

1. 서론

결맞는 광원인 레이저가 개발된 이후, 레이저와 원자와의 상호작용으로 생성된 결맞음 원자 매질은 비직관적인 흥미로운 양자 현상을 보여주었다. 2준위 원자와 레이저의 상호작용에 의한 단일광자 원자결맞음은 2준위 원자의 원자 상태 밀도가 주기적으로 바뀌는 라비 진동 (Rabi oscillation)이라는 현상으로 나타난다. 따라서 라비 진동 현상을 관측하는 것은 2준위 원자의 두 원자 상태가 중첩된 양자 상태가 되어 있다는 것을 의미한다.

한편, 3준위 원자계와 2개의 결맞음 광원과의 상호작용으로 나타나는 이광자 원자결맞음 현상이 최근에 활발하게 연구되어지고 있다. 이광자 원자결맞음을 바탕

상의 공통적인 특징은 투과 또는 흡수가 일어나는 주파수 영역이 매우 좁다는 것이다. 이러한 좁은 분광 특성은 정밀한 주파수 기준을 필요로 하는 원자시계와 원자자계 연구에 응용되며, 또한 공진 진동수 영역에서 급격한 흡수와 투과로 인한 매질의 분산은 느린 빛과 빠른 빛과 같은 광펄스의 속도제어 연구로 발전되어 연구가 진행되고 있다.

특히 최근에는 이광자 원자결맞음에 의해서 중첩된 원자의 양자 상태를 이용한 양자광학 및 양자정보 분야에 응용 연구가 활발하게 진행되고 있다.

본 원고에서는 원자물리 분야뿐만 아니라 최근 양자광학과 양자 정보 그리고 인공적인 양자 시스템 개발에 활발하게 연구되고 있는 EIT와 EIA로 대표되는 이광자 원자결맞음 현상에 대해서 간단히 설명하고, 최근에

특집 ■ 원자물리

이광자 원자결맞음

문한섭*

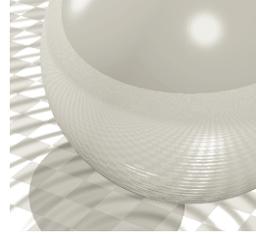
으로 대표적인 원자결맞음 현상이 전자기 유도 투과 (electromagnetically induced transparency; EIT)이다. [1] EIT 매질에서는 원자와 공진하는 주파수를 가진 조사광이 흡수하지 않고 투과가 일어나는 현상으로 이러한 특성은 양자간섭의 소멸 간섭 효과로 간단하게 설명된다. 한편, EIT와 반대 현상으로 전자기 유도 흡수 (electromagnetically induced absorption; EIA)라는 현상이 있다. EIA 현상은 원자와 공진하는 주파수에서 매우 좁은 강한 흡수를 일으킨다 [2-3]. 두 현

이광자 원자결맞음을 응용한 원자시계, 원자자계, 그리고 광펄스 속력 제어 및 양자 메모리에 대하여 간략히 소개한다 [4-5].

2. 이광자 원자결맞음

3준위 원자계의 구도는 두 개의 바닥준위와 하나의 여기준위와 결합된 Λ 형 원자계, 두 개의 여기준위와

* 부산대학교 물리학과



하나의 바닥준위와 결합된 V형 원자계, 그리고 하나의 바닥준위, 중간 여기준위, 최상 여기준위로 차례로 결합된 사다리형 원자계가 있으며, 각 구조는 각각 다른 특성을 가진다. 특히, 각각의 원자계에서 얻어진 분광 연구결과는 원자결맞음 현상을 이해하고 응용하는데 중요하다. 한편, 원자결맞음 분광 스펙트럼에서 나타나는 광펌핑 효과에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

3준위 원자계에서 각 준위의 에너지 차이에 따라서 Λ 형 구조, V형 구조, 그리고 사다리형 구조로 나눌 수 있다 [6]. 그림 1은 간단한 3준위 Λ 형 구조 원자계와 결맞음 레이저 광원과의 상호작용을 나타낸 것이다. EIT는 강한 결합광 (Ω_c)과 상호작용하는 원자에 의해서 AC-Stack 분리가 일어나고 조사광이 분리된 원자 상태를 조사할 때 소멸 양자간섭에 의해서 공진주파수에서 조사광이 흡수되지 않고 투과하는 EIT 현상이다. 이 때 투과가 일어나는 주파수 영역은 원자의 자발방출률에 의해서 제한된다. Λ 형 구조의 경우는 두 바닥준위 ($|1\rangle, |2\rangle$)의 생존시간 (lifetime)과 역비례 관계에 있고 결합광과 조사광이 공통으로 상호작용하는 여기준위 ($|3\rangle$)와는 관계가 없다. 따라서 바닥준위의 생존시간이 충분히 길다면 투과 주파수 영역이 매우 좁게 된다. EIT현상을 이해하기 위해서 결합광과 상호작용하는 두 원자 상태 ($|2\rangle, |3\rangle$)를 결합광을 포함한 새로운 양자상태 ($|d_{(+)}\rangle, |d_{(-)}\rangle$)로 표현할 수 있다. 그림 1(b)에서 표현된 두 양자 상태 ($|d_{(+)}\rangle, |d_{(-)}\rangle$)의 에너지 차이는 결합광의 라비 진동수에 비례하며, 이러한 현상을 Autler-Townes doublet으로 부른다. EIT는 조사광이 $|1\rangle$ 과 $|d_{(+)}\rangle$ 사이에서 전이와 $|1\rangle$ 과

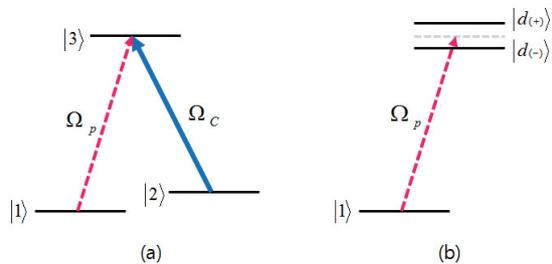


그림 1. 간단한 3준위 Λ 형 구조 원자계와 결맞음 레이저 광원과의 상호작용: (a) 강한 결합광 (Ω_c)과 약한 조사광 (Ω_p)과 상호작용하는 3준위 Λ 형 구조 원자계, (b) 결합광을 포함한 새로운 양자상태 ($|d_{(+)}\rangle, |d_{(-)}\rangle$).

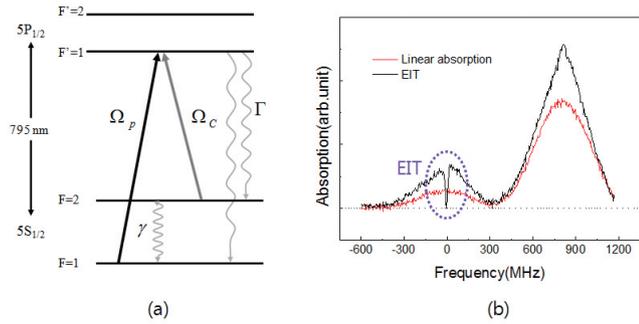


그림 2. 루비듐 원자의 D_1 전이선 ($5S_{1/2}-5P_{1/2}$)에서 Λ 형 구조(a)와 전형적인 EIT 스펙트럼(b).

$|d_{(-)}\rangle$ 사이에서 전이가 동시에 일어날 때, 두 전이 사이에 소멸 양자간섭이 일어나면서 조사광이 투과가 일어나는 것으로 이해할 수 있다.

그림 2는 루비듐 원자의 D_1 전이선 ($5S_{1/2}-5P_{1/2}$)에서 Λ 형 구조와 전형적인 EIT 스펙트럼이다. 그림 2(a)에서 보이는 것과 같이 D_1 전이선의 초미세 전이선에서 조사광(Ω_p)은 $5S_{1/2}(F=1)-5P_{1/2}(F=1)$ 전이선에 공명하고, 결합광(Ω_c)은 $5S_{1/2}(F=2)-5P_{1/2}(F=1)$ 전이선에서 공명하면서 3준위 Λ 형 구조가 만들어진다. 이 때 여기준위의 자발방출 시간에 의해서 결정되는 자연선평폭(Γ)는 약 6 MHz이다. 한편 EIT선평폭의 한계는 바닥준위 사이에 전이와 관계되어지는 γ 에 의해서 결정된다. 그러나 γ 는 원자의 충돌, 원자와 증기 셀의 벽과의 충돌 등에 의해서 달라질 수 있으며, 이러한 충돌에 의한 효과가 없을 때는 수 십 Hz로 매우 작다.

그림 2(b)에 있는 그래프는 조사광의 선형흡수 스펙트럼(빨간색)과 EIT스펙트럼(검은색)을 보여주고 있다. 선형흡수 스펙트럼은 결합광이 없을 때 조사광이 루비듐 원자 증기가 도플러 효과에 의해서 넓은 흡수를 보여주고 있다. EIT 스펙트럼은 결합광에 의해서 원자결맞음 매질이 생성되어 공진선 근처에서 조사광이 좁은 투과가 나타나는 것을 확인할 수 있다. EIT에 의한 좁은 투과는 공진선 근처에서 급격한 분산을 일으킬 수 있을 뿐만 아니라 정확한 주파수 기준이 될 수 있다.

EIT와 반대가 되는 현상으로 EIA가 있다는 것을 앞서서 언급하였다. EIT와 비교하여 상대적으로 EIA현상에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 그러나 EIA현상을 설명하는 가장 간단한 원자구조는 그림 3에서 보여지는 것과 같이 4준위 N형 구조이다. 특히 EIA현상

이광자 원자결맞음

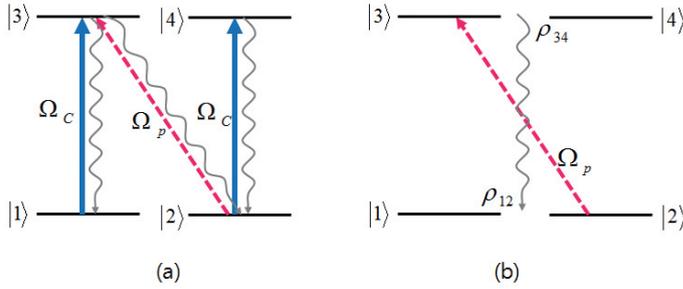


그림 3. EIA현상을 설명하는 간단한 4준위 N형 구도 원자계와 결맞음 레이저 광원과의 상호작용: (a) 강한 결합광 (Ω_C)과 약한 조사광 (Ω_P)과 상호작용하는 축퇴된 4준위 N형 구도 원자계, (b) ρ_{12} 에서 ρ_{34} 로의 자발적 원자결맞음 전이.

은 두 바닥 상태 ($|1\rangle, |2\rangle$)와 두 여기 상태 ($|3\rangle, |4\rangle$)가 각각 축퇴된 준위라는 조건이 필요로 한다. 그 이유는 그림 3(a)에서 결합광이 각각 $|1\rangle-|3\rangle$ 과 $|2\rangle-|4\rangle$ 전이를 일으킬 때 축퇴된 여기준위 사이에 원자결맞음 ρ_{34} 를 생성되고, 원자결맞음 ρ_{34} 가 자발적 전이에 의해서 축퇴된 바닥준위 사이에 원자결맞음 ρ_{12} 을 증가시키는 그림 3(b)와 같은 과정이 일어날 수 있기 때문이다. 이러한 현상을 자발적 원자결맞음 전이라고 한다.

그림 4(a)와 같이 루비듐 원자의 D_2 전이선 ($5S_{1/2} - 5P_{3/2}$)에서 자기 부준위 사이에서 N형 구도를 만들 수 있다. 그림 2(a)에서 보이는 것과 같이 D_2 전이선의 초미세 전이선에서 조사광(Ω_P)과 결합광(Ω_C)은 모두 $5S_{1/2}(F=2) - 5P_{3/2}(F'=3)$ 전이선에 공명하는 두 레이저의 편광은 서로 수직한 편광을 사용한다. 레이저의 편광에 따라서 자기 부준위 사이에 전이가 달라지기 때문에 축퇴된 N형 원자계 구도에서 자발적 원자결맞음 전이가 일어날 수 있다. 특히, 축퇴된 원자 준위를 사용하

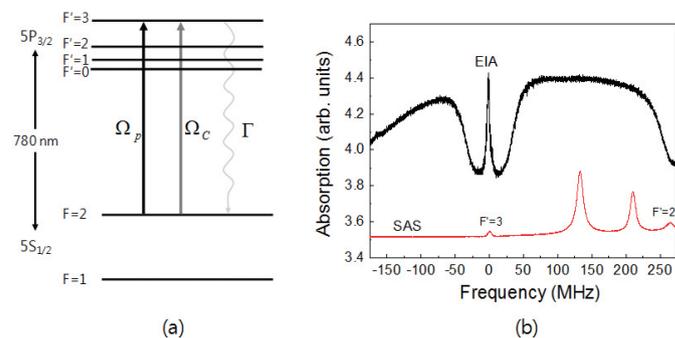


그림 4. 루비듐 원자의 D_2 전이선 ($5S_{1/2} - 5P_{3/2}$)에서 N형 구도(a)와 전형적인 EIA 스펙트럼(b).

기 때문에 다른 바닥 준위로의 광펌핑에 의한 전이를 최소화하기 위해서 $5S_{1/2}(F=2) - 5P_{3/2}(F'=3)$ 의 닫힌 전이선을 이용하여 EIA를 일으키는 자발적 원자결맞음 전이를 최대화시킨다. EIA의 선포의 한계는 축퇴된 바닥준위 사이에 전이와 관계되며 이 선포의 한계는 EIT와 같이 충돌에 의한 효과가 없을 때는 수 십 Hz로 매우 작다.

그림 4(b)에 있는 그래프는 조사광의 포화흡수 스펙트럼(빨간색)과 EIA 스펙트럼

(검은색)을 보여주고 있다. 결합광과 조사광이 같은 전이선에 공명을 일으키기 때문에 강한 결합광에 의해서 선형흡수 스펙트럼에서 포화에 의한 흡수 감소 현상과 더불어 EIA 스펙트럼은 결합광에 의해서 원자결맞음 매질이 생성되어 공진선 근처에서 조사광이 좁은 흡수가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히 EIA의 좁은 흡수 전이선 근처에서는 급격한 비정상 분산으로 인하여 광 펄스가 진공에서 진행하는 속력보다 빨리 진행되는 흥미로운 현상을 일으킬 수 있다.

3. 이광자 원자결맞음 이용한 응용 연구

매우 좁은 분광 특성을 가진 이광자 원자결맞음에 대한 연구는 분광학적인 연구 분야를 넘어서 정밀 측정, 생체 신호 측정과 양자 정보 분야의 응용 연구를 확대되고 있다. 먼저, 좁은 선포를 가진 EIT 스펙트럼 또는 결맞음 밀도 포획 (coherent population trapping; CPT) 스펙트럼을 이용한 원자시계 개발 연구이다.

원자시계는 세슘, 루비듐과 같은 알칼리족 원자의 초미세 바닥준위 사이의 주파수를 기준으로 정확한 주파수를 구현하게 된다. 기존의 원자시계는 세슘 원자 증기 빔을 이용하여 초미세 바닥준위 사이의 에너지와 일치하는 RF (radio frequency)에 의한 고분해 분광을 이용한다. 그러나 CPT 원자시계는 초미세 바닥준위 사이의 주파수의 차이를 가진 두 주파수 성분의 레이저를 이용하여 좁은 선포

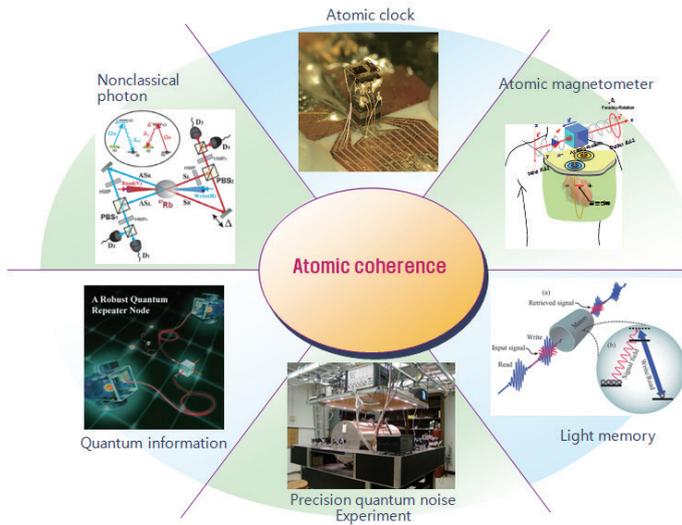
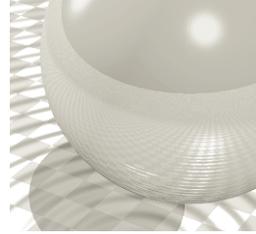


그림 5. 원자결맞음을 이용한 다양한 응용 연구.

의 CPT 스펙트럼을 얻고 이것을 기준으로 원자시계를 구현하는 것이다 [7]. 특히 CPT 원자시계는 반도체 레이저에 공급되는 전류를 직접 변조하거나 외부 변조를 이용하여 한대의 레이저에서 두 개의 주파수 성분을 얻고 원자 증기 셀을 통과시키면서 간단한 방법으로 구현이 가능하기 때문에 소형화가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 최근에 미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서는 초소형 원자시계를 개발하고 이것에 대한 다양한 응용 가능성을 소개한 바 있다.

다음은 고감도의 원자자계에 대한 연구이다. 고감도 자계는 초전도체 소자를 이용한 SQUID(Superconducting Quantum Interference Device)를 바탕으로 개발되어 상용화되어 이용되고 있다. 그러나 초전도체 소자는 극저온에서 동작을 하기 때문에 장비 운영과 비용 등에 많은 제약이 있다는 단점을 가지고 있다. 최근에 심자도와 뇌자도를 측정함으로써 현재 기술로 진단이 어려운 심장질환의 돌연사와 뇌질환의 진단 가능성이 높아지면서 고감도 자계 연구에 대한 많은 관심이 집중되고 있다. 원자결맞음을 이용한 원자자계는 초전도체 소자가 가지고 있는 단점을 극복하면서 자기장 측정 감도를 SQUID이상으로 높일 수 있는 가능성을 가지고 있다. 특히 2008년 MIT(Massachusetts Institute of Technology)에서 선정한 10대 미래기술

로 원자자계를 선정할 정도로 세계적으로 높은 관심을 받고 있는 분야이다. 이러한 고감도 원자자계 구현이 가능한 것은 매우 좁은 선폭의 원자결맞음 분광 스펙트럼으로 인하여 미세한 외부의 자기장에 의한 자기부준위의 에너지 변화를 감지할 수 있다. 이러한 자기장의 변화는 원자결맞음 매질과 상호작용으로 레이저의 편광 상태의 변화를 유도하는 비선형 광자기 효과(nonlinear magneto-optic effect; NMOE)로 측정되어 원자자계로 구현이 가능하다 [8].

원자결맞음 매질 내부에서의 광펄스의 속력 제어, 저장 및 재생에 관한 연구이다. 진공 중에서 빛의 속력은 299 792 458 m/s로 정의되어 있다. 그러나 매질 내부에서의 빛의 속력은 매질의 굴절률에 따라서 달라진다. 분산매질 내부를 진행하는 광펄스의 군속력은 분산 정도에 따라서 달라지는데, 급격한 분산을 가지는 조건에서 광펄스의 군속력이 급격하게 변하게 된다. 원자결맞음 매질 중에서 좁은 주파수 영역에서 투과하는 EIT의 경우는 공진주파수 근처에서 급격한 정상 분산 매질이 되고 이러한 급격한 분산으로 인하여 광펄스의 속력을 느리게 만들 수 있다. 특히 매질의 밀도가 높은 냉각된 원자의 경우는 수십 m/s의 속력으로 진행되는 느린 빛을 생성시킨 결과를 발표하였다 [9]. 반대로 좁은 주파수 영역에서 흡수하는 EIA(electromagnetically induced absorption)의 경우는 공진주파수 근처에서 급격한 비정상 분산 매질이 된다. 이 매질을 통과하는 광펄스는 진공상태의 빛의 속력 보다 빠른 초광속 펄스가 생성된다. 이와 같은 연구는 광펄스의 군속력을 제어할 수 있는 흥미로운 연구로 많은 관심을 받고 있다 [10]. 한편, 원자 매질 내부에 조사광 펄스를 저장하고 재생하는 연구도 활발하게 진행되고 있다. EIT매질로 조사광 펄스가 입사되어 펄스가 매질 내부에 있을 때 결합광을 적절히 조절하면 조사광의 펄스의 정보가 EIT매질 내부에 저장이 되는 광저장 현상을 관측할 수 있다 [11]. 저장된 광은 결합광을 조절하여 임의의 시간에 재생이 가능하다. 이러한 광의 저장 및 재생에 관한 연구는 최근에 활발하게 연구되는 양자통신의 광 메모

이광자 원자결맞음

리로 응용될 수 있는 중요한 기술로 다양한 조건에서 연구가 진행되고 있다.

이 밖에도 원자결맞음 매질에서 비선형 현상 및 광 스 위칭 등 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있다.

4. 결론

원자결맞음은 레이저와 원자의 상호작용을 이용하여 원자 준위 사이에 원자결맞음 중첩을 생성시킴으로써 결맞음 밀도 포획 상태라고 부르는 새로운 양자상태를 말한다. 원자결맞음의 대표적인 현상으로 전자기 유도 투과(electromagnetically induced transparency ; EIT) 또는 결맞음 밀도 포획 (CPT)이 있다. 이 현상들의 특징은 공명 주파수의 레이저에 대해서 원자가 흡수 하지 않고 투과가 일어난다는 점과 Λ 형 원자계의 경우에 스펙트럼의 선폭이 매우 좁다는 점이다. 이러한 특징들을 이용하면 고정밀 소형 원자시계 (atomic clock) 개발 및 레이저 주파수 안정화 등에 활용될 수 있고, 원자의 결맞음 제어를 통하여 효과적으로 양자얽힘 상태를 구현할 수 있게 됨으로써 양자암호, 양자전산, 양자통신 등의 양자정보 프로토콜을 구현할 수 있다. 또한 원자결맞음 현상을 이용하면 원자시계나 양자정보에 관한 연구뿐만 아니라 여러 분야에서 새로운 단계로 도약할 수 있는 창의적인 방법에 실마리를 제공할 수 있다. 고감도 원자자계는 생체자기 측정, 미소 금속탐지 등 다양한 응용분야를 가지고 있으며, MIT 10대 미래 기술로 선정될 만큼 미래의 첨단연구의 핵심 기술이 되고 있다.

참고문헌

- [1] K. J. Boller, A. Imamoglu and S. E. Harris, Phys. Rev. Lett. 66, 2593–2596 (1991).
- [2] A. M. Akulshin, S. Barreiro, and A. Lezama, Phys. Rev. A, 57,2996–3002(1998).
- [3] A. V. Taichenachev, A. M. Tumaikin, and V. I. Yudin, Phys. Rev. A 61,011802(R)(1999).
- [4] 문한섭, 물리학과 첨단기술 19(5), 12–18 (2010).
- [5] 배인호, 이희정, 문한섭, 물리학과 첨단기술 19(10), 16–19 (2010).
- [6] D. J. Fulton, S. Shepherd, R. R. Moseley, B. D. Sinclair, and M. H. Dunn, Phys. Rev. A 52, 2302–2311 (1995).
- [7] J. Vanier, Appl. Phys. B 81, 421–442 (2005).
- [8] D. Budker, W. Gawlik, D. F. Kimball, S. M. Rochester, V. V. Yashchuk, and A. Weis, Rev. Mod. Phys., 74, 1153–1201, (2002).
- [9] L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton, and C. H. Behroozi, Nature 397, 594–598 (1999).
- [10] R. W. Boyd and P. Narum, J. Mod. Opt. 54, 2403–2411 (2007).
- [11] C. Liu, Z. Dutton, C.H. Behroozi, and L.V. Hau, Nature 409, 490 (2001).

약 력



문한섭

- 2006년 9월 - 현재
부산대학교 물리학과, 부교수
- 2001년 4월 - 2006년 8월
한국표준과학연구원, 선임연구원
- 2000년 3월 - 2001년 3월
한국원자력연구원, Postdoctoral Fellow
- 1997년 3월 - 2000년 2월
한국교원대학교 물리교육과, 박사
- 1994년 3월 - 1996년 2월
한국교원대학교 물리교육과, 석사
- 1987년 3월 - 1991년 2월
한국교원대학교 물리교육과, 학사