

고체물질내에서 광속도 정지 및 재생

Light stop and retrieval in a solid medium

함병승

한국전자통신연구원, 원천기술연구소, 양자결맞음통신연구단

bham@etri.re.kr

매질내에서의 광속도 지연 관측은⁽¹⁾ 위상맞춤이 절대적으로 중요한 다파장 섞임진행이나 단일 광양자 검출 및 그에 기초한 비선형 상호작용연구에 많은 관심을 촉발시켜왔다. 이러한 지연된 광속도가 음파영역에까지 이른다면 음파-광파 상호결합에 기초한 새로운 광소자개발에도 그 가능성을 비추게 된다. 만일 광속도 지연이 아주 충분하여 광펄스를 정지시키고 또 그 정지된 광펄스가 재생되도록 조작할 수 있다면, 새로운 광정보 기능장치는 물론 광자-매질 상태상호작용 및 전환에 기초한 양자정보통신 연구에 획기적인 전기를 제공하게 된다. 최근 관측된 광속도지연은 BEC상태의 극저온이나 고온의 기체 물질을 사용해서 얻어졌는데⁽¹⁾ 이것은 새로운 개념의 광정보처리나 양자정보처리등에 한층 가까이 가게 했으며, 광펄스 정지/재생실험은⁽²⁾ 그 대안을 제시하였다. 그러나, 비선형효과는 물질의 밀도에 비례하게 되는데, 기체상태는 밀도의 증가에 한계가 있으며 또한 동시에 피할 수 없는 원자분산으로 인해 실제응용에 있어 많은 제약을 받게된다.

반면, 결정질 고체물질은 상대적으로 작은 크기에 고밀도를 유지할 수 있으며 원자분산같은 부작용 또한 없으므로 실제응용을 위해서는 기체물질에 비해 많은 장점을 지니게된다. 이러한 결정질 고체물질을 사용한 최초의 검은공진⁽³⁾ 관측은 루비에서 이루어졌고⁽⁴⁾ 최근에는 Pr첨가된 결정질 물질을 이용하여 양자광학과 비선형광학에 많은 가능성을 보여주었다.⁽⁵⁾ 본 논문에서는 Pr첨가된 결정질 물질에서 광속도 정지 및 재생에 대한 논의를 하고자 한다. 대부분의 희토류첨가된 고체물질은 광전이가 혼합되어 있고 또한 핵자기전이를 포함하고 있으므로 그렇지 않은 1족원소들과는 많은 차이점을 갖게 되는데 그 특징 중 하나가 스핀분산 (inhomogeneous spin broadening)을 갖는다는 점이다. 이러한 희토류첨가된 결정질 물질에서의 스핀분산은 기체물질과 비교하여 광속도 정지 및 재생에 있어 새로운 역할을 하게 되고 그러한 역할은 실제응용에 있어 독특한 특징을 제공하게 된다.

그림 1의 inset은 본 논문이 기초하고 있는 검은공진을 위한 기본 에너지 준위를 나타낸다. 두 개의 전자기파 "1" (Ω_1)과 "2"(Ω_2)는 각기 다른 상호작용경로를 통해 기저상태준위간에 두양자결맞음 (점선)을 유도하게 된다. 이때 각 전자기파는 물질에 흡수되지 않고 진행하는 전자기투과를 하게 되는데 이러한 현상을 검은공진이라고 한다. 그림 1은 이러한 검은공진에 기초한 전자기투과와 ($\text{Im} \rho_{13}$) 두양자결맞음을 ($\text{Re} \rho_{12}$) 각각 나타낸다. 만일 그림 1의 기저상태전이에 스핀분산(inhomogeneous spin broadening)이 있고 작용하는 전자기파가 펄스라면 전체 두양자결맞음은 각각의 두양자결맞음과는 달리 각 스핀의 위상전이시간 τ (일반적으로 T_2) 보다 훨씬 짧은 dephasing 시간을 경험하게 된다. 그러나, 이미 알려진 photon echo에서처럼 일정시간 ΔT 경과 후, 그러나 스핀위상전이시간 τ 보다는 짧은 시간 내에, rephasing 펄스가 오게 되면 각각의 전이하는 시간을 역으로 돌려 $2\Delta T$ 경과 후에는 최초의 두양자결맞음을 회복할 수 있게 된다.⁽⁶⁾

이러한 검은공진유도 두양자결맞음 복원은 광정보저장의 핵심원리를 제공하게 되는데 최근 원자증기나 BEC상태에서의 광정지/재생실험과는 근본적으로 다른 echo현상을 포함하게 된다. 즉, rephasing pulse에 의한 두양자결맞음 회복이 echo인데 이를 광학적으로 검출하는 방법으로 전자기와 "1"을 사용하게 되고 이는 물리적으로 검은공진유도 4파장진행섞임과 동일하게 된다.⁽⁵⁾ 그림 2는 광정지 및 재생에 대한 계산결과들인데, 저장된 광정보 "2"(inset: 점선)가 두양자유도결맞음에 사용된 광펄스 "1"(inset: 실선)에 의해 복원되는 과정을 보여준다. 여기서, 처음 광펄스 "1"이 "2"이후에도 계속 작용하게 되면 두양자결맞음의 일부를 잃게 되고 그 길이가 충분히 길게되면 전부를 잃게 되는데, 따라서 rephasing 펄스가 오더라도 회복할 두양자결맞음이 없어 광재생은 일어나지 않게 된다. 즉, 광정보는 검은공진유도에 의한 두양자결맞음의 형태로 매질내에 저장되게 되고 재생은 rephasing 펄스를 통한 두양자결맞음의 회복 - dark resonance echo를 통해 나타나게 된다. 이러한 계산결과들은 최근 출판된 Pr:YSO에서의 광정지 및 재생실험과 비교분석할 때,⁽⁷⁾ 서로 일치하며 따라서 광정지 및 재생은 두양자결맞음의 유도 및 echo에 다름 아님이 증명된다.

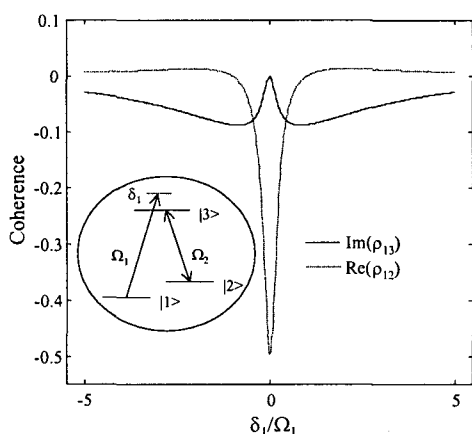


Fig. 1. Dark resonance induced two-photon coherence

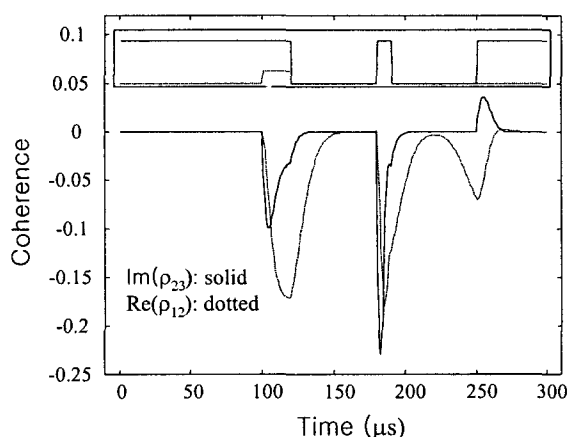


Fig. 2. Light stop and retrieval. Inset: pulse sequence, dotted for Ω_2

참고문헌

1. L.V. Hau *et al.*, Nature (London) **397**, 594 (1999); M. Kash *et al.*, Phys. Rev. Lett. **82**, 5752 (2000), and early references therein.
2. C. Liu *et al.*, Nature (London) **409**, 490 (2001); D.F. Philips *et al.*, Phys. Rev. Lett. **86**, 783 (2001).
3. G. Alzetta *et al.*, Nuovo Cimento Soc. Ital. Fis. **36B**, 5 (1976); H.R. Grey *et al.*, Opt. Lett. **3**, 218 (1979); S.E. Harris, Physics Today **50**, 36 (1997), and references therein.
4. Y. Zhao *et al.*, Phys. Rev. Lett. **79**, 641 (1997).
5. B.S. Ham *et al.*, Opt. Lett. **22**, 1138 (1997); Phys. Rev. **A59**, R2583 (1999).
6. B.S. Ham *et al.*, Opt. Lett. **22**, 1849 (1997); Phys. Rev. **B58**, R11825 (1998).
7. A.V. Turukhin *et al.*, Phys. Rev. Lett. **88**, 023602 (2002).