

광정보처리 기술을 위한 광자물리학

김경현 · 박종훈 · 이학규 · 황월연 · 이일항

한국전자통신연구소 기초연구부

이 용 탁

한국전자통신연구소 광진기술연구부

(1990년 8월 24일 받음)

근래에 와서 통신 및 정보처리 기술에 있어서 기존의 전자공학적인 방법이 가지는 한계점을 광자공학적인 방법으로 보완하거나 극복하여 고속 및 대용량화를 가능케 하려는 움직임이 있다. 이러한 광통신 및 광정보처리 기술에 필요한 광재료 및 광자소자들에 적용되는 광자물리학을 살펴보고 또 앞으로의 연구 추세를 살펴보기로 한다.

I. 서 론

인류가 빛을 이용한 역사는 오래 전부터이나 1960년 초에 있는 레이저(laser)의 발견으로 새로운 차원에서 빛을 이해하게 되었고, 또 종래에 볼 수 없었던 많은 물리광학적 현상의 관측으로 빛의 새로운 응용이 시작되었다. 한편, 1947년도에 있는 바이폴라 트랜지스터(bipolar transistor)의 발견은 우리 인류 역사에 있어서 획기적인 과학문명을 가져다 주는 계기가 되었으며, LSI, VLSI, ULSI 등의 고집적 반도체 전자산업에 이르기까지 전자의 흐름을 이용한 전자공학(electronics) 기술의 발전을 가져다 주었다. 이러한 전자공학 기술은 점점 고속화하고 고집적화 및 대용량화하는 방향으로 발전해왔고 그러한 가운데 전자소자들이 갖는 많은 한계점들에 직면하게 되었다. 앞으로 다가오는 시대에는 컴퓨터와 통신 시스템을 이용한 대량의 정보교환 시스템이 점점 중요시 되어지므로 전자소자들의 속도와 정보처리 능력의 한계점을 보완하기 위해 광자를 이용한 광자공학(photonics) 기술의 개발이 시작되고 있다.

광자공학이란, 전자공학이 미시적인 차원에서의 전자의 작용을 다루는 학문인 것처럼, 광자(photon)를 미시적으로 다루는 학문이라고 볼 수 있다. 20세기 전자시대의 상징인 실리콘, 동선 등은 21세기 광자시대를 내다보며 화합물 반도체, 광섬유 등으로 대체되고 있으며 전자식 통신, 전자식 교환기, 전자식 컴퓨터 등에 상응하는

광통신, 광교환, 광컴퓨터 등에 대한 연구가 활발해지고 있다. 전자소자들은 소자가 가지는 자체 저항과 정전용량(capacitance)으로 주어진 시간상수(RC-time constant)와 그 물질(특히 반도체)내에서 유효질량(effective mass)에 의한 이동속도의 감소로 소자의 반응속도가 피코초(picosecond) 이상이고, 또 전자기적인 간섭(electro-magnetic interference)과 병렬처리(parallel processing)의 곤란한 점 등의 단점을 가지고 있다. 반면에 광자소자는 전자소자보다 훨씬 더 빠른 반응속도를 이용하고 있고 또 전자기적인 간섭의 배제 및 정보의 병렬처리가 용이하다는 장점을 가지고 있다. 이러한 시점에서 우리에게 절실하게 요구되는 것은 진화적(evolutionary) 사고보다는 혁명적(revolutionary) 사고라는 점이다. 1940년대의 트랜지스터(transistor)들은 진공관(vacuum tube)을 개량함으로써 얻어진 산물이 아니라 혁신적 사고에 의해 생산된 소자들이었다. 이와 마찬가지로 현대와 미래가 필요로 하는 광자소자들은 트랜지스터를 개량해 나감으로써 가능해지는 것이 아니다. 혁명적 사고에 의해 새시대에 필요한 광자소자를 새롭게 개발해야 하는 것이다. 이러한 측면에서 광자를 이용할 수 있는 새로운 재료 및 물리적 성질, 소자 구조 그리고 새로운 시스템 및 응용이 창조되어야 한다는 것이다.

광자공학은 크게 레이저 물리학(laser physics), 전기광학(electro-optics)과 비선형광학(nonlinear optics)들의 발달과 함께 이루어진 분야이고, 대표적인 응용분

야로서는 광통신(lightwave communications)과 광정보처리(optical processing) 등이 있다. 이러한 응용에 있어서 기본적으로 발광소자, 수광소자, 광스위칭소자, 광기억소자, 광연결(optical interconnection) 등이 필요하다.

현재 광자공학이 추구하는 방향을 기존 광자공학과 비교하여 보면 다음과 같다. 예로써 종래 광자공학에서는 카메라와 현미경과 같은 평면적이며 아날로그 화상에 관심이 있었지만 현재에는 입체적인 화상 혹은 디지털화된 화상으로 관심이 바뀌어지고 있다. 또 종래에는 광학정보의 시간적 변화에는 거의 관심이 없었지만 현재에는 디지털 정보의 전송을 주목적으로 하는 광통신으로 흐름이 바뀌고 있다. 더욱이 현재 극초단 광펄스 연구는 광펄스가 가시광 내지 근적외선의 진동수($\sim 10^{15}$ Hz)와 불확정성 원리($\Delta\nu\Delta t \geq 1$)에 의해 결정된 펨토초 정도(femtosecond order)의 극한치에 이르는 수준에 달하였고, 이를 이용한 광통신 및 광신호처리에 대한 연구가 활발하다. 또한, 종래의 광자공학에는 균일한 광학재료를 만드는 것이 성공의 조건이었으나 현재에는 MBE, MOCVD와 같은 미세구조를 갖는 여러 제조기술이 발달하게 되어 굴절률을 필요한 형태의 분포로 하거나 혹은 파장보다도 더 짧은 크기를 갖는 양자우물(quantum well) 구조를 만들어서, 광학에 응용하는 것이 가능하게 되었다.

종래의 광자공학에 이용된 광원으로서 백열등과 방전관과 같은 비가간섭광(incoherent light)이었기 때문에 광파의 간섭회절의 응용은 매우 곤란하였지만 레이저의 발명 이후 가간섭광(coherent light)이 쉽게 얻어질 수 있게 되었다. 일반적으로 레이저광은 시간적 고속성 및 공간적 병렬성 외에 가간섭성, 단색성, 지향성, 집광성, 대출력성 및 초단펄스 발생 등의 특징을 가지고 있다. 이렇게 다양한 기능을 살리기 위해서는 출력 파워(power)와 코히런스(coherency)라는 광 자체의 특성 향상과 아울러 이들을 제어하는 주변기술의 고도화가 필요하다. 광파에 관한 주된 제어기술은

공간 제어 : 광의 도파, 광로의 스위칭, 파면의 변화 등
주파수 제어 : 광파의 진동수와 위상 변화, 주파수 안정화 등

시간적 제어 : 광 정보의 기억, 시간의 변조 등

에너지 제어 : 파워 크기(power level)의 변화, 역치(threshold)처리, 양자상태(확률분포)의 변화

등으로 분류할 수 있다. (1) 지금까지의 연구개발 상황을 볼 때 실용적인 광응용 시스템에서는 전자회로에 비하여

그다지 고도의 제어기술이 사용되고 있지 못한 것이 현실이다. 앞으로 광응용 기술의 발전에 의해, 앞에서 언급한 광파 제어성의 고기능화, 고성능화가 중요하리라 생각된다.

현재 진행되고 있는 연구는 전자공학과 유사한 기능을 광으로 실현하려는 방향과 전자공학으로는 불가능한 새로운 기능을 광으로 실현하려는 두 방향의 연구 흐름이 있다. 시간영역과 주파수영역의 제어연구는 기본적으로는 전자회로와 무선통신과 유사한 기능을 추구하는 것이 많다. 예를들면, 현재 광통신에 이미 널리 적용되고 있는 PCM(pulse coded modulator) 방식 및 광의 파동 특성을 이용한 주파수/위상 변조, 고속 스위칭, 광헤테로다인 검파 연구 등이 그것이다. 한편 광의 공간적 제어와 광파의 비간섭성을 이용한 광파장 분할다중, 에너지 제어 등은 전자공학으로는 실현하기 어려운 기능들로 광의 고유한 특성을 이용하려는 것 등이다. 예로써, 광의 공간적 병렬성을 살린 새로운 광논리, 광연산 처리회로 및 광배선 등에 의해 증가 일로에 있는 정보 처리량에 대처하자는 것이다. 이들의 연구에는 광소자, 광집적회로의 실현 및 고성능화 뿐 아니라 시스템의 기본개념과 설계에 대한 근본적 변혁이 필요할 것이다.

이러한 관점에서 우리는 21세기의 광자공학 시대를 대비하여 광자공학 시대를 주도해 나갈 광자소자, 광자집적소자 및 광자 신소재에 대해 물리학적 입장에서 포괄적으로 이들을 다루고 이들의 구체적인 응용 가능성이 있는 분야로서 초고속 대용량 광통신, 광교환 및 광컴퓨터 등에 대해 다루고자 한다.

II. 광자 재료

정보를 저장하거나 처리하기 위해서는 정보매체를 효과적으로 제어할 수 있어야 한다. 광자는 다른 광자와 직접적으로 상호작용을 하지 않기 때문에 두 빛의 상호작용은 비선형 광학 재료를 매개로 해서만이 가능하다. 따라서 현재 대부분의 광소자는 전기적으로 광을 제어하고 있으나 광자를 비선형 광학 매질을 통해 광학적으로 제어하려고 하는 완전 광정보처리(all optical information processing)에 관한 연구가 중요한 과제의 하나로 대두되고 있다.

공명 비선형 효과는 전자가 광을 흡수하여 기저상태에서 여기상태로 천이함으로써 공간 전하장을 형성시켜 전기광학 효과에 의해 굴절률을 변화시키거나(광굴절 효과), 또는 온도나 밀도의 변화를 유도하여 굴절률이나 흡수율을 변화시킴으로써 기인된다. 한편, 투명한 매질

에서 일어나는 비공명 비선형 효과의 원인은 분자 쌍극자의 방향에 따른 Kerr 효과, 분자 재배치에 의한 Kerr 효과, 비선형 전자 분극률에 의한 Kerr 효과 등이다. 일반적으로 공명 비선형 효과는 그 크기는 크지만 반응 속도가 느린데 반해 비공명 비선형 효과는 이와 반대이다.^(2,3) 본 절에서는 현재 많이 연구되고 있는 광재료인 광굴절 재료, 반도체, 광섬유, 유기물에 대해서 그들이 나타내는 비선형 광효과와 원인 및 성질에 대해서 알아 본다.

1. 광굴절 재료

광굴절 효과는 결정(crystal)내에서의 전자들의 공간적 분리에 의한 효과이다. 즉 빛에 의해 여기된 운반자(photoexcited carrier)들의 재분포에 따라서 국부적 전장(local electric field)이 형성되어 전기광학 효과에 의해 굴절을 변화가 유도되는 것이다. 그림 1에 공간 전하장이 생성되는 과정을 보여준다.⁽⁴⁾ 광굴절 매질내에서 빛에 의해 여기된 운반자들은 천이나 확산에 의해서 수 나노미터(nanometer)까지 이동하여 큰 전기 쌍극자(dipole moment)를 형성한다. 이러한 현상은 수 밀리미터의 두께를 갖는 결정에서 현저하게 나타나며 따라서 체적 홀로그래피(volume holography)에 응용되어진다. 또한 광굴절 효과는 온도에 둔감하여 비공명성이다. 지금까지 광굴절 효과는 반응이 느린 효과로 알려져, 고차원의 병렬처리 등에 이용성이 있다고 알려져 왔다. 이것은 초기에 LiNbO₃, SBN, BaTiO₃와 같이 저항이 큰

저이동도 강유전체 산화물(low-mobility ferroelectric oxide) 등에서 이러한 효과가 관측되었기 때문이다. 그러나 GaAs, InP, CdTe와 같은 광전도도(photo-conductivity)가 큰 매질에서도 광굴절 효과가 발견되어 비록 크기는 작지만 40 psec 정도의 빠른 반응을 보임이 밝혀졌다.^(5,6) 따라서 반응은 느리나 광굴절 효과가 큰 SBN이나 BaTiO₃ 등은 영상처리(image processing)용으로 사용되며, GaAs나 InP 등은 광굴절 효과의 크기는 작으나 반응이 빠르기 때문에 펄스레이저를 사용한 고속처리용으로 사용된다.

2. 반도체

반도체는 발달된 제조기술과 물성연구의 결과로부터 광자기술에서 요구되는 여러 가지 특성을 만족시킬 수 있는 새로운 인공구조로 만들어지고 있다. 이러한 반도체가 갖는 비선형 효과의 원인은 매우 다양하다. 그 중에서 중요한 몇 가지 물리적 현상은 다음과 같다.

1) 벌크(bulk)에서의 전기흡수(electroabsorption)와 전기굴절(electrorefraction)

반도체에 전장이 가해진 경우 Franz-Keldysh 효과에 의해 흡수율이 변하게 된다. 전장이 증가함에 따라서 밴드 가장자리(band edge)보다 낮은 에너지를 갖는 광자의 흡수는 증가하며, 밴드 가장자리보다 높은 에너지를 갖는 광자의 흡수는 감소한다. Kramers-Kronig 관계식에 의해서 흡수율의 변화($\Delta\alpha$)에 대한 굴절률의 변화(Δn)를 구할 수 있다.⁽⁷⁾

$$\Delta n = (1/2\pi^2) \int [\Delta\alpha(\lambda') / \{1 - (\lambda'/\lambda)^2\}] d\lambda' \quad (1)$$

그림 2에는 GaAs의 경우에 내부 전기장의 변화에 따른 흡수율과 굴절률의 변화가 보여진다.

2) 양자속박 Stark 효과(Quantum-confined Stark Effect)

분자 빔 에피택시(molecular beam epitaxy)나 MOCVD 등의 박막결정 증착 기술은 두 개의 서로 다른 반도체 성분을 매우 얇은 다층구조를 갖도록 가공할 수가 있다. 이것을 이중구조 다중 양자우물(heterostructure multiple quantum well)이라 하는데 박막의 두께는 격자의 결정성이 유지되는 임계두께 안에서 제한된다. 이 때 임계두께는 두 개의 박막이 갖는 격자 간격의 차이에 의해서 결정된다. 전자의 물질과 파장(약 100 angstrom) 정도로 두께가 얇아지면 에너지 밴드 갭(energy band gap)이 작은 박막안에 양자 우물(quantum well)이 형성되고, 따라서 원자에서처럼 불연

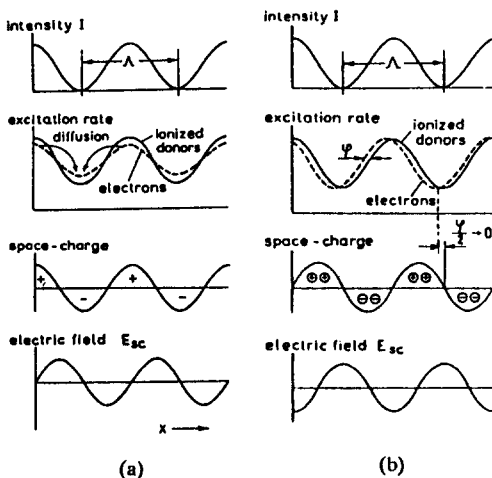


그림 1. (a) 확산(diffusion)에 의한 공간 전하장의 생성. (b) 천이(drift)에 의한 공간 전하장의 생성.

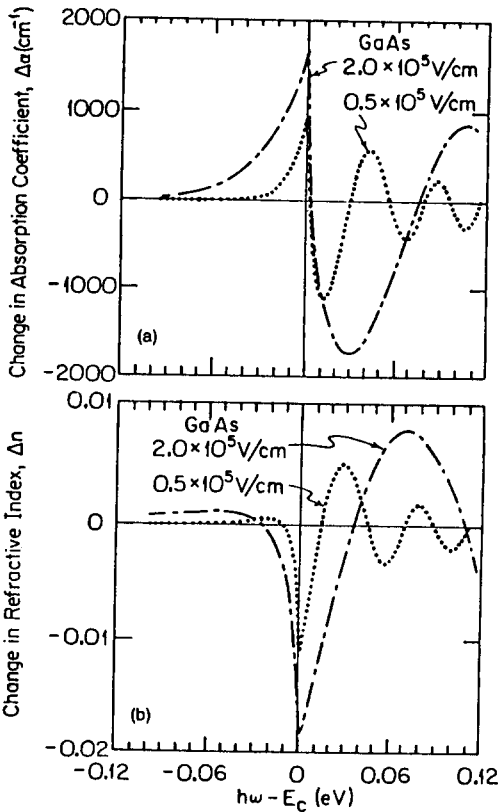


그림 2. Bulk GaAs에서의 전기장에 의한 흡수율 (a)과 굴절률 (b)의 변화.

속적인 양자화된 에너지준위를 갖게 된다. 이러한 에너지준위간에 전자가 천이하면 광자들이 발생 또는 흡수되어 양자적 광자소자를 만들 수 있게 된다.

다중 양자우물 구조에 전기장이 가해지면 흡수대가 장파장쪽으로 이동하게 된다. 이것은 벌크에서의 Franz-Keldysh 효과와 비슷하나 물리적 과정은 다르다. 그림 3에서 보는 바와 같이, 가해진 전기장에 의해서 양자 속박된 전자와 정공의 에너지준위가 이동하게 되며 (Stark effect) 전자와 정공의 공간 분포가 달라지게 되어 진동강도 (oscillation strength)와 전체 흡수가 줄어들게 된다.⁽⁸⁾ 그림 4에서는 외부 전장이 있을 때와 없을 때의 광자 에너지와 흡수율의 관계가 나타나 있다.⁽⁹⁾ 이 결과와 Kramers-Kronig 관계에 의해서 파장에 따라 굴절률이 변하게 된다.

3) 밴드 채움 (band-filling)

밴드 채움 (band-filling)은 입사되는 빛이 전송자를 밴드 가장자리 부근의 전도대로 여기시킬 때 일어난다.

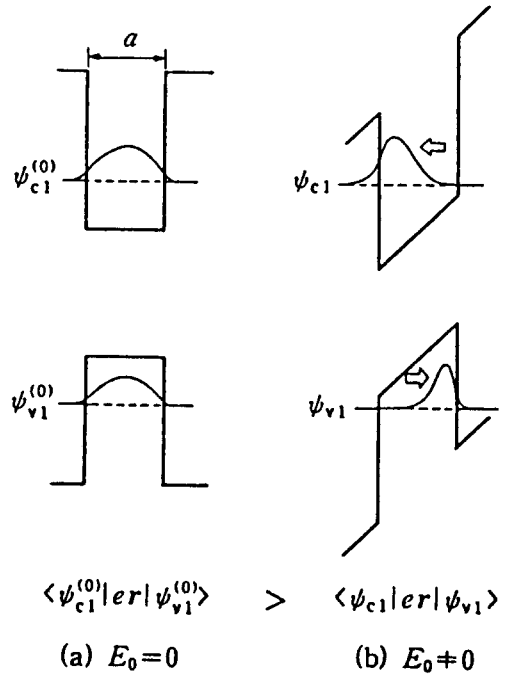


그림 3. (a) 외부 전기장이 가해지지 않은 경우 에너지준위. (b) 외부 전기장이 가해진 경우 변화된 에너지준위.

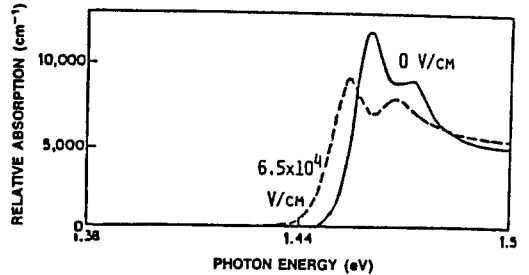


그림 4. GaAs/GaAlAs의 MQW에서 외부 전기장이 가해지지 않은 경우(실선)와 가해진 경우(점선)의 광자 에너지에 대한 흡수율 곡선.

Fermi 통계에 의해 에너지준위들은 전송자로 딱 채워지고, 흡수는 포화가 이루어진다. 즉, 낮은 강도의 빛이 입사했을 때의 흡수계수를 α 라 할 때 흡수계수는

$$\alpha = \alpha_o (f_a - f_b) \tag{2}$$

이다. 여기서 f_a 와 f_b 는 낮은 에너지 상태 a 와 높은 에너지 상태 b 의 거주확률 (population probability)이다. 빛이 입사하지 않을 경우 $f_a=1$ 이고 $f_b=0$ 이며 빛의

강도가 커짐에 따라 f_a 는 감소하며 f_b 는 커지게 된다. 이러한 빛에 의한 흡수율의 변화는 다시 굴절률의 변화로 계산될 수 있다. 그림 5에는 InAs의 밴드 채움 효과에 의한 굴절률 변화를 실험적 결과와 이론계산의 비교를 보여준다.⁽¹⁰⁾

3. 광섬유

광섬유는 굴절률이 상대적으로 큰 핵(core)과 그것을 둘러싼 cladding으로 이루어져 있으며, 특히 석영 유리(silica glass)는 광학적 비선형 효과가 작음에도 불구하고 0.2 dB/km의 매우 적은 광전송 손실을 가지고 있어 작용 길이를 충분히 길게함으로써 전체적인 비선형 효과를 크게 할 수 있기 때문에 매우 실용적인 비선형 광학소자로 응용될 수 있다.⁽¹¹⁾ 이 석영 유리의 경우 비선형성의 원인은 비공명적인 3차 비선형 분극에 의한 것으로, 흡수가 없는 상태에서 굴절률 변화를 일으킨다. 따라서 석영유리를 Kerr 스위치에 이용할 경우, 반응시간

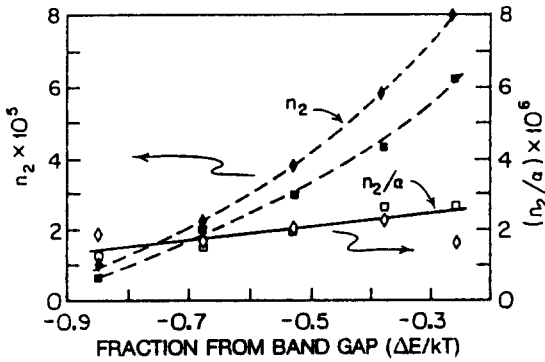
이 펨토초 정도로 빠르다. Kerr 매질에서의 비선형 광효과는

$$\Delta n_{ij}(t) = n_2^{ij} I_j(t) \tag{3}$$

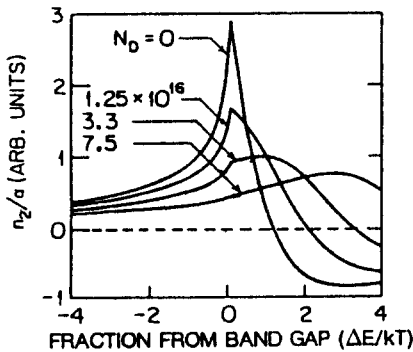
로서 표현된다. 여기에서 n_2^{ij} 는 비선형 굴절률 계수, $I_j(t)$ 는 입력 광펄스의 강도(W/m²), 아래 첨자 i, j 는 편광상태, n_2^{ij} 의 위 첨자 i, j 는 비선형 굴절률 계수의 텐서성분을 나타낸다. Δn^{ij} 는 j -성분의 편광을 갖는 빛에 의한 i -성분의 굴절률 변화를 의미한다. $\Delta n(t)$ 의 굴절률 변화가 유기된 매질내를 L 의 길이만큼 빛이 진행한 경우에, 파장이 λ 인 신호파의 전체 위상변화는

$$\Delta \Phi_{ij} = (2\pi/\lambda) \Delta n_{ij}(t) \int_0^L I_j(t - \tau L') dL' \tag{4}$$

이다. 일반적으로 광섬유 매질은 색분산과 편광분산을 가지고 있다. 따라서 펄프파와 신호파의 파장과 편광 방향이 다른 경우 군속도(group velocity)가 달라지며, 두 가지 파 사이의 시간지역 τ 가 생기게 된다. $\tau=0$ 인 경우는 자기위상 변조(self-phase modulation)라고 하며 $\Delta \Phi_{ij}$ 는 $I_j L$ 로서 L 에 비례하게 된다. 그림 6에는 glass fiber를 이용한 Kerr 스위칭으로서 완전 광시간분할 다중화/다중분리(all-optical time division multiplexing/demultiplexing)하는 실험장치와 결과가 나타나 있다. 이 때 사용한 광섬유는 편광유지 단일모드 광섬유로서 복굴절을 보상하기 위하여 두 개의 광섬유의 광축을 수직으로 하여 접착시켜 사용하였다. 스위칭 폭은 펄프파의 펄스폭에 의해 결정되는데 펄프파의 펄스폭이 80 ps인 경우 약 100 ps의 스위칭 폭을 나타내고 있다. 조금 더 짧은 펄프펄스를 사용할 경우 1 ps의 작동도 가능하리라 예측되고 있다.



(a)



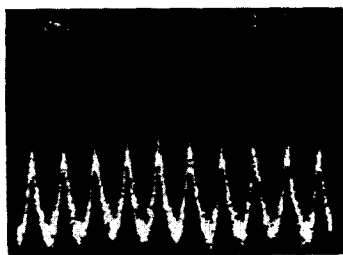
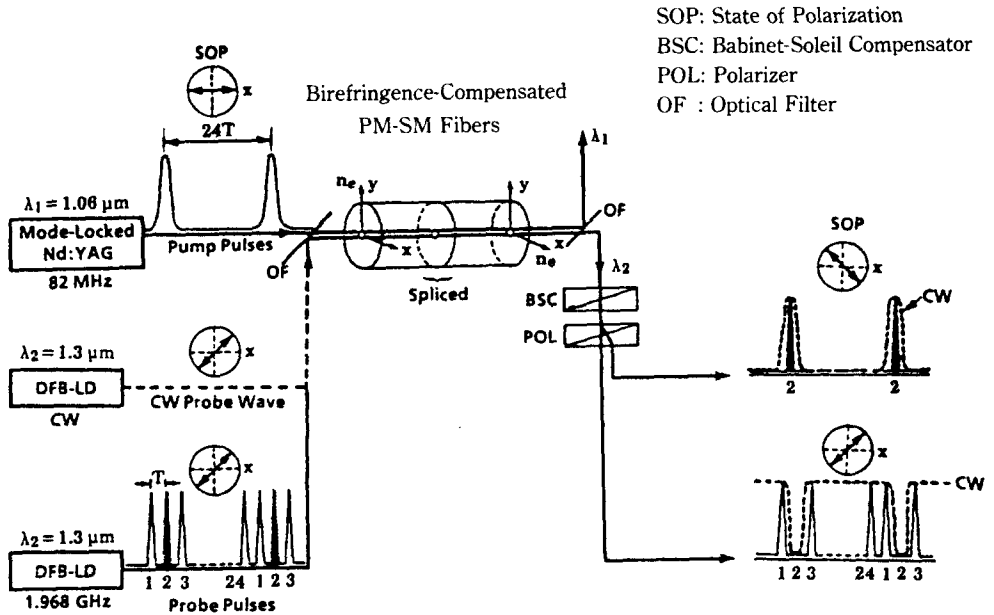
(b)

그림 5. InAs의 밴드 채움(band filling)에 의한 비선형 효과. (a) 실험, (b) 이론(원은 (a)에서 측정된 실험값).

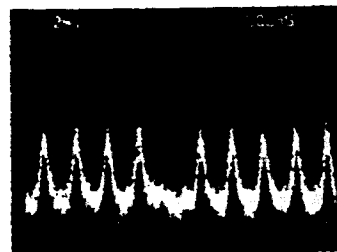
4. 유기물

유기물을 광재료로 이용하고자 하는 이유는 그것이 나타내는 2차 및 3차 비선형성이 크다는 점과 반응시간이 짧다는 점이 광교환에 있어서 매우 유용하기 때문이다. 유기물에서의 비선형 광학성은 분자 수준에서의 고차분극률(hyperpolarizability)에 기인한다. 분극률(polarizability)이라는 것은 물질내에서 한 분자(또는 원자)의 국부 전기장(local electric field)에 대한 분극의 정도를 나타내는 양으로서 영구 쌍극자(permanent dipole moment) 및 선형분극률(linear polarizability)과 고차분극률로 구성되어 있다. 즉, 국부 전장 E 에 대해서 분극 P 는

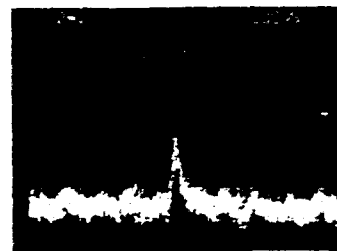
$$P = \mu_0 + \alpha E + \beta EE + \gamma EEE + \dots \tag{5}$$



Original 2GHz pulse stream



Demultiplexed pulse stream



Demultiplexed pulse stream

그림 6. 광섬유의 Kerr 효과를 이용한 완전 광시간분할 다중화/다중분리(time-division MUX/DMUX) 실험장치(a)와 결과들(b).

로 나타내어진다.⁽¹²⁾ 2차 분극률(β)은 2차 비선형성의 근원이 되며, 전자구조의 비대칭성에 크게 의존하기 때문에 전자의 비국부화(delocalization) 효과가 크고 극성분자 양쪽 극에서 전자친화력(electronegativity)이 다른 분자인 경우 그 값이 커진다. 그러나 불행하게도 유기물 결정구조에서는 분자 쌍극자들이 서로 반대 방향으로 정렬하려는 성질을 가지고 있다. 이것은 개개의 분자 분극률을 효과적으로 사용하지 못하는 원인이 되며, 따라서 2차 분극률이 큰 분자로 구성된 유기물이라고 해서 반드시 2차 비선형성이 큰 것은 아니다. 이러한 이유로 과거의 유기물은 큰 분자 고회분극률 가지고 있으면서도, 거시적으로 LiNbO_3 보다 큰 전기광학 계수를 갖는 재료를 찾지 못했다. 이것을 극복하기 위해 결정성장, 폴링(polling), 분자막(molecular film) 등 분자 쌍극자들을 평행하도록 정렬시키는 기술이 개발되고 있다. 최근 LiNbO_3 보다 몇 배 큰 전기광학 계수를 갖는 유기물들이 보고되고 있다.⁽¹³⁾

2차 비선형성에서의 분자 수준과 거시적 수준 사이의 관계를 근사적으로 관련 지우고는 있으나 정확한 수식적 모델과 계산은 아직 이루어지지 않고 있다. 유기물에서의 3차 비선형 현상은 2차 비선형 현상보다도 파악되지 못하고 있지만, 근사적으로는 구성 분자들의 비선형 결합 분극률(bond polarizability)에 기인하는 것으로 알려져 있다.⁽¹³⁾ 비선형 굴절률의 크기는 가해진 전장과 결합 방향 사이의 각도 및 결합 밀도에 의존하는 것으로 생각된다. 크게 공액(highly conjugate)된 분자 폴리머(molecular polymer)들이 큰 비선형 굴절률을 가지는데, 이것은 긴 체인(chain) 분자내에서 전자(π -electron)의 비국부화 정도가 크기 때문임이 알려져 있다. 이러한 폴리머내에서 일어나는 비선형 과정은 비공명이며 그 반응이 굉장히 빠르다($<10^{-13}$ sec). Polydiacetylene은 공액된 폴리머로서 3차 비선형 효과의 크기가 석영유리보다 10⁴배 정도가 크며 반응시간은 400 fs로 매우 빠름이 보고되고 있다.⁽¹⁵⁾ 최근 PbS, CdS 등의 반도체를 첨가(doping)시킨 폴리머도 한창 연구 중이다. 이것은 크기가 적어짐에 따라서 밴드 갭이 커지는 양자 현상을 이용할 수 있고, 3차 비선형 계수와 포화 강도를 향상시킬 수 있기 때문이다.⁽¹⁶⁾

III. 광자소자

광통신과 광정보처리에 사용되는 광학소자들은 근본적으로 소자내에서 광자와 전자가 서로 어떻게 작용하느냐에 따라 발광소자, 수광소자, 광신호처리소자, 광기억소

자 등으로 분류될 수 있다. 광통신 및 광신호처리 등에 발광소자로 사용되는 LED(light emitting diode)나 레이저 다이오드는 여기된 전자가 정공과 결합하면서 각각 자연 방출(spontaneous emission) 또는 유도방출(stimulated emission)되는 광자를 이용하는 소자이고, 수광소자의 경우에는 입사된 빛에 의해 매질내에서 전류가 유도되는 광기전 효과(photoelectric effect)로서 광전압(photovoltaic) 효과와 광전도(photoconductive) 효과를 이용하고 있으나 광정보처리에 있어서는 높은 주파수에서 성능이 좋은 광전도 포토 다이오드(photoconductive photodiode)가 주로 쓰이고 있다.

광신호처리에 있어서는 음향광학 효과(acousto-optic effect), 자기광학 효과(magneto-optic effect), 전기광학 효과(electro-optic effect), 광굴절 효과(photo-refractive effect) 등에 의해 빛이 매질에 의해 반사되는 정도나 투과되는 정도를 조절함으로써 광신호처리를 수행하는 방식이 이용되고 있다. 그리고 매질의 물리적인 상태변화 또는 형상변화, 광자기효과(opto-magnetic effect), 홀로그래피(holography), 위상공액(phase conjugation), 광쌍안정성(optical bistability) 등을 이용하여 정보를 기억하는 방식들이 있다. 이러한 광정보처리용 소자들은 매질과 구조에 따라 광자들이 나타내는 특성에 의해 동작 특성이 결정되는데, 기존의 소자들이 갖는 한계성을 극복하기 위해 최근에 연구되고 있는 새로운 소자들에 응용되고 있는 광자물리 현상들은 다음과 같다.

1. 양자크기 효과(quantum-size effect)

광통신 및 광정보처리에 사용되는 발광소자는 좋은 단색광(spectral purity), 안정도(stability), 조정성(tunability)과 고속변조(high speed modulation), 낮은 임계전류(low threshold current), 고풍력(high output power) 등이 요구되고 있는데 이러한 요구를 충족하는 하나의 방법으로 양자우물 레이저 다이오드(quantum well laser diode)가 출현하게 되었다. 이는 반도체 기술에 있어서 MBE나 MOCVD 등의 박막(epilayer) 성장기술과 같은 초미세 구조의 제작기술이 발전함으로써 전자나 정공(hole)의 물질파 파장(de Broglie wavelength $\lambda = h/p \approx 100$ angstrom)에 해당하는 화합물 반도체의 초미세 구조의 제작이 가능하였기 때문이다. 이러한 초미세 구조에서는 종래의 큰 구조를 가진 소자들에서 볼 수 없는 양자크기 효과(quantum size effect)를 볼 수 있다.

여러 층의 박막(epilayer)들로 이루어진 반도체 소자

들의 구조가 100 angstrom 정도 또는 그 이하로 점점 그 크기가 작아지면서 전자나 정공들의 운동을 구속할 경우 그들의 에너지준위(energy level)가 잘 분리된 불연속성을 갖게 됨으로써 에너지준위의 밀도가 변하게 된다. 밴드 갭이 다른 반도체 물질들의 층으로 이루어진 전위우물(potential well)내에 구속된 전자나 정공과 같은 운반자들의 에너지준위(energy level)는⁽¹⁷⁾

$$E_n = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{n\pi}{L_z} \right)^2 \quad (6)$$

로 주어진다. 여기서 m 은 운반자들의 질량이고, L_z 는 전위우물의 폭을 또 n 은 양자화를 의미하는 정수이다. 이 식으로부터 L_z 가 매우 클 때 에너지준위는 거의 연속적인 값이 된다. 그러나 충분히 작은 L_z 에 대해선 불연속적인 에너지준위를 갖게 되며, 전도대(conduction band)에 구속된 전자의 에너지준위와 가전자대(valence band)에 구속된 정공의 에너지준위는 그림 7에 잘 나타나 있다. 여기에서 전자와 정공이 결합하면서 방출되는 빛의 에너지는

$$\hbar\omega = E_g + E_{1c} + E_{1hh} \approx E_g + \frac{\hbar^2}{8L_z^2} \left(\frac{1}{m_c} + \frac{1}{m_{hh}} \right) \quad (7)$$

로 주어진다. 여기에서 E_g 는 밴드 갭 에너지이고, E_{1c} 는 가장 낮은 전도대의 에너지준위이고, E_{1hh} 는 가전자대에서 무거운 정공(heavy hole)의 가장 높은 에너지준위이며, m_c 와 m_{hh} 는 각각 전자와 무거운 정공의 질량을 나타낸다. 위 식으로부터 방출되는 빛의 에너지(즉 파장)는 양자우물의 폭의 변화에 의해 변화될 수 있음을 볼 수

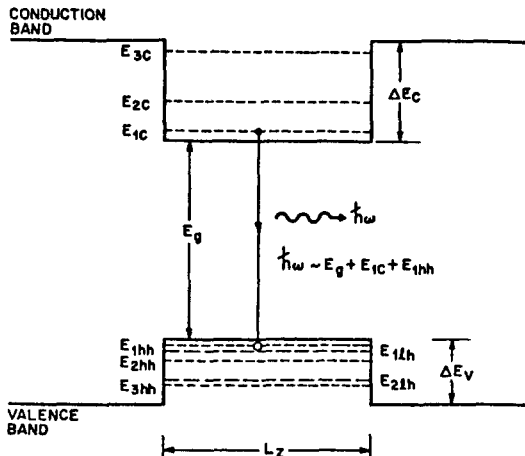


그림 7. 양자우물 구조에서 전자와 정공의 에너지 준위들.

있다는 것이 통상의 레이저 다이오드가 가지지 못하는 양자우물 레이저 다이오드의 특징이다. 또한 이러한 분리된 에너지준위 구조에 의해 종래의 레이저 다이오드보다 더 낮은 임계전류 밀도, 더 높은 효율, 또 임계전류의 적은 온도변화 등의 장점을 갖고 있다. 이러한 장점을 가진 소자의 개발을 위해 이미 일차원에서 전자를 구속하는 양자우물 구조를 이용한 레이저는 이미 많이 연구되어 오고 있고, 앞으로 더욱 더 큰 양자효과를 얻기 위해 2차원과 3차원에서 전자를 구속하는 양자선(quantum wire)나 양자상자(quantum dot)와 같은 구조에 대한 연구가 많이 이루어질 전망이다.^(18,19) 단일 파장에서 동작하는 레이저를 얻기 위해 분포 Bragg 격자(distributed-Bragg grating)와 같은 분포소자를 직접 레이저 다이오드에 집적시키는 방법이 있으며, 이를 이용한 것으로 DFB(distributed-feedback) 레이저 다이오드나 DBR(distributed-Bragg-reflector) 레이저 다이오드 등이 있다.⁽²⁰⁾

또한, 양자우물 구조를 이용한 반도체 레이저로서 80 angstrom의 단일 양자우물 활성층(single quantum-well active layer)을 가진 작은 크기의 수직 공진기형 표면 발광 레이저 어레이(vertical-cavity surface-emitting laser array)가 있다. 최근에 AT&T Bell 연구소의 J. L. Jewell et al.⁽²¹⁾에 의해 개발된 수백만개의 수직 공진기형 발광 레이저 어레이를 단일 기판위에 만든 2차원 레이저 어레이는 앞으로 병렬 광통신과 병렬 광컴퓨팅에 유용하게 사용되리라 기대된다.

광통신과 광정보처리에 있어서는 짧은 광펄스를 필요로 하는데 이제까지는 반도체 레이저를 이용한 직접 변조방식으로 초당 수십 기가비트(Gbps) 정도의 변조속도를 얻어 왔다. 반도체 레이저의 변조속도는 이득(gain), 양자효율, RC 시간상수 등과 관계되는데 양자우물 구조는 이득 및 양자효율이 통상의 벌크(bulk) 구조보다 크기 때문에 이 특성을 이용하면 훨씬 더 빠른 펄스를 얻을 수 있다. 예로써 양자우물 구조에 공명이득 변조(resonant gain modulation)를 통한 능동형 모드록킹(active mode locking) 방법, 포화흡수체를 이용한 수동형 모드록킹(passive mode locking) 방법, 또는 이득 스위칭(gain switching) 방법 등을 이용해 피코초 이하의 매우 짧은 펄스가 얻어져 왔다.⁽²²⁻²⁴⁾ 이러한 방법으로는 펄스의 피크 파워(peak power)가 수 Watt 이하만 가능하며, 최근에는 이러한 능동형 모드록킹과 수동형 모드록킹을 합친 혼합형 모드록킹(hybrid mode locking)을 이용하여 출력을 높이는 방법으로 약 0.64 psec의 펄스

폭과 33 Watts의 피크 파워를 얻어오는 등⁽²⁵⁾ 새로운 차원의 펄스 압축 및 파워 증폭의 기술이 연구되고 있다.

또 하나의 대표적인 소자로는 SEED(self electro-optic effect device)가 있는데,⁽²⁶⁾ 이는 그림 8에서와 같은 반도체 다중 양자우물 구조(multiple quantum well structure)에 수직으로 걸어주는 전기장의 세기에 따른 흡수 정점(absorption peak)의 적색천이(red-shift)와 흡수율의 변화, 즉 양자속박 Stark 효과(quantum-confined Stark effect; QCSE)를 이용하여 그 다중 양자우물 구조를 통과하는 빛의 세기변화를 조절하는 변조기의 일종으로써, 입사 빛의 세기에 따라 유도된 광전류가 바이어스(bias)된 전압의 변화를 유도해 투과하는 빛의 세기를 QCSE 효과로 자동 조절하는 현상인 자기 전기광학 효과(self electro-optic effect)를 이용하고 있다. 이러한 과정은 그림 9에 보여지며, 소자는 결국 RC 시간상수에 의해 반응속도가 제한된다. 하지만 미세구조 공정기술의 발전으로 1.3mm²의 면적에 64×32 배열의 S-SEED(symmetric SEED)가 가능하고, 이는 16,384 개의 광선을 동시에 조절할 수가 있다. SEED는 다중 양자우물 구조 변조기에 여러 종류의 전자소자를 부하로서 직렬로 연결한 구조를 갖고 있는데 그 중에서 S-SEED(symmetric-SEED)는 다중 양자우물 구조 변조기를 부하로 사용하여 대칭적인 구조를 가지고 있다. S-SEED는 궁극적으로 초당 10⁹개 이상의 신호를 교환할 수 있으며, 특정한 강도에서 임계치(threshold)나 트리거(trigger)에 의하지 않고 두 개의 입사 광선의 비에 의해서 스위칭이 일어나므로 임계바이스(critical biasing) 문제가 해결되며, 시간 연속 이득

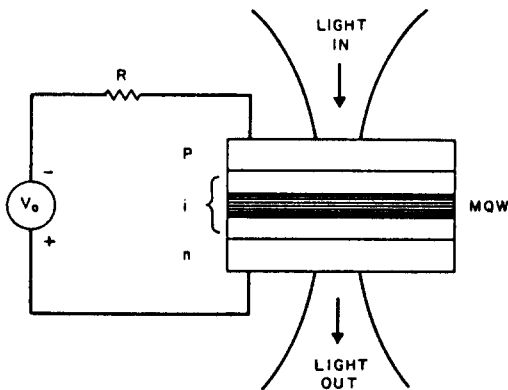


그림 8. 광쌍안정성을 가진 SEED(self-electro-optic effect device)의 구조도.

(time-sequential gain)에 의해서 큰 이득을 얻으며, 래치(latch)와 AND, OR, NAND, NOR 등 광논리기능을 수행할 수 있다는 장점이 있는 스위칭 소자이다. SEED는 광쌍안정성 소자(또는 광메모리 소자), 광공진기, 광수준 천이기(level shifter), 또는 광논리소자 등으로 광신호처리의 기본소자로 이용되어, 1990년대 중반 기에는 광고환 장치의 시제품(prototype)의 출현을 가능하게 할 전망이다. 광쌍안정성이란 하나의 입력에 대해 두 개의 안정된 출력상태를 가지는 성질을 말하며, 이는 소자를 구성하는 매질의 비선형성에 기인한다. 이러한 광쌍안정성 소자로 광메모리, 광스위칭, 광논리 등을 수행할 수 있으며 따라서 광컴퓨터의 핵심부분인 광프로세서(optical processor)를 구성할 수 있다.

2. 광신호처리 소자를 위한 비선형 광학효과

광논리 소자는 근본적으로 전기광학효과(electro-optic effect)를 이용하고 있는데 주로 외부에서 걸어준 전장의 세기나 혹은 빛 그 자체의 전장의 세기에 의해 매질내에서 일어나는 분극 현상으로 유도된 광굴절률의 비선형적 변화가 그 매질을 지나가는 빛의 위상변화를

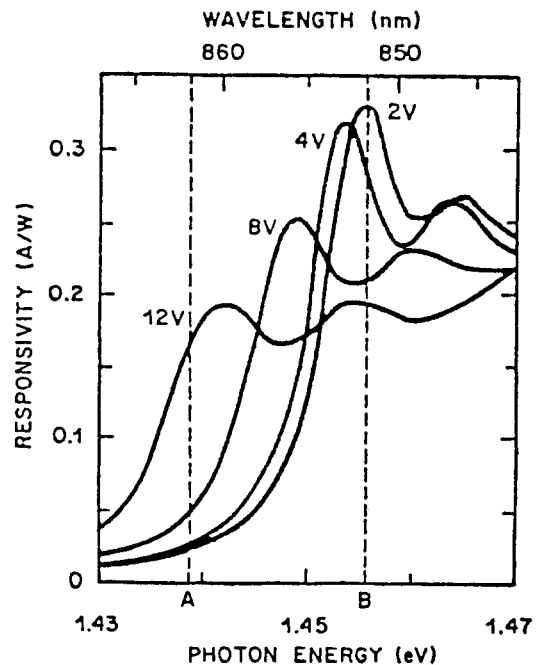


그림 9. SEED로 사용되는 양자우물 구조에 역으로 인가된 전압에 대한 반응도(responsivity : 광전류/입사광의 세기).

일으켜서 투과 또는 반사되는 빛의 세기를 변화시키는 원리를 이용한다. 근래에 많이 연구되어온 $Ti:LiNbO_3$ 소자와 같은 것은 외부에서 걸어준 전장의 세기에 의해 유도된 전기광학효과를 이용하고 있는데 전극 구조에 의한 전기용량에 의해 스위칭 속도가 나노초(nanosecond) 이상으로 느리고 또 열적인 문제가 있다. 최근에는 빛 자체의 전장의 세기에 의한 광전 효과를 이용한 스위칭 소자로서 양자우물 구조의 밴드 채움 효과(band filling effect)를 이용하거나 유리물질과 유기물 등에서의 3차 비선형 광학 효과를 이용하는 방법이 많이 연구되어지고 있는데, 이는 전기적인 RC 시간상수에 의한 속도제한을 받지 않기 때문에 피코초(picosecond) 내지는 그 이하의 빠른 속도의 스위칭을 가능하게 한다. 이러한 완전 광스위칭 소자에 효과적으로 사용되기 위해서 그 매질은 비선형도가 커서 소자 크기를 줄일 수 있어야 하며 또 작동하고자 하는 파장에서 흡수가 작아서 높은 반복률로 작동하는데 있어 열적인 문제(thermal problem)가 없어야 한다. 표 1에서는 3차 비선형 광학계수(n_2)와 반응시간(τ), 흡수계수(α)를 보여주고 있는데, 반도체 양자우물 구조와 반도체가 첨가된 유리물질들은 비선형 광학계수가 큰 이점이 있으나 광흡수가 큰 단점이 있다.⁽²⁷⁾ 반면에 광섬유의 경우에는 앞절에서 언급한 바와 같이 비록 비선형 광학계수가 작으나 흡수가 적기 때문에 긴 길이로 사용할 수가 있고, 100 fs의 빠른 스위칭이 얻어지고 있다.⁽²⁸⁾ 유기물의 경우에는 비선형 광학계수가 비교적 큰 편이나 흡수계수가 유리물질만큼은 좋지 않으나 동작속도가 빠르고 해서 앞으로 재료의 연

구와 더불어 전망이 좋은 물질이다. 그림 10은 한 예로써 에탈론(etalon) 형태의 반도체 첨가된 유리물질 스위치의 게이트(gate) 실험장치와 결과, 그리고 광쌍안정 특성실험 결과를 보여준다. 짧은 펄스폭의 강한 펄스로 빠르게 스위칭하기 위해 3차 비선형 광학효과와 음군속도 분산(negative group velocity dispersion)의 평형에 의해 광섬유나 도파로(wave guide)내에서 생성되는 솔리톤(soliton)을 이용한 스위칭 방법이 또한 연구되어지고 있다.

현재 공간 광변조기(spatial light modulator)는 광정보처리에 있어서 중요한 소자로서 사용되고 있다. 이는 빛을 on과 off의 두 상태로 공간과 시간적으로 바꿀 수 있는 소자들의 2차원적 집합으로서 광 병렬처리에 사용되고 있다. 빛을 운용하는데 있어 광학적이거나 전기적인 방법이 사용되고 있는데 광학적 방법을 이용하는 대표적인 것들은 액정을 이용한 광 밸브(liquid crystal light valve; LCLV), 광굴절 신호 증배 소자(photorefractive signal-multiplying devices), 미세 채널 플레이트 소자(micro channel plate devices) 등의 여러 종류가 있으나 대체적으로 LCLV가 현재 가장 많이 사용되고 있다. 그 외에도 압전 변환기(piezoelectric transducer)로 전기적인 신호를 음향파로 바꾸어 투명한 비선형 물질내에서 음향광학(acousto-optic) 효과를 이용한 SLM으로 acoustooptic Bragg cell deflector가 사용되고 있으며, 이는 약 1,000개의 광선을 변조할 수 있으며 사용되는 전기신호의 대역폭은 약 1GHz이다. 이러한 SLM의 기능을 대표하는 특성으로는 시공간 대역폭(time-space bandwidth)이 사용되며 이는 곧 초당 몇 개의 픽셀(pixel)이 작동하는가를 나타낸다. 근래에 시공간 대역폭이 10^{10} operations/초가 되는 SLM이 실험적으로 작동되었다.⁽²⁹⁾ 앞으로 광프로세서에 사용될 전기광학 물질(electro-optic materials)들의 선택을 대체적으로 진동수와 관련된 전기광학 감수율(electro-optic susceptibility)에 의해 주어진 전기광학 계수(electro-optic coefficient)와 상반된 반응속도의 절충에 달려있다. 액정(liquid crystal)과 같은 물질은 높은 전기광학 계수를 가지나 낮은 반응속도를 가지고 있고, 고체물질은 비록 빠른 반응속도를 가지고 있으나 낮은 전기광학 계수를 가지고 있다. 앞으로 이러한 문제의 해결을 위하여 유기물이나 다중 양자우물 소자들의 연구가 많이 진행되고 있고, 이미 강유전적 액정(ferroelectric liquid crystal) 등을 이용하여 훨씬 더 빠른 반응속도를 얻어오고 있다.⁽³⁰⁾

표 1. 웨이브 가이드형 광소자에 응용될 3차 비선형 광학물질들의 비교⁽²⁷⁾

Material System ^a	n_2 (m^2/W)	(sec)	(cm^{-1})
Semiconductors			
GaAlAs (r)	-10^{-8}	10^{-8}	10^4
(nr)	-10^{-12}	10^{-8}	30
(nr, theory)	-10^{-13}	10^{-8}	10
Doped glasses			
CdS_xSe_{1-x}	-10^{-14}	10^{-11}	3
Organics			
PTS (r)	2×10^{-15}	2×10^{-12}	10^5
(nr)	10^{-16}		0.1
Others (nr)	$10^{-16} - 10^{-17}$	10^{-14}	
Glasses			
SiO_2 (nr)	10^{-20}	10^{-14}	10^{-5}

^a(r) Resonant, (nr) detuned from resonance.

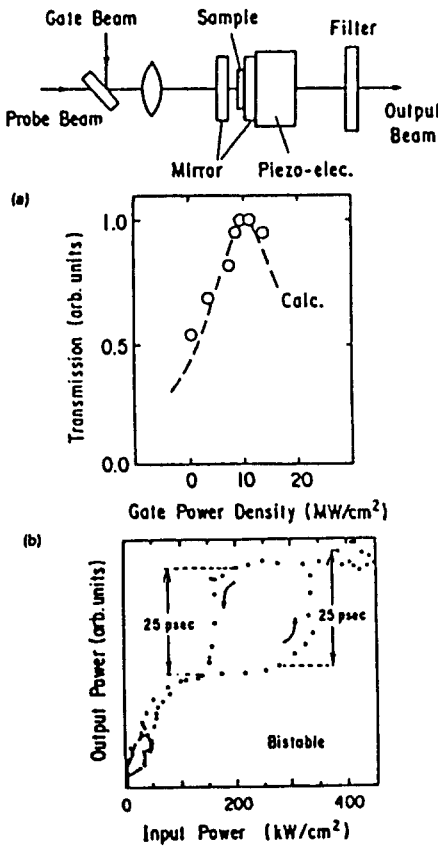


그림 10. Etalon 형태의 반도체가 첨가된 유리물질 스위치의 게이트(gate) 실험장치와 결과 (a) 및 작동되는 광쌍안정 특성(b).

3. 광기억 효과

광기억소자는 크게 광디스크를 사용하는 방법과 홀로그래피를 사용하는 방법이 추가되며 그 외에도 광쌍안정성, 위상공액(phase conjugation)을 이용하는 방법이 있다. 현재 광기억소자로 가장 많이 이용되고 있는 광디스크들은 비정질(amorphous)이나 결정체에서의 위상변화를 이용하거나 플라스틱의 변형 또는 자기광 결합(magneto-optic combination) 등을 이용하고 있다.⁽³¹⁾ 광디스크를 이용한 광기억소자에 있어서는 정보저장과 판독만 광학적으로 이루어지고 그 때 필요한 레이저 다이오드와 광검출기에 의해 바뀌어진 전기적인 신호에 의존하고 있다. 반면에 홀로그래프를 이용한 기억장치는 순전히 빛으로만 이루어질 수 있다. 그러나 보통의 홀로그래프는 한번 기록된 정보를 수정할 수가 없기 때문에 기록된 정보의 재생이 가능한 강전기적인(ferroelectric) 재료를 이용한 체적 홀로그래프가 유망하다. 예로써 비선형

광학 물질인 BaTiO₃, BSO, LiNbO₃ 등에서 일어나는 위상공액(phase conjugation) 효과와 체적 홀로그래피(volume holography) 성질이 광기억에 이용되어지고 있고 뿐만 아니라 광영상처리, 광배선, 광신경회로망 등의 응용 연구가 진행되고 있다. 그 외에 일시적인 광기억소자로 앞서 얘기한 반도체 물질 등과 같은 매질내에서의 광쌍안정성의 응용이 연구되어지고 있다.

4. 광검출

수광소자로서의 반도체 광검출기는 기본적으로 다음과 같은 3가지 과정을 거치는데 그 과정들은 첫째는 입사한 빛에 의해 운반자(carrier)가 생성되는 과정이고, 둘째는 운반자 이동(carrier transport)과 증폭작용이 이루어지는 과정, 셋째로 발생된 전류가 외부회로와 작용하여 출력신호를 내는 과정들이다.

변조된 광신호를 전기적인 신호로 바꾸는 신호처리용 광검출기는 주어진 파장에서의 고감도, 빠른 응답속도, 적은 잡음도 등이 요구되며 그 외에도 소자의 크기, 낮은 bias 전압(혹은 전류), 안정도, 수명 등도 신호처리용 광검출기가 가져야할 성질들이다. 오늘날 여러 종류의 광검출기가 있으나 정보처리용 광검출기로서는 고속 응답을 위해 반도체의 p-n 접합을 기본으로 하는 p-i-n 광검출기와 APD(avalanche photodiode)가 주로 쓰이고 있다.⁽³²⁾ p-i-n 광검출기에서는 입사광을 i 영역에서만 흡수되도록 하여 전자와 정공의 쌍을 n 측과 p 측으로 빠르게 이동시킴으로 응답속도를 빠르게 하고 또 접합용량을 줄여 RC 시간상수를 줄여 전기적인 속도제한을 줄이는 방법이다. 이 방법에서는 하나의 광자를 하나의 전자로 바꾸기 때문에 변환효율이 작아서 별도의 증폭기가 필요하다. 반면에 APD 광검출기는 수신 감도를 올리기 위해 적은 잡음과 높은 전압이 걸린 상태에서 운반자들이 격자 원자들과의 충돌로 인한 광전류의 증배작용(즉 avalanche multiplication)을 이용하고 있다. 또한 고주파수 작동용으로 이중 접합면에서 정공이 갇히는 것을 극소화하기 위해서 InP의 증배영역(multiplication region)과 InGaAs의 흡수층 사이에 InGaAsP의 얇은 천이영역(transition region)을 삽입하여 이루어진 SAM-APD(seperated absorption and multiplication APD) 등의 연구가 진행되고 있다. 이러한 단일 광검출소자와 더불어 광전집적(optoelectronic integration)이 가능한 광검출소자로서 MSM-PD(metal-semiconductor-metal photodiode) 등과 같은 소자의 연구도 이루어지고 있다.⁽³³⁾ MSM-PD는 쇼트키접합을 이용하므로써 종래의 PC(photo-conductor)에서 문제되었던

누설전류를 대폭감소할 수 있는 구조로, 축방향 작동이 가능한 평면구조로 되어 있어, FET(field-effect transistor)와 함께 집적하기에 용이하다는 장점이 있다. 앞으로 초격자(superlattice) 구조의 반도체 제작기술의 발전과 더불어 고감도, 고속, 저잡음의 광검출기에 대한 연구가 기대된다.

5. 광증폭

광증폭기는 장거리 광통신에 있어서는 광증계기로 사용되거나, 손실보상, 쌍방향 증폭 스위치, 수신단의 증폭 등에 사용됨으로써 종래의 전자소자를 이용한 증폭기가 가진 한계치보다 훨씬 더 빠르고 넓은 대역의 신호 전송을 가능케 하고, 또 광컴퓨터나 광신호처리에 있어서는 광신호의 다점 분배에 의한 강도의 보상을 원래의 신호속도의 줄임이 없이 가능케 한다. 반도체 레이저 다이오드를 이용한 광증폭기들은 바이어스(bias) 전압에 의해 여기된 운반자(carrier)들의 재결합에 의한 유도방출(stimulation emission)로 광신호를 증폭하고, Er 첨가된 광섬유 증폭기(Er-doped fiber amplifier; EDFA)는 1.5 μm 파장에서 손실이 작은 광섬유에 어븀(erbium)을 첨가시켜서 1.48 μm 근처의 파장에서 이색 다이오드나 칼라 센터 레이저(color-center laser)로 혹은 980 nm 파장에서의 레이저 광선으로 여기된 전자가 유도 방출을 하면서 광신호를 증폭한다. 이러한 EDFA는 광통신 시스템에 있어서 가입자 망(subscriber loop)이나 트렁크 전송(trunk transmission), 광솔리톤 전송(optical soliton transmission) 등에 매우 유용하게 쓰인다. 특히 1.5 μm 파장에서 높은 이득(G=30~35 dB), 약 10 ms의 큰 이완시간, 적은 잡음, 편광에 무관하고 또 높은 포화 출력 등에 의한 이득이 EDFA 증폭기의 장점이라 하겠고, 특히 솔리톤 전송과 더불어 장거리 통신에 획기적인 이용이 이루어지고 있으며, 최근에는 반도체 레이저를 펌핑 광원(pumping source)으로 사용하여 4 Gbps로 136 km 거리의 전송이 실험적으로 보여졌다.⁽³⁴⁾ 그 외에도 광증폭기로 라만 이득(Raman gain)을 이용하여 광섬유에서의 빛의 손실을 보상하는 방법이 있으며, 이 방법으로 솔리톤 신호의 6,000 km 전송이 실험적으로 보여져 왔다.⁽³⁵⁾ 하지만 이 방법은 EDFA 보다 높은 펌프 파워(>100 mW)가 요구되므로 현재로서는 EDFA가 앞으로 광통신에 실용화가 될 전망이 높으며 레이저 다이오드를 이용한 광증폭기는 광컴퓨터나 광신호처리에서 작은 부피로 유용하게 사용될 전망이다.

IV. 집적광학

집적광학은 3차원 광학계를 2차원 평면상에서 집적된 형태로 재구성하는 것으로 외부 온도변화나 진동 등에 영향을 받지 않는 안정된 광학계를 구성할 수 있다. 집적광학은 주로 광통신을 염두에 두고 발전되어 왔으나 궁극적인 목표는 1개의 기판위에 여러 기능의 광소자를 집적함으로써 전자를 정보전달의 매개체로 하는 기존의 반도체 IC와 같은 개념의 집적 광학회로를 만드는 것이다. 따라서 발광, 수광소자를 포함한 모든 능동소자와 신호처리에 필요한 모든 수동소자가 하나의 기판위에 제작이 가능하여야 한다.

광을 2차원으로 구속시키는 원리는 전반사와 정상파 조건이다.⁽³⁶⁾ 광이 평면속으로 도파되기 위한 첫째 조건은 그림 11과 같이 광 도파로 박막내에서 광의 입사각 θ 가 다음의 전반사 조건을 만족하는 것이다.

$$\theta < \tan^{-1} n_{1,3}/n_2 \quad (8)$$

여기에서 $n_{1,3}$ 는 매질 1과 3의 굴절률을 나타내고, n_2 는 도파로 매질의 굴절률을 나타낸다. 광이 도파로 속에 존재하기 위한 두번째 조건으로는 광 진행에 수직인 방향의 파수 벡터가 다음의 정상파 조건을 만족하는 것이다.

$$2(2\pi/\lambda_0)(nl) \sin\theta + \Phi_1 + \Phi_2 = 2m\pi \quad (9)$$

여기에서 λ_0 는 통과하는 빛의 진공에서의 파장이고, nl 는 수직 방향의 광로정, Φ_1 과 Φ_2 는 전반사에 의한 위상 변화, m 은 정수를 나타낸다. 여기서 $m=1$ 인 경우를 단일모드 도파로라 하며 $m>2$ 인 경우는 다중모드 도파로라 한다. $m=1, 2, 3$ 인 경우에 광의 진행을 광선(ray)의 관점에서 관측하면 그림 11의 (a), (b), (c)와 같은 zig-zag 형태가 된다. 또한 차수가 높을수록 같은 거리를 진행하기 위해 더 많은 반사가 필요함을 알 수 있고 간섭현상에 의하여 도파로 내부에서의 공간전장 분포에 마디가 생김을 알 수 있다. 광도파로 소자의 대부분은 손실이 적고 속도 분산이 없는 단일모드 도파로이며, 이는 단일모드 광섬유와의 효율적인 결합을 위해서도 매우 중요하다. 도파로 평면상의 여러 가지 광자소자(렌즈, 격자, 변조기 등)들은 3차원 광학소자의 기본원리와 마찬가지로 광의 진행 경로상에 다음과 같은 유전율의 공간적인 섭동을 유기시켜 줌으로써 가능하다.

$$\epsilon(x, y, z) = \epsilon_0(x, y) + \Delta\epsilon(x, y, z) \quad (10)$$

여기에서 $\epsilon(x, y, z)$ 는 전체 유전율을, $\epsilon_0(x, y)$ 는 섭동이 없을 경우의 유전율을, $\Delta\epsilon(x, y, z)$ 는 섭동에 의한

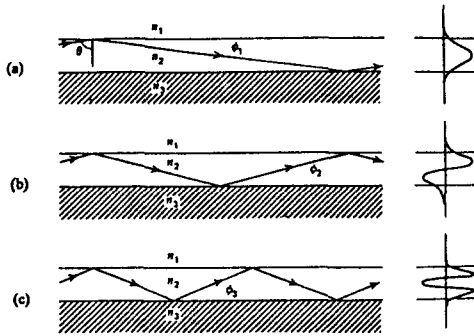


그림 11. 평면 광도파로에서 1, 2, 3 차수의 TE 도파 모드에 대한 zig-zag ray 개념 및 각각에 대한 공간 전장 분포. (a) 1차 모드, (b) 2차 모드 (c) 3차 모드.

유전을 변화를 나타낸다. 이 섭동 유전율의 함수 형태에 따라 본래 도파모드 이외의 새로운 도파모드들이 생성되고 이것들이 섭동 유전율을 통하여 서로 결합 또는 간섭함을 이용하여 다양한 기능의 광소자가 가능하다. 이 때 유전율 변화가 고정되어 있으면 수동소자이며 여러 가지 비선형 효과(전기광학, 음향광학, 자기광학 효과 등)들을 통하여 유전을 변화를 시간에 따라 조절할 수 있으면 능동소자가 된다.

예로써 진행방향에 주기적인 유전율 변화가 있으면 섭동이 없을 때의 도파모드와 진행방향이 서로 반대인 도파모드를 생성시키며 이는 본래 광과 간섭하여 Bragg 조건을 만족하는 광을 반사시키게 된다. 따라서 이러한 주기적인 섭동은 2차원 평면상의 필터, 거울, DFB, DBR LD의 공진기, 광파장 분할기 및 도파로 결합기 등에 사용될 수 있다. 또한 섭동의 종류에 따라 TE/TM 모드변환, 위상 변조기, cut-off 변조기, Bragg deflector 등 여러 가지 집적 광소자 제작이 가능하다.

3차원 광학계에서는 크게 중요하게 사용되지 않지만 광도파로 소자에서 중요한 역할을 하는 하나의 현상은 전반사에서 나타나는 광학적 투과 현상(optical tunneling effect)이다.⁽³⁶⁾ 이것은 소멸(evanescent)파의 감쇄 길이 이내에 섭동 매질이 있을 때 광의 일부가 전반사되지 못하고 섭동 매질속으로 전파되어 버리는 현상으로, 투과광의 세기는 두 매질의 굴절률, 두 매질 사이의 거리에 의존한다. 이러한 현상은 집적광학에서 광분리기, 광변조기, 광스위치 등으로 중요하게 사용되는 방향성 결합기의 원리가 된다.

이상에서 알 수 있듯이 집적광학의 원리는 3차원 광학계에서 사용되는 고전적인 파동광학의 원리와 전혀 다를

바 없음을 알 수 있다.

집적광학에서 가장 중요한 두 가지 요소는 3차원 광학계와는 달리 하나의 기판위에 모든 종류의 소자를 집적해야 하므로 광도파 매질은 능동 및 수동소자 모두를 제작할 수 있는 특성을 가진 재료이어야 하며, 또한 집적된 형태로 광학계를 구성하기 위해서는 미세 형상 제작 기술이 필수적이다. 그 예로 지금까지 많은 연구가 되어지고 거의 모든 종류의 능동 및 수동형 광집적소자가 구현된 LiNbO₃가 지금 현재 크게 각광받지 못하는 이유는 물질 자체의 불안정성(광굴절 효과) 등⁽³⁷⁾ 여러 가지 요인이 있지만 발광, 수광소자 등의 능동소자 제작이 불가능하며 또한 GaAs나 InP 등의 발광, 수광소자의 제작이 가능한 반도체 위에 LiNbO₃ 광도파로를 형성하는 것도 불가능하므로 집적광학이 추구하는 장점을 최대한 이용할 수 없는 혼합형(hybrid) 집적형태로 밖에는 사용되지 못하기 때문이다.^(38,39) 그리고 수동소자 중의 하나인 회절격자 렌즈, 프레넬 렌즈 등은 원리적으로 매우 잘 알려진 것이지만 실제 제작은 전자 빔 리소그라피가 가능해진 다음에 제작된 것이다.

따라서 집적광학이 현재 당면하고 있는 가장 큰 문제점은 새로운 물리적인 이론이 아니라 모든 종류의 광소자 제작이 가능하고, 비선형성이 크며, 안정된 특성을 가진 적절한 광도파물질과 미세구조의 평면 광소자 제작 기술이다. 현재 가장 연구가 많이 되고 있는 물질들은 발광, 수광소자를 포함하여 능동소자 및 수동소자의 제작이 모두 가능한 GaAs, InP 계의 화합물 반도체이나 비선형성(전기광학 효과)이 LiNbO₃에 비하여 10⁻²배 정도밖에 되지 않는 단점이 있다.⁽⁴⁰⁾ 최근에는 Si,^(41,42) 유기물 폴리머(organic polymer)⁽⁴³⁾에 대한 관심이 높아지고 있는데 이것은 Si에서의 전자회로 제작 이점과 폴리머의 높은 비선형성 때문이다. 폴리머 경우는 발광소자를 제외한 모든 광도파로 소자의 제작이 가능하며 GaAs, InP 등의 반도체 기판위에도 광도파로의 형성이 가능하기 때문에 유망한 물질로 생각되고 있다.

현재의 집적광학은 전기광학, 음향광학 등의 효과가 큰 물질을 이용하여 능동소자를 제작하고 있으나 궁극적으로 빛을 이용하여 빛을 조절할 수 있는 완전광소자(all optical device)를 위한 3차 비선형 광도파로 물질의 연구에 중점을 두어야 할 것이다.

V. 구체적 응용 가능성

새로운 차원의 광자 물리학적 개념은 광자소자를 포함

한 다방면에 있어서 광자공학의 응용 및 개발을 유도해 왔으며 그 중에서도 광자공학의 응용분야로서 가장 연구 활동이 활발한 분야는 광통신, 광교환, 광컴퓨터 분야이다.

1. 광통신 분야

광통신 기술은 현재 공중 통신망의 일부인 전화국간 중계방송, 장거리 시외전송, 대륙간 해저 통신 및 근거리 지역 통신망 등의 분야에 널리 쓰이고 있을 뿐만 아니라, 차세대 통신으로 여겨지는 종합정보 통신망 구축에도 크게 기여할 것이다. 앞서 설명한대로 지난 수년간 이루어진 광통신 기술의 눈부신 발전은 광섬유와 화합물 반도체의 발전에 의해 가능하였다. 현재 0.16 dB/km의 저손실을 갖는 석영 광섬유(silica fiber) 및 InGaAsP/InP 레이저, InGaAs 광검출기가 개발되어 초당 수 기가비트(Gbps)의 전송속도를 갖는 광통신 시스템이 상용화되고 있다. 완전 광스위칭(all-optical switching)과 더불어 직접 광증폭(direct optical amplification) 방식 및 솔리톤 전송은 현재 광통신이 추구하는 목표, 즉 완전 광통신 구현의 핵심 부분이다. 직접 광증폭방식이란 종래의 광-전-광 중계기 대신 광-광증폭 중계기를 의미하며, 최근 광섬유에 형광시간이 긴 어븀(erbium)을 첨가하여 직접 증폭함으로써 결합손실이 적고 채널간의 누화가 적은 중계방식이 개발되어 완전 광통신으로 한걸음 다가서게 되었다.⁽³³⁾ 또한 광섬유의 최저 분산과 장 이상의 장파장 대역에서 강도가 높은 초단 펄스가 광섬유를 진행할 때, 광섬유의 분산효과가 광섬유내의 비선형 효과에 의해 상쇄됨으로써 초단 펄스폭이 그대로 유지된채 장거리 전송이 가능한 솔리톤 전송기술은 직접 광증폭 기술과 함께 초고속 신호의 초장거리 전송을 가능하게 할 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이 최근 직접 광증폭 방식과 솔리톤 방식을 사용하여 초단 펄스로 6000 km를 전송하는 실험이 행해진 바 있다.⁽³⁵⁾

2. 광교환 분야

90년대 통신망의 핵심을 이루게 될 광대역 종합정보통신망에서는 CATV/HDTV 등 영상 정보와 고속 데이터까지 포함하는 엄청난 양을 갖는 광대역 신호의 분배 및 교환 수요를 감당하기 위해 이에 맞는 용량을 갖출 수 있는 광교환 기술이 필요하다. 광교환 기술은 빛이 가지는 고유한 특성, 즉 고속처리 능력과 병렬처리 능력 등의 장점을 활용할 수가 있다. 광교환 시스템은 시간분할 시스템, 공간분할 시스템, 파장분할 시스템, 또는 그들의 결합형 시스템 등으로 분할방식에 따라 나눌 수 있

다. 최근 들어서는 시간분할 시스템과 파장분할 시스템을 결합시킨 시스템이 큰 용량의 교환을 효과적으로 실현시킬 수 있음이 보고되고 있다.⁽⁴⁴⁾

광스위치는 광교환 시스템에 핵심이 되는 부분이다. 고속 광교환 시스템을 구축하기 위해 광스위치는 고속 스위칭, 낮은 주입손실과 낮은 잡음, 안정성 등의 특성을 가져야 한다. 그동안 많이 연구되어온 스위칭 소자는 LiNbO₃ 스위치가 있다. 이미 8×8 LiNbO₃ matrix 스위치가 제작되었으며,⁽⁴⁵⁾ 16×16 LiNbO₃ matrix 스위치도 시범동작됨이 보고되었다.⁽⁴⁶⁾ 이러한 16×16 matrix 스위치와 파장다중방법을 이용하여 600 Mb/sec의 bit rate를 갖는 HDTV 128개 회선의 스위칭 시범이 보고되고 있다.⁽⁴⁴⁾ 그러나 LiNbO₃ 도파로 소자는 열적인 안정성이 좋지 못한 단점이 있는데 이는 앞으로 해결되어야 할 과제로 남아 있다. 앞으로는 광스위칭 소자들이 집적되어 광신호처리 기능을 포함한 광집적회로가 출현할 것이다. 위와 같은 광전교환 소자 외에 광 형태로 전달된 정보를 전기신호로 변환함이 없이 광의 상태로 교환하는 전자제어/광교환과 제어까지도 빛에 의해 수행하는 광제어/광교환, 즉 완전 광스위칭이 있다. 완전 광스위칭에서 매질과 빛과의 상호작용을 고려하여 소재를 적절히 선택하면 피코초 이하의 초고속 스위칭이 가능할 것이다.

한편, 자유공간에서의 광배선(optical interconnection)을 통한 병렬적인 광교환이 가능하여 수 cm 정도의 작은 규모로써 10×10 정도의 대용량에 대한 동시교환이 가능할 것이다. 현재 광굴절 매질 등을 이용한 체적 홀로그래를 이용하는 방식이 많은 주목을 받고 있다. 이러한 광교환 기술은 광컴퓨터 분야에서도 핵심기술이 될 것이다.

3. 광컴퓨터 분야

한편, 광자공학은 차세대 광컴퓨터 연구에서도 주목을 받고 있다. 이는 광자공학 기술을 컴퓨터 분야에 적용하게 되면, 빛의 속도로 신호를 처리하여 계산속도의 향상을 가져올 뿐만 아니라, 빛이 갖는 고유의 성질인 병렬성을 이용하여 기존의 전자계산기에서는 거의 불가능한 병렬처리가 가능하기 때문이다. 또한, 대역폭이 수 Gbps로 제한되는 전자교환소자에 비해서, 광교환소자는 수 Tbps 정도의 대역폭을 갖는 것이 가능하다. 전자회로에서는 상호간섭작용 때문에 연결선들의 최소 간격이 존재하는 반면, 광연결에서는 이러한 문제가 발생하지 않고 파워 소모도 적다. 그리고, 시간상수 문제가 발생하는 전자회로와는 달리 동기 신호의 흐트러짐(clock skew)

이 없기 때문에 광자공학기술을 이용한 광컴퓨터 연구는 매우 중요한 응용분야이다.

광컴퓨터에 있어서 중요한 소자 중에 하나가 광쌍안정성 소자이다. 앞절에서 설명한 바와 같이 광쌍안정성 소자란 하나의 입력에 대해 두 개의 안정된 출력상태를 가지는 성질을 가진 소자를 말하며, 이러한 광쌍안정성 소자로 광메모리, 광스위칭, 광논리 등을 수행함으로써 앞으로 광컴퓨터의 핵심부분인 광프로세서(optical processor)가 구성되리라 전망된다. 현재 가장 각광을 받고 있는 광쌍안정성 소자는 다중 양자우물 구조에서 QCSE를 이용한 SEED이며 그 중에서도 다중 양자우물 구조 변조기를 부하로 사용하여 대칭적인 구조를 가지고 있는 S-SEED(symmetric-SEED)의 응용이 기대된다.

한편, 앞서 설명한 광집적소자도 광신호처리, 광정보처리 및 광계산 등에 이용되고 있다. 이러한 소자는 아날로그 영역에서 상관관계(correlation), 컨볼루션(convolution), Fourier 변환, 스펙트럼 분석, 비선형 함수 생성, 파장 다중화, 행렬 벡터 곱셈 등을 수행한다. 그리고 하이브리드 영역에서는 A-D 변환, D-A 변환등에 의한 디지털 곱셈을, 디지털 영역에서는 Boolean logic, 2진 덧셈들을 수행하는 것이다. 이밖에 앞서 설명한 체적 홀로그래를 이용한 칩(chip)과 칩 사이의 광연결 등에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있다.

현재, 광계산 기술의 첨단을 달리고 있는 미국의 AT&T Bell 연구소에서 1989년에 개발한 마이크로 레이저라 불리우는 2차원적인 표면 발광 레이저 다이오드 어레이(surface emitting laser diode array)로 앞으로 신호처리, 패턴 인식, 광계산 등의 영역에서 많은 응용을 위한 연구를 진행하고 있다. 또한 그 AT&T Bell 연구소에서 1990년 2월 세계 최초의 디지털 광프로세서의 시험 제작을 발표하였고⁽⁴⁷⁾ 머지않아 광교환기 내지는 광컴퓨터를 선보이리라 전망된다.

광컴퓨터는 그동안 그 실현성에 있어서 많은 사람으로부터 부정적 시각을 받아 왔으나 이번의 Bell 연구소의 광프로세서 개발은 광컴퓨터를 연구하는 사람들에게 새로운 이정표를 제시한 셈이자 하나의 혁신적인 개념을 심어준 셈이다. 이 광프로세서는 광스위칭소자로서 S-SEED 어레이를 사용하고, 다이오드 레이저와 홀로그래프 격자를 이용하여 공간 광연결을 한 디지털 광프로세서이다. 32개의 S-SEED들로 한 개의 어레이를 이루고, 이러한 어레이 4개가 서로 광에 의해 연결되어 전체적인 디지털 프로세서를 구성하고 있다. 이와 같이 128개의 S-SEED 논리소자로 이루어져 있고, 프로세서 속도도 10^6 bits/sec 정도로서 현재의 퍼스날 컴퓨터보다도

속도가 늦지만, 가까운 장래에 슈퍼 컴퓨터보다 더 빠른 디지털 광프로세서로 개발될 수 있다. 실제로 8,000개의 S-SEED 어레이를 이미 개발하여 실험하고 있으며, 속도도 10^9 bis/sec 를 얻고 있다. 앞으로 1995년까지는 슈퍼 컴퓨터의 30% 정도가 디지털 광프로세서 및 광연결 방식으로 대체될 것으로 전망되어지고 있다.⁽⁴⁸⁾

VI. 결 론

이 글에서는 광통신 및 광정보처리 기술에 필요한 광자재료 및 광소자에 응용되는 광자물리학의 전반적인 흐름을 살펴보았다. 종래의 많은 전자소자의 작동과 재료들의 특성이 고전적 물리학의 차원에서 이해가 가능하였던 반면에 대부분의 광자소자와 재료들의 특성은 양자물리학적 차원에서 설명이 가능하다. 특히 레이저 다이오드와 같은 소자들은 양자적인 특성이 강한 미세구조에서 이루어질 때 광정보처리에 더욱 알맞는 소자가 됨을 보아왔다. 이처럼 앞으로 번성할 광자공학은 종래의 전통적 개념에서 벗어나 새로운 개념적 차원에서 이루어져야 한다고 본다. 앞으로 빛의 고속성 및 병렬성을 이용한 광정보처리 기술의 고속화와 대용량화를 가능케 하기 위해서는 더 나은 광학재료 및 광소자의 개발과 더불어 그에 따른 물리적인 개념의 이해가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] S. Shimada, 전자정보통신학회지(일본), **72**, 134 (1989).
- [2] H. J. Eicher, P. Gunter and D. W. Pohl, "Laser-Laser-Induced Dynamic Grating," in *Optical Sciences*, Vol. 50 (Springer, Berlin, Heidelberg, 1986).
- [3] T. Y. Chang, *Opt. Eng.* **20**, 220 (1981).
- [4] P. Gunter and J. P. Huignard, "Photorefractive Materials and Their Applications I," in *Topics in Applied Physics*, Vol. 61 (Springer, Berlin, Heidelberg, 1988).
- [5] J. S. Stratit and A. M. Glass, *J. Opt. Soc. Am.* **B3**, 342 (1986).
- [6] G. C. Valley, A. L. Smirl, M. B. Klein, K. Bohnert and T. F. Boggess, *Opt. Lett.* **11**, 647 (1986).
- [7] B. O. Seraphin and N. Bottka, *Phys. Rev.* **A139**, 560 (1965).
- [8] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood and C. A. Burrus, *Phys. Rev. Lett.* **53**, 2173 (1984).
- [9] J. S. Weiner, D. A. B. Miller and D. S. Chemla, *Appl. Phys. Lett.* **50**, 842 (1987).

- [10] C. D. Poole and E. Garmire, IEEE J. Quantum Electron **QE-21**, 1370 (1985).
- [11] T. Morioka and M. Saruwtari, Opt. Eng. **29**, 200 (1990).
- [12] D. J. Williams, *Nonlinear Optical Properties of Organic and Polymeric Materials* (American Chemical Society, Washington, DC, 1983).
- [13] T. Yoshimura, J. Appl. Phys. **62**, 2038 (1987).
- [14] A. M. Glass, MRS Bulletin **9**, 14 (1988).
- [15] R. Burzynski, B. P. Singh, P. N. Prasad, R. Ianoi and G. I. Stegeman, Appl. Phys. Lett. **53**, 2011 (1988).
- [16] G. R. Meredith, MRS Bulletin **9**, 24 (1988).
- [17] N. K. Dutta, "Physics of Quantum Well Lasers", in *Heterojunction Band Discontinuities, Physics and Device Applications*, F. Capasso and G. Margaritondo, ed. (North-Holland, Amsterdam, 1987) chapter 13.
- [18] H. Sakaki, Jap. J. Appl. Phys. **28**, L314 (1989).
- [19] Y. Arakawa and A. Yariv, IEEE J. Quantum Electron. **QE-22**, 1887 (1986).
- [20] J. E. Bowers and M. A. Pollack, in *Optical Fiber Telecommunication II*, S. E. Miller and I. P. Kaminow, ed. (Academic Press, Inc., Boston, San Diego, New York, 1988) chapter 13.
- [21] J. L. Jewell, Y. H. Lee, A. Scherer, S. L. McCall, N. A. Olsson, J. P. Harbison and L. T. Florez, Opt. Eng. **29**, 210 (1990).
- [22] J. P. Vander Ziel, R. A. Logan and R. M. Mikulyak, Appl. Phys. Lett. **39**, 867 (1981).
- [23] Y. Silberberg and P. W. Smith, IEEE J. Quantum Electron. **QE-22**, 759 (1986).
- [24] R. Nagarajan, T. Kamiya, A. Kasukawa and H. Okamoto, Appl. Phys. Lett. **55**, 1273 (1989).
- [25] P. J. Delfyett, C. H. Lee, L. T. Florez, N. G. Skoffel, G. A. Alphonse and J. C. Connolly, submitted to Opt. Lett. (1990).
- [26] D. A. B. Miller, Opt. Eng. **26**, 368 (1987).
- [27] G. I. Stegeman and E. M. Wright, Opt. Quantum Electron **22**, 95 (1990).
- [28] S. R. Friberg, A. W. Weiner, Y. Silberberg, B. G. Sfez and P. S. Smith, Opt. Lett. **13**, 904 (1988).
- [29] J. N. Lee and A. D. Fisher, in *Proc. of OSA Top. Meeting on Spatial Light Modulators and Applications*, Vol 8, (Salt Lake Tahoe, NV, June 1988) pp. 60-63.
- [30] R. A. Rice, W. Li and G. Moddel, in *Technical Digest of Optical Computing*, Salt Lake City, Utah, (Feb. 27-Mar. 1, 1989), Paper MF 1.
- [31] P. B. Berra, A. Ghafoor, M. Guizani, S. J. Marcinkowski and P. A. Mitkas, Proc. IEEE **77**, 1797 (1989).
- [32] S. R. Forrest in *Optical Fiber Telecommunications II*, S. E. Miller and I. P. Kaminow, ed., (Academic Press, Inc., Boston, San Diego, New York, 1988) Chapter 14.
- [33] O. Wada, H. Nobuhara, H. Hamaguchi, T. Mikawa, A. Tackeuchi and T. Fujii, Appl. Phys. Lett. **54**, 16 (1989).
- [34] N. A. Olsson et al., in *Tech. Dig. Opt. Fiber Commun. Conf.* (San Francisco, CA, 22-26 Jan. 1990) Post deadline paper PD4-1.
- [35] K. Smith and L. F. Mollenauer, Opt. Lett. **14**, 751 (1989).
- [36] A. Yariv, "Optical Waves in Crystals", (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1984).
- [37] C. H. Bulmer, C. News, February, 20 (1988).
- [38] A. R. Tanguay, Opt. News, February, 23 (1988).
- [39] B. K. Nayer and R. C. Booth, Br. Telecom. Technol. J. **4**, 5 (1986).
- [40] J. T. Boyd, Opt. News, February, 15 (1988).
- [41] J. C. Bean, Science **230**, 127 (1985).
- [42] D. G. Hall, Opt. News, February, 12 (1988).
- [43] P. Panteils, J. R. Hill, S. N. Cliver and G. J. Davies, Br. Telecom. Technol. J. **6**, 5 (1988).
- [44] K. Murakami, in *Technical Digest, Topical Meeting on Photonic Switching*, (The Inst. Electron. Inform. & Comm. Eng., Japan, 1990) p. 205.
- [45] S. Suzuki, et al., in *Technical Digest, Topical Meeting on Photonic Switching*, (The Inst. Electron. Inform. & Comm. Eng., Japan, 1989) p. 168.
- [46] P. J. Duthie, et al., in *Technical Digest, Topical Meeting on Photonic Switching*, (The Inst. Electron. Inform. & Comm. Eng., Japan, 1990) p. 32.
- [47] TIME Magazine, (Feb. 12, 1990) p. 42.
- [48] A. R. Tanguay, Jr., Optics News **14**, 23 (1988).

A Review on the Photonic Physics for Optical Information Processing Technology

Kyon Hon Kim, Chong Hoon Kwak, Hak Kyu Lee, Wol Yon Hwang and El-Hang Lee
Electronics & Telecommunications Research Institute, Daeduk Science Town, Daejeon, Korea
Research Department

Yong Tak Lee
Photonics Department
Electronics & Telecommunications Research Institute, Daeduk Science Town, Daejeon, Korea

(Received: August 24, 1990)

This paper presents an overview on the present status and future trends of photonic physics and engineering as applicable to optical materials and devices that would enable optical information processing and optical communication technologies of the future. Covered subjects include semiconductor quantum devices, organic materials, photorefractive physics, quantum effect, non-linear processing optical amplification, memory, integrated optics, and applications in all-optical communications and processing, including photonic switching.