양자메모리에 대한 고찰

DOI: 10.3938/PhT.19.007

함 병 승

Review on Quantum Memories

Byoung Seung HAM

In this article quantum memories are reviewed. Quantum memories have been intensively studied for last decade for potential applications of quantum information processing such as quantum repeaters in long distance quantum communications. In that sense ultralong quantum optical data storage technique is essential.

이 글에서는 양자메모리에 대해 일반적 고찰을 하고자 한다. 양자메모리는 지난 십여 년간 장거리 양자통신에서 핵심 요소인 양자리피터 같은 양자정보처리 응용을 위해 집중적으로 연구되어 왔다. 이러한 의미에서 장시간 저장 양자광메모리기술은 필수불가결한 요소가 된다.

서 론

양자메모리(quantum memory)는 정보저장이라는 측면에서 고전적 메모리 (예를 들면 컴퓨터메모리)와 그 기능을 같이하나, 양자상태의 정보를 사용한다는 점에서 구별된다. 어느 경우나 정보저장 매체에 신호 혹은 상태를 저장하기 전과 후는 반드시 같을 것을 원칙으로 한다. 일반적으로 메모리는 정보처리에 있어 로직게이트(logic gates)와 더불어 연산을 위한 핵심요소로 기능한다는 점에 그 중요성이 있다. 고전적인 정보처리는 디지털방식의 “0”과 “1”을 만족하는 신호의 세

기, 위상, 혹은 극성 등을 이용한다. 이러한 경우에 있어 메모리는 전압, 위상, 극성을 기준으로 “0”과 “1”을 정의하고 그에 따라 정보저장이 기능하게 된다. 이와 마찬가지로 광정보 처리에 있어서는 광신호를 매개로 하는데, 이 경우 정보저장은 광메모리가 담당하게 될 것은 매우 자명하다. 다만, 최근까지도 광메모리는 그 구현방식에 있어 기술적인 문제점을 많이 내포하고 있기에 아직 그 실용화에 있어서는 난관이 산적해 있다. 한편, 양자정보처리, 예를 들면 양자컴퓨팅이나 양자통신에 있어서, 양자메모리는 양자로직과 더불어 양자정보처리 분야의 양대 축을 형성한다. 또한, 양자정보처리는 이미 구축된 광통신망을 사용할 수 있다는 점에서 광정보 인프라의 특성에도 기인하게 된다. 물론 기존 광통신망을 이용하게 될 경우, 최소 정보전달매개체(carrier)가 해당 전자기파의 주파수인 광주파수를 이용하게 되겠지만, 다양한 형태의 정보전달매개체가 사용될 수 있다는 점에서 통신위성을 위한 중적외선이나 스핀정보처리를 위한 마이크로파도 중요한 연구대상이 된다. 본 글에서는 광주파수 대역의 양자메모리 방식에 대해 살펴보고, 향후 발전방향을 가늠해보고자 한다.

지금까지 양자메모리 방식 관련 최초로 대중적인 관심을 끌었던 것은 전자기유도투과에 기초한 멈춤빛 증명이었다.^[1] 이 경우 멈춤빛은 느린빛의 극단적인 경우로써 군속도가 0이 되는 경우이고, 광정보가 스핀정보로 치환되는 원리로 양자정보저장이 구현된다. 실질적인 문제는 매질의 군굴절률변화가 고전전자기파인 조절빛에 의해 유도되는데, 흡수에 따른 매질 길이에 한계가 주어질 때 연속 광신호를 저장할 수 없는 한계가 있다. 다시 말해 느린빛 광메모리는 그 저장원리에 따라, 다수의 연속적인 광펄스를 사용할 수 없기 때문에 현실응용성은 매우 낮다고 해도 과언이 아니다. 따라서, 2000년대 초반 관심을 끌었던 느린빛 양자메모리 연구는 최근 들어 낮은 양자메모리 효율성의 이유로 이에 대한 연구는 거의 중단 상태에 있다. 이를 대체하기 위한 방법으로써, 변형된 포톤에코 방식이 있다.^[2] 포톤에코 광메모리는 8-90년대 5차원 광

저자약력

함병승 교수는 웨인주립대학교 공학박사로서(1995, 전기/컴퓨터공학 전공), MIT 박사후연구원(1996-1999), 한국전자통신연구원 선임연구원/팀장(1999-2003), 과학기술부 지정 창의연구단 단장(2000-2003), 인하대학교 정보통신대학원 부교수(2003-2008)를 거쳐 현재 인하대학교 IT공과대학 전기공학부 교수로 재직 중으로 교육과학기술부 지정 리더연구사업단 (창의) 단장을 맡고 있다. Quantum Optics Workshop 2007, 2008 조직위원장장과 공동조직위원장을 각각 맡았었고, 교과부 모니터링단 기초과학분과 위원(2008-2009), Open Optics Journal 편집위원, 한국과총 주관 “느린빛” 국제학술대회 2009 조직위원을 맡았었다. (bham@inha.ac.kr)

REFERENCES

- [1] C. Liu, Z. Dutton, C. H. Behroozi and L. V. Hau, Nature **409**, 490 (2001).

메모리 특성으로 고전적 광정보처리 분야에서 탁월한 우월성을 확보했고,^[3] 변형 포톤에코 연구는 최근 일련의 양자버전으로 확장되어 양자메모리 연구에 있어 활력이 되고 있다. 이 글에서는 최근까지 도입된 양자메모리 프로토콜에 대해 전반적인 기술을 살펴본 다음 포톤에코 양자메모리에 대해 자세히 고찰하기로 한다.

컴퓨터 칩 같은 전자메모리와는 달리, 광메모리는 그 방식뿐만 아니라 짧은 저장시간의 한계가 중요한 이슈가 되어왔다. 이와 마찬가지로, 광주파수대역에서 즉 광자를 매개체로 하는 양자메모리에 있어 저장시간의 한계 역시 매우 중요한 의미를 지닌다. 그러나 양자컴퓨팅 같은 고속정보처리를 위한 기능에 있어서는 양자메모리 저장시간의 한계가 그리 중요한 이슈는 못된다.^[4] 왜냐하면 이 경우 양자메모리는 캐쉬메모리 형태의 짧은 저장이 주 목적이 될 것이기 때문이다. 즉, 이러한 경우 양자메모리는 양자지연(quantum delay) 현상을 이용하는 것만으로도 그 목적을 달성할 수 있다. 한편, 양자통신에 있어 양자메모리는 그 적용방식이 완전히 다르다. 고전적 광통신에 있어 광섬유를 따라 전송되는 광신호는 매질산란 등의 이유로 전송거리에 따라 기하급수적인 신호감쇄를 겪게 된다. 따라서, 광신호 증폭은 필수불가결한 요소가 되는데, 현재 광통신 규약에 따르면 매 40 km마다 광증폭기를 설치하도록 되어 있는데, 이는 기본적으로 광신호의 세기를 증폭하기 위한 것이다. 이와 마찬가지로 기존의 광통신망을 사용하는 양자통신에서도 양자정보는 광신호로 전송하게 되어 있다. 이때 광신호는 동일한 원리에 따라 즉 광섬유를 따라 진행하는 동안 양자상태감쇄를 겪는다. 여기서 중요한 것은, 양자신호는 자체 증폭될 수 없는 원리, 즉 양자신호복제 불가 원리에 따라 양자정보의 복원을 위해서는 단순히 고전적 광증폭기를 사용할 수 없는 곤란한 상황에 직면하게 된다. 이를 해결하기 위한 것이 양자반복기(quantum repeater)인데, 양자반복기란 양자얽힘치환과정을 통해 감쇄된 양자정보를 본래의 상태로 회복하는 원리에 기초하고 있다.^[5] 이것을 수행하기 위한 필수 하드웨어가 양자메모리인데 이때 양자메모리는 양자얽힘치환처리를 위해 장시간 저장기능이 필수이다. 현재까지 알려진 양자리피터 규약에 따르면 양자메모리 저장시간 한계인 천분의 일 초보다 훨씬 더 긴 저장시간이 요구되는데, 본 글에서는 이를 만족하기 위한 새로운 방식의 양자메모리를 소개하고자 한다.

본 론

1. 느린빛 양자메모리

느린빛 양자메모리는 2001년 BEC를 이용한 빛의 군속도

Fig. 1. Slow light based quantum optical data storage: Fig. 3 of Ref. 8. (a) Slow light, and (b) Retrieved light. Dotted line: control pulse.

를 완전히 정지하게 한 실험결과가 발표된 후 급격한 발전을 거둔다.^[6] 이에 따르면, 전자기유도투과에 따라 공진하는 광신호(광펄스)가 매질에 흡수되지 않고 진행하면서 제 2의 조절 빛과 상호작용결과로 스핀전이로 치환되게 되어 매질성분으로 바뀌게 되는데, 이 과정을 역순으로 반복하게 되면, 동일한 광신호를 재생할 수 있게 된다.^[1] 이러한 원리는 기본적으로 느린빛에 기초하게 되는데, 느린빛의 핵심원리 즉 빛과 매질(스핀)의 중첩상태에 있는 폴라리톤(polariton)을, 빛이나 스핀 중 선택적 양자택일로 즉 빛에서 스핀으로 스핀에서 다시

REFERENCES

- [2] S. A. Moiseev and S. Kroll, Phys. Rev. Lett. **87**, 173601 (2001).
- [3] M. Mitsunaga and N. Uesugi, Opt. Lett. **15**, 195 (1990).
- [4] A. M. Marino, R. C. Pooser, V. Boyer and P. D. Lett, Nature **457**, 859 (2009).
- [5] L.-M. Duan, M. D. Lukin, J. I. Cirac and P. Zoller, Nature **414**, 413 (2001).
- [6] L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton and C. H. Behroozi, Nature **397**, 594 (1999).
- [7] M. Fleischhauer and M. D. Lukin, Phys. Rev. Lett. **84**, 5094 (2000).

빛으로 치환되는 양자메모리를 구현하게 된다.^[7] 그림 1은 2002년 고체매질에서는 처음으로 멈춤빔 원리에 따른 광정 보저장을 보여준다.^[8] 앞서 언급한 대로 이러한 멈춤빔 방식에서의 양자메모리 한계는 다수의 광펄스를 저장할 수 없다는 데 있으며 이는 현실적으로 매우 중요한 적용한계가 된다. Caltech의 Kimble 그룹은 멈춤빔 방식에 기초하여 양자상태의 빛을 저장하는 데 성공했고,^[9] Harvard 그룹은 양자메모리 복원효율에 대한 연구를 심층적으로 수행했는데,^[10] 어느 경우에는 50% 이상의 복원효율은 기대할 수 없다는 것도 멈춤빔 양자메모리의 또 다른 단점 중 하나이다. 저장시간에 있어 느린 빛 양자메모리의 한계는 스핀위상 전이시간인데 기체나 희토류도핑된 고체에서 천분의 일 초가 그 한계가 된다.

2. 비공진 라만산란 양자메모리

2004년 덴마크 그룹은 전통적인 라만산란 방법으로 양자상태의 빛을 저장하는데 성공했다.^[11] 이 방식은 단광자를 원자양상물에 Stock 라만산란 방식으로 저장시키고, antiStock 라만산란방식으로 읽어내는 원리에 기초한다. 물론 라만산란에 있어 낮은 효율은 가는 연필모양의 원자모형으로 극복될 수 있다지만, 연속펄스를 한 번에 저장시키고 읽는 것은 원리적으로 불가능하여 실질적 양자메모리 구현에 심각한 장애요소가 된다. 이러한 방식의 실험은 Harvard 그룹에서도 실험적으로 구현했다.^[12] 최근 오스트레일리아 그룹은 비공진 라만산란방식을 약간 변형하여 양자메모리를 증명하는데 성공했다.^[13] 저장시간에 있어서는 스핀위상전이시간 즉 천분의 일 초가 그 한계이다.

3. Squeezed 양자메모리

Squeezed 방식은 단광자가 아닌 다수의 광자를 사용하는 점에서 여타 다른 양자메모리 방식과 차별화된다. 일본 토교대 그룹은 EIT-멈춤빔 방식에 기초하여 squeezed 광자를 매질에 저장시키는 데 성공했다.^[14] 문제는 squeezed 양자빛은 네파진행섬유처리에 따라 만들어지는데, 그 효율이 매우 낮아 실용화에 어려움이 있다. 최근 squeezed 빛을 이용하여 양자자연 실험을 구현하기도 했다.^[4] 여기서 저장시간의 한계는 광전이 시간이므로 일반적으로 스핀위상전이시간보다 훨씬 짧다.

4. 포톤에코 양자메모리

포톤에코메모리는 1964년 처음 관측된 이후,^[15] 1980년대 비약적인 발전을 거둔 가장 진보적인 광메모리의 전형이다. 1990년대에는 3차원 공간을 갖는 매질에 시간축과 파장축을

더한 5차원 광메모리로 집적도가 매우 높은 광메모리 방식을 선도했지만, 낮은 온도를 극복하지 못한 관계로 세간의 관심에서 멀어져 갔다. 그러나 최근 양자메모리의 필요성이 대두되면서, 기존 양자메모리 방식의 한계를 극복할 대안으로 변형된 포톤에코방식의 양자메모리 방법에 제기되기 시작했다.^[16,17] 전통적 포톤에코에 있어 단점은 낮은 복원효율과 짧은 저장 시간이었는데, 2000년 스웨덴 그룹은 이를 극복할 대안을 발표하였고,^[2] 오스트레일리아 그룹은 양상불원자의 극성을 바꾸는 gradient echo 방식을 제안하여 비록 저장시간은 극복하지 못했지만 에코 효율은 극복할 수 있게 되었다.^[15] 최근 인하대 연구그룹은 에코효율뿐만 아니라 저장시간도 천분의 일 초 이상으로 지연시킬 수 있는 획기적인 양자메모리 방식을 제안하고 증명하는 데 성공하여 이 분야의 전망을 밝게 해 주고 있다.^[18]

5. 광잠금 라만에코 양자메모리

1997년 세펠스 포톤에코 방식을 전자기유도투과에 접목하여 공진라만에코를 증명하였으나 복원효율이 낮아 양자메모리로 쓰이기에는 한계가 있었다.^[19] 1998년 두 펄스 포톤에코 방식을 차용한 라만에코 메모리 이론과 실험결과가 발표되었을 때까지만 해도 저장시간의 한계는 스핀위상전이시간이었다.^[20] 최근, 인하대 광양자정보처리연구단에서는 위 두 가지 방식을 결합하고 변형하는 데 성공하여 저장시간의 한

REFERENCES

- [8] S. V. Turukhin, V. S. Sudarshanam, M. S. Shahriar, J. A. Musser, B. S. Ham and P. R. Hemmer, Phys. Rev. Lett. **88**, 023602 (2002).
- [9] S. Choi, H. Deng, J. Laurat and H. J. Kimble, Nature **452**, 67 (2008).
- [10] I. Novikova, N. B. Philips and A. V. Gorshkov, Phys. Rev. A **78**, 021802 (2008).
- [11] B. Julsgaard, J. Sherson, J. I. Cirac, J. Fiurasek and E. S. Polzik, Nature **432**, 482 (2004).
- [12] C. H. Van der Val *et al.*, Science **301**, 196 (2003).
- [13] M. Hosseini, B. M. Sparkes, G. Hetet, J. J. Longdell, P. K. Lam and B. C. Buchler, Nature **461**, 241 (2009).
- [14] K. Honda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 093601 (2008).
- [15] N. A. Kurnit, I. D. Abella and S. R. Hartmann, Phys. Rev. Lett. **13**, 567 (1964).
- [16] A. L. Alexander, J. J. Longdell, M. J. Sellars and N. B. Manson, Phys. Rev. Lett. **96**, 043602 (2006).
- [17] H. de Riedmatten, M. Afzelius, M. U. Staudt, C. Simon and N. A. Gisin, Nature **456**, 773 (2008).
- [18] B. S. Ham, Opt. Exp. **18**, 1704 (2010).
- [19] B. S. Ham, M. S. Shahriar, M. K. Kim and P. R. Hemmer, Opt. Lett. **22**, 1849 (1997).
- [20] B. S. Ham, M. S. Shahriar and P. R. Hemmer, Phys. Rev. B **58**, R11825 (1998).

Fig. 2. (a) and (b) Energy level and pulse sequence for ultralong resonant Raman echoes. Ω_P/Ω_C : Rabi frequency of Raman pulses (each pulse area: $\pi_R, 3\pi_R$); Ω_A : deshelling light for atom transportation (pulse area: π_A). (c) Raman echo simulation. 2π READ pulse position in (b) is $t = 30 \mu s$.

계는 스핀위상전이시간에서 스핀밀도전이시간으로 무려 백만 배 이상 확장시키는 데 성공하였다.^[21] 기본적인 저장시간 확대 원리는 세펄스 포톤에코 방식이나 스웨덴 그룹에서 차용했던 저장시간 지연방식과 비슷한데, 광전이에 기초한 광 결맞음을 스핀전이에 기초한 스핀결맞음으로 치환한 것이다. 이것은 단순히 들뜬 원자밀도를 제 3의 스핀에너지 준위로 이동시켜 스핀결맞음을 유도하는데 그 원리가 있다. 즉, 복원효율은 소위 광잠금방식에 의해 결정되는데, 기존 방식과 다른 점은 밀도전송에 따른 개별 원자들의 위상변환을 고려하여 특별한 조건을 만족하는 광잠금펄스 (펄스면적)를 도입한 것이다. 여기에 세펄스 포톤에코 방식을 차용하여 광전이 밀도전이시간에 해당하는 스핀밀도전이시간을 그 한계로 확보

한 것이 저장시간 한계극복의 핵심원리가 된다. 따라서, 광잠금 라만에코 방식에 의하면, 전통적인 세펄스 포톤에코에 있어 50% 미만의 복원효율은 완전히 극복되고, 저장시간은 스핀 밀도전이시간으로 확장되어 수 초에서 수 시간의 장시간 양자메모리가 가능하다.

결론

지난 십 수년간 지속되어온 양자정보통신연구는 양자정보 처리에 있어서는 수백 개 이상의 양자큐비트 확보 문제로, 양자통신에 있어서는 양자리피터 구현문제로 실용화에 근본적인 문제가 있었다. 다행히 장시간 저장이 가능한 양자메모리가 구현된다면, 양자통신, 특히 양자암호는 전송거리로부터 자유로워 기존의 양자암호 프로토콜을 직접 적용할 수 있는 계기가 될 것으로 보인다. 물론 확정적 양자상태 (단광자 발생기나 양자얽힘 발생기) 구현은 아직도 미 해결분야의 하나이나 이 분야는 상대적으로 적용가능한 분야라고 할 수 있다.

*그림 상세설명: 광잠금 라만에코에서는 한 쌍의 공진하는 라만전이를 이용하여 광정보를 스핀정보로 치환하게 되는데, 전통적인 포톤에코에서와 같은 원리로 스핀정보를 갖는 들뜬 원자는 시간이 지남에 따라 바닥상태로 돌아오는 과정을 통해 광정보를 유실하게 된다. 여기서, 들뜬 원자를 제 3의 바닥상태로 전송 격리하여 양자상태의 유실은 막는 것이 광잠금의 원리가 된다. 세 펄스 공진라만에코에서 추가된 광펄스 쌍 (Ω_A , 그림 2 참조)은 들뜬 원자들을 제 3의 바닥상태 ($|4\rangle$, 그림 참조)로 옮기고, 일정 시간 후 제자리 ($|3\rangle$)로 되돌려놓는 역할을 수행한다. 일반적으로 희토류 도핑된 광매질에서는 스핀밀도 전이시간은 수분에서 수시간에 이르기 때문에 스핀위상전이시간인 천분의 일 초에 비교하면 엄청나게 긴 시간이 된다. 그러나 원자전송과정이 이루어지는 광잠금과 정에서 180도 위상차가 필연적으로 발생하게 되는데, 이 위상차 보정은 통상적으로 스핀전이에 해당하는 마이크로파를 이용해서 극복했다. 그러나 본 방식에서는 이 위상차 극복을 위해 $3\pi_R$ (그림 2 참조) 펄스를 사용한 것이 그 차이가 된다.

REFERENCES

- [21] B. S. Ham, Nature Photon. **3**, 518 (2009).