i\eta} = 0$ 의 조건이 만족되면 원자가 준위 $|2\rangle$ 로 전이할 확률은 항상 0이고, 따라서, 원자는 초기상태에 머물러 있게 된다. 이 현상을 간섭성 감금(coherent trapping)이라 부르며 이 현상에 의하여 영원히 변화하지 않는 상태를 암흑상태라 부른다. 위의 조건을 풀면 암흑상태 $|\Psi\rangle_d$ 가

$$|\Psi\rangle_d = \frac{\Omega_{23}}{\Omega} |1\rangle - \frac{\Omega_{12}}{\Omega} |3\rangle \quad (16)$$

이 되는 것을 쉽게 유도할 수 있다. 특히 $\Omega_{12} = \Omega_{23}$ 일 때는

$$|\Psi\rangle_d = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle - |3\rangle) \quad (17)$$

가 된다. 위의 논의에서 알 수 있듯이 A형 3준위원자에서 조사

레이저의 흡수가 일어나지 않게 하는 가장 확실한 방법은 원자를 암흑상태 $|\Psi\rangle_d$ 에 준비시켜 놓고 조사레이저와 결합레이저를 입사시키는 방법이다. 그러나 문제는 실제로는 초기상태가 암흑상태가 아니고 바닥상태 $|1\rangle$ 이라는 점이다. 초기상태가 $|1\rangle$ 일 때의 확률진폭 $a_1(t)$, $a_3(t)$ 에 대한 해인 식 (9)와 (11)을 보면, 시간 t 에 대한 평균을 취할 때 $a_1(t) \approx \Omega_{23}^2/\Omega^2$, $a_3(t) \approx -\Omega_{12}\Omega_{23}/\Omega^2$ 이 되며, 특히 $\Omega_{12} \ll \Omega_{23}$ 인 경우는 $a_1(t) \approx \Omega_{23}^2/\Omega^2$, $a_3(t) \approx -\Omega_{12}/\Omega$ 이어서 식 (16)의 암흑상태의 조건이 평균적으로 만족됨을 알 수 있다. 다시 말하여 원자의 초기상태가 $|1\rangle$ 인 경우도 $\Omega_{12} \ll \Omega_{23}$ 이면 결합레이저와 조사레이저의 공동작용으로 인하여 원자의 상태가 근사적으로 암흑상태를 유지해가면서 시간에 따라 변하게 된다. 이것이 A형 3준위에서 EIT가 일어나는 물리적 설명이 된다.

4. 흡수와 분산

2장에서 기술한 EIT의 간단한 계산은 결합레이저와 조사레이저가 각각 원자의 $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$ 전이, $|2\rangle \rightarrow |1\rangle$ 전이와 정확히 공명을 이룬다는 가정 하에서 수행되었다. 그러나 EIT(LWI, Slow Light)현상의 정밀한 이론적 분석을 위해서는 조사레이저의 흡수스펙트럼과 분산(dispersion)스펙트럼을 알아야 한다. 그리고, 조사레이저 주파수 ω_p 와 $|2\rangle \rightarrow |1\rangle$ 전이의 주파수 ω_{21} 과의 차이 ($\Delta = \omega_p - \omega_{21}$)가 0이 아닌 경우를 고려하여 흡수계수와 굴절률을 Δ 의 함수로 계산하는 것이 필요하다. 또한 각 준위의 붕괴(decay) 및 쌍극자 모멘트의 붕괴도 고려되어야 한다. 이러한 계산을 위해서는 밀도행렬(density matrix)을 사용하는 것이 편리하다. 그림 1(b)의 A형 3준위원자에 대하여 슈레딩거 묘사에서 밀도행렬의 비대각선 요소에 대한 방정식은

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_{21}}{dt} &= -(i\omega_{21} + \gamma_1)\rho_{21} - \frac{i}{2}\Omega_{12}e^{-i\omega_p t}(\rho_{22} - \rho_{11}) \\ &+ \frac{i}{2}\Omega_{23}e^{-i\omega_c t}\rho_{31} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_{23}}{dt} &= -(i\omega_{23} + \gamma_2)\rho_{23} - i\Omega_{23}e^{-i\omega_c t}(\rho_{22} - \rho_{33}) \\ &+ \frac{i}{2}\Omega_{12}e^{-i\omega_p t}\rho_{13} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_{31}}{dt} &= -(i\omega_{31} + \gamma_3)\rho_{31} - \frac{i}{2}\Omega_{12}e^{-i\omega_p t}\rho_{32} \\ &+ \frac{i}{2}\Omega_{23}e^{i\omega_c t}\rho_{21} \end{aligned} \quad (20)$$

이다. 여기서 결합레이저는 $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$ 전이와 공명을 이룬다고 가

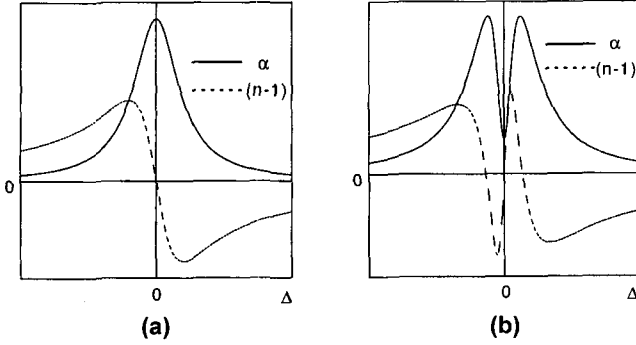


그림 2. 흡수스펙트럼(실선)과 분산스펙트럼(점선). (a) 2준위원자 (b) A형 3준위원자. α 는 흡수계수, n 은 굴절률, $\Delta=\omega_p - \omega_{21}$ 은 조사레이저 주파수와 원자주파수의 차이이다.

정하였고($\omega_c = \omega_{23}$), ω_{12} , ω_{23} 는 실수라고 가정하였으며, γ_1 , γ_2 , γ_3 는 각각 ρ_{21} , ρ_{23} , ρ_{31} 의 붕괴계수이다. EIT의 논의를 위하여 중요한 양은 $\rho_{12}(t)$ 이다. 식 (18)-(20)에서 $\rho_{12}(t)$ 의 해를 구하면 감수율(susceptibility) $\chi = \chi' + i\chi''$ 를 구할 수 있고 χ'' 은 흡수, χ' 은 분산과 관련되어 있기 때문이다. 상세한 계산과정은 참고문헌 [2]에 있으므로 생략하고 여기서는 그 결과만을 아래에 간단히 소개하도록 한다.

그림 1(a)의 2준위계에서의 흡수스펙트럼과 분산스펙트럼을 계산하면 보통 그림 2(a)와 같은 흡수 및 분산곡선을 얻는다. 그러나 A형 3준위계에 대한 계산결과를 그림 2(b)에서 보는 바와 같이 매우 다른 특성을 보인다. 흡수스펙트럼은 특히 $\Delta=0$ 부근에서 0에 가까운 값을 갖는다. 이것이 바로 EIT이다. 분산스펙트럼은 $\Delta=0$ 부근에서 특히 급격한 변화를 보인다. 이것은 상대적으로 작은 군속도(group velocity)를 주며 동시에 흡수는 0에 가까우므로 Slow Light의 관측을 가능하게 해준다.

5. EIT, LWI, Slow Light과 관련된 실험

이장에서는 지금까지 EIT, LWI, Slow Light과 관련되어 수행된 중요한 실험들을 간단히 기술한다.

5.1 EIT의 실험적 관측

EIT/LWI 이론이 1989년 미국의 Harris^[6]와 Scully그룹^[7]에 의하여 발표된 후 EIT의 첫 실험적 관측은 1991년 Harris와 공동연구자들^[8]에 의하여 수행되었다. Sr(strontium)의 A형 3준위를 이용한 이 실험에서 그림 1(b)의 $|1\rangle$, $|2\rangle$, $|3\rangle$ 에 해당하는 준위는 각각 Sr의 $5s5p^1P_1$, $4d5d^1D_2$, $4d5p^1D_2$ 이다. $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ 의 전이선 부근에서 흡수를 관측한 결과 투과율(transmittance)이 결합레이저가 없을 때는 e^{-20} 에 불과하였으나 1.5×10^7 W/cm²의

결합레이저의 영향하에서는 e^{-1} 로 급격히 증가한 것을 관측하였다.

5.2 LWI의 실험적 관측

LWI의 전제조건인 밀도반전 없는 증폭(amplification without inversion, AWI)은 1993년 네델란드그룹^[9]과 Scully그룹^[10]에 의하여 관측되었고, 이어서 1995년 LWI가 Scully그룹^[11]에 의하여 처음 관측되었다. 최초의 LWI 실험에서는 Rb(rubidium)의 V형 3준위를 이용하였는데 그림 1(c)의 준위 $|1\rangle$, $|2\rangle$, $|3\rangle$ 은 각각 Rb의 $S_{1/2}$, $F=1$; $P_{1/2}$, $F=2$; $P_{3/2}$, $F=2$ 에 해당하며 레이저작동을 위하여 제4의 준위 $S_{1/2}$, $F=2$ 에서 $P_{1/2}$, $F=2$ 로 비간섭성 펌핑(incoherent pumping)을 하였다. 레이저작동은 $P_{1/2}$, $F=2 \rightarrow S_{1/2}$, $F=1$ 전이에서 관측하였다. A형 3준위계에서의 LWI는 1996년 역시 Scully그룹^[12]에 의하여 관측되었는데, Na(sodium)를 사용하였으며 그림 1(b)의 준위 $|1\rangle$, $|2\rangle$, $|3\rangle$ 은 각각 Na의 $3S_{1/2}$, $F=1$; $3P_{1/2}$, $F=1$; $3S_{1/2}$, $F=2$ 에 해당한다. 역시 레이저작동을 위하여 $3S_{1/2}$, $F=1$ 에서 $3P_{1/2}$, $F=1$ 로 비간섭성 펌핑을 해주었다.

5.3 흡수감소와 굴절률증가의 측정

1995년 발표된 실험에서 Xiao 등^[13]은 Rb의 cascade형 3준위를 이용하여 $5S_{1/2} - 5P_{3/2}$ 전이 근처에서 흡수는 감소하고 굴절률은 매우 급격한 변화를 보이는 것을 관측하였다. 그림 1(d)의 준위 $|1\rangle$, $|2\rangle$, $|3\rangle$ 에 해당하는 Rb의 준위는 각각 $5S_{1/2}$, $5P_{3/2}$, $5D_{5/2}$ 이고 흡수감소는 약 55%, 조사 광 펄스의 군속도는 $c/13.2$ 까지 감소되는 것을 확인하였다. 이어 발표된 실험에서 Kasapi 등^[14]은 조사 광 펄스의 군속도가 $c/165$ 까지 감소된 것을 관측하였다.

5.4 자발방출 억제 관측

강력한 결합레이저를 사용하면 흡수만 억제시킬 수 있는 것이 아니고 적당한 조건하에서는 반대로 자발방출도 억제시킬 수 있다. 자발방출 억제에 관한 실험적 관측은 1996년 Xia^[15] 등에 의하여 발표되었다.

5.5 자체집속 억제 관측

강력한 빛이 비선형 물질을 통과할 때는 굴절률 $n = n_0 + n_2 I$ (I 는 빛의 세기)이 빛의 세기가 큰 부분일수록 더 큰 이유로 인

하여 자체집속(self focusing)이 일어나고 이것은 물질을 파괴시키는 결과를 초래할 수 있다. 1995년 발표된 Jain 등^[16]의 실험에서는 강력한 결합레이저를 사용하여 Pb증기의 A형 3준위에서 n_2 를 감소시키고 따라서 자체집속을 억제시킬 수 있다는 것을 보였다.

5.6 전자유도 focusing과 defocusing

1995년 발표된 Moseley 등^[17]의 실험에서는 결합레이저 빔의 단면적 세기분포를 변화시켜 radial방향의 n_2 변화를 조절함으로써 focusing 또는 defocusing을 원하는 대로 유도시킬 수 있는 것을 보였다.

5.7 4파혼합에 의한 위상공액파 발생 증진

1996년 Li와 Xiao^[18]는 Rb의 A형 3준위계에서 EIT에 의하여 $\chi^{(1)}$ 을 감소시키고 $\chi^{(3)}$ 는 증가시켜 4파혼합에 의한 위상공액파(phase conjugate wave)의 발생을 증진시켰다. 또한 보통의 경우 발생된 위상공액파는 매질을 지나면서 다른 Rb원자에 흡수되어 약해지나, 이 실험에서는 EIT현상을 이용하여 흡수되지 않고 매질을 통과해 나오게 함으로써 위상공액파 신호의 약해짐을 막을 수 있었다.

5.8 등위원소 구별

1996년 발표된 이 실험에서 Kasapi^[19]는 0.03%의 ^{207}Pb 을 포함하고 있는 ^{208}Pb 의 샘플에서 EIT를 이용하여 ^{207}Pb 에서 나오는 신호의 흡수를 급격히 감소시키고 ^{208}Pb 에서 나오는 신호의 흡수는 오히려 증가시켜 ^{207}Pb 의 존재를 측정 가능하게 할 수 있는 것을 보였다.

5.9 고체에서의 EIT

지금까지 기술한 EIT 관련 실험들은 모두 기체에서 수행되었다. 이것은 EIT가 실현되려면 준위들간의 간섭성을 유지하는 것이 중요하고 좁은 선포의 준위들을 갖고 있는 기체에서만 간섭성 유지가 용이하기 때문이다. 그러나 EIT의 산업계에서의 응용이 실현되려면 이 현상이 고체에서도 나타나야 된다. 이런 관점에서 최근 미국, 일본의 연구팀^[20-22]이 발표한 저온의 고체 매질에서의 흡수감소 내지 흡수제거 관측은 흥미로운 발전이라 하겠다.

5.10 Slow Light의 관측

최근 Hau 등^[23]은 Na(sodium)의 Bose-Einstein condensation의 A형 3준위계를 이용하여 광펄스의 군속도(group velocity)를 2×10^7 배나 줄인 놀라운 실험결과를 발표하여 많은 주목을 받고 있다. 이 실험에서 관측한 펄스의 속도는 불과 17 m/s로서 거리의 자동차의 속도 정도밖에 되지 않는다. A형의 3준위로 사용된 Na의 준위는 $F=1, M_F=-1; F=2, M_F=-2; F=1, M_F=-2$ 이고 각각 그림 1(b)의 $|1\rangle, |2\rangle, |3\rangle$ 에 해당된다. 이미 논의한 대로 $\omega_p = \omega_{12}$ 부근에서 원자의 상태가 근사적으로 암흑상태를 유지하면서 시간에 따라 변화해 가므로 흡수는 매우 작고 굴절률은 매우 급히 변화한다는 사실이 Slow Light를 실현시킬 수 있는 기본원리가 된다. 매질을 통과해 가는 주파수 ω_p 인 광펄스의 군속도는

$$v_g = \frac{c}{n(\omega_p) + \omega_p \frac{dn(\omega_p)}{d\omega_p}} \quad (21)$$

로 주어진다. 이 실험의 조건하에서는 굴절률이 ω_p 근처에서 매우 급격히 변화하므로 식 (21)의 v_g 는 분모의 두번째 항에 거의 반비례하며 따라서 원자의 밀도에 반비례하고 결합레이저의 밝기에 비례한다. 온도를 Bose-Einstein condensation이 일어나는 $T_c=435$ nK 이하로 낮추어 원자의 밀도를 $5 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ 까지 높이고 또한 원자의 열운동이 작아서 EIT효과가 상대적으로 약한 결합레이저를 가지고도 잘 나타나는 조건하에서 실험을 수행한 것이 펄스의 속도를 17 m/s까지 낮추는데 성공한 주 이유가 된다.

6. 결 론

EIT, LWI, Slow Light은 양자이론을 3준위원자에 적용시킬 때 나타나는 기본 물리현상으로 우선 학문적인 입장에서 흥미로운 현상이다. 지금은 아직 학문적 연구의 대상이고 응용의 단계까지는 가지 않은 상태이지만 앞으로 여러 방면에 유용하게 응용될 것으로 전망되고 있다. 여기서 간단히 앞으로의 응용 전망을 살펴보도록 한다.

EIT는 밀도반전 없이도 레이저작동을 가능하게 하므로 특히 x선 등의 단파장 영역에서 레이저작동을 성취시키는 중요한 방법을 제공한다. x선 영역의 단파장으로 갈수록 레이저작동이 힘들어지는 것은 자발방출률이 커져서 밀도반전을 유지하기가 힘들기 때문이다. 그러나 EIT를 이용하면 밀도반전이 필요 없으므로 이러한 난점이 저절로 해소된다. EIT의 중요한

응용으로 x선 레이저의 개발이 손꼽히는 것은 바로 이런 이유이다.

이미 5장에 열거한 실험들에서 볼 수 있듯이 EIT는 여러 비선형 광학분야에 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 전망된다. 특히 강력한 펄스가 비선형 매질을 지날 때 흡수는 감소시키고 self focusing을 억제시킬 수 있고 나아가서는 focusing, defocusing을 유도시킬 수 있으므로, EIT는 강력한 광펄스의 효율적인 전파에 기여할 것으로 기대된다. 또한 EIT는 고정밀도의 magnetometer 개발^[24,25] 등 다양한 분야에 응용이 가능할 것으로 전망되고 있다.

속도가 17 m/s인 Slow Light이 실험적으로 관측된 것은 극히 최근이므로 어떻게 응용될 수 있을지는 앞으로 두고 보아야 할 것이다. 우선 생각할 수 있는 것은 큰 지연을 주는 광지연선(optical delay line)에의 사용이다. 또한 광펄스 저장, 광데이터 저장에의 응용도 전망할 수 있다.

근본적인 입장에서 보면 EIT, LWI, Slow Light은 원자를 레이저로 단장시켜서 원자의 광학적 특성에 심오한 변화를 줄 수 있다는 사실을 증명해 주는 현상들이다. 이런 원리를 이용하여 앞으로 어떤 새로운 특성을 창조해 내고 어떤 흥미로운 응용을 만들어내어 양자광학에 혁신을 가져올 수 있을지는 양자광학을 연구하는 현재의 연구자들에 달려있다고 볼 수 있다.

참고문헌

1. S. E. Harris, *Physics Today* (July 1997) p. 36.
2. M. O. Scully and M. S. Zubairy, *Quantum Optics* (Cambridge, 1997), Ch.7.
3. C. Cohen-Tannoudji, J. Dupont-Roc and G. Grynberg, *Atom-Photon Interactions* (Wiley, New York, 1992), Ch.6.
4. 이해웅, 빛의 양자이론 (대우학술총서, 민음사, 1998), Ch.3.
5. P. Meystre and M. Sargent III, *Elements of Quantum Optics* (Springer, Berlin, 1990).
6. S. E. Harris, *Phys. Rev. Lett.* **62**, 1033 (1989).
7. M. O. Scully, S. Y. Zhu and A. Gavrielides, *Phys. Rev. Lett.* **62**, 2813 (1989).
8. K. J. Boller, A. Imamoglu and S. E. Harris, *Phys. Rev. Lett.* **66**, 2593 (1991).
9. W. E. van der Veer, R. J. J. van Diest, A. Donszelmann and H. B. van Linden van den Heuvell, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 3243 (1993).
10. E. S. Fry, X. Li, D. Nikonov, G. G. Padmabandu, M. O. Scul-

- ly, A. V. Smith, F. K. Tittel, C. Wang, S. R. Wilkinson and S. Y. Zhu, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 3235 (1993).
11. A. S. Zibrov, M. D. Lukin, D. E. Nikonov, L. Hollberg, M. O. Scully, V. L. Velichansky and H. G. Robinson, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 1499 (1995).
12. G. G. Padmabandu, G. R. Welch, I. N. Shubin, E. S. Fry, D. E. Nikonov, M. D. Lukin and M. O. Scully, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 2053 (1996).
13. M. Xiao, Y. Q. Li, S. Z. Jin and J. Gea-Banacloche, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 666 (1995).
14. A. Kasapi, M. Jain, G. Y. Yin and S. E. Harris, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 2447 (1995).
15. H. R. Xia, C. Y. Ye and S. Y. Zhu, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 1032 (1996).
16. M. Jain, A. J. Merriam, A. Kasapi, G. Y. Yin and S. E. Harris, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 4385 (1995).
17. R. R. Moseley, S. Shepherd, D. J. Fulton, B. D. Sinclair and M. H. Dunn, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 670 (1995).
18. Y. Q. Li and M. Xiao, *Opt. Lett.* **21**, 1064 (1996).
19. A. Kasapi, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 1035 (1996).
20. B. S. Ham, P. R. Hemmer and M. S. Shahriar, *Opt. Commun.* **144**, 227 (1997).
21. Y. Zhao, C. Wu, B. S. Ham, M. K. Kim and E. Awad, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 641 (1997).
22. K. Ichimura, K. Yamamoto and N. Gemma, *Phys. Rev. A* **58**, 4116 (1998).
23. L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton and C. H. Behroozi, *Nature* **397**, 594 (1999).
24. M. O. Scully and M. Fleischhauer, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 1360 (1992).
25. M. Fleischhauer and M. O. Scully, *Phys. Rev. A* **49**, 1973 (1994).

저자약력

성명 : 이해웅
 현재 근무처 : 한국과학기술원 물리학과 교수
 최종학력 : 1970, 미국 University of Pittsburgh, 물리학, Ph.D.
 1966, 서울대학교, 물리학, 학사
 주요경력 : 1989-현재, 한국과학기술원 교수
 1981-1989, 미국 Oakland University 조교수/부교수
 1980-1981, 미국 University of New Mexico 연구원
 1979-1980, 미국 University of Arizona 연구원
 1977-1978, 미국 University of Rochester 연구원
 E-mail : hwlec@laputa.kaist.ac.kr