

## 광교환 기술의 물리적 개념과 접근 방법

### Photonic Switching : Physical Concepts and Approaches

이 일 항

한국전자통신연구소 기초기술연구부

앞으로 급증하는 막대한 정보의 처리를 위하여 기존의 전자공학적인 교환방식의 한계점을 광자공학적인 방식으로 처리해 볼려는 일환으로 광교환에 필요한 소재 및 소자, 교환방식에 근본이 되는 물리적인 개념과 광교환의 실현을 위한 접근방식에 대해 살펴보고자 한다.

#### 1. 서 론

오늘날 통신에 있어서 음성이나 정지화상등의 소규모적인 데이터의 교환이 이루어 지고 있으나 앞으로 동화상, HDTV, 컴퓨터간의 데이터 교환등을 포함한 대규모 정보의 처리가 요구되는 추세에 있는데 기존의 전자식 교환 방법으로는 그러한 대규모 정보 처리에 근본적인 물리적 한계를 가지고 있다. 대표적인 한계성으로는 전자소자가 가지는 자체 저항과 정전용량으로 주어진 RC 시간상수와 또 매질내에서의 유효질량에 의한 이동 속도의 감소로 소자의 작동속도가 피코 초( $10^{-12}$  초) 이상에 머물고 또 전자기적인 간섭에 의해 병렬처리의 곤란한 점등이 있다. 반면에 빛을 이용한 교환방법은 빛 자체의 고 주파수에 의해 큰 대역폭이 가능하고 또 짧은 파장과 전자기적인 간섭의 배제에 의해 공간상에서의 병렬처리가 가능하여 앞으로 대응량에 유리한 점이 부각되고 있다.

이러한 빛을 이용한 교환 방식, 즉 광교환 방식의 연구는 그동안 획기적인 발전을 거듭해 온 반도체 전자 소자들의 기술이 이제는 집적도와 용량면에서 거의 극치에 가까

워 가는 반면에 근간에 이루어진 반도체 레이저, 광검출기, 광섬유등을 비롯한 여러 광학소자들의 대두 및 성능향상으로 더욱 활발해 지고 있다. 특히 반도체 레이저의 발전은 레이저 광의 시간적 고속성 및 공간적 병렬성 외에 가간섭성, 단색성, 지향성, 집광성, 고속성 및 초단 펄스 발생등의 특징을 이용한 광정보처리 시스템에 대한 연구를 촉진시키고 있다. 아울러 레이저 광의 고출력성은 종래의 비가간섭광(incoherent light)로써는 보기 힘든 비선형 광학효과에 대한 연구와 응용을 가능하게 하였다. 더우기 레이저광을 이용해 그 자체의 고유 진동수에 상응하는 펨토 초(femtosecond) 정도의 짧은 광펄스가 얻어지고 있고, 또 반도체 재료 및 소자 제작 기술의 발달로 미세구조를 갖는 광학소자들이 개발되어 짐으로써 광정보처리 기술에 더욱 큰 기여를 하고 있다.

빛을 이용한 정보처리에 있어서는 여러가지 장점이 있음에도 불구하고 아직까지 벌크(bulk)한 광학 부품들의 사용으로 전체적인 부피가 큰 단점이 있고 또 전자공학적인 방식보다 제어하는 능력이 취약한 단점도 있다. 광의 고유한 특성을 이용한 제어 방법으로는 공간 제어, 주파수 (혹은 파

장) 제어, 시간 제어, 에너지 제어등이 있는데, 공간 제어, 주파수 (혹은 파장) 제어, 에너지 제어등은 전자공학적인 방식으로 실현하기 어려운 기능들이다. 비록 전자공학적인 방식보다 제어 기능이 취약하나 광학적 방식이 갖고 있는 잠재력에 의해 광소자, 광집적회로의 실현 및 고성능화, 광논리, 광연산 처리회로 및 광배선등을 비롯하여 광정보처리 시스템의 기본 개념 및 설계에 대한 연구가 진행되고 있는데, 당분간 전자식 제어와 광기능 소자들이 결합된 광전소자 및 광정보처리 방식이 추후되어 질 전망이다.

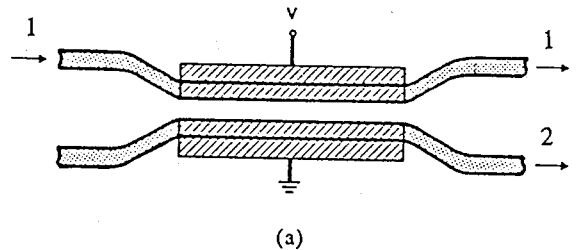
본 고에서는 현재 추후 되어지고 있는 광정보처리의 한 예로써 광교환에 관련된 광학소자 및 광교환 방식, 시스템등을 비롯하여 이들의 물리적 배경과 기술적인 접근방식들에 대한 소개를 하고자 한다.

## 2. 광교환을 위한 방식 및 시스템의 물리적 배경 및 접근방식

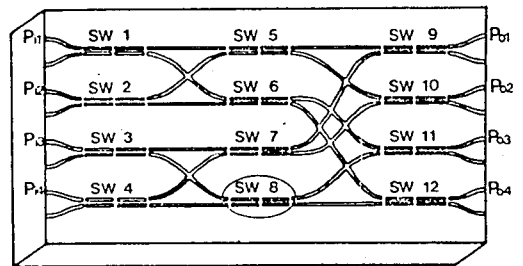
### 2.1 공간 분할 광교환 방식 개념

공간분할 광교환 방식은 2차원 상에서 입력 광신호의 진행방향을 변화 시킴으로써 교환을 이루는 방식으로 주로 광도파로 매트릭스 스위치를 사용하여 구성한다. 공간분할 광도파로 매트릭스 스위치에 사용되는 개별적인 소자는 여러가지 형태가 있지만 그 중에서 가장 일반적으로 사용되는 것이 방향성 결합기(Directional coupler) 형태로서 그림1(a)와 같은 구조를 갖고있다.<sup>(1)</sup> 이 소자는 가해지는 전압의 ON, OFF에 따라 광의 진행 경로가 1-->1 (straight through) 또는 1-->2 (cross-over)가 되는 기능을 가지고 있다. 그림 1(b)는 이러한 방향성 결합기들로 이루어진 단순한 나무형태 구조 (simple tree structure)의 4x4 매트릭스 스위치를 나타내고 있다. 입력채널 1로 입력된 광신호는 SW1, SW5, SW9이 ON상태(straight through)이면 출력1로 출력되고, SW1 과 SW 10이 ON 상태이고, SW5가 OFF상태( cross-over)이면 출력2 로 출력되게 된다. 이와같이 개별적인 스위치들의 동작상태를 외부에서 조절해 줌에 따라 광도파로

를 이용한 공간분할 광교환이 가능하게 된다. 한편 개별소자들의 연결방식에 따라서 위와 같은 단순 나무형태구조 뿐만 아니라 Clos, Benes, Banyan, Perfect shuffle, Crossbar구조등과 같은 많은 시스템 구조가 있다. 이러한 연결방식은 광손실(optical loss), 광신호 누화(cross talk), 매트릭스 스위치의 크기등을 고려해서 사용 목적에 따라서 적절하게 선택된다.<sup>(2-5)</sup> 공간분할 광교환 방식은 시스템의 간단함과 광대역성 때문에 가까운 장래에 광대역 광교환 시스템으로 사용될 가능성이 높은 방식이다. 이러한 매트릭스 스위치를 만들기 위한 재료는 LiNbO<sub>3</sub> 가 대표적이며, GaAs, InP, 유기물등의 전기광학 효과를 갖는 물질들이다. 현재 LiNbO<sub>3</sub> 매트릭스 스위치를 이용하여 4회선의 780Mbps 급 HDTV 신호분배 기능 및 32회선의 100Mbps급 화상 전화 교환 기능을 갖고 있는 공간분할 광교환 시스템이 보고되고 있다.



(a)



(b)

그림 1. (a) 방향성 결합기 스위치 구조.

(b) 단순한 나무형태의 4X4 매트릭스 스위치.

2.2 시간분할 광교환 방식 개념

시분할 광교환 방식은 공간분할 방식이 입력신호들의 공간적인 진행경로를 바꿔주는 것에 비하여 하나의 통로를 따라 순차적으로 입력되는 정보들을 시간축상에서 그 순서를 교환하는 것이다. 그림 2는 시간분할 스위칭 시스템의 구조의 한예를 나타낸 것이다.<sup>(6)</sup> 시간분할 광교환의 원리를 살펴보면 다음과 같다. 시간 다중화된 신호들은 시분할 교환기의 입력쪽에서 역다중화되어 각각의 경로로 분배된다. 각 경로로 분배된 신호는 광메모리 속에 일시 저장되고, 원하는 시간순서에 따라서 다시 읽혀져 바뀌어진 시간순서(time slot exchange)로 다중화 되어 출력된다. 따라서 시간분할 광교환 시스템의 실현을 위해서는 시간 다중화기와 역

다중화기 그리고, 고속 광 메모리 소자가 필수적이다. 최초의 시분할 광교환 시스템의 광메모리 소자는 광섬유 지연을 이용하여 제작되었다. 이후 광쌍안정 레이저 다이오드를 이용하여 256Mbps 와 512 Mbps의 성능을 나타낸 시분할 광교환 시스템이 보고 되었고, 최근에는 2Gbps급 광쌍안정 레이저 다이오드가 보고되어 더욱 빠른 시분할 광교환 시스템이 기대되고 있다.<sup>(8)</sup>

2.3 파장분할 교환개념

파장분할 광교환 방식은 통신 파장을 다중화하여 각 파장별로 서로 독립적으로 교환이 일어나는 방식이다.<sup>(9)</sup> 교

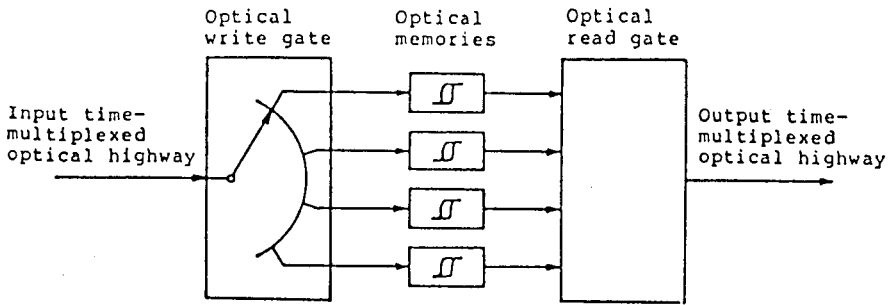


그림 2. 시분할 광교환 시스템구조.

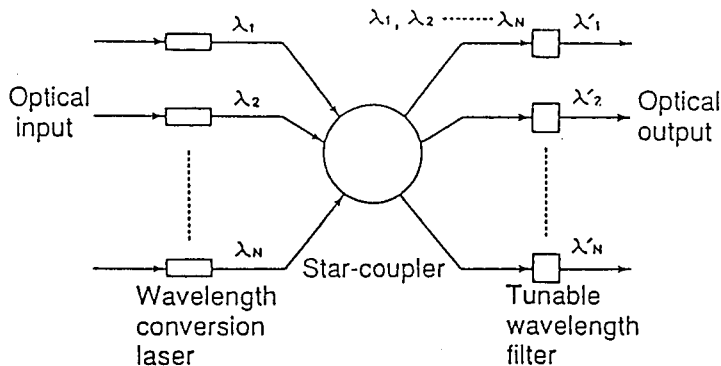


그림 3. 파장분할 광스위칭의 원리.

환 가능한 회선의 용량은 파장다중화 수에 의해 결정되는데, 이는 채널간 파장간격 및 변조 가능한 파장 범위에 의해 정해진다. 이 방식에 필요한 핵심 소자로는 파장변환기와 가변과장필터등이 있는데, DFB(Distributed Feedback)형 혹은 DBR(Distributed Bragg Reflector)형 반도체 레이저들이 연구되고 있다.

그림 3에 파장분할 스위칭 방식의 기본개념도를 도시하였다. N개의 파장을 사용하는 것으로, 각각의 광입력신호는 파장변환 레이저에 의해 N개 파장중의 하나로 변환된다. 이러한 광신호들은 스타 커플러(Star coupler)에 의해 합쳐지고, 출력부에 있는 가변과장필터에 의해 원하는 파장만을 선택하여 출력 광신호를 얻게된다. 따라서, 방송용 다중 연결망으로도 쉽게 사용될 수 있으며, 각 회선의 전송속도와 무관하게 교환이 일어날 수 있고, 스위칭이 반드시 고속으로 이루어질 필요가 없다는 장점을 갖게 되므로 대규모 광대역 스위칭 시스템을 실현하는데 유력한 방식으로 연구되고 있다.

2.4 자유공간분할 교환방식 개념

자유공간분할 스위칭은 공간분할 스위칭의 한 방식으로 2차원 평면상에서 스위칭이 이루어 지는 것이 아니라 2차원 배열의 광신호를 3차원 공간상에서 스위칭하는 방식이다. 따라서 10 $\mu$ m 정도의 채널당 크기를 갖는 고밀도 공간다중 스위칭이 가능하게된다

그림4에 공간 광변조기를 이용한 자유공간 광스위칭의 한 예를 도시하였다.<sup>(10)</sup> N개의 입력신호를 N개의 출력 채널로 스위칭하기 위해서는 NxN 개의 스위칭 채널을 갖는 공간 광변조기와 광집속 렌즈등이 사용된다. 그리고, 그림 5에 자유공간 디지털 스위칭의 한 예를 도시하였다.<sup>(11)</sup> 이 스위칭 방식은 AT&T Bell 연구소에서 제안한 방식으로, 광연결부(crossover interconnect), 광원 어레이 발생부(binary phase grating), 빔결합(beam combination), 광 논리소자 어레이(S-SEED array)등 4부분으로 이루어져있다. S-SEED(Symmetric Self Electro-optic Effect Device) 어레이

이는 최근에 가장 흥미를 끄는 논리소자 중의 하나로서, 32x32 어레이가 실제 스위칭에 사용되어 실증된 바 있으며, 수 년내에는 1000x1000 어레이의 S-SEED도 실현될 수 있을 것으로 전망된다. 이러한 공간분할 스위칭 방식이 실제 통신 시스템에 적용되기 위해서는 아직도 많은 연구가 필요하지만, 대규모의 교환망을 가능케하는 유력한 방식임에는 틀림이 없으며, 광고판뿐만 아니라 광컴퓨터 연구에서도 많은 응용 가능성을 갖고 있다.

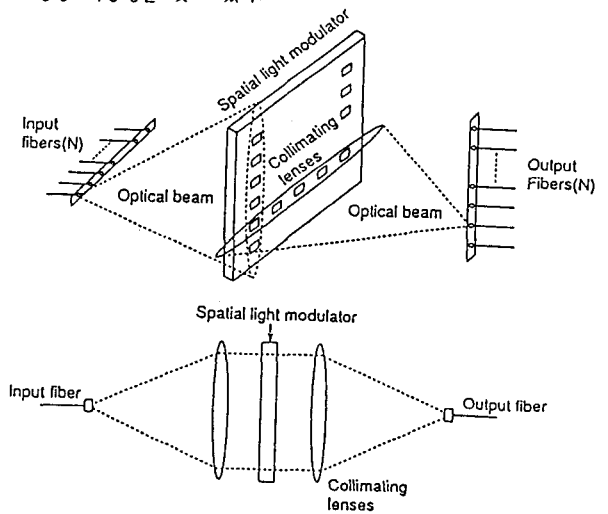


그림 4. 공간광변조기를 이용한 자유공간 광교환.

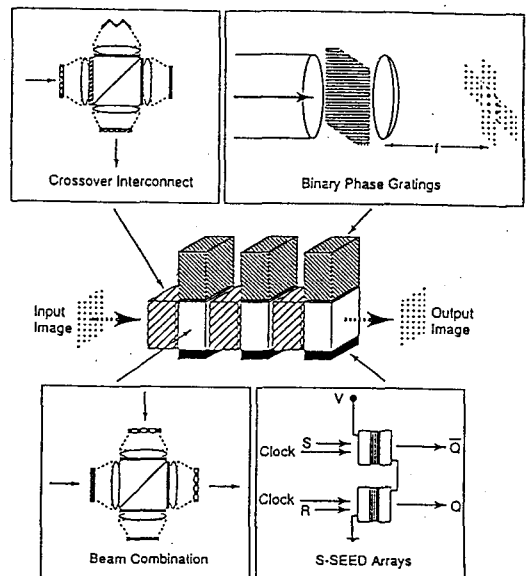


그림 5. S-SEED 어레이를 이용한 자유공간 디지털 광교환.

### 3. 광교환을 위한 기초물리현상

광교환 또는 광신포 처리에 있어 근본이 되는 물리적 현상은 전기기적인 영향에 의한 매질내의 유전율(dielectric constant)의 변화이다. 이는 곧 외부전장이나 빛 자체의 세기에 의해 그 매질의 굴절율이나 흡수 계수를 변화시킴으로써 이를 이용한 광학소자로 빛을 제어한다. 근래에 와서 광학 성질이 뛰어난 벌크(bulk)한 광학소재와 초미세 구조를 가진 반도체 재료들의 성장 기술이 발전하고 또 관련된 광학적 성질 및 현상들이 규명됨으로써 이러한 특성을 이용한 광소자의 연구와 더불어 광정보 처리 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이들 광소재 및 소자들에 기본이 되는 물리적 현상을 크게 벌크 매질에서 적용되는 현상과 초미세 반도체 구조에서 적용되는 현상으로 나누어 설명해 보면 다음과 같다.

#### 3.1. 양자크기 효과 (Quantum Size Effect)

초미세 구조를 가진 반도체 재료의 성장 기술인 MBE, MOCVD 등과 같은 에피택시(epitaxy) 성장기술의 발전으로 적자상수가 거의 같고 밴드 갭(band gap)이 서로 다른 반도체 물질들을 수백Å 정도의 얇은 두께를 가진 박막층(epilayer)으로 성장할 수 있게 되었다. 밴드 갭이 큰 반도체 화합물질로 이루어진 두개의 박막층 사이에 밴드 갭이 작은 화합물질로 이루어진 얇은 박막층을 성장시키고 그 층의 두께가 전자의 물질파장(de Broglie wavelength)에 상응하는 정도가 되면 전자는 주로 이 밴드갭이 작은 물질층에 머무르게 되고 이때 전자의 에너지는 양자화되어 불연속적인 값을 갖게 된다. 이때 밴드갭이 작은 물질층을 양자우물(quantum well)이라 하고 이 우물에 전자들이 갇히는 현상을 양자속박현상(quantum confinement phenomena)이라 한다. 그리고 이 양자우물 구조에 있는 밴드갭이 큰 물질층을 양자장벽(quantum barrier)이라 부른다.

보통 벌크(bulk)한 반도체 매질에 의한 광흡수는 광자의 에너지가 밴드갭과 같을때 시작되어 광자의 에너지가 증가함에 따라 연속적으로 증가한다. 반면에 양자우물 구조로

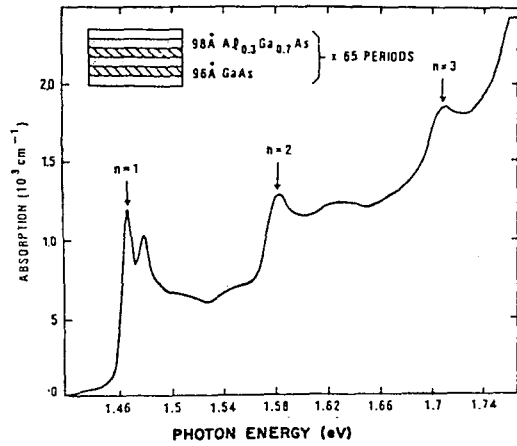


그림 6. 전형적인 GaAs/AlGaAs 양자우물 구조의 상온 광흡수 스펙트럼.

성장된 매질에 의한 흡수 스펙트럼은 양자우물 내에서의 전자와 정공(hole)의 불연속적인 에너지 분포에 의해 그림6에서 보여지는 바와 같이 연속적인 계단의 형태를 갖게 된다. (12) 그림 6은 1.42 eV의 밴드갭을 가진 GaAs의 96Å층에 1.80eV의 밴드갭을 가진 Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As의 98Å층을 교대로 성장시켜 얻은 양자우물구조에 의한 흡수 스펙트럼을 보여주고 있다. 이 흡수 스펙트럼의 각 계단이 시작되는 부분에 여기자 피크(exciton peak)라 불리는 뾰족한 피크들이 보여지고 있는데, 이는 전자와 정공이 각각 전도대(conduction band)와 가전대(valence band)에 생성되어 작은 운동에너지를 가질 경우 전자와 정공 사이의 전기적인력 때문에 결합 상태를 이루어 여기자(exciton)를 형성하면서 일어나는 흡수 피크들으로써 여기자 흡수(exciton absorption)라고도 한다. 여기에서 n = 1,2,3,...은 광흡수에 참여하는 전자와 정공의 에너지의 준위를 나타내며 그림 7에 그 에너지 준위들이 보여지고 있다. 벌크한 GaAs의 경우에 여기자의 결합에너지는 4meV 정도이며 반경은 30nm 정도이므로 전장을 걸면 아주 쉽게 이온화되고, 온도가 상승함에 따라 증가하는 광포논(optical phonon)과의 충돌때문에 선평이 아주 커지게 되어 극저온에서만 관찰 될 수 있다. 그러나 양자우물구조의 경우에는 그림 7에 보여지는 바

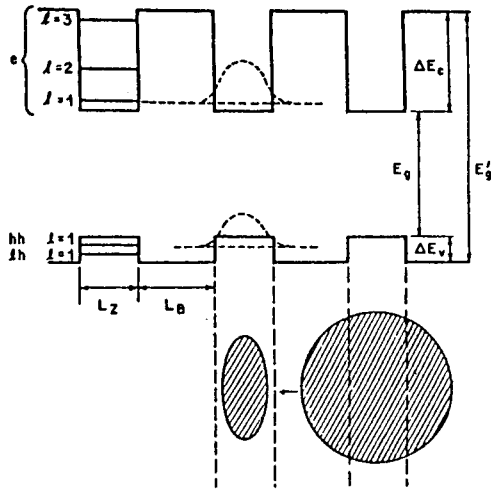


그림 7. 양자우물에서의 에너지 준위, 파동함수, 여기자의 크기. Gaussian 모양의 점선은 전자와 정공의 파동함수를 나타내며, 빗금쳐진 큰 원은 덩어리에서의 여기자를 빗금쳐진 타원은 양자우물안의 여기자를 나타낸다.

와 같이 전자와 정공의 운동이 10nm 정도의 좁은 양자우물내에 속박되어 전기적 인력에 의한 결합에너지가 증가하여 벌크한 반도체와 달리 실온에서도 여기자 피크의 관찰이 가능하다.

벌크한 반도체에 전장이 가해지면 전도대가 기울어지게 되므로 전자가 보는 유효 밴드갭(effective band gap)이 줄어들게 되어 원래 밴드갭보다 작은 광자 에너지에서의 흡수는 증가하고 그 보다 높은 에너지를 갖는 광자의 흡수는 감소하는데 이를 Franz-Keldysh 효과라 한다. 그리고 전장속의 여기자는 전장에 의한 이온화 현상(field ionization) 때문에 전장의 세기가 증가함에 따라 여기자의 수명이 단축되게 되고, 흡수 피크의 선폴이 늘어나고, 전자와 정공 사이가 멀어지게 되어 결합 에너지가 10% 이내에서 감소하게 되는데 이러한 효과를 Stark 효과라 한다. 이러한 두가지 효과는 극저온에서 아주 약한 전기장 안에서만 관찰이 가능하다.

반면에 양자우물구조에 대해서는 전기장이 양자우물에 수직인 방향으로 걸릴 경우에는 전자와 정공의 에너지 준위가 이동하게 되며(Stark effect) 전자와 정공의 공간분포가 달라지게 되어 진동강도와 전체 흡수가 줄어들며 흡수대가 장파장쪽으로 이동하게 된다. 양자우물내에서는 강한 전장을 걸어 주더라도 전자와 정공이 양자우물에 갇혀 강한 결합상태를 유지함으로써 여기자 흡수 피크의 선폴이 별로 변하지 않고 그대로 유지된다. 이처럼 강한 전장하에서 흡수 가장자리와 여기자 피크가 낮은 에너지쪽으로 많이 움직이고 여기자 피크가 날카롭게 관찰되는 효과를 양자속박 Stark 효과(Quantum Confined Stark Effect)라 한다. 이와같이 반도체 레이저에서의 흡수율 효과는 Kramers-Kronig 관계식에 의해서 굴절율의 변화와 관련되어 있으며, 이와 같은 흡수율과 굴절율 변화는 반도체 광학소자의 작동에 응용된다.

### 3.2 비선형 광학 효과

앞 절에서 우리는 미세구조의 양자우물 구조에서 일어날 수 있는 양자효과에 대해 살펴 보았다. 본 절에서는 양자우물 구조를 포함한 벌크(bulk) 광학재료에서 일어날 수 있는 비선형 광학 효과에 대해 종합적으로 살펴 보기로 한다.

비선형 광학재료의 광통신 및 광교환용 소자로 응용하기까지의 흐름을 살펴보면 그림 8과 같이 정리할 수 있다. 벌크, 광섬유등의 형태를 갖는 비선형 광학재료에 광파(전자기파)가 입사하면 재료내의 비선형 광학 효과에 의해 광입력과 광출력이 선형으로 대응하지 않는 광비선형 현상(광파장 변환, 광 쌍안정 등)이 일어난다. 이러한 광 비선형 현상을 이용해서 광스위치, 광메모리등의 비선형 광학 소자가 구성되고 이 들을 응용한 다양한 응용 기술이 가능하게 된다. 표 1은 그림 8의 정리를 따라서 비선형 광학현상과 그 응용기술을 광통신, 광교환을 중심으로 종합하였다. 이러한 응용기술의 기본이 되는 비선형 광학 재료는 유기물, 무기물, 유리(glass), 반도체 등으로 구분하고 있다. 표 1에 표시되어 있는 비선형 광학소자 가운데 2차 비선형 현상을

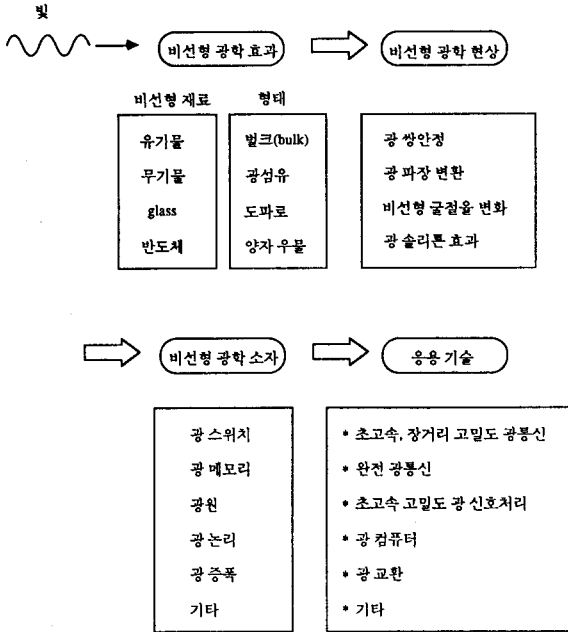


그림 8. 비선형 광학재료의 기초물리현상과 그 응용기술.

이용한 무기물 결정 소자는 어느 정도 실용화에 가까이 접근해 있는 것도 있다. 또 3차 비선형 현상을 이용한 소자에 대해서는 광증폭, 광메모리, 광논리소자등 다양한 기능의 소자가 연구 개발되고 있다. 비선형 광학 재료의 광통신, 광교환 소자로의 응용에 있어서 향후 전망 및 고려되어야 할 사항에 대해 살펴보자. 2차 비선형 효과 재료의 소자응용에 있어서 LiNbO<sub>3</sub>, β-BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (BBO), BSO등 무기물 결정이 일부 실용화 단계에 있고, 광스위치, 광변조기, 공간변조기, SHG 소자등 구체적인 소자가 제작되고 있지만 비선형 광학 특성상 개량해야 할 점도 많이 있다. 유기물 결정에는 분자 설계가 용이할 뿐 아니라 높은 SHG효율과 전기 광학 효과가 기대되고 있으며, 아울러 무기물 결정, 유기재료, 유리재료, 반도체 재료를 포함해서 2차 비선형 효과 응용소자의 연구가 활발히 전개될 것으로 예상된다. 3차 비선형 재료에는 광스위치, 광변조기, 광메모리, 광논리소자, 광증폭소자, 펄스광원, 파장변환소자등 각종의 광통신, 광교환 기본소자에 대해 연구되고 있다.

향후 광교환 기술을 포함한 광통신 기술에는 광섬유통신시스템의 확대가 불가피하고, 초고속화, 장거리화, 완전 광화로 향한 연구 개발이 더욱 활성화 될것이다. 따라서, 이를 위해서는 비선형 광학소자, 특히 고속 광변조기, 광게이트, 광스위치, 광증폭기, 광메모리, 교환용 광스위치등의 연구 및 이에 기반이 되는 비선형 광재료의 개발이 요구된다.

#### 4. 광교환 소자

광의 고유특성인 고속성과 병렬성은 종래의 전자식 교환소자의 한계를 극복하는 광 교환소자의 실현을 가져옴으로써 2차원 처리가 가능한 광프로세서, 초고속 광컴퓨터 및 광통신 시스템의 구현이 가능해 졌다. 본 절에서는 반도체 양자우물 구조를 이용한 광소자와 광도파로에서의 광전효과를 이용한 소자 및 광섬유를 이용한 초고속 광스위치 소자 부문에서 대표적인 몇가지 소자를 골라 그 원리 및 개요를 다루어 본다.

	비선형 광학 현상	광학소자	응용 기술
2차 비선형 광학 효과	파장 변환 * 고조파 발생 * 광파 혼합 * 광 파라메트릭	광원, 광 논리 상광 소자	광 디스크 고속 광검출
	전계 굴절율 효과 * 전기 광학 효과 * 광굴절 효과 * 양자 속박 Stark 효과	광 변조기 광 스위치	고속 광 전송 광 교환
3차 비선형 광학 효과	비선형 산란 * 유도 Brillouin 산란 * 유도 Raman 산란	광 증폭 소자 파장 증폭 소자	장거리 광 전송
	광 솔리톤 효과 * 변조 불안정성 * 4광파 혼합	고속 광 펄스 발생 소자 고속 광 스위치	초고속 광 전송
	비선형 굴절 효과 * 광 Kerr 효과 * 광 Stark 효과 * band-filling 효과	고속 광 스위치 소자 고속 광 논리 소자	고속 광 전송 광 교환
	광 쌍안경 * 여기자 흡수 포화 * band-filling * laser 동작	광 메모리 광 논리 소자 병렬 처리 소자	광 교환
기타	유도 발광 (레이저 발진)	광원, 광 증폭 소자 광 스위치 광 논리 소자	장거리 광 전송 광 교환
	광 화학 hole-burning photon echo	고 밀도 광 메모리	광 교환
	위상 공여 * 축퇴 4광파 혼합 * 광 굴절 효과	위상 보정 소자	영상 전송

표 1. 비선형 광학현상과 응용기술현황

( 광통신 기술을 중심으로 ).

4.1 반도체 광스위칭 소자

최근의 반도체 결정의 성장 기술은 급격히 발전해 왔다. MBE나 MOCVD와 같은 첨단 박막 결정 증착 기술을 통해 두개의 서로 다른 반도체 성분을 매우 얇은 다층 구조를 갖는 이중구조 다중우물로 가공할 수가 있게 되었다. 이러한 반도체 양자우물 구조를 이용한 대표적인 광스위칭 소자로써 SEED (Self Electrooptic Effect Device) (12,13)와 GaAs Fabry-Perot Etalon이 있다. 이중에서 SEED는 그림 9에서와 같은 반도체 다중우물 구조(multiple quantum well structure)에 수직으로 걸어주는 전기장의 세기에 따른 양자우물내에 속박된 exciton 흡수정점(absorption peak)의 적색 천이(red shift)와 흡수율의 변화, 즉 양자속박 Stark 효과(Quantum Confined Stark Effect; QCSE)를 이용하여 다중 양자우물 구조를 통과하는 빛의 세기 변화를 조절하는 변조기의 일종으로써, 입사하는 빛의 세기에 따라 유도된 광 전류가 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 10에서 보여지며 다중 양자우물층에 수직 방향으로 흐르는 광전류(photo current)에 따라 변하는 전압에 대한 exciton의 흡수정점의 이동을 보여 준다. 그림 10의 점선으로 나타내어 있는 동작 과정에 따라 이 소자는 단순한 modulator 또는 SEED로써 그 이용을 달리 할수있다. SEED는 RC 시간상수에 의해 전계가 가해지는 시간 때문에 수 ns 정도로 스위칭 속도가 느린 것이 단점이다. 그러나 미세공정기술의 발전으로 매우 작은 면적에 고집적도의 2차원 SEED 배열을 실현함으로써 초당 수백 Giga 비트 이상의 정보를 처리할 수 있다. SEED는 다중 양자우물 구조 변조기에 여러 종류의 전자소자를 부하로써 직렬로 연결한 구조를 갖고 있는데 그 중에서 S-SEED(Symmetric-SEED)는 또 하나의 다중 양자우물구조 변조기를 부하로 사용하여 대칭적인 구조를 가지고 있다.(14) S-SEED는 궁극적으로 초당  $10^9$ 개 이상의 광신호를 교환할 수 있으며 특정한 강도에서 임계치(threshold)나 트리거(trigger)에 의하지

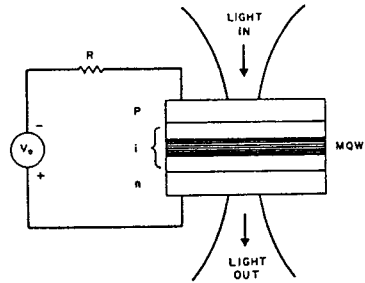


그림 9. 광쌍안정을 가진 SEED(self-electro-optic effect device)의 구조도.

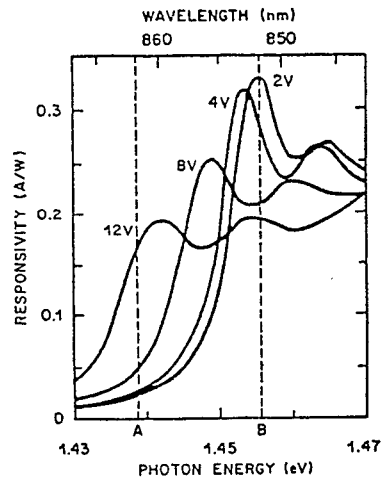


그림 10. SEED로 사용되는 양자우물 구조에 역으로 인가된 전압에 대한 반응도 (responsivity : 광전류/입사광의 세기).

않고 두개의 입사광선의 비에 의해서 스위칭이 일어 나므로 임계 바이어스(critical biasing) 문제가 해결되며, 시간 연속 이득(time-sequential gain)에 의해서 큰 이득을 얻을 수 있고, 또한 입출력 특성에서의 광쌍안정 특성 때문에 광 래치(optical latch), NOR 게이트등과 같은 광논리 소자의 이용도가 매우 높은 소자이다. 양자우물 구조를 이용한 또 하나의 반도체 소자는 FP-Etalon이다.(15,16) 이 소자는 SEED와 더불어 광 스위칭 소자로써 가장 각광을 받는 소자중의 하



나이다. QCSE 효과를 이용하여 가해진 전계에 의해 exciton의 흡수정점이 변화되는 것을 이용하는 SEED 소자와는 달리 FP etalon은 광입력의 세기에 따라 매질의 굴절률을 변화시켜 흡수 정점에 해당하는 파장을 변화시킨다. Fabry-Perot 간섭계는 일정한 거리만큼 떨어진 두개의 평행한 부분반사 거울로 구성되어 있다. 이러한 cavity well에 적절한 매질을 채워 넣음으로써 입사된 빛의 흡수를 및 굴절율을 입사광 강도에 따라 변화케 한다. 흡수율이 cavity내의 광 강도의 증가에 따라 감소하는 매질을 포화 흡수매질이라 하고 초기 상태의 불투명했던 물질이 입사광의 세기가 커짐에 따라 매질의 굴절율이 변화하며, 따라서 거울 사이의 광거리(optical length)를 변화시킨다. 이러한 효과는 etalon의 공진파장을 이동 시킨다. 보통 흡수를 변화와 굴절을 변화는 함께 일어나며, 사용 파장 영역에 따라 둘 중의 하나만이 주된 변화가 될 수 있다. FP-etalon에서 가장 중요한 요소는 공진기(cavity) 내의 비선형 매질의 선택이다. 비선형의 크기가 소자의 요구 전력을 직접적으로 결정하기 때문에 굴절율의 비선형 변화가 큰 매질이 바람직하다. 이상적으로는, 매질이 동작파장에서 투명하거나, 적어도 흡수 손실이 흡수포화 되어야 한다. 또, 고속동작을 위해서 매질의 비선형성이 입력 광의 세기에 빨리 반응하여야 한다. 현재까지는, 직접 밴드 갭(direct band gap) 반도체가 비선형성이 크고, 빨리 스위칭되고, 제작기술이 잘 발달되어 있고, 순도와 표면의 질이 좋아서, 가장 좋은 매질로 알려져 있다. GaAs소자는 흡수 밴드 가장자리(absorption band edge) 근처에서 대단히 큰 비선형성 굴절률을 보이고 상온에서 동작이 가능할 뿐만 아니라 속도가 대단히 빠르다. 특히 양자우물구조의 GaAs-GaAlAs etalon은 비선형 효과가 보다 크고, 다이오드 레이저파장에서 동작 시킬 수 있는 장점이 있다.<sup>(15)</sup> 양자우물을 이용한 반도체 FP-etalon소자는 속박된 exciton의 여기와 재결합에 의해 결정되는 life time에 따라 스위칭 속도가 수 ps 정도로 SEED 소자보다 훨씬 빠르긴 하지만 큰 비선형 효과를 얻기 위하여 강한 흡수를 유도해야 하므로 소자의 heating 문제가 심각하게 대두된다.

#### 4.2 전기 광학 변조기

광통신에서 사용하는 주입 전류에 의한 직접 변조 방식은 양자우물 레이저(quantum well laser) 에서 50 GHz정도가 최대일 것으로 예측되고 있다. 파장의 처핑(chirping)에 의한 심볼간의 간섭(inter symbol interference) 및 레이저 내의 광자 수명과 전송자 수명으로 인해서 이 이상으로 변조 속도를 올릴 수 없으므로 전기광학 변조에 의한 외부 공진기(external cavity) 변조 방식을 사용하여야 한다. 전기 광학 변조기란 반도체, 강유전체, 유기물 등의 전기 광학매질에 외부의 전기장을 가하여 이 매질을 통과하는 광의 투과상태를 변화 시키는 소자를 의미한다. 주로 도파로형을 사용하며 결합기나 간섭계를 구성하여 전압에 따른 결합율의 변화(1/0)나 간섭계의 위상차 변화( $\pi/0$ )를 이용한다. 많은 물질 중에서 현재까지는 LiNbO<sub>3</sub>가 가장 많이 연구되어 위상 변조기, 진폭 변조기, 스위치등의 상용화가 이루어지고 있다. 그러나 LiNbO<sub>3</sub> 도파로는 온도에 의한 작동조건의 변화, 편광의존성, 주입 손실, 채널간의 잡음, chip의 크기 등에 문제를 안고 있다. GaAs등 화합물 반도체는 전기광학 효과는 작으나 OEIC와의 모노리틱한 집적(monolithic integration) 가능성과 높은 속도의 변조가능성 때문에 현재 많은 연구가 진행 중이다. 전극 구조는 그림 11과 같은 진

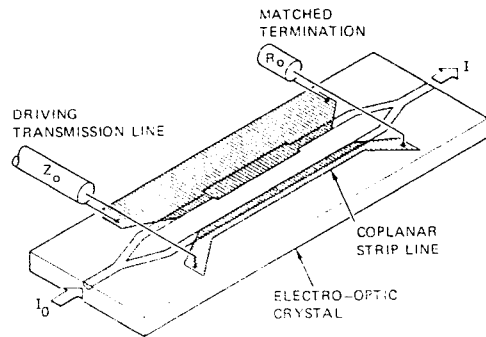


그림 11. Mach-Zehnder간섭계형 traveling-wave 전기광학 변조기.

행파(traveling wave)형을 주로 사용하는데 이와 같은 구조는 변조 전장의 진동수와 사용하는 광의 진동수 사이의 굴절율 차이에 의해서 변조 속도가 제한되며  $\text{LiNbO}_3$ 인 경우 40GHz 이고, GaAs인 경우 100GHz까지 보고 되고 있다.<sup>(17,18)</sup> 이러한 경우 고속 변조 외에도 직접변조 방식보다 감쇠율(extinction ratio)도 좋고 (20:1), 전송시 문제가 되는 진동수처핑(frequency chirping)도 없다는 것이 장점이다. 또한 자기화된 유기물 폴리머(poled organic polymer)의 높은 비선형성을 이용하려는 연구도 활발하다.<sup>(19)</sup>

#### 4.3 극초단 광섬유 스위칭 소자

미래의 광대역 종합 통신망은 엄청난 정보량을 처리하기 위해 Tbps의 처리 속도를 갖는 스위치가 필요하다. 현재의 전자소자는 RC 시간상수에 의해  $10^{-11}$ 초 정도로 스위칭 속도가 제한되므로, 전자 소자의 한계를 넘어서는 광을 이용한 초고속 스위치의 연구가 행하여 지고 있다. 광자가 다른 광자를 조절하는 스위칭 소자, 즉 완전 광스위치는 광자들의 상호작용을 매개하는 비선형 광물질의 성질이 소자의 성능을 좌우한다. 비선형 광물질로는 앞서 언급한 모든 물질이 포함되어 있고 이들의 공통적인 목표는 조절광이 입사할때 굴절율이나 흡수율의 큰 변화를 유도하여 스위칭에 필요한 에너지를 줄이고 스위칭 속도를 피코초 이하로 내리는 것이다. 지금까지 알려진 스위칭 물질중에서 석영유리는 비공명 전자들만이 비선형 효과에 기여하므로 반응속도가 수 펨토초 정도로서 가장 빠르고 0.2 dBkm 정도의 낮은 흡수율 때문에 열에 의한 문제가 없어서 높은 비트율(bit rate)로 동작이 가능하다. 그러나 비선형 계수는  $10^{-14}\text{cm}^2\text{W}^{-1}$  정도로서 매우 작으므로 실제로 응용하기 위해서는 작용거리를 km 정도로 길게 할 수 있고, 작은 단면적 (지름=수  $\mu\text{m}$ )때문에 광의 강도를 올릴 수 있는 도파관 구조(광섬유)를 사용하여야 한다. 광섬유 스위치는 구조상 polarization rotation<sup>(20)</sup>, nonlinear Mach-Zehnder interferometry<sup>(21)</sup>, nonlinear coupling<sup>(22)</sup>, two-mode coupling<sup>(23)</sup>, nonlinear Sagnac interferometry<sup>(24)</sup>등 여러종

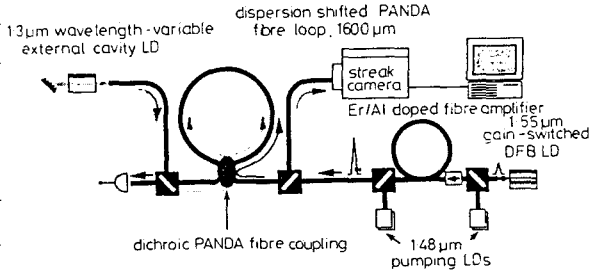


그림 12. 반도체 레이저를 광원으로 하고, 광섬유를 비선형 매질로 사용한 Sagnac 간섭계형 완전 광 스위치.

류가 있으나 nonlinear Sagnac 간섭계는 balanced interferometric arm을 사용하기 때문에 가장 안정적이고 on-off 비율이 좋은 것으로 알려져 있다. 그림 12에서는 반도체 레이저를 광원으로 사용한 Sagnac 간섭계 스위치를 보여 주고 있다.<sup>(25)</sup> 주된 부품은 신호광과 조절광의 속도를 같게 하는 분산이동 편광유지 광섬유와 신호광을 50/50으로 분리하며 조절광에 대해서는 0/100으로 분리하는 특수한 광섬유 결합기(dichroic PANDA fiber coupler)이다. 이러한 구조로 20Gbps의 펄스열을 여다증화한 실험 결과가 보고되고 있다.<sup>(26)</sup> 광섬유 스위치의 크기가 크고 스위칭 대역폭이 사용하는 광원의 펄스폭과 처핑(chirping) 그리고 광섬유의 색분산 및 편광분산에 의해 제한 되므로 이에 대한 해결을 위한 연구가 진행 중이다.

#### 5. 결론

이 글에서는 광교환에 필요한 물리학적 접근방식 및 기초개념, 그리고 이것을 이용한 광교환의 특성등을 살펴 보았다. 종래의 전자식 교환에 필요한 고전적 물리학의 차원을 떠나 광교환에 필요한 광의 특성 및 양자물리학적 측면의 이해가 광교환소자의 구현에 필수적임을 알았다. 특히 초고속 광섬유 스위칭을 이용한 광통신 시스템이나 광병렬성을 이용한 광프로세서 및 광컴퓨터의 구현은 이러한 고유 광특성을 이용한 대표적인 응용 예가 될 수 있다. 기존 전자식 교환체계의 발달은 비교적 시스템적 측면의 교환

algorithm 및 교환방식 개발에 의존하는 대신, 광학적 교환 체계의 발달은 현재로서는 그 내부의 광소자의 개발에 직접적으로 좌우되므로 광소자의 특성을 결정짓는 물리학적 개념 발굴 및 이해는 매우 중요한 요소로 인식되고 있다. 따라서 앞으로의 이 분야의 기술전망은 더욱 빠르고, 대용량화를 가능케 하는 더 나은 광학재료 및 광소자의 개발에 박차를 가하게 될 것이고, 기존 전자식 시스템과 병존하는 광전자 분야와 순수한 광의 특성만을 이용하는 완전 광소위칭 시스템(all-optical switching system)이 공존하는 시대를 거쳐, 결국에는 전자공학(electronics)로부터 광자공학(photronics)로 넘어가는 대전환기를 맞게 될 것으로 본다.

### 참고문헌

1. A. Neyer *et al.*, IEEE J. Lightwave Tech., LT-3, 635 (1985).
2. K. Komatsu, *et al.*, in *International Topical Meeting on Photonic Switching*, 13A-4, Kobe (1990).
3. P. Granstrand *et al.*, Electron Lett., 22, 817 (1987).
4. H. Nishimoto *et al.*, Electron Lett., 23, 1167 (1988).
5. S. Suzuki *et al.*, in *Topical Meeting on Photonic Switching*, FE1, Salt Lake City (1988).
6. H. S. Hinton *et al.*, in *Photonic Switching*, (IEEE Press, New York 1990).
7. S. Suzuki *et al.*, IEEE J. Lightwave Tech., LT-4, 894 (1989).
8. T. Shimore *et al.*, in *Topical Meeting on Photonic Switching*, FD2, Salt Lake City (1989).
9. M. S. Goodman and H. Kobrinski, in *Top. Meeting on photonic Switching*, April 12, Kobe, Japan, 13 D-2 (1990).
10. A. A. Sawchuk *et al.*, Computer, 20, 50 (1987).
11. H. S. Hinton, in *Top. Meeting on Photonic Switching*, April 12, Kobe, Japan, 12 D-1 (1990).
12. D. A. B. Miller *et al.*, Phys. Rev. B32, 1043 (1985).
13. D. A. B. Miller, Opt. Eng. 26, 368 (1987).
14. A. L. Lentine *et al.*, Appl. Phys. Lett. 52, 1419 (1988).
15. M. E. Warren, *et al.*, IEEE Computer, 20, No.12, 68 (1987).
16. S. W. Koch, *et al.*, J. Appl. Phys. 63, R1-11 (1988).
17. C. M. Gee, *et al.*, Appl. Phys. Lett. 43, 998 (1983).
18. I. Nees, *et al.*, Appl. Phys. Lett. 54, 1962 (1989).
19. R. Burzynski *et al.*, Appl. Phys. Lett. 53, 2011 (1988).
20. B. K. Nayar and H. Vanherzeele, IEEE Photon. Tech. Lett. 2, 603 (1990).
21. I. H. White, *et al.*, Electron. Lett. 24, 340 (1988).
22. S. R. Frieberg *et al.*, Opt. Lett. 13, 904 (1988).
23. H. G. Park, *et al.*, Opt. Lett. 13, 776 (1988).
24. M. Jinno and T. Matsumoto, IEEE Photon. Tech. Lett. 2, 349 (1990).
25. M. Jinno and T. Matsumoto, Electron. Lett. 27, 75 (1991).
26. B. P. Nelson *et al.*, Electron Lett. 27, 705 (1991).