

■ 국내외 광기술 연구 및 교육 현황



함병승

인하대학교 정보통신대학원 교수/광양자정보처리연구단(창의) 단장

1 들어가는 글

1947년 미국 벨연구소의 3명의 과학자에 의한 반도체 트랜지스터의 발명은 19세기 인류 물질문명을 이끌어 온 산업혁명을 20세기 전자혁명으로 대체하는 대 전환점이 된다. 이후 지금까지 50년 동안 전자문명은 라디오로부터 우주선에 이르기까지 인류문명사에 엄청난 변화와 공헌을 했다. 전자문명의 핵심인 전자집적회로는 1970년대를 고비로 컴퓨터라는 문명의 이기로 진화하게 되며 지난 30여년 동안 꾸준한 집적화를 거쳐 2007년 현재 인텔 마이크로프로세서(CPU)의 클럭주파수는 3.8GHz에 이른다. 이러한 컴퓨터 칩의 발전양상은 1965년 인텔사의 창시자인 고든 무어에 의해 제시된 “매 18개월마다 트랜지스터 집적도는 두 배로 증가한다”는 일명 ‘무어의 법칙’ (Electronics, Vol. 38, No. 8, 1965.04.19)으로 요약된다 (그림 1).

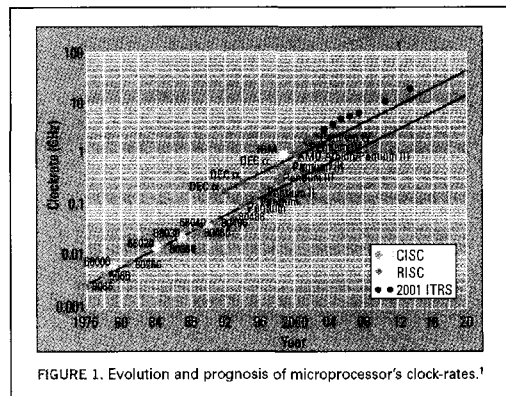


FIGURE 1. Evolution and prognosis of microprocessor's clock-rates.¹

그림 1 무어의 법칙

컴퓨터 없는 현대생활은 생각지도 못할 정도로 오늘날 컴퓨터는 없어서는 안 될 필수불가결한 문명의 이기이며, 현대 사회는 나날이 더 많은 정보량과 더 빠른 정보처리능력을 요구하기에 더 빠른 컴퓨터의 출현은 한 사회의 진보와도 매우 밀접한 관계를 맺고 있다. 그러나 컴퓨터 속도의 증대를 위해서는 트랜지스터의 크기를 줄여야만 하기에 컴퓨터 집적회로 원리는 당연 그 자체한계를 가질 수밖에 없다. 즉, 트랜지스터의 크기가 원자 크기에 이르게 되면 필연적으로 일어나는 양자효과 때문에 더 이상의 집적은 불가능하게 된다. 인텔사에 따르면 현재 실리콘에 기초한 CPU는 그 속도가 약 30GHz가 되는 2012년에 이르면 ‘0’과 ‘1’의 경계가 모호해지는 영역에 이르러 반도체 혁명의 이론적 종착점이 될 수도 있다고 경고한다. 설상가상으로 인텔은 말하기를 무어의 법칙보다 더 빠르게 증가하는 누설전류로 인해 수년 내에 컴퓨터 칩 구동을 위한 단위 전력량이 원자로나 로켓추진을 위한 것과 비슷하게 된다고 예측한다.

다른 한편, 1980년대에 정점을 이루었던 광컴퓨터 연구에 있어서는, 자연에 존재하는 가장 빠른 전송수단은 빛이고 (아인슈타인 특수상대성 이론), 빛은 전자파와 달리 전자파간섭효과를 배제하기 때문에 평행정보처리가 가능하다는 장점으로 많은 관심을 끌어들였다. 지난 수십 년 동안 축적된 광컴퓨터 연구결과를 종합해보면 홀로그래피 등에 기초한 광메모리, 광인터페이스, 스마트 픽셀을 이용한 광어레이, 광패턴인식과 같은 초고속 광아날로그 처리, 그리고 반도체광증폭기(SOA)에 기초

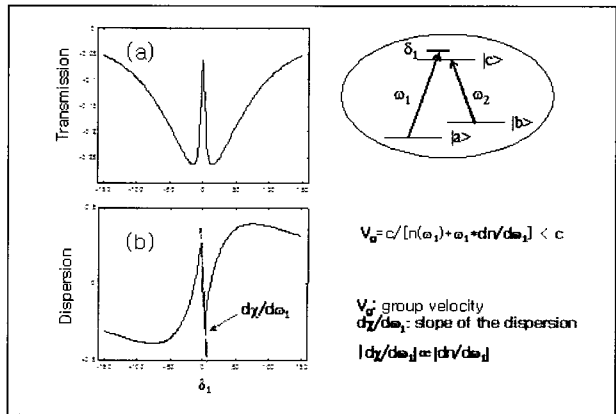
한 디지털 광논리 등에 대한 방대한 연구업적이 있으나 현재의 전자회로를 전면 대체하기에는 그 이론적 기술적 한계가 너무나 커 사실상 불가능에 가깝다.

또한 일각에서 제기되는 광/전 하이브리드 정보처리는 전자가 갖고 있는 치명적인 결함 즉 1~10GHz 대역폭의 한계를 극복하고자 전자CPU를 그대로 사용하면서 CPU-메모리 혹은 CPU-주변기기간의 데이터전송용량의 증대를 피하고자 함이 주목적이므로, 기술적인 부차적인 문제를 차치하고서라고 본질적인 해결방법은 될 수 없다. 따라서, 현재 디지털 전자집적회로의 모든 장점은 그대로 수용하면서 정보전달매체 즉 전자를 빛으로 온전히 대체하고 집적도, 확장성, 효율성에서 현재의 전자CPU를 대체할 수 있는 디지털 광논리만 개발할 수 있다면 이것이 완전한 의미에서 광컴퓨터로 가는 것이며 무어의 법칙은 마치 상전이를 이루듯 전자에서 빛이라는 새로운 단계로 진입할 수 있을 것이다.

본 광양자정보처리연구단에서는 위에서 언급한 20세기 문명의 총아 전자집적회로가 안고 있는 근본적인 문제 즉, 스위칭 속도는 집적도에 비례해야만 한다는 본질적인 문제를 해결하고, 순전히 빛으로만 구동되는 디지털 광CPU에 대한 연구와 디지털정보처리와는 전혀 다른 양자정보처리에 대한 연구를 시도하고자 2006년 4월 과학기술부/과학재단 지원 창의적연구진흥사업으로 설립되었다. 구체적으로 이를 위해 최근 제안되고 검증된 양자스위치를 디지털 광논리를 이루는 핵심원리로 하고, 전자가 완전히 배제된 순수 빛으로만 이루어진 광논리, 광CPU 레지스터, 광도파로를 통한 디지털 THz 광CPU를 연구하는 것을 최종적인 목표로 한다. 또한 양자정보처리에 대한 연구로는 지난 10여년간 축적된 다양한 양자정보/양자통신분야중에서 정보처리/정보통신을 위한 핵심연구 즉 양자얽힘생성과 양자메모리에 대한 연구를 할 것이다. 물론 본 연구단에서 추구하는 양자얽힘과 양자메모리는 기존의 연구와는 전혀다른 것인데, 부언하자면 원하는 시간에 원하는 양자얽힘을 발생하거나 한번에 여러 개의 양자데이터를 저장할 수 없다면 미래 양자정보처리의 치명적인 결함이 될 것이다. 아쉽게도 현재까지 진행된 양자정보연구는 확률적 양자얽힘발생과 일회 양자메모리에 머물고 있어 이를 극복하기 위한 창의적 연구가 필요한데, 이미 본 연구단에서는 최근 그에대한 이론연구를 수행했으며 앞으로는 이를 증명하는 데 주력할 것이다.

2 EIT 연구동향

EIT는 Electromagnetically Induced Transparency의 약자로 1990년 미국 스탠포드 대학의 한 연구팀에 의해 제안된 비선형양자광학의 한 지류이다. 그러나 역사적으로는 1976년 이태리 피사대학에서 나트륨 분광선을 측정하던 중 우연히 관측된 검은 흡수선이 사실 그 출발점이 된다. 이후 CPT (Coherent Population Trapping)란 이름으로 1980년대까지 약한 세기의 빛에 기초한 분광학 개념의 연구에 국한되어 오다가, 1990년 강한 빛의 영역으로 넘어가면서 EIT란 이름이 사용되게 된다. 그 이후 1999년까지 EIT연구는 비선형광학분야에서 획기적인 기여를 하게 되는데, 예를 들면 '밀도반전없는 레이저'라든가 '빛속도지연' 등의 결맞는 양자통제연구가 그것이다. EIT란 두 개의 결맞는 빛이 매질과 상호작용할 때 나타나는 양자간섭효과로써 공명전이일 경우에도 물질에 흡수됨 없이 투과하는 현상을 지칭한다 (그림 2a). 여기서 핵심적인 물리현상으로 빛(photon)과 매질(spin coherence)이 하나되어 움직이는 현상 즉 Dark resonance Polariton을 말할수 있는데, 이에 대한 체계적인 연구는 2000년대 중반이 되어서야 이루어지게 된다.



EIT연구에 있어 전환점은 뭐니뭐니해도 1999년 허버

그림 2 EIT와 굴절률 분산

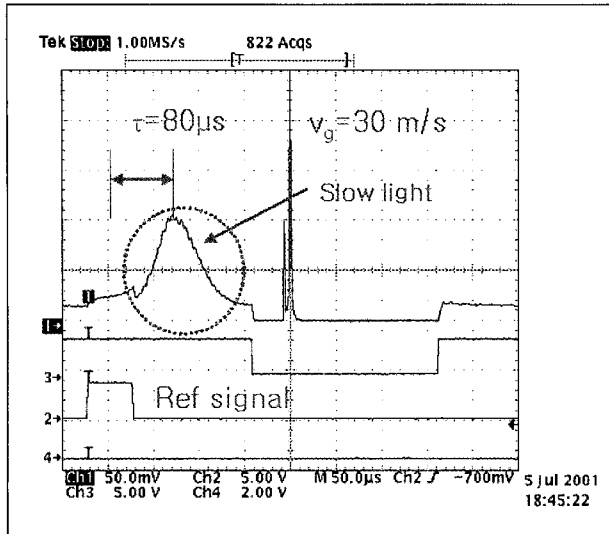


그림 3 느린 빛

연구를 선도해왔는데, 예를 들면 세계최초로 고체에서 EIT관측 (PRL/OC (1997))과 EIT-비선형관측 (OL(1997)), 양자메모리 (OL(1997), PRB(1998)) 등이 있으며, 2000년에는 독자적으로 새로운 이론인 양자스위칭이론과 그에 대한 증명을 PRL에 발표하여 선도그룹의 능력을 보유하게 되었고, 2002년에는 고체물질을 이용하여 최초로 느린빛 관측은 물론 멈춤빛 실험에도 성공하였다 (PRL) (그림 3). 최근에는 양자스위칭이론을 기반으로 광논리이론을 확립하여 창의적연구진흥사업단으로 지정받아 9년 장기 국책연구를 수행중에 있다. 세계적 연구동향을 보면 1990년대는 미국을 중심으로 몇몇 소수의 연구그룹이 EIT-비선형양자광학연구를 수행했고, 2000년대에는 느린빛과 양자결맞음통제를 기반으로 전 세계적인 양자정보처리연구로 확산되었으며, 최근에는 느린빛을 광버퍼메모리에 응용하려는 목적으로 광전자공학분야로 급속히 파급되고 있고, 2006년에는 미국광학회 산하 '느린빛워크샵'이 초창기 EIT그룹이 아닌 반도체 그룹에 의해 조직되었다. 반도체를 이용한 EIT연구에는 오레건 그룹과 영국 임페리얼 그룹이 초기 결과를 보유하고 있다.

3 광로직 연구동향

현재 광로직 연구를 위한 대부분의 광소자는 비선형광학에 기초하고 있다. 그런데, 비선형 광학은 입사된 광의 세기에 비례하며 그 임계세기가 상당히 커야 한다는데 한계가 있다. 최근 활발하게 논의되고 있는 SOA (반도체 광증폭기)를 이용한 광로직 연구에 있어서는 입력되는 신호빛과 펌핑빛 상호간의 XGM (cross gain modulation)에 의한 한계이득을 이용하는 것인데, 바로 이 XGM은 전형적인 비선형광학에 속하고 따라서 펌핑광의 세기는 물론 1mm나 되는 SOA길이도 집적화에 걸림돌이 되는 것이다. 최근 SOA 광로직에 대한 활발한 연구를 하는 세계적인 연구그룹은 미국에서는 국방부의 지원을 받는 미시간 대학, MIT-링컨 연구소 등이, 일본에서는 NEC, 일본전기 등이 있고, 유럽연합에서는 6개국 컨소시엄 형태의 LASAGNE가 2004년부터 광논리 및 광라우팅 연구를 개시했다. 또한 영국, 그리스 등에서도 개별적으로 광논리 연구를 수행하고 있는데, 대부분의 유력한 연구그룹들은 SOA (반도체 광증폭기)를 이용한 기본적인 광스위칭, AND, OR, NOR 등 광논리를 이미 증명했다. 그러나 아쉽게도, SOA를 포함한 대부분의 현존 광논리 방식은 집적도, 전력요구량, 속도 등에서 획기적인 개선 없이는 전자 CPU를 대체할 현실성은 없어 보인다: 2004년 현재 인텔 펜티엄 4 CPU 한 개에 집적된 트랜지스터 수가 3억개 임을 고려할 때, 현재까지 제안된 SOA-광논리로 이 수준의 광CPU를 구성한다는 것은 난센스에 가깝다: (예)

드-스펜포드 그룹에 의해 'Nature(런던)'에 발표된 느린 빛 관측이다. 물론 빛속도 지연에 대한 원리는 굴절률분산에 관한 것으로써 즉, 양자간섭효과로 나타나는 흡수선 변화인 EIT의 직접적인 결과인데 (그림 2b), 세계적인 이목을 집중시키게 된 원인은 빛의 속도를 음파이하로 통제할 수 있었다는 것이고, 이는 비선형광학은 물론 양자정보분야에 획기적인 영향을 미치기 때문이다. 예를 들면 비선형효과에 의한 위상변화는 빛이 매질과 반응하는 시간에 비례하게 되는데, 빛이 느리게 진행하게 되면 그만큼 반응시간이 증가하게 되고, 따라서 비선형광학의 최대 결합인 약한 세기의 영역에서도 소기의 목적을 달성할 수 있게 된다. 물론 약한빛의 극한은 양자정보처리에 있기에 느린빛 연구는 곧바로 양자정보처리의 현실적인 한계인 '비파괴양자측정(QND)'을 가능케 할 수도 있다.

본 연구단은 지난 10여 년 동안 EIT에 있어 핵심적인

광논리의 광스위칭을 구성하는 SOA길이는 1mm → 최소면적: 100 μm²; 소자당 구동에너지는 100fJ → 1 ps pulse이므로 최소 필요전력은 100mW x 10⁶ = 10MW: Opt. Lett. 23, 1271 (1997); MIT-Lincoln Lab (2004).

국내 연구동향은 지난 1996년 과학기술부의 국책연구개발사업으로 시작되어 2005년에 종료된 KIST의 '차세대 포토닉스 기술개발사업단' 이 9년간 SOA를 이용한 광로직 대부분을 증명했다. 본 연구단은 2006년 과기부 창의적연구진흥사업으로 시작되었으며 새로운 방식 즉 EIT에 기초한 광양자로직과 양자메모리에 대한 연구를 수행중에 있다. 한편 광스위칭연구에 있어서는, 정통부 과기부 등 정부의 지원을 받는 정부출연연구소, 대학, 및 산업체의 여러 광소자 연구그룹이 있고, 광전하이브리드 광인터컨넥터와 관련해서는 2003년 과학재단 ERC로 선정된 인하대 '집적형 광자기술 연구센터'가 있다.

4 유니버설 광양자로직게이트

"더 작게, 더 빠르게"라는 모토에 기초한 무어의 법칙은 불행하게도 본질적 물리법칙의 한계 즉 원자크기보다 더 작아져서 안되는 한계로 말미암아 2004년 기준 그 종착점을 10년도 채 안 남겨두고 있다. 이러한 예측은 무어의 법칙을 준용했을 경우 2007년 6 GHz CPU가 나와야 함에도 불구하고 인텔은 겨우 dual CPU로 대체하고 있어 벌써부터 문제점이 노출되기 시작한 것으로 보인다 (그림 1). 문제는 이 한계는 기술적일뿐만 아니라, 물리법칙의 한계이기 때문에 그 근원적인 자연법칙을 바꾸지 않는 한 해결할 수가 없는 것이다. 최근 인텔이 검토 중에 있는 하이브리드 컴퓨터는 점점 벌어지는 CPU속도와 메모리 버스 대역폭간의 차를 해결하기 위해 광인터컨넥터를 도입하자는 것인데, 이는 전체 컴퓨터 효율을 상당히 개선시킬 수는 있겠지만 CPU 자체의 문제를 해결하지 않기에 본질적인 해결책은 아니다. 두말할 것도 없이 그 근원적인 해결의 열쇠는 전자에 기초한 스위칭 한계 즉, RC 시간 상수 의존을 완전히 제거하는 것이다.

광양자정보처리연단에서는 기존의 어떠한 기술이나 법칙과도 다른 새로운 원리 즉 양자스위칭에 기초하여 소자 크기나 집적도 혹은 RC상수에 상관없는 광양자논리게이트에 대한 연구를 하고있다. 이 광양자논리게이트는 매질을 반도체로 했을 경우 최소 100GHz 이상의 속도를 갖는 반면, 크기와 전력소모는 현재 CPU에 준하게 될 것으로 예측된다. 그러면 우선 양자스위칭이란 무엇인가부터 살펴보기로 한다. 양자스위칭이란 본 연구단에서 2000년에 기본원리를 PRL에 발표했고, 2004년 APL에 광필스에 기초한 양자스위칭/양자라우팅 실험결과를 발표한 것으로써, EIT-비선형양자광학에 기초한다 (그림 4). 여기서 EIT는 공진하는 전자기파가 매질에 흡수없이 투과하는 현상이라고 앞서 설명하였다. 이러한 EIT현상은 반드시 서로다른 두 개의 레이저 혹은 전자기파가 매질과 상호작용할 때 나타나는 양자광학 현상인데, 그림 4에서처럼 세번째 레이저 A가 작용하게 되면 애초 S와 C에 의해 형성된 EIT를 제거하고 새로운 EIT를 만들게 되며, 따라

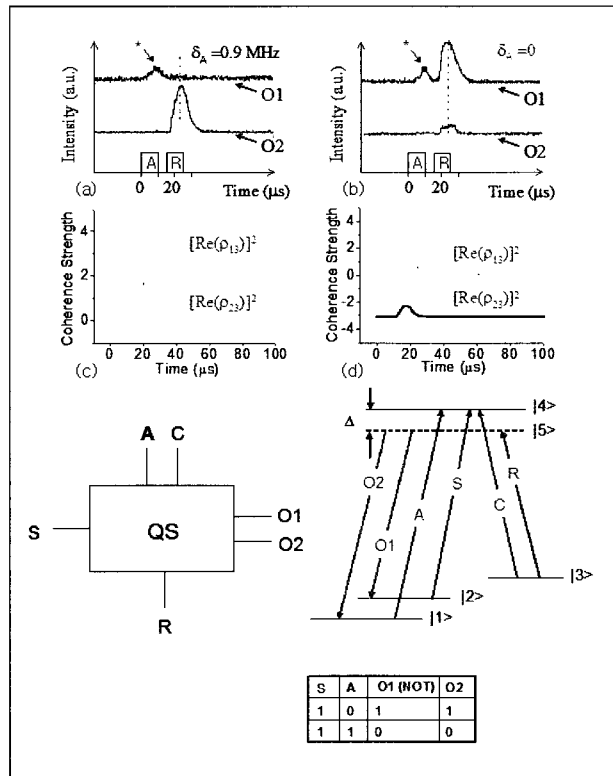


그림 4 양자스위칭

서 세번째 레이저를 control 빛으로 하면 그림 4처럼 S를 O1 혹은 O2로 단속할 수 있는 양자스위치/양자라우터를 구성할 수 있게 된다. 이때 스위칭 속도는 기존 광스위칭의 한계인 밀도전이시간보다 100배나 빠를 수 있음을 증명하여 2003년 PRB에 발표하였다.

광양자로직은 그림 4의 양자스위치 QS를 두 개 혹은 그 이상을 직렬 혹은 병렬로 연결하면 Boolean algebra를 구성할 수 있는데 그림 5와 6은 그 중 일부의 광양자로직게이트를 설명하고 있다. 이러한 광양자로직게이트의 특징은 광스위칭 시간이 양자스위칭시간에 준하게 되므로 반도체를 매질로 할 경우 최소 100GHz의 속도를 얻을 수 있게된다. 또한 기본 원리가 EIT에 있으므로, 본질적으로 양자광학현상이며 따라서 양자정보처리도 이론적으로 가능하다고 할 것이다. 이러한 양자정보 인 터페이스에 관한 자세한 연구내용은 '양자과장변환' 이란 제목으로 2006년 APL에 발표되었다.

위에서 간단히 설명했듯 본 광양자정보처리연구단에서는 1단계 3년 동안 첫째, 두개 이상의 양자스위치를 이용하여 광양자로직게이트 - AND, OR, NOR, NAND, XOR를 실험적으로 증명할 것이며, 둘째, EIT-느린빛 현상을 이용하여 양자메모리 및 양자얽힘생성을 관측할 것이다. 양자메모리와 양자얽힘에 대한 자세한 설명은 지면관계상 생략하기로 한다. 마지막으로 광양자로직게이트를 구현하기 위해서는 반도체와 같은 빠른 전이시간을 갖는 매질이 필요한데, 반도체 양자나노구조에서는 아직 EIT에 기초한 느린빛 현상이 관측되지 않고 있다. 사실 반도체 느린빛은 본 연구가 실용화 될 수 있을지에 대한 열쇠를 제공하게 될 것인데, 현재 본 연구단에서는 반도체양자우물구조에서 느린빛 실험을 준비하고 있다.

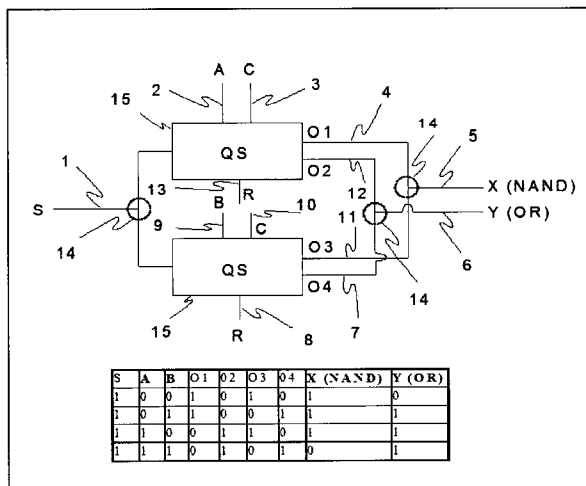


그림 5 광양자로직게이트 (NAND/OR)

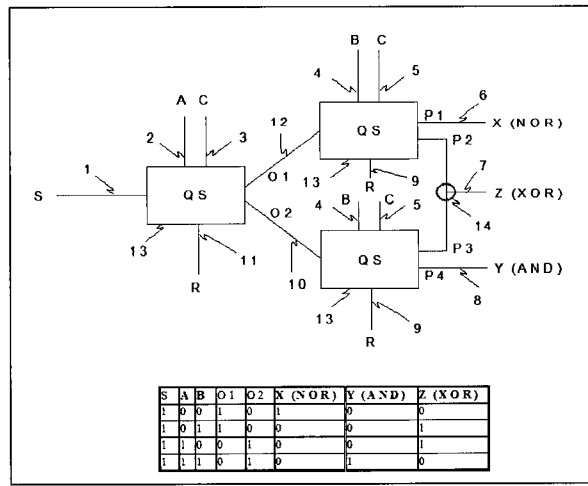


그림 6 광양자로직게이트 (NOR/XOR/AND)

5 맺는말

지난 10여 년 동안 광정보통신은 전자집적회로의 빠른 진보와 맞물려 인터넷이라는 지식정보사회의 하부구조를 탄생시켰고, 현재 무선통신을 포함한 유무선정보통신은 언제 어디서나 아무기기로나 인터넷에 접속가능한 유비쿼터스 사회로의 진입을 목표로 하고 있다. 현재 세계 반도체 시장규모를 인텔은 약 200조원으로 추산하는데 매년 폭발적으로 늘어나는 이동통신 기기까지 감안한다면, 본 연구에서 목표하는 디지털 광양자컴퓨팅 연구의 사회경제적 가치와 규모는 실로 막대하다 할 것이다. 따라서, 현대 물질문명의 발달을 가능케 했던 추동력이 무어의 법칙에 기초한 전자집적회로의 발달이었음을 고려할 때, 무어의 법칙은 지식정보사회를 완결하기 위한 하부구조의 토대라는 점에서 반드시 지속되어야만 한다. 그뿐 아니라 인간의

뇌와 비슷한 인공지능을 개발하기 위해서는 초당 1조회의 연산능력이 있어야 한다고 하는데, 따라서 THz 속도를 갖는 광양자CPU는 지식정보사회를 완결하기 위한 필수불가결한 핵심 하드웨어가 될 것이다. 그것을 위해서는 현재 전자가 안고 있는 본원적인 문제를 광자(빛)를 통해 해결하고 집적이 가능한 광트랜지스터를 통하여 광컴퓨터를 개발하는 것이야말로 20세기 전자혁명을 21세기 광혁명으로 이어가는 것이고, 그렇게 함으로써 인류문명은 파국 없이 지식정보사회로의 이행을 완료할 것이다. 이 연구의 성공은 21세기 광혁명을 완성하는 열쇠를 제공한다는 점에서 인류문명사에 한 획을 긋는 대사건이 될 것이다.

Acknowledgement

이 연구는 과기부-과학재단 창의적연구진흥사업(광양자정보처리연구단)에 의해 지원되었습니다.

References

1. G. Moore, *Electronics* 38 (No. 8), (April 19, 1965).
2. L.V. Hau, S.E. Harris, Z. Dutton, and C.H. Behroozi, *Nature (London)* 397, 594 (1999).
3. A.V. Turukhin, V.S. Sudarshanam, M.S. Shahriar, J.A. Musser, B.S. Ham, and P.R. Hemmer, *Phys. Rev. Lett.* 88, 023602 (2002).
4. M. Fleischhauer, A. Imamoglu, and J.P. Marangos, *Rev. Mod. Phys.* 77, 633 (2005).
5. G.B. Serapiglia et al., *Phys. Rev. Lett.* 84, 1019 (2000); M.C. Phillips et al., *Phys. Rev. Lett.* 91, 183602 (2003).
6. S.A. Moiseev and B.S. Ham, *Phys. Rev. A* 71, 053802 (2005).
7. B.S. Ham, M.S. Shshriar, and P.R. Hemmer, *Opt. Lett.* 22, 1138 (1997); Y. Zhao, C. Wu, B.S. Ham, M.K. Kim, and E. Awad, *Phys. Rev. Lett.* 79, 641 (1997).
8. B.S. Ham and P.R. Hemmer, *Phys. Rev. Lett.* 84, 4080 (2000); B.S. Ham, *Appl. Phys. Lett.* 85, 893 (2004); B.S. Ham and P.R. Hemmer, *Phys. Rev. B* 68, 073102 (2003).
9. B.S. Ham, *Appl. Phys. Lett.* 88, 121117 (2006).