

## 광소재 및 광소자 기술

李一恒\*, 權寧世\*\*, 李章雨\*\*\*

韓國電子通信研究所\*, 韓國科學技術院\*\*

三美電子研究所\*\*\*

### I. 서 론

광과 및 광학기술에 있어서 기본이 되는 것은 광소재들과 광소자들이다. 광섬유, 광반도체, ferroelectric 물질, 유기물 등등 광자(photon)를 정보전달체로 효율적으로 활용하고 기능을 다양하게 하기 위한 것들이다. 이것은 전자시대에 있어서의 전자재료 및 전자소자(실리콘 반도체, 화합물 반도체, 금속박막, 산화규소박막, 초전도체 등등)등, 전자(electron)를 정보전달체로써 효율적으로 활용하고 기능을 다양하게 하는 것과 같다.

앞에서 말했듯이 20세기를 전자시대라 하고, 21세기를 광자시대라 한다. 전자방식으로 해결할 수 없는 것들을 광기술로 해결하는 시대로 돌입하고 있다는 이야기다. 광자들은 전자와 물리적으로 전혀 다른 성질을 갖고 있으므로 광자들의 이용을 위해서는 새로운 물리, 새로운 재료, 새로운 소자들을 개발해내야 한다. 진공관을 개량해서 transistor를 만들 수 없었듯이, 전자 transistor를 개량해서 광의 흐름을 조작하기 어렵기 때문이다. 현재 선진국에서는 광의 시대로 향하여 막대한 자원과 부단한 노력을 펴고 있다. 그중 가장 핵심되는 부분이 곧 광재료와 광소자 부분이다. 이 부분을 먼저 해결하는 국가가 곧 광시대를 선취할 것이기 때문이다. 일본의 광전기술, 미국의 경우 광을 이용한 신경지능망 연구과제, 유럽의 EUREKA, RACE 등 모두 좋은 예이다.

우리나라도 이 분야는 선진국과 함께 경쟁해 들어갈 수 있는 분야이므로 가능하면 속히 대담한 지원이 필요하다고 본다. 21세기 정보사회에서 선진기술을 선취하는 지름길이라고 보기 때문이다. 이런 의미에서 이 장을 준비하였으며, 90년대와 2000년대를 향한 조그마한 씨앗이 되기를 바라는 마음이다. 광소자와 광

소재 2부분으로 나누어 전개하였다.

### II. 광소자와 광전소자

통신용 광소자에는 전송에 쓰이는 송수신용 소자와 교환기능의 광스위칭 소자 등이 있다. 광자가 갖는 전송과 저손실, 광대역의 광섬유 기술 및 고신뢰도 반도체 레이저의 개발로 광전송 기술은 이미 확고한 기반을 구축하고 있으며 최근에는 기존의 기간통신망 뿐 아니라 광대역 종합정보통신망을 겨냥한 새로운 전송 기술로써 coherent 광통신 기술 및 초고주파 신호를 광섬유를 통해 직접 전송하는 subcarrier multiplexing 기법 등이 개발되고 있다. 한편으로는 network 기능의 강화와 광대역에 대한 요구가 점증함에 따라 기존의 전자교환방식의 제약을 해결하기 위해 광교환 방식로의 전환이 모색되고 있다. 이 장에서는 이러한 추세에 맞추어 전송용 광소자로서 광원, 광검출기, 광증폭기 등의 개별소자와 이들 광소자와 트랜지스터 등의 전자소자가 집적된 광전집적소자 및 광교환기 실현을 향한 각종 광스위칭 소자들의 동작특성 및 연구 개발 동향에 대하여 기술하기로 한다. 먼저 1절에서는 광원으로 널리 쓰이는  $1.3\mu\text{m}$ ,  $1.55\mu\text{m}$  파장의 레이저 다이오드와 발광 다이오드, 광검출기로서 pin photodiode와 APD(avalanche photodiode), 그리고 광증폭기에 대해서 다루고 2절에서는 이들 개별소자들을 단일 칩 집적한 광전 집적회로를 송신기와 수신기로 나누어 기술하기로 한다. 다음으로 각종 광스위칭 소자들이 3절의 대상이 될 것이다. 끝으로 4절에서는 polymer를 이용한 광소자들에 대해서 다루기로 한다.

#### 1. 전송용 반도체 광전소자

광통신용 광원에는 레이저 다이오드와 발광 다이오드가 있다. 발광 다이오드는 전류를 흘려주어 주입된

전자와 정공이 p-n 접합부에서 재결합하면서 발생한 자연 방출된 빛을 이용한 소자이기 때문에 광출력은 주입전류에 비례하며 발광 스펙트럼의 폭 및 방사각도가 넓고 광섬유에 결합되는 광파워도 낮다. 또 변조대역폭도 캐리어 수명에 의해 제한되기 때문에 비교적 보통 100MHz 정도이다. 불순물 농도를 증가시키면 캐리어 수명이 짧아지는 것을 이용하여 변조대역폭을 1GHz 정도까지 높인 결과도 있지만 발광효율이 낮아 광출력이 작은 문제가 있다. 그러나 소자의 신뢰도가 높고 동작특성이 온도변화에 덜 민감하다는 장점이 있다. 따라서 단거리 데이터 전송 등에 적합하다.

레이저 다이오드는 발광 다이오드와는 달리 유도방출에 의한 발광소자이기 때문에 발진 스펙트럼 폭과 방사각도가 좁고 변조대역폭은 넓다. 또 광출력-주입전류 특성에 threshold가 있으며 전광 변환효율도 높다. 변조대역폭은 레이저의 공진주파수와 패키지 및 칩의 기생요량에 의해 결정된다.<sup>[1]</sup> 레이저의 공진주파수는 레이저 공진기의 이득상수, 광자의 수명 및 광자밀도에 의해 정해지며 주어진 레이저 다이오드의 공진 주파수는 광자밀도의 제곱근에 비례하게 되어 바이어스 전류 I를 높임으로써 증가시킬 수 있다. 보통의 레이저 다이오드 변조대역폭은 1~3GHz 정도이며 기생용량을 줄인 고주파용은 높은 바이어스 전류에서 15~20GHz 정도인데 동작온도를 낮추거나 양자우물 구조의 레이저를 쓰며 50GHz 이상까지 높이는 것이 가능하다라는 보고도 있다.<sup>[2][3]</sup>

레이저 다이오드의 발진 스펙트럼은 광섬유의 분산 특성을 생각하면 광섬유에 결합된 광입력, 광섬유 손실과 함께 최대 전송거리를 결정하는 중요한 요소가 된다. 보통의 FP 레이저에서는 여러 파장의 빛이 동시에 발진하며 대개 반치폭이 1~3nm 정도이다. 그러나 이 반치폭은 변조주파수가 증가함에 따라 커져 1GHz 정도에서는 DC에서의 값에 1.5~2배 정도가 된다. 더욱이 발진파장의 분포가 한 펄스내에서도 시간에 따라 다르며 펄스와 펄스 사이에서도 달라 수신기에 도달하는 시간이 조금씩 다르기 때문에 수신기의 입장에서는 잡음(mode partition noise)으로 보이게 된다. 이러한 이유로 FP 레이저 다이오드는 1Gbps 이상의 고속 장거리 통신에는 적합하지 않다.

위의 문제를 해결하기 위한 소자가 발진파장을 하나로 고정시킨 DFB 또는 DBR 레이저이다. 이 구조의 레이저는 고속변조에서도 발진파장과 옆파장과의 출력차이를 30dB 정도로 유지할 수 있다. 그러나 이 DFB 레이저도 고속변조를 할 때에 발진 스펙트럼이

넓어져 0.2~0.5nm 정도의 폭을 가지며 중심파장도 on 상태와 off 상태에서 달라지게 된다(chirping). 그 이유는 레이저 동작이 이루어지는 반도체 결정의 굴절율이 전류주입에 따라 변화하기 때문에 나타나는 피할 수 없는 현상이다. 직접변조/직접 검파 방식의 장거리 통신에서는 위의 특성때문에 1Gbps 이하에서는 FP 레이저를, 1~10Gbps 까지는 DFB 레이저를 쓰게 되며, 최근에는 565Mbps 시스템에서도 DFB 레이저를 사용하기도 한다. 그러나 DFB 레이저도 완전한 해결책은 아니다. 특히 spatial hole-burning에 의한 주모드 선택도의 불안정성, TE, TM mode 간의 작은 이득 차이 등이 문제가 될 수 있다.<sup>[4]</sup> 한편 coherent 광통신에서는 발진 파장의 선폭에 대한 요구조건이 까다로워서 heterodyne 방식의 FSK나 PSK변조의 경우 전송속도의 0.3~2% 정도여야<sup>[5]</sup> 하므로 1Gbps 전송의 경우 3~20MHz 정도의 선폭이 필요하며 이 값은 1.55 $\mu$ m의 경우 파장변화  $10^{-5}$ ~ $10^{-4}$ nm에 해당하므로 매우 엄밀한 값이다. 보통의 DFB 레이저의 선폭은 광출력에 따라 다르지만 대개 1~100MHz 정도여서 선폭을 더 줄이려는 노력이 필요하다. 선폭을 결정하는 요소들은 여러 물질상수 및 공진기 변수들이지만 결국 자연 방출에 의한 잡음과 활성층 내에서의 굴절을 변화로 요약할 수 있고 이러한 영향들을 줄이는 것이 선폭을 줄이는 길이다. 선폭 증대계수가 작은 다중 양자우물(multiple quantum well) 구조의 DFB 레이저는 출력 2mW 이상에서 5MHz 이하의 선폭을 갖는 것으로 밝혀졌다.<sup>[6]</sup>

또 좁은 파장 간격의 파장다중(wavelength division multiplexing) 시스템은 물론 단일 채널의 coherent 전송을 위해서는 송신기와 수신기의 발진파장을 정확하게 맞추어야 하므로 발진파장의 조정이 필요하다. 따라서 수신기 쪽에는 좁은 선폭과 넓은 파장가변 영역을 갖는 local oscillator가, 송신기에서는 좁은 가변영역을 갖는 레이저가 필요하므로 이 분야의 연구개발 노력도 계속되고 있으며 부분적으로는 만족할 만한 결과들이 발표되고 있다. 한편으로는 coherent 방식의 송신기는 좁은 선폭을 유지하면서 고속변조가 이루어져야 하기 때문에 변조기가 단일칩 집적된 집적 레이저에 대한 연구도 계속되고 있다.

수신용의 광검출기에 pin photodiode와 APD가 있는데 photodiode 재료가 Ge에서 InGaAs로 바뀌어 가고 있다. 그것은 InGaAs가 흡수계수 및 이동도가 크고 Ge에 비해 에너지 갭이 커서 누설전류가 작기 때문이다. InGaAs pin photodiode의 성능변수는 양자효

을, 정전용량, 누설전류, 반응속도 등으로 양자효율 80%, 정전용량 1pF 이하, 누설전류 1nA 이하의 좋은 성능의 소자들이 양산되고 있으며 -3dB 대역폭도 50ohm 부하에서 50GHz 이상의 것이 발표되고 있다.

APD는 pin photodiode와는 달리 avalanche multiplication에 의한 이득이 있기 때문에 수신감도가 높은 장점이 있으나 동작전압이 높고 동작특성이 온도 및 바이어스 전압에 민감한 단점도 있다. InGaAs는 에너지 갭이 작아 avalanche multiplication이 일어나도록 전계를 강하게 해주면 암전류가 너무 커지므로 p-InP/n-InP/n-InGaAsP/i-InGaAs/n-InP의 구조를 써서 i-InGaAs에서 흡수된 빛이 생성시킨 정공을 n-InGaAsP의 중간층을 거쳐 InP p-n 영역에서 avalanche가 일어나도록 한 구조를 쓴다. APD의 성능은 누설전류, 이득, 과잉잡음계수 및 응답속도 등에 의해 결정되며 누설전류는 InP 층에서 multiplication이 일어나도록 함으로써 줄일 수 있다. 과잉잡음계수는 주로 정공과 전자의 multiplication 비에 의해 결정되는 값으로 이 비율이 클수록 좋다. 응답속도가 avalanche multiplication이 지속되는 시간에 의해 결정되는 높은 주파수 영역에서는 이득 대역폭 곱이 일정하게 되므로 이 값이 성능지표가 되며 avalanche multiplication이 일어나는 층의 두께와 불순물 농도를 조절하면 이득 대역폭 곱을 70GHz까지 높일 수 있어 10Gbps 정도의 system에 응용이 가능한 수준에 이르렀다.<sup>[7]</sup>

전송신호를 재생하지 않고 증폭만 해도 되는 경우에는 광증폭기를 광증폭기로 대체할 수 있다. 광증폭기는 레이저 다이오드와 같은 동작원리와 구조를 갖지만 공진기 양면의 반사율을 낮추어 threshold 전류보다 낮은 전류를 가해주면 입사시킨 빛이 유도방출에 의해 증폭되어 나오게 된다. 광증폭기는 레이저 다이오드 제작기술과 무반사막 증착기술의 개발에 힘입은 바 크며 실용화 노력이 진행되고 있다. 광증폭기는 증폭기 외에도 분배망에서의 손실보상, 쌍방향 증폭 스위치, 수신단의 증폭기 등으로 사용될 수 있으며 특히 증폭 가능한 파장영역이 40nm 정도로 넓어 고밀도 파장 다중화 방식의 전송에서는 증폭기로서 큰 의미를 가지게 된다.

그러나 광증폭기도 몇 가지 문제점들을 가지고 있는데 입력신호가 클 때의 이득의 포화 및 신호간의 간섭, 이득의 온도 의존성, 자연방출 잡음의 누적, 반사된 신호의 증폭에 의한 feedback 잡음, 이득의 파장 및 편광에 따른 변화 등이다. 이러한 문제점들을 고려하더라도 수신기 전자회로의 preamplifier 잡음이 가

장 우세한 1Gbps 이상의 전송에서는 매우 유용한 소자로 광섬유와의 결합손실을 고려해도 20dB 이상의 이득, 40nm 정도의 넓은 증폭 파장 영역, 50GHz 정도의 대역폭을 얻을 수 있다.<sup>[8][9]</sup>

이상의 논의를 요약하면 송수신용 개별소자 기술은 비교적 완숙된 단계로 10Gbps 정도의 전송 시스템에 까지 사용 가능한 수준에 이르렀으며 초고주파 신호의 광섬유를 통한 직접 전송도 가능한 상황이다. Coherent 전송용 광전소자는 실용화를 위해서는 좀더 연구가 필요한 상황이며 광증폭기는 응용분야에 따라 가까운 장래에 실용화가 이루어질 전망이다.

## 2. 광전집적회로

광전집적회로란 종래의 전자소자만의 집적회로에 광소자 및 광전소자를 함께 집적시킨 것으로 전자와 광자의 두 가지 신호매체를 갖는 집적회로를 말한다. 전자소자만의 집적회로에 광소자와 광전소자를 추가한 배경에는 전자에 비해 광자가 가지는 장점을 이용하려는 의도가 숨어 있으며 특히 광자가 가지는 고속성 및 통신매체로서의 장점을 활용하기 위한 것이다.

광전집적회로 연구개발은 주로 기간 통신망이나 컴퓨터간 데이터 전송을 위한 송수신기 연구에 집중되고 있으며 InP계의 경우에는 일본의 Matsushita사가 발표한 400Mbps 전송용 송, 수신 집적회로를 제외하고는 상품 생산이 이루어지고 있는 것들은 거의 없는 실정이다. GaAs계의 광전집적회로는 주로 Gbps 이상의 컴퓨터간 통신에 이용될 목적으로 개발되고 있으며 대표적인 것으로 Honeywell이 발표한 MSI급의 transceiver 칩과 IBM이 발표한 5.2GHz 대역폭의 수신기와 2,500개 정도의 소자를 집적시킨 수신기<sup>[10]</sup>, Fujitsu가 발표한 집적소자 50개 정도의 4채널 송신기와 수신기 등이 있다.

1.3 $\mu$ m 및 1.55 $\mu$ m 대의 장거리 통신을 위해서는 InP계 광전집적회로가 필요한데 이 물질계의 광전집적회로의 주요 문제점은 트랜지스터 및 집적회로 기술이 미숙하다는 데에 있으며, 당초의 기대와는 달리 hybrid 회로에 비해 아직은 성능이 뒤지는 상태이며 집적된 소자의 수도 10개 정도로 비교적 소규모에 머물러 있다. 이에 따라 비교적 완숙한 GaAs IC 기술과 InP계 광전소자를 접목시키기 위해 격자부정합 에피택시 기술로 GaAs-InP 복합결정을 사용하려는 노력도 추진되고 있다. 현재 대표적인 광전집적회로로는 GaAs 기판을 사용하여 1.3 $\mu$ m InGaAsP LD, pin PD 및 GaAs MESFET를 집적시킨 송신기와 수신기로

송신기의 경우 2.4Gbps 변조속도를, 수신기는 1.2Gbps에서 -26dBm의 수신 감도를 보였다.<sup>[11]</sup> 이 수신감도는 hybrid 수신기에 비해 10dB 정도 나쁜 결과이다. 기술적으로 좀더 어려운 송신 광전집적회로의 대표적인 예로는 일본 Toshiba사에서 InP MESFET와 constricted mesa 레이저 다이오드를 InP 기판위에 집적시킨 송신기가 있으며 5Gbps까지 직접변조가 가능하였다.<sup>[12]</sup>

광전집적회로는 기생용량이 줄어들기 때문에 얻을 수 있는 고속, 고성능성과 대량생산 및 패키징 공정의 감소로 생기는 원가절감, 다기능성, 어레이화가 쉬운 점 등의 큰 가능성을 가지고 있으나 현재의 기술수준은 아직 이러한 가능성을 실현할 수 있는 수준에까지 이르지 못했다. 그 이유는 근본적으로 서로 다른 광소자, 광전소자와 전자소자를 개별소자의 성능 저하 없이 단일 칩 집적시켜야 하는 어려움이 있다. 더욱이 III-V 족 화합물 반도체 소자 제작의 제반공정이 충분한 수율의 집적회로 제작이 가능한 정도로 완속되어 있는 상황이 아니다. 이에 따라 공정의 단계수도 많아지고 복잡해지면서 수율이 낮아져 경제성의 문제가 나타나고 성능의 향상도 기대에 못미치는 실정이다. 표1

과 표2에 대표적인 송신 및 수신 광전 집적회로의 성능을 정리하였다.

그러나 제반공정의 향상에 따라 이러한 문제들은 해결되어 가고 있으며 전자와 광자가 가지는 장점을 극대화시키려는 광전집적회로의 가능성은 점차 현실로 나타나게 될 것이다. 특히 광전집적회로만이 가질 수 있는 특수한 기능들로 해서 여러가지 다양한 기능의 소자들이 개발될 것으로 기대된다. 1단계로는 비교적 제작이 쉬운 수신 광전 집적회로들이 컴퓨터 통신, 종합정보통신망, 장거리 통신 등에 쓰일 전망이며 다음 단계로는 송신 광전 집적회로, 중계기 등이 사용될 전망이다. 더 나아가서는 광스위칭 소자들이 집적되어 광신호처리 기능을 포함한 광전집적회로의 출현도 기대된다. 아울러 이와는 별도로 특수기능의 어레이나 광전 집적회로들은 필요에 따라 지속적인 수요 공급이 있을 것으로 전망된다.

### 3. 광/광전 스위칭용 반도체 소자

광/광전 스위칭(총괄해서 광스위칭)의 영역은 기존의 디지털 전자 스위칭에 비해 광주파수 영역이 추가되어 공간분할, 시간분할 및 광주파수 분할 방식 등이

표 1. 대표적인 송신용 광전집적회로

developer	material	epitaxy	transistor	integration scale	structure	speed(Gbps)	year
Honeywell	GaAs	LPE	MESFET	1LD+180D+180FET	mesa	0.15	1983
Rockwell	GaAs	OMVPE	MESFET	1LD+FET	mesa	1.0	1983
Hitachi	GaAs	OMVPE	MESFET	1LD+1PD+4R+12FET	mesa	1.6	1986
Fujitsu	GaAs	MBE	MESFET	4×(1LD+1PD+1R+3FET)	mesa	0.56	1986
Matsushita	InP	LPE	HBT	1LD+3HBT	planar	0.4	1984
NTT	InP	LPE	JFET	1LD+1PD+2FET	mesa	0.12	1985
NEC	GaAs/InP	LPE/MBE	MESFET	1LD+3FET	mesa	2.4	1987
Toshiba	InP	OMVPE	MESFET	1LD+1FET	mesa	5.0	1988

표 2. 대표적인 수신용 광전집적회로

developer	material	epitaxy	transistor	integration scale	structure	speed(Gbps)	year
Hitachi	GaAs	LPE	MESFET	1PD+2R+5D+3FET	mesa	1.6	1986
IBM	GaAs	MBE	MESFET	1PD+6R+2D+10FET	planar	3.0	1986
IBM	GaAs	MBE	MESFET	1PD+4FET+2R	planar	5.2(GHz)	1987
IBM	GaAs	implantation	MESFET	1PD+2500devices	planar	1.25	1988
Matsushita	InP	LPE	JFET	1PD+1R+4D+4FET	planar	0.4	1986
NTT	InP	MOMBE	JFET	1PD+1R+3D+6FET	mesa	1.35(GHz)	1988
NEC	GaAs/InP	VPE/MBE	MESFET	1PD+1R+5D+4FET	mesa	1.2	1987
Fujitsu	InP	MBE	HEMT	1PD+1HEMT	mesa	2.0	1988
Bell Lab.	InP	MBE	JFET	1PD+4D+6FET	planar	0.2	1988

있으며 스위칭 방법으로는 광스위칭과 광전 스위칭이 있다. 따라서 광스위칭용 소자로서는 공간분할 스위칭을 위한 광스위칭 matrix와 광검출기 및 레이저 다이오드 array, 시간분할 스위칭을 위한 고속의 광스위치와 광메모리, 파장분할 방식을 위한 파장가변 광필터, 주파수 가변기 등의 소자들이 고려되고 있다.<sup>[13]</sup>

먼저 공간 스위칭용 소자로서는 광변조기와 광변조기 matrix, 광전 스위칭 소자 등이 있으며 전 광스위칭 소자로서는 광쌍안정 소자 등이 있다. 광변조기로는 인가된 전계에 따른 재료의 흡수계수, 이득 및 굴절율의 변화를 이용하는 것이 대부분이며 변조특성의 polarization 의존성, 파장 의존성 및 안정성, 집적화, 신뢰도 향상, 방열, 광섬유와의 결합 등이 해결되어야 할 주요 과제이다.

흡수계수의 변화를 이용한 소자들로는 전계에 따른 유효 에너지 갭의 변화, Franz-Keldysh 효과와 양자우물 구조에서의 quantum confined stark effect를 이용한 것<sup>[14]</sup>, 광펌핑에 의한 bleaching을 이용한 것 등이 있다. 광증폭기는 주입전류에 따라 광신호에 이득과 손실을 줄일 수 있으므로 광스위치로 쓸 수 있으며 특히 증폭기능 때문에 fan-out이 큰 장점이 있다. 굴절율의 변화는 electrooptic effect, 자유 반송자의 주입이나 공핍에 의한 plasma effect, 양자 우물 구조에서의 quantum confined stark effect 등에 기인하며, 이러한 현상을 스위칭 소자에 응용하려면 위상변조를 강도변조로 바꾸기 위한 구조가 필요하다. 이러한 소자에는 directional coupler, Mach-Zender 간섭계, 전반사 거울 및 공진기 등이 있다. 이러한 개별소자들의 집적에 의한 공간스위치 matrix의 구조도 매우 다양하며 개별소자의 특성에 따라 상호간섭이 없도록 설계되어야 한다.

광전스위칭 소자로는 고속 디지털 집적회로와 interfacing 소자로서 다채널 광전집적회로를 사용한 것들이 보고되고 있으며 전광 스위칭 소자로는 saturable absorber를 갖는 multi-section DFB 레이저와 C<sup>3</sup> (cleaved coupled cavity) 레이저를 이용한 논리게이트 및 먼저 기술한 bleaching 현상을 이용한 소자 등이 있다.

시간 분할 스위칭을 위해서는 고속의 광메모리와 위에서 언급한 고속의 광스위치가 필요하다. 광메모리는 쌍안정 소자를 이용하게 되는데 전기적 feedback을 이용한 것, 반도체 레이저를 이용한 것과 Fabry-Perot etalon을 이용한 것 등이 있다. 전기적인 feedback을 이용한 대표적인 것으로는 SEED(self electrooptic

effect device)가 있다. 이 소자는 다중 양자우물 구조의 흡수 스펙트럼이 인가된 전계에 따라 변화하는 성질을 이용한 것으로 외부저항을 직렬로 연결하고 전압을 가해준 구조이다. 이 소자에 exciton transition에 해당되는 파장의 빛을 입사시키면 유기된 전류에 의한 전기적인 feedback 때문에 투과특성에 쌍안정 특성이 나타난다. 이 소자의 스위칭 에너지는  $18\text{fj}/\mu\text{m}$ , 스위칭 시간은 400ns 정도이며 2차원 array 형태로의 집적화가 쉬운 장점이 있다. 이 외에도 pnpn thyristor 구조를 이용하거나 resonant tunneling을 이용한 소자들도 있으며 광전소자와 전자소자의 조합에 따라 다양한 구조의 소자가 가능하며 광전 집적화가 요구되는 분야이기도 하다.

쌍안정소자의 또 하나의 예로서 반도체 레이저를 이용한 것이 있다. 이 쌍안정 소자는 스위칭 속도가 ns 또는 그 이하로 전기적인 feedback을 이용한 소자보다 빠르고 광이득이 커서 fan-out이 큰 장점이 있으나 소모전력이 크고 온도의존성이 높으며 집적도를 높일 수 없는 단점도 있다. 쌍안정 반도체 레이저는 saturable absorber를 이용한 것과 굴절율 변화를 이용한 것으로 대별할 수 있으며 전자는 광출력-주입전류 특성에, 광입력에 따른 공진주파수의 변화를 이용한 소자인 후자는 광입력-광출력 특성에 쌍안정 특성이 나타난다. Saturable absorber를 이용한 쌍안정 소자는 multi-section 구조의 것이 많이 연구되고 있으며 바이어스 전류에 따라 광입력에 대해서도 비선형 증폭기, 광메모리, 광논리 게이트, 광주파수 변환기 등으로 동작한다.

반도체 Fabry-Perot etalon을 이용한 광 쌍안정 소자는 etalon 내부에 비선형 물질을 넣은 구조로 반도체 박막은 광입력에 따라 굴절율이 변화하고 굴절율이 높아 반사계수가 커져 그 자체로서 쌍안정 소자가 된다. 특히 비선형계수가 큰 다중 양자우물 구조의 경우에는 20~40ns 정도의 스위칭 속도를 얻을 수 있고 매우 균일한 2차원 array가 가능하다는 점에서 매우 유용한 소자이다.

파장분할 스위칭을 위해서는 광주파수 변환기와 주파수 가변 광필터가 요구된다. 광주파수 변환기로는 coherent 광통신에서 언급한 파장가변 DFB 레이저와 C<sup>3</sup> 레이저와 같이 전기적 신호에 의해 파장변환이 일어나는 것과 saturable absorber를 갖는 레이저와 광증폭기에서 degenerate four wave mixing에 의한 광주파수 변환과 같은 광신호에 의한 주파수 변환 등이 있다. 반도체 레이저를 이용한 주파수 가변기는 광 또는

전기적 입력에 의해 굴절을 또는 이득 분포가 변해서 레이저 동작이 다른 파장에서 일어나도록 한 것으로 ns 정도의 비교적 빠른 동작이 가능하다. 광증폭기를 이용한 주파수 변환기는 펄핑빔과 광신호의 간섭때문에 생긴 광증폭기 내부의 굴절율과 이득의 주기적 변화에 기인하며 두 광파간의 주파수 차이가 2.5GHz 이하일 때 효율적이다. 이렇게 주기적인 변화가 생긴 광증폭기를 다른 광파가 진행하면 이 광파외에도 이 광파보다 펄핑빔과 신호빔의 주파수 차이만큼 주파수가 큰 광파와 그만큼 작은 광파가 나오게 되어 주파수 변환이 이루어진다. 이 외에도 multi-section DFB 레이저에서 불균일한 전류의 주입으로 주모드와 옆모드 사이의 스위칭이 일어나도록 한 소자도 있다. 이러한 소자에서는 파장가변 범위를 넓게 하고 신호간의 불필요한 간섭을 없애는 것이 과제가 된다.

파장다중 시스템에서 demultiplexing을 위해서는 주파수 가변 광필터가 요구되며 여기에는 quantum confined stark effect를 이용한 것, DFB 레이저 증폭기 및 grating filter를 갖는 집적광학형 광도파로 소자 등이 있다. 이 소자들은 전류나 전압을 인가함으로써 굴절율을 바꿀 수 있으므로 주파수 가변이 가능하다. 이 중에서 DFB 레이저 증폭기는 이득을 가진다는 측면에서 매우 유용한 소자이지만 주파수 가변을 위해 주입전류를 바꾸어 주면 이득도 따라서 변하므로 이의 보상을 위해서는 multi-section 구조가 되어야 한다. 집적형 광도파로 반도체 소자는 insertion loss가 비교적 큰 문제점이 있으며 grating 및 도파로 제작을 위한 dry etching 및 미세형상 제작기술이 요구된다. 반도체의 비교적 큰 흡수계수의 문제를 해결하기 위하여 반도체를 기판으로 한 유전체 도파로형 소자들에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

이상의 광스위칭 소자들은 기존의 디지털 스위칭용 전자소자인 트랜지스터에 비해 몇가지 약점을 가지고 있다. 광메모리의 경우 트랜지스터 메모리와는 달리 입력 빛의 파장과 세기를 동시에 조절해야 하는 점, 몇몇 예외적인 경우를 제외하고는 증폭기능이 약하다는 점, 이 두가지 문제점에 기인하는 cascability의 문제점, 아직 스위칭 속도가 충분히 빠르지 않다는 점 및 동작특성의 안정성 확보 등이 그것이다. 그러나 거의 무한한 정보처리 능력과 낮은 스위칭 에너지등이 연구개발의 추진력이 되고 있으며 광스위칭 소자기술의 기반으로서 미세 형상 제작기술 및 광전 집적화도 계속 추진되어야 할 것이다.

#### 4. Polymer 소자

Polymer 소자는 70년대 중반부터 연구되기 시작하였으며, 우수한 비선형 특성과 광투과율 및 다양한 소자 제작 가능성으로 인하여 관심의 대상이 되고 있다. 현재 polymer 소자에 대한 연구는 새로운 특성을 갖는 polymer 소재의 합성<sup>[15]</sup>, 소자 구조 설계 및 해석<sup>[16]</sup>, 제조 공정 개발 분야로 크게 나눌 수 있으며, 통신용 소자 개발 측면에서 보면 신소재의 합성과 제조 공정 분야의 연구가 가장 활발하다고 할 수 있다. 광통신용 소자 구조는 광도파로가 그 기본을 이루며, 따라서 근래에 소개되는 polymer 광소자의 구조는 LiNbO<sub>3</sub> 소자와 유사하다. 사실 광통신용 polymer 소자 연구의 1차 목표는 기존의 LiNbO<sub>3</sub> 소자를 대체할 수 있음을 보이는 것이다. Polymer를 사용한 도파로, coupler 등의 수동소자는 이미 BT&D에서 polyguide 라는 이름으로 소개되었고, 스위치나 변조기와 같은 능동소자의 연구는 이보다 조금 뒤진 상태이나, polymer에서의 비선형 효과를 이용한 주파수 변환이나 고속 스위칭, 효율적인 poling 방법 등의 연구가 활발히 전개되고 있다.

Polymer는 다음과 같은 면에서 우수한 특징을 갖는다. 우선 광학 굴절율이 기존 반도체 재료( $n > 2$ )나 LiNbO<sub>3</sub>( $n = 2.2$ )에 비해 낮기 때문에( $n = 1.5$ ) 광섬유와의 결합시 mode field의 직경을 맞추기 쉽고 결합부에서의 손실을 줄일 수 있으며, 광신호와 전기신호의 phase mismatch가 작을 뿐 아니라, 비선형도가 매우 크기 때문에 소자의 길이를 줄일 수 있어 고속화와 집적화에 유리하다. 또한 polymer 소자는 소요되는 재료가 다른 반도체 소재나 무기 결정 소재에 비해 저렴하며, 넓은 면적으로 만들기 쉽고 공정이 비교적 간단할 뿐 아니라, 다양한 특성의 소자를 제작할 수 있다.

반면, 내구성이 무기물 소재에 비해 뒤떨어지고, 수동소자의 광학특성이 과염유나 유리를 사용하는 경우에 비해 뒤지는 점 등은 개선해야 할 문제점이다. Polymer는 온도, 습기 등의 외부환경 변화에 크게 영향을 받을 뿐 아니라, 능동소자 제작시 poling된 분자의 배열이 시간이 지남에 따라 흐트러지는 것은 장기간 사용해야 되는 통신용 소자로서는 필히 해결해야 할 사항이다. Polymer 광소자의 제작에 가장 널리 사용되고 있는 spin coating의 경우, 기판 가장자리의 edge bead에 의한 손실 때문에 end coupling이 불가능하므로, 현재 prism coupling이 사용되고 있으나 이는 실용성이 없는 방법이다. 따라서 이 문제가 해결되어야만 실용화 가능성이 논의될 수 있을 것이다.

현 단계에서 polymer 소자의 활용 가능성은 단일칩 집적화된 OEIC 상에서 광신호의 전달이다.<sup>[17]</sup> Polymer는 기판의 종류에 상관없이 coating 할 수 있으므로 OEIC 내의 발광소자와 수광소자간 혹은 광섬유와 광전소자간의 광결합에 사용할 수 있다. Polymer 도파로에서의 손실은 1.3 μm 파장에서 1dB/cm 정도이며<sup>[18]</sup>, polymer의 종류에 따라 0.2dB/cm 이하인 경우도 보고되고 있다.<sup>[19]</sup>

Polymer는 발광소자를 제외한 모든 소자를 제작할 수 있다. 전기광학 효과는 물론이고, 전도성 고분자를 이용한 수광소자의 제작도 가능할 뿐더러, 광증폭기와 나아가서는 전광신호처리 소자의 제작 가능성도 기대된다. 통신용 이외의 광신호처리 분야에서도 손쉬운 제작공정과 높은 비선형 특성 및 고속성으로 많은 연구가 진행중에 있다.

### III. 광재료(Photonic Materials)

광자(photon)는 전자(electron)에 비해 빠른 속도와 넓은 대역폭(bandwidth)를 가지며 전자기장에 영향을 적게 받는다는 장점을 가지고 있다. 이러한 광자의 좋은 성질을 이용하기 위한 연구가 여러분야에 걸쳐 활발하게 진행되어 왔다. 광자기술의 발전은 각 응용분야에서 요구되는 특성을 만족시킬 수 있는 재료의 발전을 통해서만이 이루어질 수 있음을 지난 수년간 이루어진 광통신 기술의 눈부신 발전이 광섬유(optical fiber)와 화합물 반도체(compound semiconductor)의 발전에 의해 가능하였다는 사실로부터 쉽게 확인할 수 있다.

본 3장에서는 지금까지 연구되어온 광재료를 몇가지로 나누어 그동안 이루어진 연구결과와 동향을 검토하고자 한다. 첫번째 절에서는 광재료로써 요구되는 일반적 특성을 살펴보고 두번째 절에서는 반도체 재료, ferroelectric 재료, 유기물 재료 그리고 비정질 재료별로 광재료를 분류하여 각 재료들의 특성과 제조방법에 관해 기술하였다.

#### 1. 광재료로써 요구되는 일반적 특성

광자기술은 전기장 또는 입사광에 의해 물질의 굴절률이나 흡수계수가 변화하는 현상인 전기광학 효과나 광굴절 효과를 이용하는 기술이다.

일반적으로 주어진 전기장에 의한 굴절률의 변화는 다음의 식으로 표시된다.

$$n = n_i^3 r_{ij} E/2$$

여기서  $n_i$ 는 굴절률이고,  $r_{ij}$ 는 전기광학 sensor coefficient이며 E는 가해진 전기장이다. 여러가지 물질의  $n_i^3 r_{ij}$ 의 값이 표 3에 나타나 있다. 표 3에서 볼 수 있는 바와 같이  $Sr_{0.75} Ba_{0.25} Nb_2 O_6$ 나  $BiTiO_3$ 와 같은 ferroelectric 재료가 큰 전기광학계수(electro-optic coefficient)를 나타냄을 알 수 있다. 그러나 광학용으로 사용할 수 있는 양질의 단결정을 성장하기 어렵다는 점과 이들 물질내의 결정결함이나 조성의 불균일함에 기인하는 전하이동(charge migration) 때문에 이들 물질들은 지난 20여년간 크게 주목받지 못하였다.<sup>[20]</sup>

전 광통신(all optical communication)과 광상처리에 가장 적합한 물질은 광굴절 물질로 알려져 있다. 이들 물질에서 광학적 비선형성(optical nonlinearity)은 주어진 입사광에 의해 여기된 전하가 이동(photo-carrier transport)하여 물질 내부에 전기장을 형성하고 이에따른 전기광학 효과가 복합되어 나타나게 된다. 주어진 광자의 에너지에 대한 굴절률의 변화를 나타내는 광민감도(photosensitivity)는  $r_{ij}/e$ 와  $L_{eff}$ 에 비례하게 된다. 여기서 e는 유전률이고  $L_{eff}$ 는 유효 이동거리(effective transport length)로 물질의 고유성질과 주어진 외부조건에 따라 변화하게 된다. 광민감도가 좋은 물질을 얻기 위해서는 물질의 전기광학

표 3. 여러가지 물질의 전기광학 특성

	$n^3 r$ pm/V	$n^3 r/e$ pm/V
Ferroelectric		
LiNbO <sub>3</sub>	320	11.0
KNbO <sub>3</sub>	690	14.0
BaTiO <sub>3</sub>	11300	4.9
$Sr_{0.75} Ba_{0.25} Nb_2 O_6$	16300	4.8
Bi <sub>12</sub> SiO <sub>20</sub>	82	1.8
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O	12	9.1
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	86	1.7
Semiconductors		
GsAs	43	3.3
InP	52	4.1
GaP	44	3.7
CdTe	152	16.0
ZnTe	133	13.0
CdSe	70	6.6
CdS	61	5.9
ZnSe	38	4.1
Organic Materials		
MNA	530	133.0
m-NA	97	29.0
POM	19	

계수와 전하이동거리를 함께 고려해야만 한다. 높은 광민감도는 반도체나 유기화합물로부터 얻어질 수 있을 것으로 기대된다.<sup>[21]</sup> 광굴절 물질로서 LiNbO<sub>3</sub>와 BaTiO<sub>3</sub>, SBN과 BSO에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다.

광재료로 사용되기 위해서는 큰 전기광학 효과와 광굴절 효과가 필요함을 알았다. 이외에도 각 응용분야마다 요구되는 물질의 특성은 다르나 일반적으로 요구되는 조건을 요약하면 다음과 같다. (1) 큰 광학적 비선형성을 갖기 위해 큰 second order susceptibility나 third order susceptibility를 가져야 한다. (2) 레이저 radiation, 온도의 변화, 부식성 혹은 산화분위기에 대해 안정해야 한다. (3) 입사광의 파장(incident wavelength)와 발생광의 파장(generated wavelength)에서 투명해야 하며 큰 복굴절성(birefringence)을 가져야 한다. (4) 광학용으로 사용할 수 있을 정도의 좋은 성질을 갖는 단결정을 싼 방법으로 쉽게 만들 수 있어야 한다. (5) 박막이나 bulk로 제작할 수 있어야 하며 기계적 성질 특히 인성(toughness)이 좋아야 한다.

## 2. 광재료

### 1) 반도체

앞에서 언급한 바와 같이 지난 수년간 이루어진 광학기술의 눈부신 발전은 광섬유의 발명 전 GaAs와 InP를 이용한 반도체 레이저 다이오드와 광 검출기의 발전에 기인하고 있다. 넓은 범위에 걸쳐 다양한 bandgap을 갖는 화합물 반도체의 단결정 성장기술은 50년대와 60년대에 걸쳐 크게 발전하였으며, bandgap과 격자상수(lattice constant) 간의 일대일 대응관계로 인하여 격자정합을 갖는 heterojunction의 성장이 어렵다는 제약이 제4의 원소를 첨가하는 것에 의해 극복되었다. 즉 그림 1에서 2원계(binary) 반도체는 점으로 나타나며 4원계(quarternary) 반도체는 3원계 반도체를 나타내는 선들로 둘러싸인 공간으로 나타내지게 된다. 그림에서 일점쇄선은 InP와 같은 격자상수를 가지며 band gap이 다른 물질의 조성을 나타내고 있다. 이와같이 band gap과 격자상수를 독립적으로 변화시킬 수 있는 능력과 발달된 III-V 화합물 반도체의 단결정 성장기술을 이용하여 원하는 bandgap을 갖는 물질을 격자정합 상태를 유지하며 성장시킬 수 있게 되었고 이에 따라 새로운 구조(quantum well이나 superlattice)와 특성을 갖는 물질을 제작할 수 있게 되어 화합물 반도체에 새로운 장을 열게 되었다.

표 3에서 볼 수 있듯이 반도체 재료들은 일반적으로 작은 전기광학계수를 나타내기 때문에 광재료로서 관심을 끌지 못했으나 quantum well 구조에서 굴절률과 흡수계수가 absorption edge 근처에서 가해진 전기장에 의해 크게 변화한다는 사실이 밝혀지면서 광재료로서 주목을 받게 되었다. 그림 2에서 보여지는 바와 같이 AlGaAs/GaAs quantum well에 전기장이 가해질 경우 GaAs 층에 제한되어 있는 전자와 정공(hole)이 반대방향으로 이동하게 되어 전자와 정공의 quantum state가 변화하게 되고 이에 따라 물질의 투과성을 변화시키게 되는데 이러한 현상을 quantum confined stark effect(QCSE)라 한다. QCSE가 그림 2의 (b)에 잘 나타나 있으며 QCSE를 고속변조에 응용하려는 연구가 보고되었다.<sup>[21]</sup> QCSE를 이용할 경우 변조시킬 수 있는 광의 파장에 제약이 있지만 quantum well에 사용된 물질의 성분을 변화시키는 것에 의해 파장(operation wavelength)을 변화시킬 수 있으며 quantum wire나 quantum dot 등의 구조를 이용하여 전자와 정공의 제한을 증가시킬 경우 전기장에 대한 굴절률과 흡수계수의 변화를 크게 증가시킬 수 있다고 알려졌다.<sup>[22]</sup>

광자기술에 응용할 수 있는 또 다른 현상이 staggered GaAs/AlAs의 quantum well 구조에서 보고되고 있다.<sup>[23]</sup> Staggered alignment quantum well 구조는 그림 3에서 보여지는 바와 같이 아주 얇은 GaAs 층으로 인하여 GaAs에서 전자의 quantum state가 AlAs

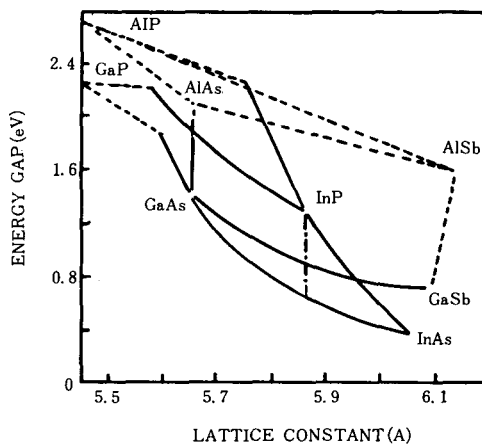


그림 1. III-V 2원계 반도체와 3원계 및 4원계 반도체의 격자 상수와 energygap



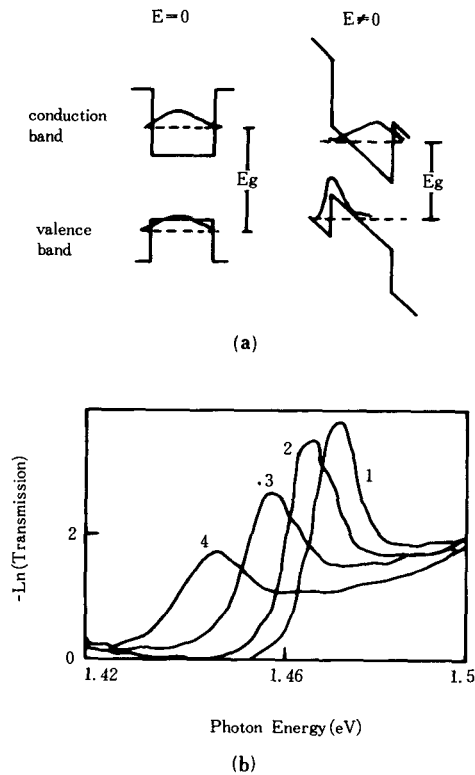


그림 2. (a) 외부에서 전기장이 가해진 경우 나타나는 quantum confined Stark effect를 보여주는 그림

(b) 가해진 전기장에 따른 GaAs quantum well의 투과성 :

- (1)  $1.6 \times 10^4$  V/cm,
- (2)  $1.0 \times 10^5$  V/cm,
- (3)  $1.3 \times 10^5$  V/cm,
- (4)  $1.8 \times 10^5$  V/cm

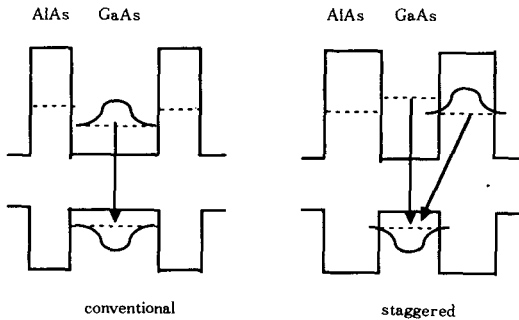


그림 3 Staggered GaAs/AlAs quantum well과 보통 quantum well에서의 에너지 준위

에서 전자의 quantum state 위에 위치하게 되어 전자와 정공이 각각 다른 물질에 제한되게 되어 carrier의 수명(lifetime)이 크게 증가하게 된다. 이러한 상태에 외부에서 전기장을 가할 경우 GaAs에서 전자의 quantum stat가 낮아지게 되고 일정한 크기 이상의 전기장에서는 GaAs의 electron state가 AlAs의 electron state보다 낮아지게 되어 앞에서 설명한 QCSE가 나타나게 된다.

Quantum well 구조에서 발견된 QCSE와 같은 새로운 현상과 전하이동(charge transport)을 이용한 소자의 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중 가장 널리 알려진 것이 self-electro-opticeffect-device(SEED)이다.<sup>[24]</sup> 전기장이 가해져 있는 multi-quantum well에 빛을 쬐일 경우 여기된 photo carrier들이 외부에서 가해진 전기장을 상쇄(screen)시켜 QCSE를 감소시킨다. 이에 따라 빛을 쬐여주기 전에 장파장으로 이동한 광흡수(absorption)가 단파장 쪽으로 이동하게 되어 물질의 투명도(transparency)가 증가된다. 빛을 끈 다음에는 photo carrier에 의한 효과가 없어지게 되어 광의 흡수가 다시 장파장 쪽으로 이동하게 된다.

SEED를 변형한 소자로 NIPI가 있다.<sup>[25]</sup> 이 소자에서는 n-type과 p-type의 얇은 박막( $\sim 1000\text{\AA}$ )을 교대로 성장시켜 내부에서 전기장이 형성되도록 한다. 이 경우에도 여기된 photo carrier들이 내부에서 형성된 전기장을 상쇄시켜 흡수율의 변화를 나타내게 된다. 이와 같이 화합물 반도체를 이용한 quantum well 구조는 광기술에 응용될 수 있는 많은 새로운 현상을 보여주고 있으며 앞으로의 광재료 및 소자 연구에서 중심적 역할을 할 것으로 기대된다.

반도체 재료를 이용한 광소자 연구는 주로 GaAs와 InP를 중심으로 이루어져 왔으며 CdTe나 CdSe에 대한 연구도 조금씩 되어 왔다. 이들 반도체 이외에도 ZnSe, ZnS, CdSe, ZnTe와 같은 II-IV 반도체 재료와 AgGaS<sub>2</sub>, CdGeAs<sub>2</sub> 등의 3원계 반도체를 광재료로써 사용한 연구도 보고되었다.<sup>[26]</sup>

반도체 재료의 또 다른 응용분야로써 광학적 bistability를 이용한 광소자 분야를 들 수 있다. 광학적 bistability는 그림 4에서 보여지듯 주어진 입력값이나 일정범위의 입력값에 대해 광 시스템이 안정한 두 개의 출력을 나타내는 현상으로 입사광의 강도에 따라 흡수계수 혹은 굴절률이 변하는 광학적 비선형성과 시스템 내에서의 feedback 간의 강한 상호작용에 의해 나타나게 되며 광교환이나 전 광학적 논리 소자에 응용될 수 있다는 점에서 그 중요성을 갖는다.<sup>[27]</sup> 광학

적 bistability는 Na 기체에서 처음 발견되었으며 그 후 많은 물질에서 발견되었으나 반도체와 이를 이용한 multi-quantum well 구조가 큰  $dn/I$  값을 가지며(여기서  $dn$ 은 굴절률의 변화이고  $I$ 는 입력광의 강도) 속도면에서도 다른 물질에 비해 우수하다고 알려졌다. 이에 반도체를 중심으로 많은 연구가 이루어져 왔다. 표 2에 광학적 bistability를 나타내는 반도체 물질의  $dn/I$  값과 bistability를 나타내는 mechanism이 요약되어 있다. 표 4에서 P는 교환시(switch-on) 필요한 입력 power를 나타내며 t는 교환시간(switching time)을 나타낸다. Bistability를 나타내는 mechanism으로는 band filling, exciton nonlinear refraction과 electron-hole plasma<sup>[28]</sup> 등이 있으며 그중 band filling은 다음과 같다. Band gap보다 큰 에너지를 갖는 빛이 물질에 쬐어질 경우 빛의 강도가 충분히 크면 여기된 전자와 정공이 소멸되는 속도보다 빠르게 conduction band와 valence band의 낮은 energy state들을 채우게 되고 이에 따라 band edge가 가해진 광자의 에너지와 같아지게 된다. 이러한 band edge의 변화는 흡수곡선(absorption spectra)을 변화시키며 굴절률을 변화시켜 bistability를 나타내게 된다. 그림 4(b)는 band filling을 도식적으로 나타낸다.

이와같이 전기광학 효과, 광굴절 효과 및 광학적 bistability 현상을 반도체를 광재료로 사용할 경우 이미 발달된 반도체 제조기술과 물성연구의 결과를 이용할 수 있으며, 광집적회로에 큰 장점을 가질 수 있다. 특히 물질의 조성과 물성의 조절을 통해 광기술에서 요구되는 특성을 만족시킬 수 있으며 새로운 인공구조를 이용하여 그 응용의 범위를 넓혀갈 수 있다. 이와 같이 반도체 재료는 광재료로써 많은 장점을 가지며 앞으로의 연구에 있어 중심적 역할을 할 것이다.

표 4. 광학적 bistability를 가지는 물질의 특성

Medium	Nonlinear Mechanism	$dn/I_1$ (cm <sup>2</sup> /kW)	$P_1$ (mW)	$t_1$	$t_1$
GaAs	free exciton	-0.005	100	<200ps	<40ns
InSb	band filling	-0.088	8	< 1 ns	=500ns
InSb	two-photon	$2 \times 10^{-4}$	100kW/cm <sup>2</sup>		50ns
CdS	bound exciton	=0.015	0.75		1 ns
InAs	band filling	-0.04	3	< 1 ns	< 1 ns
CdHgTe	plasma & band filling	$10^{-5}$	500kW/cm <sup>2</sup>	<0.1 ns	=0.4 ns
CuCl	biexciton	$10^{-7}$	10MW/cm <sup>2</sup>		ps predicted
SbSI	free carrier	50	2		few second
Te	free carrier	= $10^{-6}$			100ns

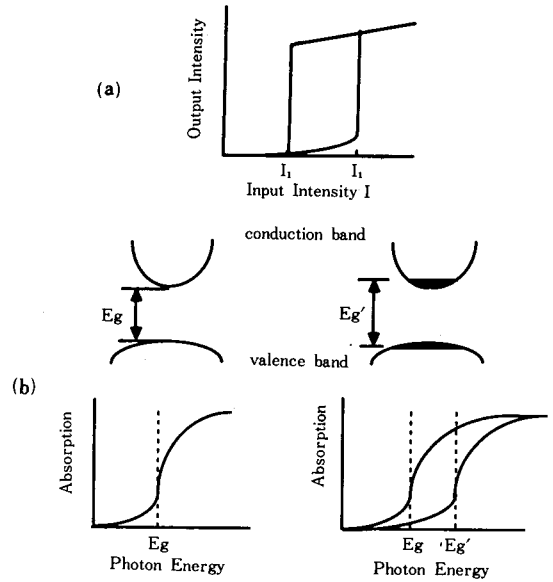


그림 4. (a) 광학적 bistability  
(b) Band filling에 의한 흡수곡선의 이동

2) Ferroelectric materials

Ferroelectric 물질은 표 3에서 보여지는 바와 같이 큰 전기광학계수를 나타내기 때문에 전기광학 효과와 광굴절 효과를 이용하는 광소자에 사용하려는 연구와 이들 물질에 대한 물성연구가 활발히 진행되어 왔다. Ferroelectric 물질들은 일반적으로 ABO<sub>3</sub>의 분자식을 가진다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 전이원소(Ti나 Nb 등)를 중심으로 산소가 8면체(oxygen-octahedra)를 이루며 cubic(혹은 pseudocubic)의 모서리를 양이온(Ba 혹은 k)이 차지하고 있는 구조를 갖고 있다.

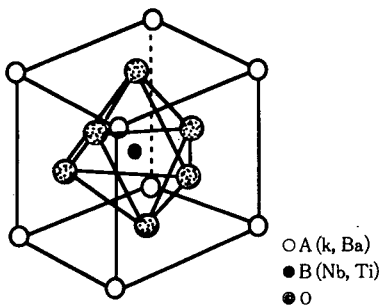


그림 5. ABO<sub>3</sub> perovskite 구조의 단위격자

LiNbO<sub>3</sub>는 다른 ferroelectric 물질에 비해 상대적으로 작은 전기광학계수를 가지고 있음에도 불구하고 광소재로서 사용되는 ferroelectric 물질중에서 가장 광범위하게 연구되어졌다. 이는 strain이 없고 결정결함의 농도가 낮은 좋은 품질의 큰 단결정을 Czochralski 방법에 의해 상대적으로 쉽게 얻을 수 있으며 1 $\mu$ m 이상의 장파장 영역에 전하이동이나 광전도도(photo-conductivity)가 매우 작다는데 기인한다. LiNbO<sub>3</sub>에 사용되는 dopant는 주로 천이금속으로 결정성장 중에 산화물 형태로 첨가되는 데 이들 dopant는 excitation spectra를 변화시키므로 사용 주파수를 변화시킬 수 있다. LiNbO<sub>3</sub>에 첨가되어 있는 dopant 중 Fe가 가장 많이 사용되며 첨가된 Fe의 양에 따라 LiNbO<sub>3</sub>의 굴절률의 변화량이 영향을 받는다고 알려져 있다. LiNbO<sub>3</sub>에서 Fe는 Fe<sup>+2</sup>와 Fe<sup>+3</sup>로 존재하게 되는데 Fe<sup>+2</sup>는 전자가 포획되어 있는 trap으로 물질의 흡수계수에 영향을 미치며 Fe<sup>+3</sup>는 전자가 비어있는 trap으로 암전도도(dark conductivity)와 광전도도(photoconductivity)에 영향을 주는데 Fe<sup>+2</sup>와 Fe<sup>+3</sup>의 상대적인 양에 따라 물질의 특성이 변화한다고 알려졌다. Fe 외에도 Cu, Mn, Rh 등이 dopant로 사용된다.

LiNbO<sub>3</sub>를 이용한 도파로(optical waveguide)를 만들려는 노력이 많이 이루어져 왔다. Ti 확산법(diffusion), 이온교환법(ion-exchange)과 이온주입법(ion implantation)이 그 대표적 방법이다.<sup>[29]</sup> Ti 확산법은 가장 널리 이용되는 방법으로 LiNbO<sub>3</sub> 위에 Ti을 증착시킨 후 약 1,000°C로 가열하여 LiNbO<sub>3</sub>에 Ti을 침투시키는 방법이다. LiNbO<sub>3</sub>안의 Li/Nb의 비율이 Ti의 확산계수(diffusion coefficient)에 영향을 미치므로 정확한 Li/Nb의 조절이 필요로 된다. 이 방법을 사용할 경우 고온처리에 따른 Li의 out-diffusion

이 일어나 표면근처에서 Li이 부족한 현상이 나타나게 되어 LiNbO<sub>3</sub> 자체의 성질과 Ti의 확산거동에 영향을 주게 되므로 Li의 out-diffusion을 방지하여야 하며 Ti 확산시 횡축으로의 확산이 일어나게 되므로 공정계획시에 각별한 주의가 요구된다. 여러가지 공정상의 제약에도 불구하고 Ti 확산법이 다른 방법보다 많이 사용되며 이 방법을 이용하여 만든 도파로가 보고되었다. 이온교환법은 LiNbO<sub>3</sub>를 TiNO 용액에 담그는 것에 의해 LiNbO<sub>3</sub>의 굴절률을 변화시키는 방법으로 큰 굴절률의 변화를 얻을 수 있다는 장점을 가지나 LiNbO<sub>3</sub>의 표면에 많은 결함을 만들고 변화된 굴절률이 불안정하며 굴절률의 변화와 함께 물질의 구조가 변화하는 단점 등을 가지고 있다. 이온주입법은 N<sup>+</sup> 이온을 LiNbO<sub>3</sub>에 주입시키는 방법으로 LiNbO<sub>3</sub> 굴절률의 감소를 얻을 수 있지만 N<sup>+</sup> 이온주입시 생기는 손상에 의해 Li이 부족한 층이 형성된다는 단점이 있다.

LiTaO<sub>3</sub>는 LiNbO<sub>3</sub>와 비슷한 성질을 가지며 Czochralski 법에 의해 좋은 상태의 단결정을 얻을 수 있다. 또한 여러가지 전이금속이 dopant로 사용된다고 보고되었으나 LiTaO<sub>3</sub>를 이용한 광소자에 대한 연구는 보고되지 않고 있다.

표 3에서 볼 수 있듯이 BaTiO<sub>3</sub>와 KNbO<sub>3</sub>는 매우 큰 전기광학계수를 갖기 때문에 광재료로서 넓은 응용분야를 갖는 유망한 물질이다. 그러나 두 물질은 용융과 상온 사이에서 1차(first order) 상변화를 하기 때문에 단일 domain을 갖는 단결정을 성장시키기가 LiNbO<sub>3</sub>에 비해 매우 어렵다. 특히 BaTiO<sub>3</sub>는 좋은 품질의 단결정 성장의 어려움과 물질내의 전하이동(charge migration) 현상때문에 광재료로서 각광을 받지 못했으나 1980년대 초에 실시간응용(real-time application)에 있어 유용성이 인정된 후 물질특성 및 광재료로서의 응용에 관한 연구가 활발히 진행되었다. 최근에 들어와 큰 signal level을 요하는 응용분야와 phase conjugate resonator에 적합한 물질로서 인정되었다. BaTiO<sub>3</sub> 단결정은 K-F flux 방법(혹은 Reimeika 방법) 또는 top seed solution growth(TSSE, Czochralski) 방법에 의해 성장된다. K-F flux 방법에 의해 성장된 단결정은 flux inclusion에 의한 산란과 K이나 F에 의한 광의 흡수를 나타내게 되므로 TSSE 방법으로 성장한 단결정보다 나쁜 결정특성을 나타낸다. TSSE 방법에 있어서는 BaO와 과량의 TiO<sub>3</sub>를 사용하는데 과량의 TiO는 단결정 성장조건을 용이하게 하며 양질의 단결정 성장에 유해하다고 알려진 고온

hexagonal BaTiO<sub>3</sub>의 성장을 피할 수 있도록 해준다. TSSE 방법을 이용하면 congruent한 결정성장을 할 수 있으며 지름이 2~3cm이 되는 양질의 단결정을 얻을 수 있다. Dopant로는 Cr, Co, Ni, Fe과 Cu와 같은 전이금속이 사용되며 이들 전이금속은 Ti의 자리에 들어간다고 생각된다. 아직 BaTiO<sub>3</sub>의 물리적, 광학적 성질중 많은 부분에 대한 이해가 잘 이루어지지 않고 있다. BaTiO<sub>3</sub>를 광소재로 사용하는데 가장 큰 문제점은 상대적으로 긴 반응시간(response time)으로 알려져 있다. 이렇듯 느린 반응시간이 BaTiO<sub>3</sub> 고유의 성질이 아님이 밝혀짐에 따라 산화나 환원 분위기에서의 열처리와 같은 처리 방법 등을 이용하여 반응시간을 줄이려는 연구가 진행중이다.<sup>[30]</sup>

KNbO<sub>3</sub>는 매우 큰 암전도도(dark conductivity)를 갖는 물질로 그 값은 보통  $10^{-9} \sim 10^{-13} (\text{ohm-cm})^{-1}$ 이다. 이와같이 큰 암전도도는 Fe 이온에 의한 설명만으로는 충분하지 않으며 다른 이온전도 구조(mechanism)가 있을 것이라 생각된다. KNbO<sub>3</sub>의 큰 암전도도와 광전도도는 광굴절률의 변화를 제한한다고 알려져 있다. KNbO<sub>3</sub>:Fe의 기록 혹은 소멸(record or decay) 시간은  $10^{-9} \sim 10^{-10}$  초로 큰 전기광학계수와 광전도도를 갖는 KNbO<sub>3</sub>는 실시간 광처리 응용소자에 가장 적합한 물질로 알려져 있다.<sup>[31]</sup> KNbO<sub>3</sub>의 단결정 성장은 flux growth 방법에 의해 이루어지나 앞에서 언급한 바와 같이 좋은 품질의 큰 단결정을 만드는데 어려움이 있다.

Ba<sub>x</sub>Sr<sub>1-x</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>는 텅스텐 브론즈(tungsten-Bronze) 구조를 갖는 물질로서 Curie 온도가 물질의 조성에 따라 변화한다. 즉 Ba/Sr=3의 조성에서 T<sub>c</sub>=205°C이며 Ba/Sr=1/3의 조성에서는 T<sub>c</sub>=60°C이다. 좋은 품질의 단결정을 직경 1cm까지 Czochralski 방법에 의해 성장할 수 있다. 특히 최근에는 개량된 CZ(modified Czochralski) 방법에 의해 stain이 없고 균일성이 증가된 단결정 성장이 이루어지고 있다. 물질이 다른 특성도 조성에 영향을 받는데 hologram에 가장 적합한 SBN의 조성은 Ba/Sr=1/3으로 알려져 있다. Ba<sub>x</sub>Sr<sub>1-x</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>에 CeO<sub>2</sub>를 0.1wt% 첨가할 경우 photovoltaci recording에 있어서 매우 높은 민감도(sensitivity)를 갖게 되며 SBN에서의 mobility는 LiNbO<sub>3</sub>와 비슷하다고 알려져 있다.

Ba<sub>2</sub>NaNb<sub>5</sub>O<sub>15</sub>는 비선형 광학성질과 전기광학 성질을 가진 물질로서 Curie 온도가 560°C이다. 300°C에서 ferroelastic상 변화를 일으키며 이에 따라서 공간격자 군이 4mm에서 2mm로 변화하게 되고 polling을 필요로

한다. Ba<sub>2</sub>NaNb<sub>5</sub>O<sub>15</sub>의 광민감도(photo sensitivity)는 비교적 작은 편으로 광에 의한 굴절률 변화가 비교적 적은 응용분야에 적합하다.

Bi<sub>12</sub>SiO<sub>20</sub>와 Bi<sub>12</sub>TiO<sub>20</sub>는 paraelectro-optic 효과와 광전도도(photo conductivity)를 갖는 물질이다. 표 3에서 보듯이 BSO는 작은 전기광학계수를 갖지만 큰 유효이동거리를 가짐으로써 큰 광민감도(photo sensitivity)를 갖으며 광민감도는 온도의 증가에 따라 증가한다. BGO나 BTO는 BSO와 같은 구조를 가지며 비슷한 성질을 나타내는 물질로서 단지 Si이 Ge이나 Ti으로 대체된 것으로 이들 물질을 통칭하여 sillenite라 부르며 광학에 사용될 수 있을 정도의 좋은 특성을 갖는 단결정이 Czochralski 방법에 의해 큰 크기로 얻어진다. 이들 물질에 전기장을 가하지 않을 경우 광학적으로 등축성(optically isotropic)을 나타내지만 전기장이 가해질 경우 복굴절성을 나타내게 된다.

### 3) Sillenite

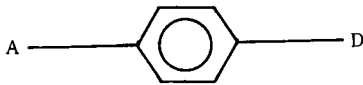
BSO와 BGO에 대해 광범위한 결정 특성의 연구가 이루어져 이들 물질의 에너지대와 전하이동 원리가 밝혀졌다. BSO는 3.25eV의 bandgap을 가지며<sup>[32]</sup> Si vacancy는 흡수곡선(absorption spectra)을 넓게 퍼지게 하며 conduction band의 최저 에너지보다 2.6eV 적은 에너지 준위(impurity state)를 나타내게 된다. 그 외에도 conduction band의 최저 에너지보다 2.2eV와 1.3eV가 작은 불순물 에너지 준위(impurity state)가 존재한다. BSO는 n-type의 큰 광전도도(photoconductivity)와 매우 작은 p-type의 암전도도(dark conductivity)를 가지므로 충분히 저장시간(storage time)을 가지고 있어 여러 응용분야에 이용될 수 있다. 이들 sillenite는 LiNbO<sub>3</sub>나 다른 광굴절 물질에 비해 짧은 상기록 시간을 갖기 때문에 실시간 기록소자로서 널리 응용될 수 있으며 공간 광변조기(spatial light modulator), 실시간 상기록 two-beam coupling과 phase conjugation 소자, self-pumped laser resonator 등에 이용을 위한 연구가 많이 진행되어왔다.

### 4) 유기물 중합체

앞 장에서 언급한 바와같이 유기물 중합체를 광재료로 이용하고자 하는 연구는 잘 알려진 광학적 비선형성에 관한 연구결과와 발달된 유기화학 및 화학공학을 이용하여 원하는 특성을 갖는 많은 유기물 중합체를 만들어 낼 수 있으며, 서로 다른 특성을 갖는 유기물들을 손쉽게 혼합하여 새로운 물질을 만들 수 있다는 장점을 갖는다. 또한 유기물 중합체를 광재료로써 사

용할 경우 유기물 중합체의 제작시 소요되는 비용이 저렴하며 원하는 구조로 만들 수 있다는 융통성과 유전율(dielectric constant)이 작으며 광 손상에 대한 저항성이 좋다는 부수적 성질을 얻을 수 있다. 반면 유기물 중합체 자체의 취약성으로 인하여 소자의 내구성이 무기물 재료를 사용한 소자에 비해 떨어진다는 점과 중합체의 비정질 특성때문에 광전스위치나 비선형 광소자와 같은 응용에 있어서 polling이 필요하며 도파로(optical waveguide) 제작이 용이하지 않다는 문제점을 갖고 있다. 또한 거시적(macroscopic) 광학적 비선형성과 미시적(microscopic) 광학적 비선형성 사이의 관계가 어느정도 정립되어 유기물 중합체의 제작시 대략적인 지침서로서 역할을 하고 있지만 거시적 광학적 비선형성을 예측할 수 있는 이론의 개발을 필요로 한다.

유기물 중합체가 광학적 비선형성을 얻기 위해서는 비점대칭 구조(acentro symmetric)를 갖도록 하여야 한다. 따라서 유기물 단위체에 있어 pi-전자군의 수소 원자를 donor나 acceptor로 작용할 수 있는 화학단(chemical group)으로 대체시킨다.<sup>[33]</sup> 즉 아래 그림과 같은 구조를 갖는 단위체를 만들면 된다.



여기서 A와 D는 각각 acceptor와 donor로 작용하는 화학군을 나타낸다. 표 5는 큰 광학적 비선형성을 나타내는 유기물의 구조와 각 유기물의 공간구조를 나타내고 있으며 이들 물질의 전기광학계수가 표 3에 나타나 있다.

광학적 비선형성을 나타내는 유기물 중합체의 제조 방법으로는 Langmuir-Blodgett법, Shear Grown법 및 Spin coating이 있다. Bulk의 형태로 유기물을 제조하기 위해서는 광학적 비선형을 갖지 않는 유기물 모재(host material)에 비선형을 나타내는 다른 유기물(nonlinear guest)을 첨가하는 방법이 이용된다. 최근에 들어와서는 중합체에 반도체(CdS나 PbS)를 첨가하여 비선형 광학효과(nonlinear optic effect)를 얻으려는 노력이 진행되고 있으며 이러한 방법에 의해 3차(third order) susceptibility를 보여주는 물질이 얻어졌다는 보고가 있다.

거시적 second order susceptibility를 얻기 위해서는 앞에서 언급한 바와 같이 비점대칭 구조를 갖는 유

표 5. 전기광학 효과와 광학적 비선형성을 가지는 유기물

compound		Fundamental molecule	point group
MAP	methyl-(2,4-dinitrophenyl)-aminopropanoate		2
POM	3-methyl-4-nitropyridine-1-oxide		222
MNA	2-methyl-4-nitroaniline		m (=mm2)
m-NA	meta-nitroaniline		mm2
NPP	N-(4-nitrophenyl)-(L)-prolinol		2
COANP	2-Cyclooctyl amino-5-Nitropyridine		mm2
UREA	Carbonyl diamide		42m

기물 단위체를 만들어야 한다는 조건 이외에 각 단위체의 규칙적인 배열이 필요하다. 이를 위해 polling이라는 작업이 요구되며 유기물 중합체의 polling에 대한 많은 연구가 이루어졌다.<sup>[34]</sup> MNA는 거의 평행하게 배열된 분자로 구성되어 있어 큰 광학적 비선형성을 나타내며 NPP는 서로 다른 위치에 붙어있는 nitrophenyl 기에 의해 비선형성을 나타낸다. POM과 같은 비극성 물질도 mixed polarization susceptibility를 나타낸다. 최근에 DMS methylsulfate가 LiNbO<sub>3</sub>보다 몇배 큰 전기광학계수를 갖는다고 보고되었다. 이러한 광학적 비선형성을 갖는 물질이 주파수 변조에 응용되기 위해서는 상일치(phase matching)의 조건을 만족시킬 수 있어야 한다. Urea는 큰 광학적 비선형성을 갖지 않지만 복굴절성이 크고 단파장에서 투명하다는 성질을 갖고 있어 주파수 변조에 유용하다고 알려져 있다.

유기물에 있어서 3차(third order) 광학적 비선형성은 2차(second order) 광학적 비선형성에 비해 연구가 되어지지 않은 분야로써 third order 비선형성에 대한

이론과 그 이해는 원초적 단계를 벗어나지 못하고 있다. 3차 비선형성에 있어 중요한 것은 pi-전자의 conjugation이다. pi-전자 conjugated된 중합체로써 doped된 상태에서 큰 전도도를 나타내거나 광여기(photoexcitation)시 전도도가 큰 중합체가 3차 광학적 비선형성을 크게 나타낸다고 알려져 있다.<sup>[33]</sup> 큰 3차 비선형성을 갖는 물질로는 polydiacetylen(PDA)과 PBT가 있는데 PDA는 반도체이고 PBT는 부도체이다. 비록 큰 3차 비선형성을 갖는 유기물 중합체가 femtosecond의 빠른 반응시간(response time)을 갖지만 광교환 소자에 사용될 정도의 큰 비선형성은 갖지 못하는 것으로 알려져 있다.

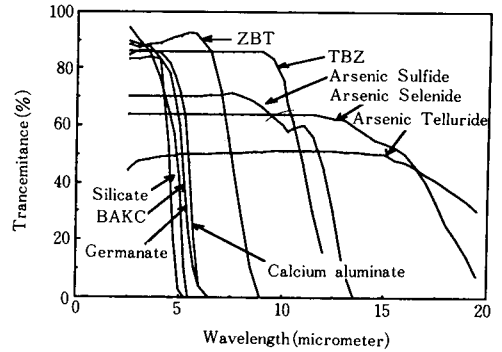
5) Glasses

1979년 0.2dB/km의 손실을 갖는 광 화이버가 제작되었는데 이러한 광화이버 기술의 발전은 광통신 기술 발전에 원동력이 되었다. 0.2dB/Km의 손실은 silica 자체의 고유특성에 의한 것임이 밝혀지고 10<sup>-2</sup>dB/Km 이하의 손실을 갖는 물질을 얻을 수 있다는 가능성이 발표된 후에 silica를 이용한 광 화이버보다 넓은 파장 영역에서 투명도를 갖거나 silica를 이용한 광 화이버보다 적은 손실을 갖는 새로운 glass 물질에 대한 연구가 다시 시작되게 되었다.

광 화이버 글래스(glass)로 사용되기 위해서는 일반적으로 다음의 몇 가지 조건을 만족시켜야 한다. 첫째는 글래스를 형성할 수 있는 조성영역을 가져야 하며 둘째는 장파장에서도 투명도(transparency)를 유지해야 하고 셋째는 외부조건에 대해 안정(stability)해야 하며 네번째는 기계적 성질과 성형성(formibility)이 좋아야 한다. 여러가지 글래스 물질의 투과도가 그림 6에 나타나 있다.

SiO<sub>2</sub>는 글래스 물질중에서 안정한 글래스를 갖는 조성 영역이 가장 넓은 물질로서 좋은 물리적 화학적 성질을 갖는다. 그러나 입사광의 흡수가 4-5 μm부터 시작된다는 단점을 가지고 있는데 이는 Si-O-Si의 진동에 의한 것으로 알려져 있다. 입사광의 흡수를 장파장 쪽으로 이동시키기 위해 작은 field strength를 갖는 CaO와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 SiO<sub>2</sub>에 첨가한다. CaO와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 Si-O 진동의 주파수를 감소시켜 흡수를 장파장으로 이동시킨다고 보고되었다. 최적의 투명도를 얻기 위해서는 불순물중 특히 B와 수분의 침투를 최소화하여 B나 O-H에 의한 흡수를 제거해야만 한다.

칼슘 알루미늄이트 글래스(calcium aluminate glass)는 SiO<sub>2</sub>보다 1 μm 정도 이상의 장파장에서도 투명도를 가지며 열충격(thermal shock)에 대해서도



BAKC(BeF<sub>2</sub>, 47%, AlF<sub>3</sub>, 10%, and CaF<sub>2</sub>, 16%), ZBT(ZrF<sub>4</sub>, 57.5%, ThF<sub>4</sub>, 8.75%, and BaF<sub>2</sub>, 33.75%), and TBZ(ThF<sub>4</sub>, 40%, BaF<sub>2</sub>, 20%, and ZnF<sub>2</sub>, 40%).

그림 6. 여러가지 글래스의 파장에 따른 투과도

좋은 저항성을 갖고 있다. 그러나 어느 정도 이상의 크기가 되었을 때 결정화(crystallization)하는 경향과 O-H에 의한 흡수를 완전히 제거하는데 어려움이 있다. 칼슘 알루미늄이트에 SiO<sub>2</sub>가 첨가되는 경우 성형성과 안정성이 향상되며 네트워크 형성체인 GeO<sub>2</sub>를 첨가할 경우 물질의 특성이 향상된다고 알려졌다.

GeO<sub>2</sub>는 좋은 투과도와 물리적 화학적 성질을 가지며 GeO<sub>2</sub>의 투과도와 글래스 형성을 향상시키기 위해 Ba, Pb를 첨가한다고 알려져 있다. 자외선 흡수도와 Rayleigh 산란 결과에 의하면 GeO<sub>2</sub>는 2 μm의 주파수에서 0.25dB/Km의 손실을 갖는다고 보고되었으나 실제로는 이보다 훨씬 큰 손실을 나타내는데(2.0 μm에서 최저손실은 13dB/Km)이는 제작공정에 기인한다고 보고되었다. GeO<sub>2</sub>의 최대 단점은 제작비가 비싸다는 점이다.

As, Sn, Mo이나 W 산화물을 이용하여 광 화이버용 글래스를 만들려는 시도가 있었으나 이들 물질이 다른 물질에 비해 별다른 장점을 갖지 못한다고 알려졌다. 중금속 산화물을 이용할 경우 Pb, Bi의 산화물이 유망할 것으로 알려져 있다.<sup>[35]</sup>

할라이드 물질은 극히 적은 손실을 갖는 화이버로 사용되기 가장 적합한 물질로 알려져 있다. 이는 할라이드 물질의 bandgap이 크고 multiphonon에 의한 흡수가 SiO<sub>2</sub> 글래스 물질에서 보다 긴 파장에서 일어나며 결정물과 비선형성이 매우 작다는데 기인한다.<sup>[36][37]</sup> 계산에 의하면 BeF<sub>2</sub>는 1.05 μm에서 ZnCl<sub>2</sub>는 3.5-4.0 μm에서 10<sup>-2</sup>dB/Km의 손실을 나타낸다. 그

려나 아직 이와 같이 작은 손실을 나타내는 할라이드 물질이 보고되지 않고 있다.

BeF<sub>2</sub>는 fluorides 중에서 가장 좋은 광 화이버 물질로 SiO<sub>2</sub>보다 넓은 구간에서 투명도를 나타내지만 일반적인 투과성은 좋지 않으며 독성(toxicity)이 강하고 O-H를 포함하고 있다는 단점을 갖고 있다. 이러한 BeF<sub>2</sub>에 AlF<sub>3</sub>, KF와 CaF<sub>2</sub>를 첨가하여 용융이 쉽고 O-H를 포함하지 않는 좋은 광학적 질을 갖는 물질(BAKC)이 제작되었다. ZrF<sub>4</sub>를 이용한 몇가지 fluoride 물질이 제작되었으며 HfF<sub>4</sub> 이용한 광 화이버 물질이 발견되었다. 이 중 ZrF<sub>4</sub>는 가장 좋은 투과도를 나타내나 글래스로 만들기 위해서는 급냉을 하여야만 한다. ZrF<sub>4</sub>, HfF<sub>4</sub>와 AlF<sub>3</sub>를 이용한 다원계(multicomponent) 글래스의 연구가 활발히 이루어져 왔다. 이들 글래스는 약 0.2 μm서부터 약 7 μm까지의 넓은 영역에 걸쳐 투명하고 산(acid)이나 수분에 대해 상대적으로 안정하며 기계적 성질과 성형성이 좋다는 장점을 가지는 반면 bulk로 만들 경우 10-50 μm 정도의 결정체를 형성하려는 경향을 가지며 200°C 이상의 고온에서 사용할 수 없고 열충격에 약하며 재료물질이 비싸다는 단점을 가지고 있다. 그러나 이들 물질의 제반 특성을 이용하여 SiO<sub>2</sub>나 GeO<sub>2</sub>가 사용되는 파장과는 다른 영역에서 광 도파로용 화이버(optical waveguide fiber)로 fluoride 글래스를 이용할 수 있다는 가능성을 가지고 있다. 할라이드 글래스 물질이외 할라이드 단결정과 다결정을 화이버로 사용하려는 연구가 진행되었으며 그 대표적인 물질로는 KCl, NaCl, KBr, AgCl 등이 있으나 아직 좋은 결과가 보고되고 있지 않다.

Chalcogenide는 6족 원소를 음이온으로 갖는 화합물을 통칭하는 용어이나 여기에서는 산화물이나 fluoride 글래스가 아닌 sulfide, selenide, telluride 글래스가 나타내는 용어로 사용하였다. Chalcogenide에서 글래스를 형성하는 성향은 S>Se>Te, As>P>Sb와 Si>Ge>Sn의 순서이나 적외선 투과도 및 열변형(thermal deformation), 저항성, 경도 등은 글래스 형성 성향과 반대이다(단, As과 P는 순서가 바뀜). As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>는 chalcogenide 중에서 최초로 상용화된 물질로서 hologram 기록 매질, photoresist로 이용될 수 있다. 3상(ternary)이나 그 이상의 다원계 글래스의 제작이 2상(binary) 글래스에 앞에서 언급한 원소를 첨가하는 것에 의해 이루어졌다. Ge-As-S 시스템은 넓은 구간에 걸쳐 안정한 글래스로 제작할 수 있으며 Ge-Sn-Se과 Ge-As-Se 계는 적외선 투과도, 성형성 및

물리적 화학적 특성이 좋다는 장점을 가지고 있으므로 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. Telluride 글래스는 투과도와 안정성 그리고 성형성에 있어 sulfide와 selenide 글래스에 비해 떨어진다고 보고된다. Chalcogenide 글래스는 어떤 비정질에서 보다 좋은 적외선 투과도를 가지며 성형성이 좋으나 제작시 포함되는 산소의 제거가 어려우며 가시광선에서 투과도가 낮고 일반적으로 물리적 화학적 특성이 나빠며 경도가 낮다는 단점을 가지고 있다.


### 參 考 文 獻

- [1] J.E. Bowers, "High speed semiconductor laser design and performance," *Solid-State Electr.* vol. 30, no. 1, pp. 1-11, January 1987.
- [2] K. Uomi et al., "Ultra-high speed (17GHz) 1.55 μm /4-shifted DFB lasers and proposal on reducing damping phenomenon for high speed modulation," *IOCC' 89 Technical Digest*, vol. 2, pp. 120-121, Kobe, Japan, July 1989.
- [3] L. Suemune et al., "Extremely wide modulation bandwidth in a low threshold current strained quantum well laser," *Appl. Phys. Lett.* vol. 53, no. 15, pp. 1378-1380, Oct. 1988.
- [4] J.E.A. Whiteaway et al., "The design and assessment of /4 phase shifted DFB laser structure," *IEEE J. of Quantum Electronics*, vol. 25, no. 6, pp. 1261-1279, June 1989.
- [5] R.A. Linke et al., "High-capacity coherent lightwave system," *IEEE J. of Lightwave Technology*, vol. 6, no. 11, pp. 1750-1769, Nov. 1988.
- [6] K. Kobayashi et al., "Single frequency and tunable laser diodes," *IEEE J. of Lightwave Technology*, vol. 6, no. 11, pp. 1623-1633, Nov. 1988.
- [7] J.C. Campbell et al., "InP/InGaAsP/InGaAs avalanche photodiodes with 70 GHz gain-bandwidth product grown by chemical beam epitaxy," *OFC '88 Technical Digest*, paper TUC3, pp. 12, New Orleans, USA, Jan. 1988.
- [8] M.J. O'Mahony, "Semiconductor laser optical amplifiers for use in future fiber system," *IEEE J. of Lightwave Technology*, vol. 6, no. 4, pp. 531-544, Apr. 1988.

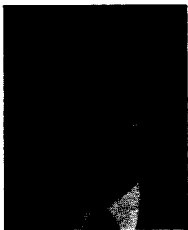
- [9] T. Saitoh et al., "Recent progress in semiconductor laser amplifiers," *IEEE J. of Lightwave Technology*, vol. 6, no. 11, pp. 1656-1664, Nov. 1988.
- [10] J.D. Crow et al., "A GaAs MESFET IC optical multiprocessor networks," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 36, no. 2, pp. 263-268, Feb. 1989.
- [11] Y. Inomoto et al., "A 1.2Gb/s-52.5Km optical fiber transmission experiment using OEICs on GaAs-on-InP heterostructures," *OFC '88 Technical Digest*, paper PD9, New Orleans, USA, January 1988.
- [12] N. Suzuki et al., "High-speed operation of 1.5 $\mu$ m GaInAsP/InP optoelectronic integrated laser driver," *Electronics Letters*, vol. 24, no. 8, pp. 467-468, April 1988.
- [13] T. Ikegami et al., "Semiconductor devices in photonic switching," *IEEE J. of Selected Areas in Communications*, vol. 6, no. 7, pp. 1131-1140, Aug. 1988.
- [14] T.H. Wood, "Multiple quantum well waveguide modulators," *IEEE J. of Lightwave Technology*, vol. 6, no. 6, pp. 743-757, June 1988.
- [15] E. Banks et al., *J. Appl. Polymer Sci.*, vol. 25, pp. 359-368, 1980.
- [16] P. Kaczmarek et al., *IEE Proc.*, vol. 136, pp. 152-158, 1989.
- [17] P. van Daele et al., *Proc. ECOC '89*, vol. PDB-4, pp. 58-61, 1989.
- [18] M.B.J. Diemeer, *Proc., ECOC 89*, vol. ThB 22-3, pp. 425-428, 1989.
- [19] H.P. Weber et al., *Opt. and Quantum Electro.*, vol. 7, pp. 465-473, 1975.
- [20] A.M. Glass, "Materials for photonic switching and information processing," *MRS Bulletin*, vol. 14, no. 8, pp. 16-20, Aug. 1989.
- [21] T.H. Wood et al., "131ps optical modulation in semiconductor multiple quantum well" *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. QE-21, no. 2, pp. 117-127, Feb. 1985.
- [22] D.A.B. Miller et al., "Electroabsorption of highly confined system: Theory of the quantum confined Franz-Keldysh effect in semiconductor quantum wires and dots," *J. Appl. Phys. Lett.*, vol. 52, no. 20, pp. 2154-2156, June 1988.
- [23] B.A. Wilson et al., "Optical evidence of staggered band alignments in (AlGa)As/AlAs multi-quantum well structure," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. B4, pp. 1037-1040, Jul./Aug. 1986.
- [24] D.A.B. Miller et al., "The quantum well self-electrooptic effect-devices: Optoelectronic bistability and oscillation, and self-linearized modulation," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-21, pp. 1462-1476, Sep. 1985.
- [25] A. Kost et al., "Nonlinear multiple quantum well hetero n-i-p-i structure for photonics," Conference on laser and Electro-optics, *Conference Digest*, 138 TUR3, 1988.
- [26] G.W. Iseler et al., "Ternary semiconductor crystal for nonlinear optical applications," *Ternary Compounds* edited by G.D. Holah, pp. 73-88, Institute of Physics, Bristol and London.
- [27] J.G. McInerney, "Bistable optoelectronic devices," *SPIE* vol. 836, Optoelectronic Materials Devices, Packaging, and Interconnects, pp. 244-253, 1987.
- [28] H.M. Gibbs, *Optical Bistability: Controlling light with light*, Academic Press Inc., New York, p. 312, 1985.
- [29] A. Carnera, "Optical waveguides in LiNbO<sub>3</sub> produced by Ti in-diffusion, ion exchange, and ion implantation," *Electro-optic and photorefractive Materials*, edited by P. Gunter, Springer-Verlag, pp. 179-194, 1987.
- [30] M.B. Klein, "Photorefractive properties of BaTiO<sub>3</sub>," *Photorefractive materials and their applications I*, edited by P. Gunter and J.P. Huignard, Springer-Verlag, pp. 195-236, 1988.
- [31] P. Gunter and H.J. Eichler, "Introduction to photorefractive materials," *Electrooptic and photorefractive Materials*, edited by P. Gunter, Springer-Verlag, pp. 206-228, 1987.
- [32] P. Gunter and J.-P. Huignard, "Photorefractive effects and materials," *Electro-optic and photorefractive Materials*, edited by P. Gunter, Springer-Verlag, pp. 7-74, 1987.
- [33] D.R. Ulrich, "Nonlinear optical and electroactive polymers," *Nonlinear optical and electroactive polymers*, edited by P.N. Prasad and D.R. Ulrich, Prentice Hall, pp.



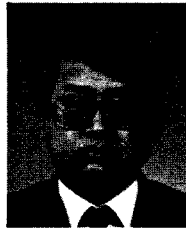
1-12, 1987.  
 [34] G.R. Meredith, "Optical materials for nonlinear optics," *MRS Bulletin*, vol. 14, no. 8, pp. 24-29, Aug. 1989.  
 [35] W.H. Dumbaugh, "Infrared transmitting

glasses," *Opt. Eng.*, vol. 24, no. 2, pp. 257-262, Mar./Apr. 1985.  
 [36] T. Miyashita et al., "Infrared optical fibers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-18, no. 10, pp. 1432-1450, Oct. 1982. 

筆者紹介



李 章 雨  
 1949年 9月 20日生  
 1976年 서울대학교 물리학과 졸업  
 1978年 서울대학교 대학원 물리학과(석사)  
 1983年 미국 North Carolina State Univ. 물리학 (박사)  
 1984년~1986년 미국 Texas Instruments 중앙연구소 연구원 (Member of Technical Staff)  
 1986년~1988년 미국 Kopin Corporation 연구실장  
 1988년~현재 삼미전자주식회사 상무이사  
 주관심분야: Optoelectronics와 microwave technology 등



權 寧 世  
 1945年 12月 28日生  
 1968年 서울대학교 공과대학 (학사)  
 1972年 미국 오하이오대학교 (석사)  
 1977年 미국 캘리포니아대학교 (버클리), (박사)  
 1977년~1979년 미국 Army Research Office 및 Duke 대학 연구원  
 1979년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 조교수, 부교수, 교수  
 주관심분야: 고속 광통신 및 광계산을 위한 광전집적회로