

광주과학기술원 정보통신공학부 광양자정보처리센터

합 병 승

연구실 개요

1947년 미국 벨랩에서 발명된 트랜지스터는 현대문명의 핵심이 되어 21세기 컴퓨터와 인터넷시대를 여는 주역이 되었다. 그리고 전자소자는 일명 무어의 법칙에 따라 적어도 지난 30년간 매년 기하급수적인 속도진보를 거듭해왔다. 그러나 소자(게이트) 크기에 반비례하는 속도진보의 원리는 그 한계가 양자효과가 나타나는 나노 크기에 있는데(인텔은 2012년으로 예상했음), 당황스럽게도 그보다 훨씬 이전 단계인 100나노 때부터 이미 누설전류에 의해 문제가 나타나기 시작해 2008년 이후 cpu칩 속도진보는 사실상 정지상태에 있다. 본 연구실은 현대문명을 견인해온 이러한 핵심 전자하드웨어의 한계를 극복하고 광칩으로 대체하는 연구를 위해 2006년 과기부(현재 미래부)에 의해 리더연구사업단(창의)으로 출발하였는데, 그 핵심 아이디어는 양자결맞음을 기본원리로 하여 THz 속도를 갖는 디지털 광로직 연구에 있다. 또한 디지털 광정보처리와는 별도로, 아날로그 광정보처리와 더불어, 미래 양자문명을 견인하기 위해 양자정보처리-양자메모리 연구도 병행하고 있다. 현재 광정보처리나 양자정보처리는 그 핵심이 되는 광칩 혹은 양자칩의 부재로 인해 전자문명의 테두리 안에서 서성대고 있는 실정이다.

주요연구분야

1. 디지털 광정보처리: 광로직

본 연구는 일반적인 아날로그 광정보처리와는 달리 디지털 광정보처리에 관한 것으로서 현재의 전자cpu를 광cpu로 대체하고자 함이 목적이다. 이를 위해서는 광시계와 광로직이 핵심 연구가 되는데, 광시계 연구는 2005년 MIT Ippen 교수팀에서 미국 정부의 지원으

PIIP 광양자정보처리센터
Center for Photon Information Processing



▲ 센터 로고

◀ 함병승 교수/센터장.

로 시작했고, 광로직 연구는 본 연구센터에서는 2006년 과기부(현재 미래부) 창의사업 지원으로 시작됐다. 광로직은 광cpu의 핵심소자가 되는데, 여기서는 현재 전자칩 크기구조에서 전자신호를 완전히 배제하고 오직 광신호로만 작동되는 완전한 의미에서의 광프로세서를 의미한다. 본 연구센터에서는 지난 2008년 APL에 느린빛을 이용한 광로직(OR, NOR, XOR, AND) 실험결과를 게재하였는데,^[1,2] 이로 인해 반도체 양자우물구조를 사용했을 경우 THz 속도가 가능함을 입증하였다. 이것은 1990년대 후반부터 2000년대 중반까지 세계적으로 연구가 진행되었던 반도체광증폭기(SOA)를 이용한 광로직과는 근본적으로 다른데, SOA로는 불가능한 마이크로 크기의 광트랜지스터로 광집적회로를 만들 수 있기 때문이다. 본 광로직의 핵심원리는 느린빛에 기초한 네파섬유진행 현상인데, 일반적으로 광소자에서 광스위칭 시간한계(들뜬 전자의 전이시간, 반도체에서는 sub-ns, 즉 ~10 GHz가 한계)보다 더 빠른 소자구현은 불가능한데, 여기서는 광펌핑의 라비주파수에 의존하여 반도체매질에서 ps (THz 라비주파수) 속도가 충분히 가능하며,^[3] 현재 전자cpu보다 100배 이상 빠른 광소자 구현이 가능하다. 전자cpu에서의 또 다른 문제는 구리선 신호전송 용량의 한계(Gbps)인데 광회로에서는 사실상 무한대(100 THz 이상)가 되어 신호전송용량한계는 전혀 문제가 안 된다. 그림 1은 느린빛-네파섬유진행에 기초한 광로직의 실험구조를 보여준다. 본 연구가 반도체 매질에서 성공적으로 수행되면 1조 플롭의 연산이 광cpu 한 개로 가능하며, 수백 개 광cpu를 병렬연

저자약력

함병승 교수는 Wayne State University 공학박사(1995, 양자공학 전공)로서, 미국 MIT 포스트닥/Hanscom공군연구소 연구원(1996-99), 한국전자통신연구원 원천기술연구소 팀장(1999-2003), 과기부 창의적연구진흥사업 단장(2000-2003), 학술진흥재단 순수기초연구 그룹장(2003-2006), 인하대학교 정보통신대학원 부교수(2003-2008), 인하대학교 정보통신대학원 교수(2008-2010), 인하대학교 광양자정보처리연구단 소장(2006-2013), 인하대학교 IT공과대학 전기공학부 교수/인하펠로우 교수(2010-2013)를 거쳐 현재 광주과학기술원(GIST) 정보통신공학부 교수/특훈교수로 재직 중이다. (bham@gist.ac.kr)

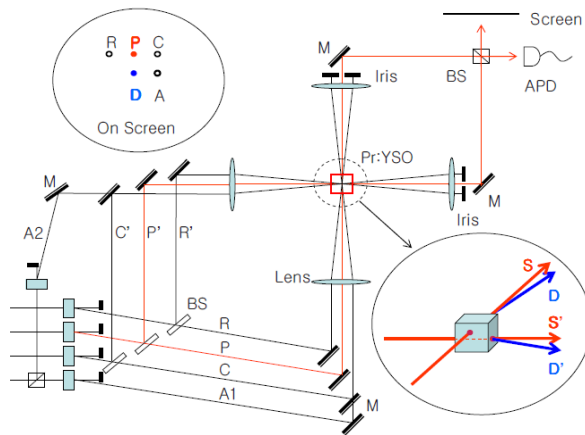


그림 1. 광로작게이트 실험셋업 구성도. P/P', slow light A, control light; R, pumping light; D/D', diffracted light. 참고문헌 [1].

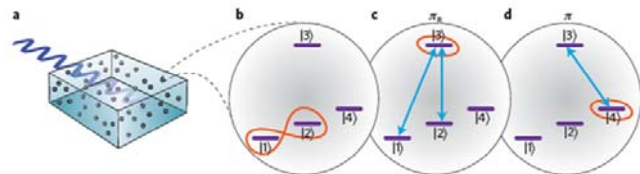


Figure 1 | Ham's ultralong quantum memory. a, Absorption of a photon in an atomic ensemble. b, Subsequent creation of a coherence. c, A resonant Raman π (π_R) pulse inverts the atoms to state $|3\rangle$. d, The optical decay lock 'freezes' the atoms in state $|4\rangle$.

그림 2. 광잠금 양자메모리 설명도. (a) 양상블게 라만메모리에서 광흡수, (b) 양상블게 라만광펄스에 의한 스핀여기, (c) 스핀재위상을 위한 p-라만광펄스 적용, (d), 광잠금 펄스. 참고문헌 [5].

결한 광데스크탑 수준에서 현재의 슈퍼컴 기능을 수행할 수 있고, 따라서 영화에나 나올법한 인간과 대화가 가능한 인공지능 로봇이 비로소 현실화될 수 있다. 참고로 인간의 뇌는 1천조 개 시냅스로 연결되어 있다고 알려져 있으며, cpu 20만 개로 구성된 현대 슈퍼컴은 1천조 플롭 연산이 가능하다(2010년 슈퍼컴퓨터 자료). 부가하여 전자컴퓨터는 아날로그 정보처리와 호환이 불가능하지만, 광컴퓨터는 기본적으로 아날로그와 호환 가능(compatible)하다.

2. 아날로그 광정보처리: 연산광메모리 및 홀로그램

현재의 3D TV나 3D 영화는 2초점 시야각과 심도제한된 매우 원시적인 수준을 벗어나지 못하고, 빛 버전의 홀로그램은 기술적 결함과 광매질의 응답한계로 인해 3D 방송과 결합이 아예 불가능하다. 또한 80-90년대 제기되었던 광연산메모리는 기술적 결함을 극복하지 못하고 이미 폐기된 지 오래다. 본 연구센터에서는 80년대 활발히 연구되었던 포톤에코와 2000년대 등장한 느린빛을 결합하여 기억재생신호가 입력신호의 세기와 크거나 같아야 하는 요구조건을 충족하는 광연산메모리의 구현을 첫 번째 목표로 하고 있다. 참고로 연산메모리는 단편적 재생 정보만으로도 전체정보를 복구해 낼 수 있는 강력한 기능 때문에, 전산 소프트웨어분야에서는 연산메모리에 대한

연구가 꾸준히 이루어져왔다. 본 연구센터에서 추진하는 두 번째 연구목표는 입력시간과 처리시간의 한계로 인해 실시간 3D 디스플레이가 사실상 불가능한 기존 홀로그램의 한계를 극복하고, 지금 기술과는 전혀 다른 방법으로 실시간 총천연색 방송 친화적 홀로그램으로 순광 3D 디스플레이를 구현하고자 한다.

3. 양자정보처리: 양자리피터

1994년 Shor의 논문 한편으로 촉발된 양자정보연구의 태동은 지난 20년간 괄목할만한 성장을 보여왔으나, 기술적 측면에서는 아직도 원시적인 상태를 벗어나지 못하고 있다. 그 이유는 무엇보다도 쿼텀기기를 구현할 양자기술의 부재 때문이다. 예를 들면, 양자컴퓨터의 핵심이 되는 정렬된 큐비트구성에 있어 아직 큐비트 14개 이상은 실현되지 못하고 있고, 양자통신에서는 양자리피터가 없어 100 km 전송한계에 갇혀있다. 양자컴퓨터는 차치하고서라도 양자문제를 풀기 위한 쿼텀시뮬레이터에 있어서도 최소 100개의 큐비트를 필요로 하고 있어 앞으로 양자컴퓨터가 해결해야 할 문제는 산적해있다. 한편, 양자통신에 있어서는, 유력한 양자리피터 프로토콜인 DLCZ(Duan Lukin Cirac Zoller)에 의하면, 500 km 양자신호 전송을 위해서도 100초 이상의 양자메모리가 필요한데,^[4] 현재 양자메모리 최장 저장시간은 수십 밀리초에 불과한 실정이다. 본 연구센터에서는 장거리 양자통신을 가능케 할 장시간 양자메모리에 대한 연구를 수행 중인데, 2009년 '광잠금' 방식에 의해 수 시간 저장 가능한 양자메모리 프로토콜을 제안했고(그림 2),^[5,6] 2012년 2초 이상의 저장시간을 갖는 양자메모리 선행실험을 성공적으로 수행하였다.^[7] 양자메모리 분야는 2010년 이후로 국제적으로 활발히 연구되고 있으나, 스위스 GINIS 교수팀이 제시하고 그 추종그룹들에 의해 연구되어온 원자주파수빗^[8] 방식으로는 1초의 한계조차 넘을 수 없기 때문에,^[9] 본 연구센터의 '광잠금' 방식은 매우 유력한 양자리피터용 양자메모리 프로토콜이 된다.^[10]

4. 표면플라즈몬(SPP)

표면플라즈몬은 금속과 유전체(유리)매질 사이에서 무질서한 자유전자가 아닌 결맞은 전자 진동특성을 갖는 전자를 지칭하는데, 광자와 결합하게 되면 표면플라즈몬폴라리톤(SPP)이라는 광-전 결합입자가 되고, SPP는 고전적 광회절 한도를 벗어나는 행태를 띠어, 나노크기의 영역에서도 빛의 투과, 진행, 굴절, 간섭 등이 일어난다. 광통신 광소자에서, 광도파로의 크기는 대개 마이크로 이상으로 나노크기의 영역에서는 다룰 수가 없었던 한계에 반해, SPP의 경우에는 저에너지 구동 나노 광소자에도 응용할 수 있어 다양한 광소자 및 의학적 응용개발에 활용될 수 있다. 본 연구센터에서는 SPP 두 개의 모드 간섭을 중첩하여 광신호의 스위칭을 2012년에 선보였는데(그림 3),^[11,12] 이는 국소영

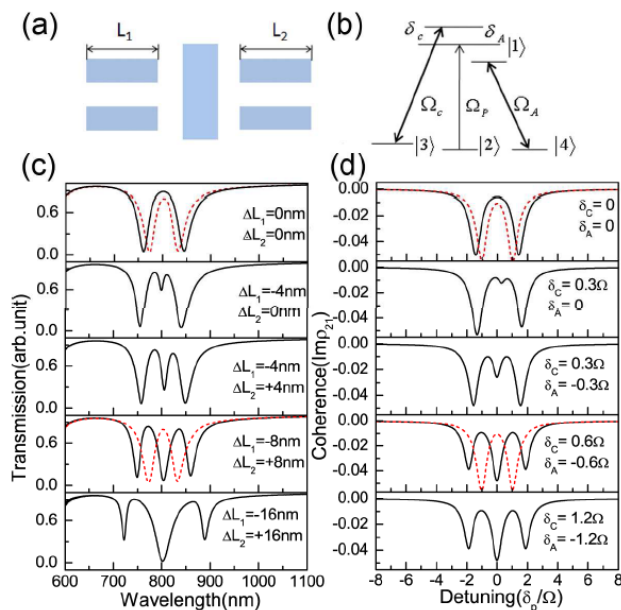


그림 3. 표면플라즈몬 스위칭 전산모사 (a), 표면플라즈몬 스위칭을 위한 나노구조, (b), (a)의 나노구조와 상응되는 원자준위 구조, (c), (a)의 길이 차이에 따른 광투과 전산모사, (d), (b)의 detuning에 따른 전산모사. 참고문헌 [11].

역을 통과하는 광신호의 방향을 제어하는 연구로서, 그 응용 예는, VLSI 회로선에 대비되는 광집적회로 도파로가 되는데, 기존 광소자 광도파로와는 달리 마이크로 이하 크기의 VLSI급 광회로를 구현하는데 응용할 수 있다. 본 연구센터에서는 궁극적으로 손톱만한 크기의 광칩으로 테라플롭 연산을 할 수 있는 순수 광소자에 적용가능한 플라즈몬 광도파로를 개발하여 전자가 완전 배제된 미래 순광컴퓨터 및 순광처리기에 응용하고자 한다.

5. 퀀텀바이오 이미징

현대의학은 의료장비에 상당부분 의존하고 있는데, 예를 들면, 암 진단에 있어 암세포 크기는 전적으로 바이오-태깅/이미징의 정밀도/해상도에 달려있다. 즉 X-ray 사진으로는 검출 불가능한 것이 MRI에 의해 진단되듯, 생체이미징 해상도는 현대의료분야에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 현재까지의 생체이미징 기술은 토모그래피, fMRI, PET, SPECT, FLI, CT 등이 있는데 이들은 각자 고유한 한계특성을 내포한다. 예를 들면, fMRI는 자장의 기술기 정도가 해상도를 결정짓기 때문에 수 테슬라의 고자기장이 필수이고, 스핀위상검출 효율문제와 액체헬륨에서의 극저온 구동을 해야만 한다. PET의 경우에 있어서 생체투과시 산란된 신호는 외부 소음보다는 커야하는데, 이로 인해 한 개의 세포반응이 아니라 수억 개의 세포반응에 의한 신호에 의존하고, 생체 두께는 cm 이하로, 해상도는 mm 이상으로 무뎌진다. 이것은 결국 두꺼운 생체조직을 갖는 유방암 검진  실시간 암진단이 어려워지는 이유가 된다. 본 연구센터에서는 NV 나노입자를 사용하여 나노미터 크기의 해상도를 갖고 단일 생세포에 반응하는 퀀텀나노바이오 이미징 연구를 수행한다.

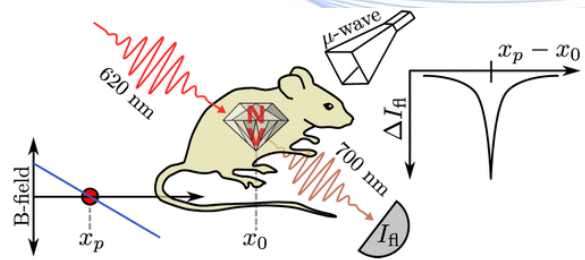


그림 4. UOT(Ultrasound-modulated Optical Tomography) 생체이미징 개략도.

또한 느린빛에 기초한 시간필터링 기법을 이용하여 소음없는 실시간 광신호검출에 적용하는데, 이는 기존의 UOT방식에(그림 4) 양자결맞음 네파섞음진행을 혼용하여, 10 cm 두께의 생체조직 진단에 활용된 바 있다.^[13] 즉, 본 연구센터에서는 sub-마이크론급 해상도를 갖고, 10 cm 두께의 생체에서 단일세포 전이추적을 가능하게 하는 차세대 생체의료 전이영상에 대한 연구를 목표로 하고 있다. 세밀한 일간뉴스 보도에 따르면, 10년 후 한국에서는 치매환자가 백만이 넘는다고 한다. 올해 초 미국 오바마 대통령은 두뇌지도 프로젝트에 1000억 원 투입을 승인했다. 하지만 현재 의료기술로는 치매정복은 커녕 이해도 요원하다. 이런 의미에서 단일세포 전이추적 생체영상기술은 두뇌지도 프로젝트 실현에 매우 중요한 역할을 할 것이며, 궁극적으로 대부분의 질병 원인은 이해될 것이고, 불치병(예를 들면 치매)은 정복될 수 있을 것으로 생각한다.

향후전망

본 광양자센터에서는 현재 불가능하거나 이론조차 없는 미지의 학문영역을 개척하여 인류 문명의 진보에 기여할 목적으로 다양한 양자광학 연구를 수행하고 있는데, 첫째 광컴퓨터의 출현을 앞당겨 인공지능이 가능한 차세대 정보처리연구를 선도하고, 둘째, 거리제한 없는 양자통신을 장시간 양자메모리로 해결하며, 셋째, 진정한 의미의 방송과 결합된 총천연색 3D 디스플레이와 광연산메모리를 느린빛-포톤에코기반의 연구로 달성하고, 넷째, 단일세포 전이추적 기능을 갖는 퀀텀나노바이오이미징 연구로 생명에 대한 근본적인 이해는 물론 불치병 정복이 가능하게 하는데 기여하게 될 것으로 전망한다.

참고문헌

- [1] B. S. Ham and J. Hahn, Appl. Phys. Lett. **94**, 101110 (2009).
- [2] B. S. Ham, US Patent 7,775,821 (2010).
- [3] B. S. Ham, Appl. Phys. Lett. **78**, 3382 (2001).
- [4] N. Sangouard *et al.*, Rev. Mod. Phys. **83**, 33 (2011).
- [5] B. S. Ham, Nature Photon **3**, 519 (2009).
- [6] B. S. Ham, Phys. Rev. A **85**, 031402(R) (2012).
- [7] B. S. Ham, New J. Phys. **14**, 013003 (2012).
- [8] M. Afzelius *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 040503 (2010).
- [9] B. S. Ham, J. Opt. Soc. Am. **28**, 775 (2011).
- [10] B. S. Ham, US Patent 8,094,367 (2012).
- [11] H. Xu and B. S. Ham, Opt. Exp. **18**, 17736 (2010).
- [12] H. Xu and B. S. Ham, Opt. Commun. **311**, 77 (2013).
- [13] P. R. Hemmer: SPIE Photonics West, Conference 8636-6, San Francisco, USA (2013).