원자 매질을 이용한 양자 광학

DOI: 10.3938/PhiT.19.050

배인호·이희정·문한섭*

Quantum Optics Using Atomic Medium

In-Ho BAE, Hee Jung LEE and Han Seb MOON*

For realization of quantum communication and the quantum computing, it is important to realize a narrow-bandwidth single-photon source and single-photon memory that preserves the quantum nature of the single-photon. We briefly introduced the methods for generating, storing, and retrieving nonclassical light using electromagnetically induced transparency (EIT) caused by the two-photon atomic coherence effect.

서론

양자 광학에서 최근에 가장 활발하게 연구되고 있는 분야 중에 하나가 단일 광자와 원자 매질과의 결맞음 상호작용을 이용한 양자 제어 분야이다. 단일 광자와 원자의 결맞음 상호작용은 기초과학의 중요성의 범위를 넘어서 양자 정보 전송 및 저장과 같은 양자 통신을 위해서 필수적인 요소 기술을 실현시키기 위해서 매우 중요하다.

광자는 양자 정보를 전달하는 데 효과적이며, 원자는 양자 상태의 조작과 긴 시간의 양자 정보 저장에 효율적이다. 이러한 특성을 양자 정보 전송에 활용하기 위해서는 원자와 빛의 비고전적인 상태 생성, 원자와 광자 간에 양자 상태의 결맞음 전이, 그리고 양자 메모리 기술들이 구현되어야 한다.^[1,2]

이러한 기술들의 구현을 위해서 공진기 양자 전자기 동역학(cavity QED) 실험에서는 반사율이 매우 높은 마이크로 공

진기를 이용하여 단일 광자와 단일 원자의 상호작용으로 단일 광자 생성 및 저장 등을 구현하고 있다.^[3] 단일 광자와 단일 원자를 이용한 연구는 매우 구현하기 어려운 실험 조건을 요구하는 고도의 실험 기술과 정밀한 실험장치를 이용하고 있다.

한편, 원자 앙상블에서 양자 펄스 빛을 조작하는 연구가 최근에 수행되고 있다. 원자와 빛을 이용한 양자 광학 연구는 원자 매질과 비고전 광원을 상호작용이 상대적으로 쉽고, 긴 원자 매질을 이용함으로써 긴 상호작용 시간을 이용할 수 있다는 장점을 가진다. 이러한 빛과 원자 매질과의 결맞음 상호작용의 대표적인 현상이 전자기 유도 투과(electromagnetically induced transparency: EIT)이다. EIT 현상은 양자 간섭 효과에 의해서 원자의 공명주파수에서 자연선폭보다 매우 좁은 주파수 영역의 투과가 일어날 수 있도록 급격한 굴절율의 변화를 일으킨다.^[4] 이러한 특성을 이용하여 EIT에 기반을 둔 양자 광학 기술로 단일 광자 생성, 광자 저장 및 광의 속도 제어에 이르기까지 다양한 연구가 수행되고 있다.^[1,2]

전자기 유도 투과(EIT)

결맞음 광원과 원자와의 상호작용은 원자 매질의 흡수와 분산의 성질을 변화시킨다. 전자기 유도 투과는 강한 결합광과 조사광이 3준위 원자계와 상호작용하여 조사광이 공진 주파수에 흡수하지 않고 투과하는 현상이다. 그림 1은 3준위 Λ 형 원자계와 상호작용하는 결합광과 조사광을 나타낸 것이다. 결합광은 바닥준위 $|g\rangle$ 와 여기준위 $|e\rangle$ 사이에서 공진하며, 조사광은 다른 바닥준위 $|s\rangle$ 와 여기준위 $|e\rangle$ 사이에서 공진한다. 이때 원자와 결맞음 광원과의 상호작용으로 두 바닥준

저자약력

배인호는 부산대학교 물리학과 박사과정에 있으며, 원자 매질에서의 광펄스의 광속제어 및 광저장 연구를 수행하고 있다.

이희정은 부산대학교 물리학과 박사과정에 있으며, 광원의 양자적인 성질과 원자 매질을 이용한 양자 광원 생성에 대한 연구를 수행하고 있다.

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

REFERENCES

- [1] M. D. Eisaman, *Generation, Storage, and Retrieval of Non-classical States of Light Using Atomic Ensembles*, Ph. D. Thesis, Harvard University, Cambridge, MA (2006).
- [2] K. S. Choi, H. Deng, J. Laurat and H. J. Kimble, *Nature* **452**, 67 (2008).
- [3] H. J. Kimble, *Physica Scripta* **76**, 127 (1998).
- [4] K. J. Boller, A. Imamoglu and S. E. Harris, *Phys. Rev. Lett.* **66**, 2593 (1991).

Fig. 1. 4-type atomic system interacted with the coupling laser (Ω_C) and the probe laser (Ω_P).

위 $|g\rangle$ 와 $|s\rangle$ 사이에 원자결맞음이 형성된다. 원자결맞음에 의한 양자 간섭 효과로 이광자 공명 조건에서 빛이 원자 매질에 흡수되지 않고 투과한다. 여기서 원자결맞음을 이 생성될 때, 원자의 양자 상태에 광원의 정보를 포함하게 된다.

EIT를 이용한 단일 광자 생성

빛의 특성을 구분하는 방법은 고전적으로 빛의 결맞음 정도에 따라서 레이저와 같은 결맞음 광원에서 열 광원과 같은 비결맞음 광원으로 구별할 수 있다. 빛의 결맞음은 빛의 위상과 세기의 균일한 정도로 정의할 수 있다.^[5]

한편, 양자역학적인 관점에서 빛은 광자의 통계적인 특성으로 구별되어진다. 광자 통계에 의해 구분되는 세 가지 종류의 광자는 다음과 같다.

*sub-poissonian 통계 $\Delta n < \sqrt{n}$

*poissonian 통계 $\Delta n = \sqrt{n}$ (Poisson 분포)

*super-poissonian 통계 $\Delta n > \sqrt{n}$ (Bose Einstein 분포)

레이저와 열 광원은 poissonian 통계와 super-poissonian 통계를 따르는 광자이다. 이는 광자의 통계적인 특성이 결맞음 정도에 따라서 분산의 정도가 달라지는 것을 의미한다. 레이저와 같은 결맞음 광원은 일정 시간 간격 내에 균일한 광자의 수를 가지는 반면에 비 결맞음 광원은 광자의 수가 혼돈적인 성질을 갖는다. 이러한 점에 있어서 비 결맞음 광원은 위상과 세기가 불규칙적인 고전적인 빛의 성질과 일관되게 설명된다. 한편, 고전적인 파동이론으로 설명되지 않는 sub-poissonian 통계를 갖는 광자가 있다. 이 광원을 '비고전 광(nonclassical light)'이라고 한다. 비고전 광은 결맞음 광원의 광자수 통계 분포의 분산보다 좁은 광자수 통계분포를 가지게 되는데, 이러한 분포를 sub-poissonian이라고 한다. 이러한 특성은 고

전적인 개념으로 설명되지 않는다.

● ● ● ● ● ● ● ● ● ● (응집광)
● ● ● ● ● ● ● ● ● ● (결맞음 광)
● ● ● ● ● ● ● ● ● ● (반응집 광)

이러한 광자의 특성을 광자수 통계의 분산 또는 2차 간섭성 함수로 표현할 수 있다.

* 응집 광 (bunched light) : $g^{(2)}(0) > 1$

* 결맞음 광 (coherent light) : $g^{(2)}(0) = 1$

* 반응집 광 (antibunched light): $g^{(2)}(0) < 1$

Hanbury Brown-Twiss (HBT) 방법은 2차 간섭성 함수를 측정하는 방법으로 잘 알려져 있다. 2차 간섭성은 광자들의 응집(bunching)의 정도를 나타내는 특성이라고 할 수 있다. 2차 간섭성은 광자 통계와도 밀접한 관련이 있기 때문에 광자들의 통계에 따라 다른 결과를 보인다. 2차 간섭성의 양자 이론에서는 고전 이론에서 존재하지 않는 양자적인 현상을 포함하므로 양자광학의 당위성을 보여줬다. 반응집광은 오로지 빛을 광자로 접근하는 양자 이론에서만 해석이 가능하다.

EIT를 이용하여 단일 광자의 생성과 제어가 가능한데, EIT를 이용한 단일 광자 생성에 대한 아이디어는 라만 산란(Raman scattering)을 이용하는 것이다. 그림 2는 4형 원자계에서 단일 광자 생성을 설명하기 위한 간단한 모식도이다.

원자의 전이선과 공진하는 주파수에서 크게 벗어난 강한 레이저를 이용하여 자발적 라만 산란(spontaneous Raman scattering)으로 두 바닥준위 $|g\rangle$ 와 $|s\rangle$ 사이에 원자결맞음을 생성시킨다. 이때 단일 Stokes 광자가 생성되고 단일 광자의 정보가 원자결맞음 상태에 저장된다. 단일 광자 생성을 위해서 일정한 시간이 지난 후 원하는 시간에 바닥준위 $|s\rangle$ 와 여기준위 $|e\rangle$ 사이에서 공진하는 재생 레이저 펄스를 보내주면 $|g\rangle$ 와 $|s\rangle$ 사이에서 공진하는 단일 anti-Stokes 광자가 생성된다.^[1]

이와 같이 EIT를 이용하여 생성된 단일 광자는 단일 광자의 성질을 제어할 수 있다는 장점을 가진다. 첫째, 단일 광자의 주파수 폭을 제어할 수 있다. 이것은 매우 중요한 문제이다. 일반적으로 단일 광자를 생성하는 방법으로 자발적 매개하향 변환(spontaneously parametric down conversion; SPDC)에 의한 비고전 광원의 생성은 생성된 광원의 주파수

REFERENCES

[5] R. Loudon, *The Quantum Theory of Light*, 2nd 3d. (Oxford University Press, New York, 1983).

Fig. 2. Single-photon generation by EIT in Δ -type atomic system; (a) spontaneous Raman scattering of a Stokes, (b) anti-Stokes photon generation by a retrieve laser.

폭이 넓고 원자의 공진 주파수와 차이가 있기 때문에 원자를 이용한 양자 광학 응용에 어려움이 있다. 그러나 EIT를 이용한 단일 광자는 주파수 폭이 EIT폭으로 주어짐으로 매우 좁고 공진 주파수도 일치하는 장점을 가진다. 둘째, 원하는 시간에 단일 광자 생성이 가능하다. 재생 레이저 펄스를 보내는 시간을 조절함으로써 원하는 시간에 단일 광자를 생성시킬 수 있다. 셋째, 단일 광자의 방향을 제어할 수 있다. 재생 레이저 펄스의 방향에 따라서 운동량 보존이 되는 방향으로 단일 광자 생성이 이루어진다.

한편, 비고전광으로 압축 광(squeezed light)이 있다. 압축은 어떤 물리량의 불확정도가 간섭성 상태의 빛에서의 불확정보다 더 작음을 의미하고 반응집광과 마찬가지로 고전 이론에서는 존재하지 않는 빛이다. 일반적으로 압축 광을 발생시키기 위해서는 한 쿼드러처 진폭의 노이즈를 증폭시키고 다른 쪽은 감소시키는 위상에 민감한 과정이 필요하다. 매개 하향 변환이나 4파 혼합은 출력파의 진폭이 펌프 빔과 신호 빔의 위상차에 의존하므로 위상에 민감한 과정이며 따라서 압축 광을 발생시킬 수 있다.^[6,7] 1985년에 Slusher 등이 optical cavity에서 Na 원자에 대한 비 축퇴 4파 혼합에 의해서 압축 광을 최초로 발생시켰다.^[8] 이 실험 이후로 많은 연구자들이 다양한 조건의 atomic vapors에서 4파 혼합에 바탕을 둔 압축을 설명해 왔다.^[9,10] 그러나 비선형성이 광학적 전이들에 의해 분리되어진 준위들 사이에 결맞음에 바탕이 되어있을 때 자발 방출 노이즈에 의해서 원자 증기에서 4파 혼합으로부터의 압축이 제한되어진다. 최근에 많은 실험들이 바닥상태 결맞음에 바탕을 둔 비선형성을 사용한 원자 증기 4파 혼합의 세기를 실험을 수행하고 있으며, 이러한 이유는 결맞음 밀도 포획(coherent population trapping; CPT)과 EIT가 자발 방출 노이즈를 줄이거나 제거하는데 유용하기

때문이다. 또한 최근에는 Λ 형 원자계에서 4파 혼합으로 압축이 생성되는 것을 예견했었고,^[10] Rb 증기 20의 Λ 원자계에서 약 -0.2 dB 압축을 수행한 연구가 최근에 수행되었다.^[11]

EIT를 이용한 단일 광자 저장

광자의 양자 상태를 유지하면서 저장과 재생하는 양자 메모리의 구현은 원자를 이용하는 것이 가장 효과적이다. 최근에는 고체와 양자점 등에서 이러한 연구들이 수행되고 있지만, 극저온 상태에서 동작과 메모리 효율 등에 있어서 원자 매질과 차별된다. 빛의 저장은 1999년 Hau 등은 차가운 원자 매질에서 EIT를 이용하여 빛의 군속도를 17 m/s까지 감속시키는 연구를 수행하였고,^[12] Phillips 등에 의해 빛을 원자 매질에 저장하고 재생시키는 광 저장을 실험적으로 구현되었다.^[13] 이러한 연구 이후, 다양한 조건에서 저장과 재생된 광의 특성에 대한 연구가 진행되었다.

느린 빛에 대한 설명은 광 펄스가 매질 내를 이동할 때 광의 군속도는 다음과 같이 정의된다.

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

그림 3과 같이 EIT 매질의 특성인 좁은 선폭과 투과라는 현상을 이용하여 분모의 분산값이 매우 큰 값으로 만들 수 있고, 이 분산이 큰 주파수 대역에 광펄스의 속력을 매우 느리게 할 수 있다. 원자 매질 속에 느린 광 펄스가 진행하면 짧은 원자 매질 속으로 광 펄스가 압축되어 들어갈 때 그림 4에서 보는 것과 결합광을 끄면 진행하는 광 펄스는 원자 매질에서 나오지 못하고 원자결맞음에 광 펄스 정보를 저장하

REFERENCES

- [6] R. Hanbury-Brown and R. Q. Twiss, *Nature* **177**, 27 (1956).
- [7] L. A. Wu, H. J. Kimble, J. L. Hall and H. Wu, *Phys. Rev. Lett.* **57**, 2520 (1986).
- [8] R. E. Slusher, L. W. Hollberg, B. Yurke, J. C. Mertz and J. F. Valley, *Phys. Rev. Lett.* **55**, 2409 (1985).
- [9] M. W. Maeda, P. Kumar and J. H. Shapiro, *Opt. Lett.* **12**, 161 (1987).
- [10] M. Shahriar and P. Hemmer, *Opt. Commun.* **158**, 273 (1998).
- [11] C. H. van der Wal, M. D. Eisaman, A. André, R. L. Walsworth, D. F. Phillips, A. S. Zibrov and M. D. Lukin, *Science* **301**, 196 (2003).
- [12] L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton and C. H. Behroozi, *Nature* **397**, 594 (1999).
- [13] D. F. Phillips, A. Fleischhauer, A. Mair, R. L. Walsworth and M. D. Lukin, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 783 (2001).

Fig. 3. Dispersive property of EIT in the $5S_{1/2}$ - $5P_{1/2}$ transition of ^{87}Rb atoms.

Fig. 4. vacuum (black), slowed (red), and retrieved light (blue) pulse in Rb atoms.

게 된다. 이러한 현상을 광자와 원자의 결합으로 이루어진 여기상태 'dark-state polariton'으로 설명한다.^[14] 광의 정보가 저장된 후 일정 시간이 지난 후 결합광을 다시 켜면, 광 펄스가 재생된다. 이때 재생된 광 펄스의 정보는 양자 정보를 포함한 고전적인 광 정보가 모두 보존된다.

그림 4에서 검은색 실선은 진공 상태를 진행하는 광 펄스이고 파란색 실선은 EIT 원자 매질 속을 진행하다가 결합광이 제거되었을 때 광 펄스가 단절된 것을 보여주고 있다. 약 25 μs 의 저장시간이 지난 후에 다시 결합광을 켜면 광 펄스의 일부가 재생되는 것을 확인할 수 있다. 여기서 빨간색 점선과 같이 결합광을 계속 켜두었을 때, 광 펄스는 원자 매질 내에서 느리게 진행하기 때문에 광 펄스가 도달하는 시간이 길어지는 것을 확인할 수 있다.

EIT를 이용한 비고전 광의 생성과 저장, 재생 연구는 2005년 광자가 포획(magneto-optical trap; MOT)된 루비듐 원자 매질에서 T. Chaneliere에 의해서 수행되었다.^[15] 그림 5는 T. Chaneliere의 실험 장치와 실험 모식도이다. 이 연구는 크

Fig. 5. A schematic diagram of our experimental set-up, demonstrating generation, transmission, storage and retrieval of single photon excitations of the electromagnetic field.^[15]

게 세 가지 부분으로 나눌 수 있다. 첫째, A 영역에서 EIT를 이용하여 쌍 광자 생성을 하였다. 이 과정은 앞에서 EIT를 이용한 단일 광자 생성에서 설명한 것과 같다. 둘째, 약 100 m 길이의 광섬유를 통과하여 전송하였다. 셋째, 전송된 단일 광자를 MOT 원자 매질에 저장 후 재생하는 과정을 수행하였다. 그들은 생성된 쌍 광자의 상관함수를 측정함으로써 재생된 광 펄스의 양자 상태가 유지되는 것을 실험으로 보였다.

결론

원자와 광자를 이용한 양자 광학은 빛과 물질의 본질을 이해하는 기초 과학 연구와 미래 정보통신인 양자 통신 및 양자 컴퓨터 구현에 필요한 핵심 요소 기술을 실현함에 있어서 매우 중요하다. 본 글에서 언급한 EIT 현상은 원자와 광자의 양자적인 성질을 제어하여 광자를 양자 상태를 전송하는 매개로 그리고 원자는 양자 상태를 저장하고 제어하는 매개로 효과적으로 이용할 수 있도록 하는 흥미로운 현상이다. EIT를 이용한 단일 광자 생성, 저장 및 재생 연구는 국제적으로 활발하게 이루어지고 있으며 다양한 접근 방법들이 연구되고 있는 분야이다. 양자컴퓨터, 양자정보 처리, 양자통신, 양자암호(Quantum cryptography)에 의해 한계로 주어진 정밀 측정분야 그리고 광통신에 이르기까지 다양한 응용 분야에서 중요한 발전을 가져올 수 있는 핵심 기술로써 기여할 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [14] M. Fleischhauer and M. D. Lukin, Phys. Rev. Lett. **84**, 5094 (2000).
- [15] T. Chaneliere, D. N. Matsukevich, S. D. Jenkins, S.-Y. Lan, T. A. B. Kennedy and A. Kuzmich, Nature **438**, 833 (2005).