전자기 유도 투과 (EIT)

DOI: 10.3938/PhiT.19.023

문 한 섭

Electromagnetically Induced Transparency (EIT)

Han Seb MOON

I briefly introduced the atomic coherence interacting with light and atoms and its applications. One of the interesting phenomena caused by the two-photon atomic coherence effect is electromagnetically induced transparency (EIT). The atomic coherence has been reported in various media and used in a range of applications, such as atomic clocks, light storage and atomic magnetometer.

서 론

결맞는 광원(레이저)과 원자와의 상호작용으로 생성된 결맞음 원자 매질은 비직관적인 흥미로운 현상을 보여준다. 대표적인 원자결맞음 현상이 전자기 유도 투과(electromagnetically induced transparency; EIT)이다.^[1] EIT 매질에서는 원자와 공진하는 주파수를 가진 조사광이 흡수하지 않고 투과가 일어나고, 투과 주파수 영역이 매우 좁다는 특성을 가진다. 이러한 특성은 양자간섭의 소멸 간섭 효과로 간단하게 설명된다. 최근에 EIT 매질의 특성을 응용한 다양한 연구를 활발하게 진행하고 있다. 대표적인 분야를 예를 들면 다음과 같다.

첫째, 원자결맞음을 이용한 고분해 원자결맞음 분광이다. 원자결맞음 분광은 3준위 원자계를 바탕으로 많은 연구가 진행되고 있다. 3준위 원자계의 구조는 두 개의 바닥준위와 하나의 여기준위와 결합된 Λ 형 원자계, 두 개의 여기준위와 하나의 바닥준위와 결합된 V 형 원자계, 그리고 하나의 바닥준위, 중간 여기준위, 최상 여기준위로 차례로 결합된 사다리형 원자계가 있으며, 각 구조는 각각 다른 특성을 가진다.^[2] 특히, 각각의 원자계에서 얻어진 분광 연구결과는 원자결맞음

현상을 이해하고 응용하는데 중요하다. 한편, 원자결맞음 분광 스펙트럼에서 나타나는 광범핑 효과에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

둘째, 좁은 선폭을 가진 EIT 스펙트럼 또는 결맞음 밀도 포획(coherent population trapping; CPT) 스펙트럼을 이용한 원자시계 개발연구이다. 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 선폭의 CPT 스펙트럼을 얻고 이것을 기준으로 원자시계를 구현하는 것이다.^[3] 특히 CPT 원자시계는 반도체 레이저에 공급되는 전류를 직접 변조하거나 외부 변조를 이용하여 한 대의 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.

셋째, 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 장비운영과 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 소

저자약력

문한섭 교수는 한국교원대학교 박사(2000)로서, 한국원자력연구원의 박사후연수생, 한국표준과학연구원의 선임연구원(2001-2006)을 거쳐, 2006년부터 현재까지 부산대학교 물리학과 부교수로 재직 중이다.
(hsmoon@pusan.ac.kr)

REFERENCES

- [1] K. J. Boller, A. Imamoglu and S. E. Harris, Phys. Rev. Lett. **66**, 2593 (1991).
- [2] D. J. Fulton, S. Shepherd, R. R. Moseley, B. D. Sinclair and M. H. Dunn, Phys. Rev. A **52**, 2302 (1995).
- [3] J. Vanier, Appl. Phys. B **81**, 421 (2005).

자가 가지고 있는 단점을 극복하면서 자기장 측정 감도를 SQUID 이상으로 높일 수 있는 가능성을 가지고 있다. 특히 2008년 MIT(Massachusetts Institute of Technology)에서 선정한 10대 미래기술로 원자자계를 선정할 정도로 세계적으로 높은 관심을 받고 있는 분야이다. 이러한 고감도 원자자계 구현이 가능한 것은 매우 좁은 선평의 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.^[4]

넷째, 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 분산정도에 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.^[5] 반대로 좁은 주파수 영역에서 흡수하는 EIA(electromagnetically induced absorption)의 경우는 공진주파수 근처에서 급격한 비정상 분산 매질이 된다. 이 매질을 통과하는 광펄스는 진공상태의 빛의 속력보다 빠른 초광속 펄스가 생성된다. 이와 같은 연구는 광펄스의 군속력을 제어할 수 있는 흥미로운 연구로 많은 관심을 받고 있다.^[6] 한편, 원자 매질 내부에 조사광 펄스를 저장하고 재생하는 연구도 활발하게 진행되고 있다. EIT 매질로 조사광 펄스가 입사되어 펄스가 매질 내부에 있을 때 결합광을 적절히 조절하면 조사광의 펄스의 정보가 EIT 매질 내부에 저장되는 광저장 현상을 관측할 수 있다.^[7] 저장된 광은 결합광을 조절하여 임의의 시간에 재생이 가능하다. 이러한 광의 저장 및 재생에 관한 연구는 최근에 활발하게 연구되는 양자통신의 광 메모리로 응용될 수 있는 중요한 기술로 다양한 조건에서 연구가 진행되고 있다.

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

원자결맞음을 이용한 고분해 원자분광

그림 1은 간단한 3준위 원자계와 결맞음 레이저 광원과의

Fig. 1. Three-level atomic system interacted with the coupling laser(ω_c) and the probe laser(ω_p); (a) Λ -type atomic system, (b) V-type atomic system, (c) ladder-type atomic system.

상호작용을 나타낸 것이다. 3준위 원자계에서 각 준위의 에너지 차이에 따라서 (a) Λ 형 구조, (b) V형 구조, 그리고 (c) 사다리형 구조로 나눌 수 있다. 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 현상이다. 이때 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. 그러나 V형 구조에서는 두 여기준위 ($|2\rangle$, $|3\rangle$)의 생존시간과 관계되고 일반적으로 여기준위의 생존시간은 바닥준위와 비교하여 매우 짧기 때문에 넓은 투과 주파수 영역을 가지게 된다. 뿐만 아니라 자발방출의 경우에 위상이 불규칙적임으로 원자결맞음을 유지하기 어렵다. 따라서 V형 구조의 경우는 일반적으로 EIT의 특성을 갖지 못한다.

그림 2는 루비듐 원자에서 Λ 형 구조(a)와 사다리형 구조(b)의 EIT를 구현한 실험장치의 개략도와 스펙트럼이다.^[8] 그림 2(a)의 Λ 형 구조의 실험장치를 살펴보면 조사광(LD1)과 결합광(LD2)은 외부공진형 반도체 레이저를 사용하고 서로 수직인 선편광된 레이저 광을 빔분리기(BS1)로 합쳐서 같은 방향으로 루비듐 증기 셀을 통과시킨다. 조사광과 결합광을 같은

REFERENCES

- [4] D. Budker, W. Gawlik, D. F. Kimball, S. M. Rochester, V. V. Yashchuk and A. Weis, Rev. Mod. Phys. **74**, 1153 (2002).
- [5] L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton and C. H. Behroozi, Nature **397**, 594 (1999).
- [6] R. W. Boyd and P. Narum, J. Mod. Opt. **54**, 2403 (2007).
- [7] C. Liu, Z. Dutton, C. H. Behroozi and L. V. Hau, Nature **409**, 490 (2001).
- [8] H. S. Moon, L. Lee and J. B. Kim, J. Opt. Soc. Am. B **22**, 2529 (2005).

Fig. 2. Experimental setup for EIT and the typical EIT spectrum of Rb atoms in (a) Δ -type atomic system and (b) Ladder-type atomic system.

방향으로 진행시키는 것은 원자증기를 이용하는 경우에 도플러 효과를 상쇄시켜야 하기 때문이다. 루비듐 증기 셀을 통과한 레이저 광은 편광빔분리기(PBS)에서 결합광과 조사광을 분리한 후 조사광만을 광검출기(PD)로 검출한다. 그림 2에 있는 그래프는 조사광의 선형흡수 스펙트럼(빨간색)과 EIT 스펙트럼(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.

사다리형 구도에서 EIT는 그림 2(b)에서 보여주고 있다.^[8] 실험장치에서 Δ 형 구도와는 차이가 결합광과 조사광의 방향이 서로 반대방향이라는 점이다. 이것은 앞에서 설명한 것과 같이 사다리형 구도에서는 원자 증기에 의한 도플러 효과를 상쇄시키는 구도가 서로 반대방향으로 진행되는 방향이다. 한편 측정된 EIT 스펙트럼은 Δ 형 EIT와 큰 차이를 확인할 수 있다. 첫째, EIT 스펙트럼에서 여기준위의 초미세구조를 관측할 수 있다. 이것은 실제 루비듐 원자는 여기상태에 초미세구

Fig. 3. (a) Energy diagram of the $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$ - $5D_{5/2}$ transition of ^{87}Rb and (b) absorption spectrum due to EIT and DROP in the ladder-type atomic system.

조를 가지고 있고 여기상태의 초미세구조의 에너지 간격이 수십 MHz로 매우 좁기 때문에 사다리형 EIT 스펙트럼에서 초미세구조를 관측할 수 있다. 두 번째, 광펌핑에 의한 선형 흡수 배경 스펙트럼의 변형이 없다. Δ 형 EIT의 경우는 결합광이 있을 때 선형흡수에 의한 배경 스펙트럼의 왜곡이 심하다. 이것은 강한 결합광에 의해서 조사광과 상호작용하는 준위의 밀도가 증가하는 광펌핑에 의한 효과로 알려져 있다. 그러나 사다리형 EIT는 결합광이 없을 때 투과 신호만이 사라지고 선형흡수에 의한 배경 스펙트럼에는 왜곡이 없다. 이것은 약한 조사광에 의한 원자 밀도의 변화가 없을 것으로 예상되었기 때문이다.

원자결맞음을 이용한 원자분광 스펙트럼에는 광펌핑 효과에 의한 효과가 포함되어 있고 Δ 형 EIT의 경우는 다양한 연구가 진행되었다. 광펌핑에 의한 효과는 원자결맞음에 의한 특성과 구별되지만, 사다리형 EIT에는 광펌핑 효과가 없는 것으로 알려져 있었다. 그림 3은 ^{87}Rb 원자의 $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$ - $5D_{5/2}$ 전이선의 초미세구조와 사다리형 EIT 스펙트럼을 확대한 것이다. 실제 원자는 단순한 3준위계가 아니라 초미세구조를 포함하고 있기 때문에 여러 가지 경로로 여기상태에서 바닥상태로 전이가 가능하다. 이러한 전이선들을 고려하면 사다리형 원자계에서 매우 흥미로운 광펌핑 효과가 있다는 것을 알 수 있다. 최근에 사다리형 원자계에서 이중공명광펌핑(double resonance optical pumping; DROP)에 의한 광펌핑 효과가 포함되어 있다는 것이 밝혀졌다.^[9] DROP의 과정을 간단히

REFERENCES

- [9] H. S. Moon, L. Lee and J. B. Kim, Opt. Express **16**, 12163 (2008).

살펴보면, $5S_{1/2}(F=2)$ 준위에 있는 원자들이 $5P_{3/2}(F'=3)$ 준위를 거쳐 $5D_{5/2}(F''=2, 3, 4)$ 로 전이된다. 이때 $5D_{5/2}(F''=2, 3)$ 준위로 전이된 원자는 $5P_{3/2}(F'=1, 2)$ 준위를 거쳐서 $5S_{1/2}(F=1)$ 준위로 자발방출하는 과정이 발생된다. 이러한 과정이 DROP이다. DROP에 의해서 $5S_{1/2}(F=2)$ 준위의 원자 밀도가 $5S_{1/2}(F=1)$ 준위로 광펌핑이 되기 때문에 조사광의 흡수가 줄어드는 효과가 발생된다. EIT는 원자결맞음에 의한 효과이고 DROP은 자발방출에 의한 효과로 완전히 다르지만 스펙트럼에서 구별하는 것은 어렵다. 따라서 원자결맞음을 이용한 원자분광 스펙트럼에는 광펌핑 효과가 포함되어 있다. 특별히 사다리형 EIT는 DROP에 의한 투과와 구별하기 어렵기 때문에 스펙트럼의 분석에 주의가 필요하다.

결맞음 밀도 포획 원자시계

인터넷을 통한 정보량의 확대와 이동통신의 구현을 위해서는 무엇보다 중요한 것이 정확한 시간이다. 이 원리는 같은 시간에 많은 정보량을 주고받거나 핸드폰으로 통신을 하는 경우, 주고받는 신호들 사이에 시각동기가 필요하고 시각동기를 위해서는 정확한 시간이 기준이 된다. 이러한 정확한 시간 기준은 원자의 공명 전이선의 주파수를 이용한 원자시계로부터 얻을 수 있다. 그리고 차량, 항공기, 선박 등의 위치 정보를 알려주는 GPS와 자동항법 시스템을 운영하는 GPS 인공 위성에 가장 핵심이 되는 것이 또한 원자시계이다.

한편, 시간은 가장 정확하게 측정할 수 있는 물리 측정량이다. 따라서 많은 실생활의 응용뿐만 아니라 일반상대성 이론의 실험적 검증과 초미세상수의 변화량 측정 등 최첨단 물리학의 실험적 검증을 위한 핵심기술이 된다. 현재 시간의 상대 정확도는 약 10^{-16} 정도이다. 이러한 정확도를 가지는 이유는 시간을 구현하기 위해서 원자 전이선 사이에 고유한 공명 주파수를 이용하기 때문에 가능하다. 시간의 정의는 세슘원자의 초미세구조 사이의 전이선 사이의 공명 주파수인 9 192 631 770 Hz로 정의되어 있다. 이렇게 정의된 시간을 구현하기 위해서 세슘 원자를 이용한 원자시계 개발이 각국의 표준기관을 중심으로 이루어졌다.

원자시계의 정확도를 높이기 위한 핵심 기술은 고분해 원자분광이다. 원자시계에 응용될 수 있는 고분해 레이저 분광 기술의 획기적인 진보를 공로로 노벨 물리학상을 최근까지 4 차례나 수상하였다. 1989년 노먼 램지에 의해서 지금 현재 원자시계의 가장 중요한 기술적인 방법인 분리 진동장 방법을 개발한 공로로 노벨 물리학상을 수상한 이후, 1997년에는 레이저를 이용하여 원자를 냉각시킴으로써 거의 정지된 상태의 원자를 이용하여 고분해 레이저 분광을 수행할 수 있

Fig. 4. CPT atomic clock. (a) three-level atomic system of the $5S_{1/2}$ - $5P_{1/2}$ transition of ^{87}Rb , (b) typical CPT spectrum with narrow spectral width and (c) experimental setup for CPT atomic clock.

는 기술과 원자를 조작하여 분수형태로 만들어서 원자시계에 응용함으로써 원자시계의 정확도를 10^{-16} 까지 올릴 수 있었다. 2001년에는 원자의 온도를 더욱 낮게 하여 원자들을 하나의 원자 덩어리로 만든 보즈-아인슈타인 응축이 가능하였고, 2005년에 노벨 물리학상을 수상한 펄토초 레이저를 이용한 광주파수 빔은 빛의 주파수를 측정할 수 있는 획기적인 방법을 개발함으로써 시간의 정확도를 더 높일 수 있는 핵심 기술이 마련되었다. 앞에서 언급한 것과 같이 높은 정확도를 갖는 시간은 정보통신 기술과 위성을 이용한 항법장치 등에 매우 중요하기 때문에 많은 연구자들에 의해서 연구가 진행되고 있다.

한편, 원자분수와 같이 매우 높은 정확도를 갖지는 않지만, 소형 원자시계에 대한 연구는 정밀한 장치, 군사용 장비, 첨단 장치 등에서 응용되면서 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 연구는 원자결맞음 고분해 레이저 분광기술을 바탕으로 이루어지고 있다. 원자결맞음 고분해 레이저 분광기술은 레이저와 원자의 상호작용을 이용하여 원자 준위 사이에 원자결맞음 중첩을 생성시킴으로써 결맞음 밀도 포획 상태(Coherent population trapping state: CPT state) 또는 어둠 상태(dark state)라고 부르는 새로운 양자상태를 만들고, 이러한 상태를 레이저 분광학적인 방법으로 측정하는 것이다.

원자시계의 정확도를 높이기 위한 핵심 기술은 레이저를 이용한 고분해 원자분광이다. 원자시계에 응용될 수 있는 고

분해 레이저 분광 기술 연구는 원자결맞음 고분해 레이저 분광기술을 바탕으로 이루어지고 있다. 앞에서 언급한 것과 같이 CPT 현상의 특징은 공명 주파수의 레이저에 대해서 원자가 흡수하지 않고 투과가 일어난다는 것과 3준위 Λ 형 원자계의 경우에 투과 신호의 선평이 여기준위의 자연선평을 따르지 않고 바닥준위 사이에서의 소멸률을 따르기 때문에 투과 신호의 선평이 매우 좁다는 것이다. 이러한 특징 때문에 CPT에 의한 원자결맞음 매질에서 얻어진 CPT 스펙트럼은 주파수 표준으로 구현되는 원자시계로 응용이 가능하다.

그림 4는 CPT 원자시계 개발에 사용된 루비듐 원자의 $5S_{1/2}-5P_{1/2}$ 전이선을 이용한 3준위 Λ 형 원자계(a), 전형적인 CPT 스펙트럼(b) 그리고 간단한 실험장치도(c)를 보여주고 있다.^[10] 두 개의 결맞음 광원이 원자와 동시에 상호작용을 하는 3준위 Λ 형 원자계를 이용하여 CPT를 바탕으로 한 원자시계를 구현한다. 두 광원의 주파수 차이를 루비듐 원자의 바닥준위의 에너지 차이 (약 6.8 GHz) 근처에서 두 광원의 주파수 차이를 변화시키면서 원자와 상호작용한 결과로 스펙트럼을 측정하면, 그림 4(b)와 같이 매우 선평이 좁은 투과스펙트럼을 얻을 수 있다. 이 신호는 루비듐 원자에서 얻어진 CPT 스펙트럼이라고 한다. CPT 스펙트럼의 선평은 약 110 Hz로 측정되었다. 이 선평은 원자가 여기상태로 여기된 후 바닥상태로 자발방출을 하는데 걸리는 시간에 의해서 결정되는 자연선평이다. CPT 스펙트럼의 선평은 자연선평보다 60 000배나 좁은 스펙트럼을 보여준다. 이러한 좁은 선평의 스펙트럼은 매우 정확한 주파수 기준을 제공해준다. CPT 원자시계의 구현은 좁은 선평의 CPT 스펙트럼에 RF 주파수를 안정화시키는 것을 의미한다. 이러한 루비듐 원자를 이용한 소형 CPT 원자시계의 구성은 반도체 레이저 부분, 고분해 레이저 분광 부분, 주파수 안정화 부분으로 나뉘어진다. CPT 원자시계를 구현하기 위해서 그림 4(c)와 같은 간단한 장치를 소형화하여 제작이 가능하다.

원자 자계

자기장은 기본적인 물리량의 하나이며, 1832년 가우스(Gauss)에 의한 자기장 측정실험 이후 지금까지 자기공명, 홀효과, fluxgate 원리를 이용한 자계(magnetometer) 등 다양한 방법과 목적에 따른 효과적인 자기장측정 도구의 개발이 지속적으로 진행되고 있다. nT 이하의 미소 자기장 측정은 다양한 분야에서 필요로 하고 있다. 항공우주 및 지하자원 탐사, 그리고 생체자기 측정을 이용한 의료를 비롯하여 군사용 무기센서 그리고 CPT(charge parity time) violation 연구와 같은 기초과학에 이르기까지 다양한 분야에서 미소 자

기장 측정을 핵심기술로 하고 있다.

최근에 광을 이용한 원자 자계(atomic magnetometer)에 관한 연구가 SQUIDs의 한계를 극복할 한 방법으로서 활발히 진행되고 있다.^[4] 현재까지의 광학 자계 분야의 연구는 크게 두 가지 방향으로 요약할 수 있는데, 자기장에 의한 매질의 굴절률 변화 정도를 측정하는 방법과 자기부준위의 이동 정도를 측정하는 방법으로 대별된다.

원자결맞음 자계에 관한 연구는 Scully 그룹에서 원자결맞음 현상을 이용하여 루비듐원자에서 원자결맞음을 이용하여 자계를 개발했을 때 약 0.6 fT의 감도를 가지는 것으로 이론적인 결과를 보고하고 있다.^[11] Scully 그룹에서 이론으로 계산된 결과는 원자결맞음 자계가 다른 어떤 자계보다 우수한 자기장 감도를 가짐을 보여주고 있다.

가장 최근에는 G. Bason 등은 RF와 레이저와 이중공명을 이용한 원자자계를 이용한 19채널의 심자도 측정 센서를 구성하여 심자도 지도를 생성할 수 있는 연구가 진행하였다.^[12] 또한 초소형 원자자계가 NIST의 P. Schwindt에 의해서 개발되어 유비쿼터스 기술과 접목되어 휴대형 자기공명영상, 매설 폭발물 탐지기, 리모트 미네랄 측정기 등에 응용되는 연구가 진행될 수 있을 것으로 예상하고 있다. 이러한 연구기술은 MIT가 내놓은 2008년 10대 기술 리스트에 포함되면서 관련 분야의 사업에 큰 영향을 줄 것으로 예상되었다.^[13]

비선형 광자기 효과(NMOE; nonlinear magneto-optical effects)를 이용한 원자 자계는 진행방향에 수평 또는 수직인 자기장이 존재할 때 매질을 통과하는 빛의 편광면이 회전하는 패러데이 효과(Faraday Effect) 또는 보이그 효과(Voigt Effect)를 이용하여 자기장의 크기를 정밀 측정하는데, 편광의 회전정도가 레이저의 세기에 대해서 비선형적으로 변하기 때문에 비선형 광자기 효과라고 한다. 자기장에 의해 바닥준위의 자기부준위들이 비대칭 에너지 이동이 일어나게 되면 자기부준위간의 원자결맞음에 의한 CPT 신호의 큰 분산에 의해 편광면의 회전정도가 크게 달라질 수 있으며, 그 차이를 측정함으로써 자기장에 의한 효과를 검출할 수 있다.

이러한 원자자계는 원자매질 내에서 원자결맞음에 의한 비

REFERENCES

- [10] H. S. Moon, S. E. Park, Y. H. Park, L. Lee and J. B. Kim, J. Opt. Soc. Am. B **23**, 2393 (2006).
- [11] M. Fleischhauer, A. B. Matsko and M. O. Scully, Phys. Rev. A **62**, 013808 (2000).
- [12] G. Bison, N. Castagna, A. Hofer, P. Knowles, J.-L. Schenker, M. Kasprzak, H. Saudan and A. Weis, Appl. Phys. Lett. **95**, 173701 (2009).
- [13] <http://www.technologyreview.com/magazine>.

Fig. 5. Atomic magnetometer. (a) three-level atomic system in Hanle configuration, (b) polarization change due to nonlinear Faraday rotation, (c) experimental setup for an atomic magnetometer, and (d) typical NMOE spectrum.

선형성을 증대시킴으로써 비선형 광자기 효과 혹은 비선형 페러데이효과(NLFE; nonlinear Faraday effects)를 정밀 측정하는 방법이다. 원자 밀도가 충분하고 레이저의 세기가 크지 않다면, 자기부준위들의 대칭성에 의해 슈타르크 효과(ac Stark shift)에 의한 주파수 이동이나 레이저 빔의 세기에 관한 선폭 확대효과가 상쇄될 수 있기 때문에 매우 정밀한 측정이 가능하다.

그림 5(a)와 같이 원자의 자기부준위에서 Λ 형 구조가 생성되는 경우에 외부자기장에 따라서 자기부준위의 에너지 차이가 생기게 된다. 그림 5(b)에서 선편광은 반대방향으로 회전하는 두 원편광의 합으로 표현됨으로 자기부준위 사이에 Λ 형 구조가 생성된다. 따라서 외부의 자기장의 변화에 따라서 CPT 조건이 달라진다. NMOE 자체는 원리적으로 두 원편광 성분의 굴절률 변화에 의한 위상변화를 측정하는 것이다. 선편광된 광은 크기가 같고 반대방향으로 회전하는 두 원편광의 합으로 생각할 수 있기 때문에 선편광된 광이 자기부준위를 가진 원자매질을 통과하게 되면, 두 원편광 성분에 의해서 자기부준위 사이에 원자결맞음 증첩상태가 만들어진다. CPT에 의한 원자결맞음 매질에 자기장이 가해지면, 자기부준위의 에너지가 이동하고, 이로 인해서 두 원편광 성분의 굴절률 변화가 반대방향으로 나타난다. 이러한 두 성분의 위상 차이에 의해서 매질에 입력되기 전의 초기 편광은 돌아가게 된다. CPT로 인해서 만들어진 큰 분산은 두 원편광의 위상 차이를 매우 크게 만들 수 있기 때문에 외부자기장에 대해서 민감하게 반응하게 된다. 이러한 현상을 이용하여 미소 자기장을 측정할 수 있다.

그림 5(d)는 원자결맞음 분광 신호를 원자 자체에 응용하기 위해서 편광분석 장치를 이용하여 NMOE 신호를 측정한 것이다. NMOE 스펙트럼은 전형적으로 미분형태를 가지고 있으며, 이러한 NMOE 신호의 기울기는 외부자기장의 측정 감도에 매우 중요하며 광학적으로 얻어진 신호에서 전기적인 잡음을 제거하여 자기장 측정 감도를 높이는 경우에 약 자기장 측정 감도는 $10 \text{ pT}/\sqrt{Hz}$ 으로 측정된다.

광펄스 제어 및 광 저장

EIT는 원자매질의 흡수와 분산성질을 변화시키기 때문에 결맞음 원자매질 내부를 통과하는 빛의 속력이 변하게 된다. 진공 중에서 빛의 속도는 $299\,792\,458 \text{ m/s}$ 로 정의하고 있으나 잘 알려진 것처럼 빛의 속도는 매질 속에서 굴절률에 따라서 속도가 변한다. 그리고 매질의 굴절률은 매질의 흡수와 투과 특성으로 인하여 상호작용하는 빛의 주파수에 따라 달라지는 분산현상을 가진다. 분산매질 내부에서 빛의 군속력은 다음과 같이 표현된다.

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n(\omega) + \omega \frac{dn(\omega)}{d\omega}}$$

여기서 c 는 진공 중에서 빛의 속력이고 n 는 굴절률을 나타낸다. 따라서 식에서 알 수 있는 것과 같이 군속력은 주파수에 따른 굴절률의 변화가 급격하게 일어날 경우에 분모값에 큰 변화가 생기는 것을 알 수 있다. $\frac{dn(\omega)}{d\omega} > 0$ 경우를 정상 분산이라고 하고 이 경우에 분모값이 증가하기 때문에 군속력이 줄어들게 된다. 이러한 정상분산이 아주 크게 일어나는 경우에 매질 내부에서 군속력은 매우 느려질 수 있다는 것을 알 수 있다. EIT 매질은 급격한 정상분산을 가지고 있기 때문에 빛의 군속력을 느리게 하는데 이용된다. 반대로 $\frac{dn(\omega)}{d\omega} < 0$ 경우는 비정상분산이라고 하고 이 경우는 분모값이 감소하기 때문에 군속력이 빨라진다. 따라서 군속력은 c 보다 빠른 초광속을 얻을 수 있다. 특히 급격한 비정상분산을 가진 매질을 지나는 펄스에서 초광속 펄스 측정이 가능하다. 이러한 비정상분산 매질은 전자기 유도 흡수(electromagnetically induced absorption; EIA)라는 원자결맞음 현상으로 구현이 가능하다.

그림 6(a)는 정상파 형태의 결함광으로부터 EIA 매질에서 초광속 펄스를 구현하고 EIT 매질에서 느린 펄스를 하나의

(a)

(b)

Fig. 6. (a) Subluminal and superluminal propagations (b) light storage in Rb atoms.

원자계에서 구현한 결과를 보여주고 있다.^[14] 검은색 곡선은 공기 중을 진행하는 펄스를 측정된 것인데, 이것을 기준으로 초광속 펄스와 느린 펄스가 완전히 분리되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 연구가 고밀도의 냉각된 원자에서 약 17 m/s로 측정될 만큼 느려진다. 한편, 초광속 펄스의 경우는 고밀도 원자매질을 통과할 때 EIT 현상에 의해서 펄스폭이 흡수되기 때문에 느린 펄스와 같은 정도의 속도 차이를 얻는데 한계가 있다.

원자결맞음 매질에서 조사광 펄스가 느린 속력으로 진행하는 동안 매질 내부에 펄스 압축이 일어난다. 조사광 펄스가 원자결맞음 매질 내부에 있을 때 결합광을 제거하면 조사광 펄스의 정보가 원자결맞음 매질에 저장된다. 이렇게 저장된 조사광 펄스의 정보는 세기와 위상 및 양자상태의 정보까지 저장이 가능하다. 저장된 조사광 펄스의 정보는 결합광을 넣으면 조사광 펄스가 원자결맞음 매질에서 재생된다. 그림 6(b)는 루비듐 원자 증기에 조사광 펄스의 일부가 저장과 재생이 되는 것을 보여주는 것이다. 그림 6(b)에서 회색 점선 곡선은 조사광 펄스를 저장하기 전에 느린 조사광 펄스로 진

행하고 있는 것을 나타낸 것이다. 그리고 검은색 실선 곡선은 조사광 펄스를 저장한 후 약 5 μ s 후에 재생되고 있는 것을 보여주고 있다.

양자정보 기술에 있어서 양자얽힘상태는 필수적임이 최근 잘 알려져 있다. 그리고 얽힘상태 광자를 양자정보 응용에 사용하려면 궁극적으로는 양자메모리의 개발이 필요하다. 광자의 양자상태를 보존하면서 저장한 후 원하는 시간에 재생할 수 있는 장치가 필수적이며 양자메모리 개발에 큰 가능성을 가지고 있는 방법이 바로 EIT를 이용하는 것이다.

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 흡수하지 않고 투과가 일어난다는 점과 Λ 형 원자계의 경우에 스펙트럼의 선폴이 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 원자시계는 생체자기 측정, 미소 금속 탐지 등 다양한 응용분야를 가지고 있으며, 2008년 MIT 10대 미래기술로 선정될 만큼 미래의 첨단연구의 핵심 기술이 되고 있다.

원자들의 이러한 양자상태를 조절하는 기술이 원자시계, 고감도 원자시계, 양자통신과 같은 첨단 응용연구에 핵심이다. 원자결맞음 효과에 대한 연구와 원자결맞음을 높이는 방법에 대한 연구는 원자와 빛과의 상호작용을 이해하는 순수 과학적인 측면에서 매우 중요할 뿐만 아니라 원자결맞음을 이용한 많은 응용 연구의 기반이 되는 핵심기술로써 연구의 필요성이 절실하다.

REFERENCES

- [14] I. H. Bea and H. S. Moon, Phys. Rev. A to be submitted (2010).