제7회 광학 및 양자전자학 워크샵 논문집, 1990. 7. 13~14.

광자공학 : 어떻게 할 것인가?

Photonics (What To Do & How To Do It?)

이 일항, 김 경헌

한국전자통신연구소, 기초기술연구부

근래에 와서 통신 및 정보처리 기술에 있어서 기존의 전자공학적인 방법이 가지는 한계점을 광자공학적인 방법으로 극복하여 고속 및 대용량화 하려는 움직임이 있다. 이러한 통신 및 정보처리 기술에 필요한 광자 소자 및 재료의 연구 동향과 그 들의 광교환, 광컴퓨터 그리고 광통신에의 응용 등을 살펴 보고자 한다.

I. 서론

광자공학(photonics)이란, 전자공학이 미시적인 차원에서의 전자의 작용을 다루는 학문(electronics)인 것처럼, 광자(photon)를 미시적으로 다루는 학문이라고 볼 수 있다. 사실 빛을 다루는 광학(optics)의 역사는 오래 전 부터이나, 양자물리학의 발전과 함께 1960 년대 초에 도래된 레이저(laser)의 발명[1,2]이 본격적인 현대 광자공학 (modern photonics)의 시작이 되었다고 볼 수 있다. 레이저의 발명으로 우리는 단색광의 강한 강도를 가진 빛을 인위적으로 만들어 낼 수 있게 되었으며, 이로 인해 종래에 볼 수 없었던 많은 물리광학적 현상을 볼 수 있게 되었다. 넓은 의미에서 광자공학은 광자를 다룬 전반적인 모든 분야를 포함하고 있지만, 이 글에서는 미래 지향적인 광통신 및 광 정보처리를 위해 발전하고 있는 광자공학을 다루기로 한다.

현재 우리가 살고 있는 정보통신 사회는 그림1에서 보는 바와 같이 기계적인 방법으로 부터 전기적인 방법을 거쳐 전자공학적인 방법 그리고 광학적인 방법으로 진화적이면서 또 혁신적인 발전을 거듭해 왔다. 1947년에 있은 bipolar transistor의 발견은 기존의 진공관 시대에 획기적인 변화를 가져다 주면서 오늘날에 이르기까지 반도체를 중심으로한 전자공학의 번성을 이루어 왔다. 전자공학의 기술은 반도체 전자산업과 함께 고속화, 고집적화 및 대용량화하는 방향으로 발전해 왔으며 이미 전자소자들이 갖는 한계치에 직면하게 되었다. 전자소자들의 속도는 소자가 가지는 자체 전기용량(capacitance)과 저항 값으로 주어지는 시간계수(RC-time constant)와 그 물질 (특히 반도체) 내에서 운반자(carrier)들의 유효질량(effective mass)에 의한 이동속도의 감소로 소자의 반응속도가 제한을 받아 picosecond 이상의 수준에 머무르게 된다. 또한 전자소자는 전자의 이동에 따른 전자기적인 간섭(electro-magnetic interference)과 전선과 같은 매질 내에서만 움직일 수 있기 때문에 병렬처리(parallel processing)의 곤란한 점등의 단점들을 가지고 있다. 20 세기 전자시대의 상징인 실리콘, 동선 등은 21 세기 광자시대

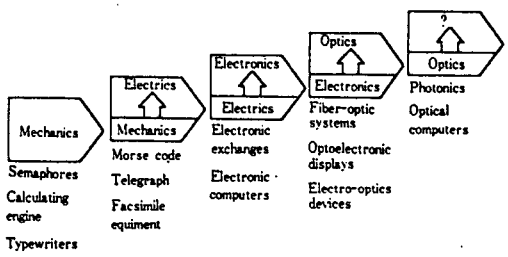

그림1. 통신과 컴퓨터 기술의 진화.
[after J.Bass, The Plessey Company]

를 내다 보는 화합물 반도체, 광섬유 등으로 대치되고 있으며 전자식 통신, 전자식 교환기, 전자식 컴퓨터 등에 상응하는 광통신, 광교환, 광컴퓨터 등에 대한 연구가 활발해지고 있다. 이러한 전자공학적인 방법이 가지고 있는 한계성을 극복하여 정보의 홍수를 경험하고 있는 현시점에서 앞으로 더욱 불어날 정보의 원활한 처리를 위해 광자공학적인 방법이 추구되어 지고 있는 것이다. 광자소자는 일반적으로 전자소자보다 훨씬 더 빠른 반응속도를 가지며, 전자기적인 간섭의 배제 및 자유로운 공간에서의 이동으로 정보의 병렬처리가 용이한 장점들을 갖고 있다. 이러한 빛의 장점 때문에 앞으로 많은 전자적 방법들이 광자적 방법으로 바뀌어 갈 전망이며, 그 중간 단계로 전자와 광자의 운동을 동시에 이용한 광전소자들의 많은 진전이 이루어지고 있다. 그림2는 현재 전자산업과 광학산업의 발전 동향을 보여주고 있으며 그러한 추세로 본다면 1990년 중반내지는 후반기 부터는 광학산업이 전자산업을 앞지를 가능성이 있다. 앞으로 광학산업이 번성하기 위해서는 광자소자의 근본이 되는 소재와 소자구조의 연구가 필수적이며, 나아가 광 정보처리에 필요한 알고리즘(algorithm)과 소자들의 아키텍처(architecture)의 연구도 아울러 이루어져야 한다. 최근에 AT&T Bell 연구소의 Alan Huang이 SEED(self-electro-optic effective device)를 이용해 광 신호처리를 실험적으로 보인 것[3]은 이러한 분야의 대표적인 발전을 나타내며 앞으로 광 정보처리 기술의 광자화에 획기적인 시도의 한 예라 볼 수 있다.

II. 전자적 방식과 광자적 방식

반도체 기술의 발달로 전자소자들은 이미 마이크로 웨이브(microwave) 영역에까지 주파수 대역을 넓혔으며 그 중에서도 낮은 진동수의 마이크로웨이브 영역은 물론 나아가 밀리미터웨이브(milimeterwave) 영역에까지 발전하여 그 들

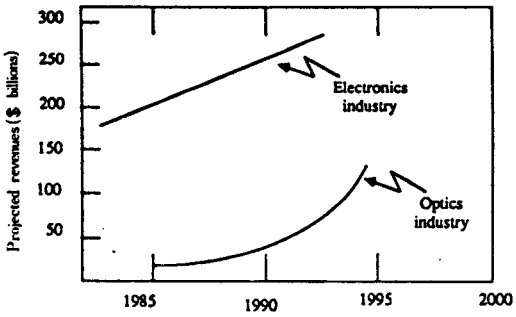

그림2. 광학산업의 예상된 발전.
[Source: TIME, Oct.6, 1986]

이 가지는 고유 진동수에 해당하는 빠른 속도까지 접근하고 있다. 최근에 보고된 것으로는 InAlAs/InGaAs를 이용한 HEMT 소자를 60 GHz까지[4], 또 AlGaAs/GaAs HBTs (Heterojunction Bipolar Transistor)로 175 GHz의 최고 진동수를 얻어오고 있다[5]. 하지만 빛의 파장이 근적외선의 약 30 THz로 부터 자외선영역의 1000 THz까지 이므로 광학소자로서 전자소자가 가질 수 있는 이상의 고주파수 영역에서 작동을 가능케 할 수 가 있다.

정보처리기술에 있어서 광 신호처리의 장점은 앞서 얘기한 것과 같이 빛의 고속성 뿐만이 아니라 병렬성도 있다. 전자적인 방법으로는 막대한 연결선과 전자기적인 간섭을 피하기 위한 공간적인 부피로 병렬처리에는 제한이 따르나, 광처리방식으로는 3차원 공간상에서 얼마든지 쉽게 처리될 수가 있다. 광학소자가 가지는 이러한 고속성과 더불어 병렬성의 이점을 그림3이 잘 나타내어 주고 있다[6].

III. 광소자

광정보처리 및 통신을 위한 광학소자들은 대체적으로 발광소자, 수광소자, 광신호처리용 소자, 광 기억소자등으로 구분 될 수 있다. 발광소자는 주로 레이저 다이오드(laser diode)가 많이 사용되고 있고, 단일 소자로부터 광 병렬처리를 위한 2차원적 LD어레이(aray)에 이르기까지 많이 발전을 해오고 있으며, 수광소자의 경우에는 pin 광 검출기로부터 고감도, 고속, 저잡음을 위한 APD 광 검출기로 발전을 하면서 동시에 2차원적인 검출기로서 CCD(charge-coupled device)등이 연구되어 오고 있다. 광 신호처리용 소자로는 음향광학 변조기 및 편향기(accorsto-optic modulator and deflector), 공간 광변조기 (spatial light modulator), 광 쌍안정(optical bistable)소자, LD어레이, 비선형 광학소자, 홀로그램, 집적 광학소자등이 있다. 이들 중 대표적인 소자들의 연구현황 및 전망은 다음과 같다.

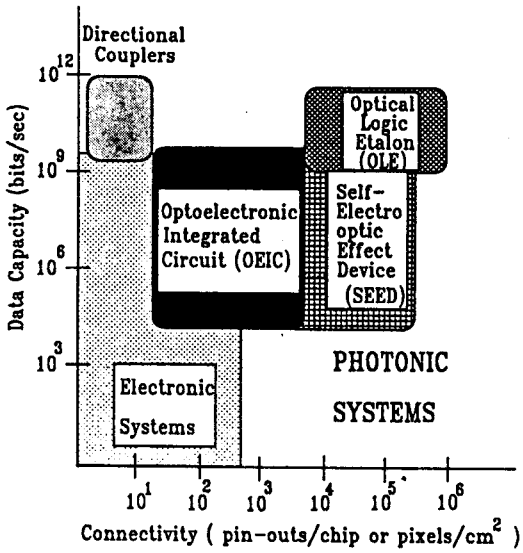

그림3. 광자소자들의 정보처리 응용.
[참고문헌 6번에서 발췌]

(a) 양자우물 소자 (Quantum-well device)

반도체 기술에 있어서 MBE나 MOCVD등의 epilayer 성장기술과 같은 초미세구조의 제작 기술의 발전은 전자나 정공(hole)의 물질파장(de Broglie wavelength, $\lambda \simeq h/p \simeq 100$ angstrom)에 해당하는 화합물 반도체의 초미세구조를 가능하게 하였고, 이러한 초미세구조에서 일어나는 양자크기효과(quantum size effect)를 이용한 양자소자(quantum device)의 출현을 가능케 하였다. 이러한 quantum device의 대표적인 광학소자들로는 양자우물 레이저다이오드 (quantum well laser diode)와 SEED(self electro-optic effect device)가 있으며, QW구조를 광 검출기, 광에 의해 작동되는 광 스위치(optically-contolled optical switch)등에 사용하려는 연구도 많이 진행되고 있다.

레이저 다이오드 경우에는 QW 구조를 이용하여 단색광(spectral purity), 안정도 (stability), tunability, 고속변조 (high speed modulation), 낮은 임계전류(low threshold current)를 지향하는 방향으로 연구되고 있다.

일차원에서 전자를 구속하는 양자우물구조를 이용한 레이저는 작은 활성영역으로 기존의 반도체 레이저보다 낮은 임계전류를 가지며, 또 단색광과 안정도에 있어 많은 이점을 가지고 있다[7]. 앞으로 2차원, 3차원에서의 전자구속을 이용한 양자선(quantum wire)나 양자상자 (quantum dot)와 같은 구조로 활성영역의 부피를 줄여 줄이고 더 큰 양자효과로 임계전류의 온도의존도 감소, 레이저선폭 감소등의 효과를 얻을려는 연구 결과가 기대된다. 양자우물구조의 레이

저 다이오드에서 변조 주파수(modulation frequency)가 높아지면 보통의 Fabry-Perot 공진기 구조의 레이저는 여러 파장의 빛이 동시에 나오므로 광섬유의 분산특성에 의한 선폭의 증가로 고속 장거리 통신등에는 사용이 곤란하기 때문에, 주기적인 격자구조를 이용하여 공진기를 구성한 DFB (distributed feed back) 나 DBR(distributed bragg reflector) 레이저에 대한 연구도 많이 진행되고 있다.

최근에 AT&T Bell 연구소의 J. L. Jewell et al. [8]에 의해 한 GaAs 기판(substrate) 위에 80 angstrom의 단일 양자우물 활성층(single quantum-well active layer)을 가진 1.5 μm 직경의 수직 공진기형 표면 발광 레이저 (vertical-cavity surface-emitting laser)의 수 백만 개가 만들어져 2차원적인 레이저 어레이(laser array)가 가능하게 되었다. 이러한 구조로 7 x 8 mm^2의 기판 면적위에 만들어진 2백만 개 이상의 미세 레이저 (micro laser)에 대해서도 공진기내 활성부피(active volume) 를 0.05 μm^3 이하로 줄일 수 있기 때문에 단지 1.5 mA 이하의 임계전류로 작동이 가능하였다. 이러한 2차원 레이저 어레이는 앞으로 병렬 광통신(parallel lightwave communication)과 광연산(optical computing) 등에 유용한 응용이 기대된다. 광연산과 같은 광정보 처리에 사용될 때 발광소자의 파워(power) 손실에 따른 열적인 문제(thermal problem) 등이 가장 큰 문제이기 때문에 발광소자의 임계전류를 최소화 하는 것이 중요하다. 이러한 점을 고려해 볼 때 공진기(cavity)내의 광흡수를 줄이고 표면 재결합을 줄임으로서 활성 부피를 0.01 μm^3 이하로 줄임으로서 10 μA 보다 낮은 임계 전류로 작동이 가능한 방향으로의 수직공진기형 표면발광레이저의 발전이 이루어지고 있다.

QW 구조를 이용한 SEED는 반도체 다중양자우물구조 (multiple quantum well structure)에 수직으로 걸어주는 전기장의 세기에 따른 흡수 정점(absorption peak)의 적색천이 (redshift)와 흡수률의 변화, 즉 quantum-confined Stark effect(QCSE)를 이용하여 그 다중양자우물 구조를 통과하는 빛의 세기 변화를 조절하는 변조기의 일종이다[9]. 입사 빛의 세기의 따라 유도된 광전류가 바이어스(bias)된 전압의 변화를 유도해 투과하는 빛의 세기를 QCSE 효과로 자동 조절하는 현상을 자기 광전효과 (self electro-optic effect)라 하고, 이효과를 이용한 SEED 소자는 결국 RC 시간지수에 의해 반응속도가 제한된다. 하지만 미세구조 공정기술의 발전으로 1.3 mm의 면적에 64 x 32 배열의 S-SEED (symmetric SEED)가 가능하고 이는 16,384 개의 광선을 동시에 조정할 수가 있다. SEED는 광쌍안정소자 (또는 광메모리소자), 광공진기, 광 level shifter, 또는 광 논리소자 등으로 광 신호처리의 기본 소자로 이용되어, 1990년대 중반기에는 광교환 장치의 시제품(prototype)의 출현을 가능하게 할 전망이다.

(b) 광논리소자 (Optical logic device)

광프로세서에 사용될 광자소자들은 크게 두 개의 범주로 분류할 수 있는데 첫째는 단순히 입력과 출력을 연결해 주는 상관소자(relational device)와 Boolean 논리기능과 같은 논리기능을 행할 수 있는 논리소자(logic device)로 나누어질 수 있다[10]. 대표적인 상관소자는 공간 광 변조기 (spatial light modulator)와 방향성 광커플러(directional optical coupler)등이 있으며, 논리소자는 앞에서 언급한 SEED나 비선형 Fabry-Perot etalon등이 있다. 그 외에도 논리소자들을 연결해 주는 광 배선방법으로 홀로그래피와 bulk optics를 이용한 자유공간 배선 방법들이 있다.

광처리소자 또는 광 배선소자로서 사용될 수 있는 방향성 커플러는 Ti:$LiNbO_3$와 같은 ferroelectric 재료에 웨이브 가이드(waveguide) 형태로 만들어져 광전(electro-optic) 효과를 이용하여 두개의 입구와 출구에 신호를 bar 상태나 cross 상태로 바꾸어주는 기능을 한다. 이러한 소자의 작동에는 전지적인 입력신호가 필요한데 Ti:$LiNbO_3$의 경우에는 전극구조에 의해 전기용량이 수 picofarad이고 스위칭 전압이 약 10 V가 되기 때문에 스위칭 속도가 nanosecond 이상이 되고 또 전기적인 에너지에 의한 열적인 문제 (thermal puoblem)가 있어서 다른 feroelectric 재료나 유기물질등에 대한 연구도 진행되고 있다.

광전소자들이 대체적으로 RC 시간지수에 의해 동작시간이 한정되어 있는 반면에, 물질의 비선형광학 효과 (nonlinear optical effect)를 이용한 완전광소자(all-optical device)들로서 빛이 가질 수 있는 최대 속도에서 동작하려는 노력이 또한 진행되고 있다. 이러한 완전광소자들의 연구로 band filling effect에 의한 비선형 광학효과를 이용한 반도체 다중양자우물 구조나 반도체가 첨가된 유리로 된 완전 광 스위칭 소자와 3차 비선형 광학효과를 이용한 광섬유나 유기물질등으로 된 완전 광 스위칭 소자들의 연구가 많은 진행되어 오고 있다. 이러한 완전 광 스위칭 소자들은 빛 그 자체의 전장의 세기에 의해 매질 내에서 일어나는 비선형 광학효과를 이용하기 때문에 다른 소자들보다 훨씬 더 빠른 picosecond 내지는 subpicosecond 정도의 스위칭 속도를 얻을 수 있다. [11-14]. 다중양자우물 물질과 반도체 첨가된 유리물질들은 Fabry-Perot etalon 형태로 만들어져 앞으로 광평행처리 (optical parallel processing)를 위한 논리소자로 사용될 수가 있으며, 광섬유의 경우에는 Mach-Zehnder 간섭계형이나 directional coupler형, 광 Kerr shutter형, loop mirror 형태로 만들어져 초고속 광직렬처리 (optical serial processing) 나 다음절에서 설명할 상관소자로서 응용될 수 있다.

반도체 양자우물구조와 반도체 첨가된 유리물질들은 비록 비선형광학계수는 큰 이점이 있으나 광흡수가 커서 고반복률 스위칭에의 응용에 있어서는 열적인 효과(thermal

effect)가 문제가 된다. 광섬유의 경우에는 비록 비선형광학 계수가 작으나 흡수가 적기 때문에 긴 길이로 사용할 수가 있어 100 fs의 빠른 스위칭이 가능하여 현재로선 가장 좋은 완전광 스위칭 재료 로 알려지고 있다[13]. 근래에 많이 연구되고 있는 유기물질의 경우에는 큰 비선형광학계수와 비교적 좋은 광 투과율을 가진 유기물질들이 등장하기 때문에 앞으로 이 물질도 하나의 유망한 완전광 스위칭 재료로 생각되어지고 있다.

광정보처리에 있어서 중요한 소자로서 공간 광 변조기가(spatial light modulator, SLM) 있다. 이는 빛을 on과 off의 두 상태로 공간과 시간적으로 바꿀 수 있는 소자들의 2차원적 집합으로서 광 병렬처리에 사용되고 있다. SLM은 투과형과 반사형의 2종류가 있고, 또 빛을 운용하는 데는 광학적이거나 전기적인 방법이 상용되고 있다. 광학적 방법으로 응용되는 대표적인 것들은 액정을 이용한 광 밸브(liquid crystal light valve, LCLV) 광굴절 신호증배소자(photorefractive signal-multiplying devices), 미세 채널 플레이브 소자(micro channel plate devices)등의 여러종류가 있으나 대체적으로 LCLV가 많이 사용되고 있다.

그 외에도 piezoelectric tranducer로 전기적인 신호를 음향파로 바꾸어 투명한 비선형 물질내에서 음향광학(accousto optic) 효과를 이용한 SLM으로 accoustooptic Bragg cell deflector가 사용되고 있으며, 이는 약 1,000개의 광선을 변조할 수 있는 사용되는 전기신호의 대역폭은 약 1GHz이다.

이러한 SLM의 기능을 대표하는 특성으로는 시공간 대역폭(time-space bandwidth)가 사용되며 이는 곧 초당 몇 개의 pixel 작동을 하는 가를 나타낸다. 근래에 시간공간 대역폭이 10^{10} operations/s가 되는 SLM이 실험적으로 작동되어졌었다[15].

(c) 광기억소자

광기억 소자는 크게 광 디스크를 사용하는 방법과 홀로그래피를 사용하는 방법이 주가 되며 그외에도 위상공액(phase conjugate)을 이용하는 방법등이 있다. 현재로선 무결정체(armorphous)나 결정체에서 위상변화를 이용하거나 플라스틱의 변형 또는 자기광 결합(magnetooptic combination)등을 이용한 광디스크들이 광기억 소자로 가장 잘 개발되어 있다[6]. 대표적인 것으로는 CD (compact disk), MOD (magneto-optical disk) 등의 광기억 소자가 있다. 광 디스크를 이용한 광기억소자에 있어서는 정보저장과 판독만 광학적으로 이루어지고 그 때 필요한 레이저 다이오드와 광검출기에 의해 바뀌어진 전기적인 신호에 의존하고 있다. 반면에 홀로그램를 이용한 기억장치는 순전히 빛으로만 이루어질 수 있다. 그러나 보통의 홀로그램은 한 번 기록된 정보를 수정할 수가 없기 때문에 기록및 재생이 가능한 ferroelectric 재료를 이용한 체적 홀로그램이 유망하다. 예로서 비선형광학 물질인 $BaTiO_3$, BSO, $LiNbO_3$등에서 일어나는 위상공액(phase conjugate) 효과와 체적 홀로그래피(volume holography) 성질은 광 영상처리 뿐만 아니라 광기억, 광 배선, 광 신경회로망 등에 응용될 소자로서 연구되고 있다. 그 외에 광쌍안정소자와 같은 소자는 일시적인 광 기억소자로도 응용이 가능하다.

IV. 광 소재

광 소재로는 앞에서 다룬 광소자 부분에서 이미 소자의 재료로서 사용되어 왔다. 대표적인 소재로서는 양자우물 물질을 포함한 반도체, 유리물질, 유기물, ferroelectric material 등의 여러종류가 있다. 광학재료서 일반적으로 요구되는 주요 특성은 큰 전광효과와 광굴절 효과를 가지는 것이다. 이러한 효과들은 외부에서 걸어 준 전기장에 의해서나 아니면 광자체의 전기장에 의해 야기된 물질의 굴절률이나 흡수계수가 변화에 기인한다. 이 외에도 각 응용분야마다 요구되는 물질의 특성은 다르나 일반적으로 수반되어야 할 물성은 다음과 같다. 첫째로 큰 비선형광학 효과을 얻기 위해 큰 second order susceptibility나 third order susceptibility를 가져야 한다. 둘째로 레이저 광선과 온도의 변화, 부식성 등에 대해 안정해야 한다. 셋째로 입사광과 발생광의 파장에서 투명해야 한다. 넷째로 광학용의 좋은 단결정을 손쉽게 제작할 수 있어야 한다. 다섯째로 박막이나 도파로, bulk등으로 제작할 수 있어야 하며 인성(toughness)이 좋아야 한다.

반도체의 경우는 LED나 레이저 다이오드와 같은 발광소자로 쓰이기 위해 III-V, II-VI, IV-VI 등의 direct band-gap을 갖는 화합물 반도체가 주로 사용된다. III-V족 물질로 GaAs나 InP 등이 많이 사용되고 있고, 근래의 양자우물 구조의 출현으로 레이저 다이오드 뿐만 아니라 SEED나 비선형 완전광소자 등으로 응용되고 있다. 그외에도 CdTe나 CdS, 또 II-IV 반도체 재료로 ZnSe, ZnS, CdSe, ZnTe 등과 같은 재료에 대한 연구도 이루어 지고 있다.

Ferroelectric 물질은 다른 물질에 비해서 비교적 큰 전광효과가 있는 것이 특징인데 $LiNbO_3$가 결정 결함이 없이 쉽게 길러질 수 있어서 가장 많이 연구되어 오고 있다. $LiNbO_3$는 앞에서 언급 되었듯이 광도파로를 이용한 집적회로 소자로 많이 연구되어 지고 있다. 그외에 $BaTiO_3$는 큰 광전계수로 위상공액 공진기 등에, $KNbO_3$는 빠른 광전효과로 실시간 광처리 소자에의 응용에 대해 연구되어 지고 있으나 좋은 단결정 성장이 어려운 점이 있다. 그리고 홀로그램에 사용하기 되기도 하는 $Ba_xSr_{1-x}Nb_2O_6$등의 여러 다른 물질들이 연구되어 지고 있다.

$Bi_{12}SiO_{20}$(BSO)와 $Bi_{12}TiO_{20}$(BTO)는 sillenite 물질이라 불리워 지며 또한 paraelectro-optic 효과와 광전도도(photo-

conductivity)를 갖는 물질로 알려지고 있다. BSO는 n-type의 큰 광전도도와 매우작은 p-type의 암전도도(dark conductivity)를 보유하고 있으므로 충분한 저장시간을 가지고 있다. 이 sillenite들은 $LiNbO_3$나 다른 광굴절 물질에 비해 짧은 상기록 시간을 갖기 때문에 실시간 기록소자나 공간 광변조기, 위상공액소자 등에의 응용을 위해 연구되어지고 있다.

유기물을 광학재료로 쓸려고 하는 가장 큰 이유는 서로 특성이 다른 유기물들을 손쉽게 혼합하여 반응속도가 빠르고 2차 및 3차 비선형광효과가 큰 새로운 물질을 만들 수 있다는 장점에 있다. Polydiacetylene과 같은 유기물의 경우에는 비선형도가 π 전자에 의해 야기되었고, 석영 유리보다 약 10^4 정도 더 큰 비선형도를 갖고 있다는 것이 알려져 오고 있다[16]. 최근에 고체 polymer film과 grating coupler 를 이용해 약 400 fs의 스위칭도 얻어져 오고 있다[14].

광섬유의 경우에는 이론적인 한계치에 가까운 저손실 광섬유가 얻어져 광통신에 유용하게 사용되고 있으며 최근에는 이를 이용한 광 스위칭에 대한 연구가 진행되고 있다. 광섬유는 대체적으로 비선형도가 작은 편 인데 비선형도를 올려서 효과적인 광 스위칭을 하기 위해 GeO_2가 첨가된 광섬유를 쓰는 방법도 연구되고 있다[17].

그외 완전광소자로 사용되기 위해 Fabry-Perot etalon 형태로 만들어지는 유리물질의 경우에는 광섬유와 비슷하게 유리물질에 CdSSe나 CdSeTe 등의 반도체 물질을 첨가시켜 비선형광학 계수를 올릴려는 노력도 행해지고 있다[16].

V. 집적광학소자

앞서 설명한 여러가지 광학소자를 한 개의 기판위에 집적하여 전자를 정보전달의 매개체로 하는 기존의 반도체 집적 전자소자와 같은 개념으로 광 정보처리 및 광계산등에의 응용을 위해 제안되고 구현되고 잇다. 궁극적인 목표는 모든 소자를 완전 광 소자화하여 집적하는 것이 목표이나 발신소자(transmitter)와 수신소자(receiver)등을 비롯하여 아직 기술적인 우위에 있는 광전소자를 집적한 정보처리용 OEIC(opto-electric integrated circuit)등의 현재 많이 연구되고 있다.

앞에서 언급한 $LINbO_3$ 기판위의 방향성 커플러등이 집적되어 크로스바 스위칭(crossbar swotjching)등의 광 정보처리용 집적회로에 대한 연구를 비롯하여, 광원, 광 검출기, 방향성 커플러와 같은 능동형 광도파로 소자등의 제작이 모두 가능한 GaAs나 InP등의 III-V족 반도체를 이용한 집적회로의 연구가 또한 많이 진행되고 있다.

VI. 광 컴퓨터

광 컴퓨터에 있어서는 신호의 입력에서 전달 및 처리, 저장, 출력에 이르기까지 모든 과정이 빛을 이용해 이루어지며, 사용되는 컴퓨터 구성요소는 그림4에 개괄적으로 보여진다. 레이저 다이오드나 레이저 다이오드 어레이등의 입력용의 광원으로, CCD나 포토 다이오드(photodiode) 등은 출력부분의 수광용 소자로 다른 부분에 비해 비교적 개발이 많이되어 있다. 입력과 출력 부분을 제외한 광 컴퓨터의 주된 부분들은 광기억, 광 프레세서 및 광 배선들이며, 아직 이들은 많은 연구가 필요한 부분들이다.

광기억장치로는 광 디스크와 홀로그램들이 반 영구적인 기억소자로, 또 ferroelectric 물질을 이용한 체적 홀로그램이 일시적인 기억소자로 유망하다. 디지탈 광 처리에는 공간광변조기와 광 쌍안정소자가 이용되고 있고, 앞으로 비선형광 효과를 이용한 완전광 스위칭소자의 응용도 기대된다. 모듈간(module-to-module) 또는 보드간(board-to board) 광배선에는 웨이브가이드나 광 섬유를 이용한 방향성 광 커플러가 사용되고 있으며 또 칩간 (chip-to-chip) 광배선에는 홀로그램을 이용한 자유공간 광배선과 벌크 광학재료(bulk

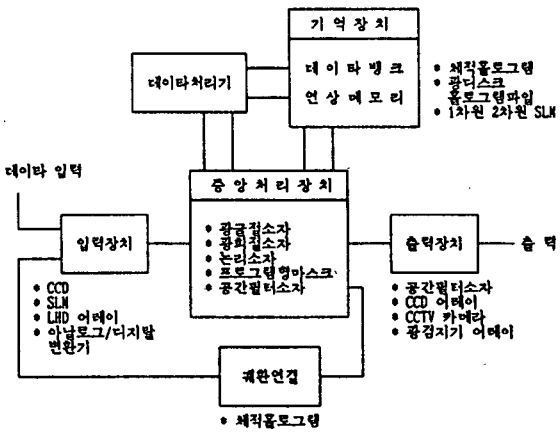

그림4. 광컴퓨터의 구성요소.

[Source: 한국 경제신문, May 27, 1990]

optics)를 이용한 광배선등이 연구되어지고 있다.

기존의 디지탈 계산 및 아날로그 계산을 광으로 구현하려는 노력과 더불어 패턴인식이나 음성인식과 같은 직관적인 판단을 하는 뇌의 인지기능을 구현하는 방법으로 광신경회로망에 대한 연구도 이루어 지고 있다. 앞으로 광컴퓨터가 실현되기 위해서는 SLM과 그의 제작에 필요한 소재의 연구, 광배선 기술 등의 개선이 필요하다.

VII. 광교환

기존의 재래식 교환 방법으로는 광섬유로 전달된 광신호를 전기신호로 바꾸어 교환한 후 다시 광 신호로 바꾸어 전송하므로 전자공학적 방법에 의한 속도제한을 받게 된다. 그림5에서 영상신호와 HDTV등의 신호처리를 위해서는 각 채널당 수백 1 Mbits/s에서 1 Gbits/s가 필요함을 볼 수 있

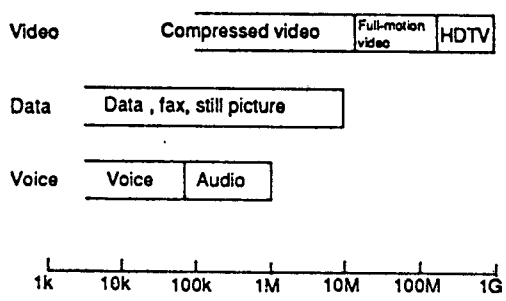

그림5. 서비스에 따라 요구되는 신호처리속도 (bits/s).
[참고문헌 18번에서 발췌]

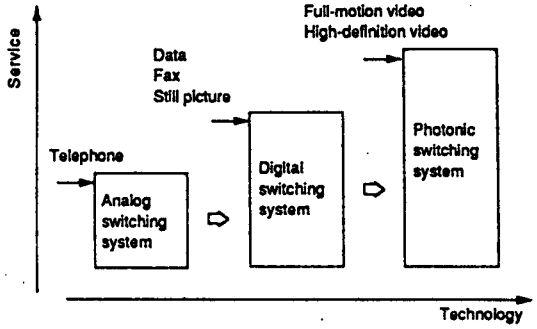

그림6. 광교환으로의 발전.
[참고문헌 18번에서 발췌]

다[18]. 기존의 전자식 교환기는 최대 수십 Gbits/s 밖에 운용할 수 없으므로 이러한 영상신호나 HDTV 신호는 겨우 수 채널에서 수십 채널 밖에 서비스를 제공할 수 없다. 이러한 영상신호를 수천 채널이상을 서비스하기 위해서는 교환기 시스템이 최대로 Tbits/s 이상의 신호처리속도를 가져야 한다. 이러한 속도는 오직 광학적 방법만이 유일하기 때문에 현재 교환기 시스템들은 그림6에서 보는 봐와 같은 종래의 전자식 아날로그 교환방식에서 광학적 디지탈교환방법으로 발전해 나가고 있다. 이러한 광교환방식은 앞으로 광대역 ISDN(Broadband Integrated Service of Digical Network)에 적절한 방식이다.

시간분할 및 공간분할 방식이 결합된 광교환방식이 이러한 대용량의 정보처리에 적절한 것으로 여겨지고 있고 [18], 근래에 $LiNbO_3$ 웨이브 가이드를 이용한 광도파로가 연구되고 있다. 그림7은 광교환을 위해서 $LiNbO_3$ 광도파로를 이용하는 한 예를 보여준다. 그 외에도 다른 ferroelectric 재료를 이용한 광도파로 연구및 GaAs나 InP등의 소재를 이용한 OEIC등이 광교환을 위해 연구되고 있으나 앞으로 궁극적으로는 초고속 광교환을 위해서는 비선형 광학효과를 이용한 완전 광스위칭 소자의 연구가 필요하다.

VIII. 완전 광 통신

완전 광 통신(all-optical communication)이란 글자 그대로 모든 통신망에서 광-전, 전-광 변환을 거치지 않고 또 전기적인 제어에 의하지 않고 빛으로서 제어하면서 빛으로서 모든 정보를 통신하는 것을 말한다. 이러한 완전 광통신을 위해서는 우선적으로 앞절에서 말한 광 교환 시스템이 해결되어야 하나 아직 이 분야는 기초연구단계에 지나지 않는다. 그러나 최근에 부분적으로 기존의 전자적인 증폭기 소자를 대체할 수 있는 광증폭기가 개발되었고, 이는 광신호전송에 크게 다른 발전을 가져오고 있다. 장거리 광신호 전송에서 기존의 증폭 방법은 빛을 전기신호로 바꾸어서 증폭을 하고 난 다음 다시 빛 신호로 바꾸어 전송하는 방법인데 여기에서 전자증폭기에 의한 많은 속도 제한을 받고 있다. 그러나 최근에 erbium이 첨가된 광섬유를 이용한 증폭 방식으로 전송용 광섬유와의 결합손실이 작고, 편광에 무관한 이득을 얻을 수 있고 또 고속전송이 가능한 점이라 볼 수 있다. Erbium 광섬유 증폭기는 1.48 μm에서나 0.98 μm에서 펌프하여 축적된 에너지를 1.55 μm의 신호가 지나가면서 유도방사(stimulated emission)에 의해 증폭하는 방법이다. 그 외에도 반도체 레이저를 이용한 광증폭기와 Raman 이득을 이용한 광증폭기가 있다. 그러나 반도체 레이저는 이득의 편광의존성, 증폭기 단면의 잔류 반사율로 인한 이득의 불균등, 강도 변조시 누화(crosstalk)등의 단점이 있고, Raman 증폭기는 높은 강도의 펌프레이저빔이 필요한 단점이 있다.

그 외에 광통신을 위해 오늘날 많이 연구되고 있는 것으로 광 솔리톤(soliton) 전송기술이 있다. 광섬유의 최저 분산파장 이상의 장파장대역에서 강도가 높은 초단펄스가 광섬유내로 전송될 때 광섬유의 분산(dispersion) 효과가 비선형 광효과에 의해 상쇄되므로써 펄스폭이 그대로 유지된 펄스를 soliton이라 하고, 그 soliton의 펄스폭이 변하지 않고 장거리 전송이 가능한 것을 기본원리로 하고 있다. soliton과 Raman 증폭을 이용한 방법으로 6,000km 상당의 장거리 통신이 실험적으로 보여져 왔고[19], erbium 광섬유증폭기로는 4Gbits/s의 속도로 136km의 거리에 전송을 가능함이 보여져 왔다[20]. Soliton과 erbium 광섬유 증폭기는 조만간에 고속 장거리 광 신호전송을 위하여 실용화 될 전망이다.

IX. 결론

이처럼 전자공학적인 방법을 벗어나 광자공학적인 방법을 이용함으로서 광정보처리 기술의 혁신화 즉 고속성 및 대용량화 할려는 노력이 전개되고 있는 가운데, 아직 많은 소자와 재료에 대한 연구가 선행되어야 함을 볼 수 가 있다. 그리고 이제껏 전자공학적인 방법으로는 생각지 못했던 새로운 차원에서 광자공학을 이용하기 위해서는 새로운 알고리즘이나 소자들의 아키텍쳐가 필요하다. 이러한 광자공학

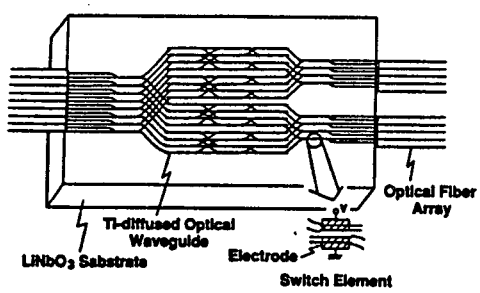

그림7. Ti:$LiNbO_3$ 웨이브 가이드를 이용한 광처리 방식에 한예.
[Source: S. Suzuki et al., Proc. ISS, May27-Jun. 1, 1990 (Stockholm, Sweden) Paper C2]

의 발전은 20세기 정보통신에 있어서 전자공학이 중요한 역할을 했듯이 곧 다가오는 21세기의 정보통신에 있어서는 광자공학이 주된 역할을 하리라 믿는다.

참고문헌

1. A. L. Schawlow, and C. H. Townes, Phys. Rev., **112**, 1940 (1958).
2. T. H. Maiman, Nature(Lond), **187**, 493 (1960).
3. TIME Magazine, (Feb. 12, 1990) page 42.
4. P. Saunier, in *Microwave and Millimeter-wave Heterostructure Transistors and Their Applications*, edited by Fazal Ali et al, (Artech House, Inc, Norwood, CA, 1989) pp. 125-128.
5. N. H. Sheng et al, 1987 IEEE Int. Electron Devices Meeting Dig. Tech. Papers, pp. 619-622.
6. P. B. Berra et al, Proc. IEEE, **77**, 1797 (1989).
7. A. Yariv, IEEE Circuits & Devices Magazine, 25~28 (Nov,1989).
8. J. L. Jewell et al., Opt. Eng., **29**, 210 (1990).
9. D. A. B. Miller, Optics & Photonics News, **1**, 7 (1990).
10. H. S. Hinton, AT&T Tech. J., **66**, issue 3, 41 (1987).
11. J. L. Jewell et al., Appl. Phys. Lett., **51**, 94 (1987).
12. J. Yumoto et al., Opt. Lett., **12**, 832 (1987).
13. S. R. Friberg et al., Opt. Lett., **13**, 904 (1988).
14. R. Burzynski et al., Appl. Phys. Lett., **53**, 2011 (1988).
15. J. N. Lee, and A. D. Fisher, in *Proc. of OSA Top. Meeting on Spatial Light Modulators and Applications*, Vol. 8, (S. Lake Tahoe, NV), pp.60-63, June 1988.
16. K. Kubodera, Tech. Dig. 1990 Int. Top. Meeting on Photonic Switching, (Kobe, Japan, Apr. 12-14, 1990), Paper 14C-1.
17. I. H. White et al., Electron. Lett., **24**, 340 (1988).
18. K. Murakami, in *Tech. Dig. of 1990 Intern. Top. Meeting on Photonic Switching*, April 12-14, 1990 (Kobe, Japan) paper 14A-1.
19. K. Smith, and L. F. Mollenauer, Opt. Lett., **14**, 751 (1989).
20. N. A. Olsson et al., Tech. Dig. Opt. Fiber Commun. Conf., (San Francisco, CA, 22-26 Jan. 1990) postdeadline paper PD4-1.