

光機能素子 技術現況 및 展望

강 광 남
(KIST 광전자연구소장)

■ 차 례 ■

- | | |
|-------------------|--------------------------|
| I. 서 론 | III. 분야별 기술 현황과 기술의 발전방향 |
| II. 광기능소자의 정의와 분류 | IV. 결 론 |

I. 서 론

인류의 역사의 시작과 더불어 시작된 통신기술의 발전은 인류가 최초로 사용한 digital 광통신 시스템으로부터 전자기파의 이해와 아울러 실용화 시킨 무선 통신의 역사를 거쳐 저손실 광섬유의 개발과 실용화에 따른 광통신의 광범위한 활용에까지 무한한 발전의 역사를 거듭하여왔다. 광통신 기술은 1970년대의 개발의 과정을 거쳐 1980년대에 광범위한 실용화 실적을 이룩하였고, 특히 대륙간 해저 전송망과 국가 기간 전송망으로 그 실용성을 입증한 바, 낮은 전송 손실에 따른 장거리 통신망에서의 중계기 숫자의 감소와 마이크로웨이브 통신망보다 월등히 넓은 bandwidth 및 전자기파에 대한 immunity등이 그 주된 이유이다. 특히 광주파수와 마이크로웨이브간의 전송 주파수 비교에서 광주파수가 10,000배 이상의 고주파수인 점을 감안하면 현재의 실용화된 광통신 시스템의 bandwidth가 100 내지 1,000배 이상 증가가 가능할 것으로 인식되어 그 중요성이 더욱 강조되고 있다.

통신 시스템의 bandwidth가 더욱 넓어져야할 필요성은 21세기의 사회구조가 정보산업을 기간으로한 고도의 정보화 사회로 전환될 것인 바, telecommunication을 기간산업으로 한 각종 computer network, 이동 통신망, 정보의 생산과 저장 및 분배산업등이 크게

부각될 것이고, 이에 따라 광대역 고속 통신망의 개발이 필요할 것이다. 특히 HDTV, full color 동화상 전송, real time image processing등의 실용화가 21세기의 통신시스템이 구현코자하는 궁극적 목적이 될 것이며, 기술적 목표는 10,000km 이상의 무중계 전송시스템 기술, 1,000채널 이상의 multiplexing 기술 및 10Gbps 이상의 초고속 전송시스템 기술등의 hardware기술과 시스템 운영기술일 것이다.

II. 광기능소자의 정의와 분류

2-1. 광기능소자의 정의

광기능소자(optical functional devices)는 정보의 생산, 처리, 저장 및 전송이 광학적인 방법에 의해 이루어지는 소자를 통칭하는 의미를 갖는다. 가장 비근한 예인 반도체 IC와 비교하면 반도체 IC의 경우 전자적 신호에 의해 정보의 생산과 처리 및 지장이 이루어지는데 비해, 광기능소자의 경우 신호의 전달매체가 photon으로 광회로의 집적화를 통해 광IC(optical integrated circuit; optical IC)의 구현이 기대된다. 이 경우 광신호 전달용 배선은 optical waveguide에 의한 광배선이 될 것이며, laser diode, photo detector, optical modulator, 및 광switch등이 개별소자들에 해당하고, 이들의 집적화에 의한 IC수준의 예로는 광통신용

transmitter IC, receiver IC, detector array, optical switch
방등이 반도체 집적회로에 상응된다. 아울러 광IC 기술의 발전과 더불어 다양한 기능의 집적화가 가능해질 것으로 예견된다. 따라서 광기능소자의 일반적 정의는 아래와 같이 표현할 수 있다.

- 첫째, 광신호를 생산하거나 검출하는 기능
- 둘째, 광신호의 전달, 변조, 스위칭 및 비교 기능
- 셋째, 광신호의 연산 기능
- 넷째, 광신호의 저장 기능
- 다섯째, 광신호에 의한 계측 기능

이상의 기능을 수행하는 단위소자(unit devices) 및 이들의 집적화에 의고한 광IC를 역시 광기능소자로 분류되어질 수 있다.

광기능소자의 기능을 수행하기 위해 제어신호 내지 제어회로들이 필요할 것인 바, 광신호를 전기적 신호로 변환한 후 필요한 신호처리 과정을 거쳐 다시 광신호로 변환하여 전송하는 형태의 소자 역시 광기능소자로 분류할 수 있는 바, 소위 광집적회로(optoelectronic IC; OEIC)가 그 예이다. OEIC의 경우 전자회로에 의한 신호처리가 반도체 집적회로의 기술 발전에 힘입어 그해 발달된 사실에 비추어 순수한 광집적회로보다 더 광범위한 기능을 수행할 수 있을 것으로 예견된다.

2-2. 광기능소자의 분류

광기능소자(optical functional devices)의 분류는 여러가지 방법이 있을 수 있으나 통신산업에의 응용이 주된 응용분야라고 보고 분류함이 타당할 것으로 인식된다. 이 경우 각각의 소자가 수행하는 기능에 따라 아래와 같이 크게 분류할 수 있다.

광기능소자의 분류와 그 예

분류

- 광원 및 transmitter module
- 수광소자 및 receiver module
- 광섬유 및 광섬유 소자
- 광교환 소자 및 광교환 기술
- 광연산 및 메모리 소자
- 기타 광부품

응용소자의 예

laser diode, LED, LD array, Tx module

- pin diode, APD, MSM diode, Photo transistor
- SM & MIM fiber, plastic fiber, fiber 센서
- 1×N switch, N×N switch, 광배선 소자
- 비선형 광학소자, CD, LD, MOD, 광DRAM
- modulator, isolator, coupler, 공간 광변조기

광기능소자의 응용분야는 위의 분류에서도 볼 수 있듯이 광통신 시스템에의 기여만이 아니라 광메모리, 광연산, 광계측, 각종 디스플레이 및 광정보 저장 시스템등 다양한 분야를 갖고 있다. 특히 광기능소자의 응용분야뿐만 아니라 소자 그 자체도 최첨단의 기술 개발이 필요하며, 산업화 시 그 부가가치가 대단히 높으며 이는 응용 시스템도 광기능소자가 핵심적인 역할을 수행으로써 이 분야의 기술자립이 없이는 대외적인 기술경쟁력이 확보될 수 없는 점이 이 분야 기술의 특성이라 할 수 있다.

III. 분야별 기술 현황과 기술의 발전방향

3-1. 광원 및 transmitter module

광통신용 광원의 경우 근거리용 또는 저가격 LAN 용 LED를 제외하고는 laser diode (LD)를 사용함이 보편화 되어 있다. LED의 경우 사용 파장 0.8, 1.3, 1.55um대의 multimode fiber용으로 대략 100Mbps.km 정도의 bandwidth를 가지며 전송거리 10km 내외를 갖는 제품이 주종을 이루고 있다. 응용분야는 주로 저가의 LAN 부품으로 이용되며 Si- 또는 Ge-pin diode와 함께 사용된다. 현재 10mW 정도의 출력 수준에 파장 정밀도 10nm, 파장반폭 120nm, 예상수명 10E8 시간 정도의 제품 생산이 가능할 것이나, 향후 10년 이내에 출력 50mW, 파장정밀도 5nm, 예상수명 10E9 시간 이상의 제품이 실용화 될 것으로 예견되고 있다.⁽¹⁾

LD의 경우 응용 system에 따라 요구 사항이 다른 바, 해저전송, 기간전송등의 분야에 응용될 LD는 통상 1.3, 1.55um의 파장에 fiber출력 10mW정도, 변조대역 10Gbps 이상의 특성을 공통적으로 요구한다. 아울러 고속 전송의 분야는 파장정밀도 10nm 이하, 변조대역 30GHz 이상, 신뢰성 10E6시간 이상의 특성이 가외로 요구된다.⁽²⁾ LD의 경우 비록 그 가격이 고가이긴 하나 현재의 수준에서 통신용 소자로 사용하는 데에는 기술적 문제가 없으나 향후 수년내에 신뢰성의 향상, LD 및 변조기의 집적화, 파장 정밀도의 향상 및 구동회로와의 집적화 등이 해결되어야 할 것이다.

DFB-LD와 DBR-LD는 optical feedback의 구조에

다른 분류이고 현재의 광통신용 광원으로 가장 널리 쓰이는 소자구조이다. 그 특성은 laser diode의 chip내에 distributed feedback 구조 또는 Bragg reflector를 설치하여 cavity 구조를 완성하는 것으로 우수한 파장정밀도와 매우 좁은 발진선폭을 얻을 수 있으며, 주로 high speed operation을 위해서 개발되고 있다.^(3,4) 특히 10내지 100kHz 정도의 극히 좁은 발진선폭은 100channel 또는 그 이상의 multiplexing에 필수적인 요건이다. 이와같은 구조의 제조에 필요한 핵심 기술은 MBE, CBE 및 MOCVD 등에 의한 multiple epitaxy 기술과 0.1um 정도의 가공정밀도를 갖는 초미세 가공 기술로 e-beam lithography 또는 holographic lithography 등이다. 최종적으로는 package 기술이 중요한 바, output beam의 stability를 위해 monitoring용 photo-detector와 엄격한 온도 제어를 위한 Peltier module 및 이들의 제어부와 fiber output 부분들이다. 장래 이 분야의 핵심 기술은 multi-quantum well 또는 quantum-wire 구조의 LD들이 실용화되는 방향으로 생산기술들을 개발할 것이고, 이 모든 노력들은 결국 파장정밀도 향상, 발진선폭의 최소화 및 주수대역의 증대에 집중될 것이다. 아울러 구동회로부와외의 집적회와 external modulator와의 집적화 역시 중요한 개발 분야가 될 것이다.

Fabry-Perot cavity laser는 구조의 단순성과 개발의 역사가 긴 점에 의해 광통신용 광원으로써 뿐만 아니라 광섬유 증폭기용 pumping source, 각종 고체 레이저용 pumping source와 기타 고출력 LD의 응용분야에서 극히 중요한 소자이다. 특히 array 구조에 의한 출력의 증가는 이미 10W대의 array들이 실험실 규모에서 성공적으로 발표되고 있는 현화이다.⁽⁵⁾ 특히 중요한 laser는 0.98 또는 1.48um의 광섬유 증폭기용 LD로 해저 전송망이나 초장거리 전송망의 구현에 필수적인 광직접증폭기 모듈의 핵심 부품이 될 것이다. FP-LD의 장래 연구 과제는 파장정밀도의 향상, 주파수대역의 증가 및 신뢰성의 제고가 될 것이며 아울러 저가격화와 온도특성의 향상이 요구된다.

Vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL)은 기존의 edge emitting laser cavity가 기판과 평행한 위치에 있으므로 cavity의 구성상 양 단면을 고반사율을 갖게 제조해야 하는 난점을 해소하기 위하여 laser cavity를 기판과 수직으로 구성하는 기술을 이용한 것이다. 아울러 VCSEL 구조에 의해 평면상의 2D-array 구조를 가능케 하여 optical computing 등 응용의 분야가 크게 늘어날 전망이다. VCSEL은 single 또는 multiple quan-

tum well을 active layer로 사용하고 상하에 multiple quantum well 구조에 의한 Bragg reflector를 설치함으로써 cavity를 완성하는 것이다. 따라서 상하 reflector의 구조 설계에 의한 의해 output beam이 front 또는 back sface emitting 방식의 소자구조로 분류가 가능하다. 사용할 수 있는 재료는 GaAs계 또는 InP계 ternary 또는 quaternary crystal이며, 핵심 기술은 mutiple quantum 구조의 epitaxy 기술로 현재 MBE, MOCVD 및 CBE가 가장 널리 이용되는 기술이다. 아울러 vertical cavity 구조의 공정을 위한 micro machining용 ion beam etching 기술 또는 ion implantation 기술이 소자간 isolation을 위해 필수적이다. 대표적 개발 사례로 InGaAs strained layer quantum well을 사용하여 980nm의 front 및 back surface emitting laser를 개발하였으며⁽⁶⁾, cavity 구조의 변화에 의해 930-980nm의 tuning range를 갖는 7×20 surface emitting laser array가 발표되어 있다.⁽⁷⁾

Strained layer quantum-well laser는 compressive / tensile strain을 갖는 lattice mismatched quantum well을 사용하여 1.48-1.55um의 laser를 MBE 또는 CBE 방법으로 제조하며, 주로 광통신용 광원 내지 광증폭기용 pumping source로 이용하고 있다. 현재까지의 개발 실적은 threshold current density는 InGaAs-InGaAsP에서 160A / Cm², efficient 82%로 1mW CW에서 6200시간의 동작이 보고되고 있다. 동일한 구조의 3-section tunable laser의 경우 7.2nm의 tuning range를 보이며 3dB bandwidth가 40GHz로 보고되고 있다.⁽⁸⁾ 다른 보고에 의하면 최저 83A / Cm²의 threshold current density를 얻었으며 InGaAs-AlGaAs 구조 역시 900-1100nm대의 활용을 위해 MBE 방식으로 개발이 진행되고 있다.⁽⁹⁾

가시광 laser는 정보처리용 광원으로 크게 기대되고 있는 바, magneto-optic disk용 head, bar-code reader용 source 등 응용의 분야가 주로 consumer electronics에 있다. 사용되는 material은 InAlGaP-AlGaAs로 개발 목표는 실온, 연속동작 고출력 laser의 실용화이다. 사용 장비는 주로 MOCVD가 주종을 이루나 최근의 CBE 방식도 차세대 기술로 기대되고 있다. 현재까지의 개발 실적은 발광파장 630-650nm 범위이고 실온 연속 (CW) 동작에서 25mW의 것이 보고되고 있다. Threshold current density의 경우 1.7kA / Cm², threshold current 34mA를 670nm에서 보고하기도 하며 광출력의 경우 연속동작 80mW, pulse동작 400mW / facet가 보고되어 있다.⁽¹⁰⁾

High power laser 또는 LED의 경우 solid state laser (Nd:YAG or Nd:YLF) 또는 second harmonic generation(SHG)용 pumping source로 사용된다. InGaP-AlGaAs 출력이 보고되어 있고 150 μ m의 stripe width에서 2.9W(CW)의 보고가 있다. 고출력 laser의 경우 mirror의 degradation에 의한 reliability가 가장 중요한 문제로 Al₂O₃ 또는 SiO₂ 등을 사용한 laser 구조에서 100mW, 25°C의 동작조건에서 100,000시간 이상의 수명이 예측되어지는 현황에 도달하여 있다.⁽¹¹⁾

Tunable laser는 Broad-band ISDN, coherent communication을 위한 핵심소자이다. 특히 WDM 또는 FDM 방식에 의한 multi-channel 통신용 광원과 coherent communication용 local oscillator를 위해 필수적이다. 일반적으로 laser의 tuning을 위해서는 두가지 방식이 사용되는 바, external cavity를 사용하거나 또는 multi-section electrode를 사용하여 current injection에 의한 Bragg wavelength를 제어하는 방식이다. 전자의 경우 tuning range가 50-150 정도로 매우 넓으나 monolithic integration이 불가능할 뿐만 아니라 mechanical stability가 낮아 장래의 광IC에서의 활용에 제한이 있다. 후자의 경우 통상 DFB 또는 DBR 구조에 전류주입형 다진극 구조를 사용하여 10nm 선위의 tuning range가 보고되고 있다.⁽¹²⁾ 이 경우의 특징은 광통신용 여타 device들과의 monolithic integration이 가능하여 one chip transmitter, receiver등의 구현 가능하고, 균일한 소자의 대량생산에 유리하다. 현재의 기술발전 추세로 미루어 B-ISDN에의 응용을 위해 100channel 이상의 multiplexing에는 10-20nm 정도의 연속파장 가변이 가능한 LD가 실용화되어야 할 것으로 인식되고 있다. 아울러 파장 정밀도는 1nm 이하, 발진선폭 10kHz 이하 및 주파수 대역 40GHz 이상의 소자 기술이 개발되어야 할 것이다. GaAs-AlGaAs GRIN-SCH-SQW 구조의 tunable DBR LD의 경우 MOCVD 방법에 의해 2.9THz의 파장가변 범위와 최소선폭 560kHz(파장 795nm, 출력 12mW)의 결과가 보고되어 있다.⁽¹³⁾ 가변 파장범위의 확장을 위해 Y-coupled-cavity integrated injection laser 구조에 의해 1300nm 및 1500nm에서 각각 22nm와 23nm의 가변파장범위를 갖는 결과가 발표되어 있다.⁽¹⁴⁾ 최소 발진선폭은 35GHz, 최대 변조대역은 5GHz로 12 single-mode channel의 multiplexing이 2nm의 spacing으로 가능할 것이다.

Quantum confined laser의 경우 통상의 double heterostructure LD의 경우 낮은 threshold current den-

sity, 낮은 internal loss 및 높은 quantum efficiency를 보인다. MOCVD에 의한 GRIN-SCH single quantum well GaInAs-GaInAsP LD에서 6.2mA의 threshold current와 40%/facet의 높은 quantum efficiency 및 109mW의 높은 출력이 보고되고 있다.⁽¹⁵⁾ MQW 구조의 경우 1mm의 long cavity에 대해서도 10.6mW의 낮은 threshold current와 110mW의 CW 최대 출력이 보고되고 있다.⁽¹⁶⁾ 이 분야의 개발방향은 궁극적으로 quantum wire이다.

광통신용 광원 분야는 결국 발진선폭의 최소화, 고출력화, 신뢰성의 향상, 가변 파장범위의 확장등 소자 특성의 향상이 요구되며 연관되는 기술 분야는 양질의 active layer 재조를 위한 epitaxy 기술 (MOCVD, MBE, CBE)과 공정기술(dry etching, passivation등)과 주변기술(packaging, driving circuit등)이다. 아울러 대량생산에 의한 저가격화가 응용분야의 확장 노력과 더불어 개발되어야 할 것이다.

3-2 수광소자 및 receiver module

광통신용 수광소자의 종류는 pin-diode, APD등의 구조가 사용되고 있으며 coherent 전송 또는 초고속 전송등 용도에 따라 system측 요구 사항이 약간씩 다르긴하나 대략 1.31 μ m 또는 1.55 μ m의 파장에서 양자 효율 90%이상, APD의 경우 증배율 100이상, 과잉잡음지수 0.75이하, 암전류 1nA이하, 대역 15-30GHz 정도의 것이 요구되고 있다. Decic측 개발 현황은 APD의 경우 양자효율 90% 정도, gain-bandwidth product 50-70, 증배율 10-20, 주파수대역 8GHz, 과잉잡음지수 0.7, 암전류 3nA 정도가 실용화 되어 있고⁽¹⁷⁾ 수년 내에 system측 요구에 부응할 수 있는 소자의 실현이 가능하다. pin-diode의 경우 양자효율 90%, 주파수대역 20GHz, 암전류 100-1000pA, 5V용량 0.8pF등이 실현되고 있다. 이 경우 역시 수년내에 특성의 개선이 가능할 것이며 특히 암전류, 용량등이 2-3배 정도 개선 가능할 것이다.

단위소자로서의 수광소자는 현재 기술현황에 비추어 실용화에 큰 난점은 없으나 장래의 활용을 위해 집적화등 receiver module의 실용화에 개발노력이 필요하다. Coherent detection을 위해서는 twin-detector의 개발과 분배계로 3dB의 directional coupler와의 집적화가 필요하다. 고감도 수신회로의 실용화에는 pin/FET의 집적화가 필요하며 주로 JFET와의 집적화가 개발되고⁽¹⁸⁾ 있으나 pin구조는 본질적으로 2-3 μ m의 두터운 absorption층을 필요로 하기 때문에

여타 전자회로와의 집적화에 planarization 등의 문제가 있다. 근래에 InAsP계의 pseudomorphic HEMT (high electron mobility transistor)를 MSM (metal-semiconductor) detector와 직접적화 시킨 receiver chip이 개발되어 실용화에 진일보하였다.⁽¹⁹⁾ MSM detector의 경우 planarization에 문제가 없고 전극의 간격을 submicron 영까지 축소하기가 용이하여 비교적 쉽게 수 10GHz까지의 대역을 얻을 수 있을 것으로 예상되고 있다.

Detector의 다른 용도는 laser diode의 output monitoring용 detector이다. 이 경우 현재의 활용방법은 개별소자를 hybrid 방법으로 transmitter module내에 장착하는 것이나 장래의 목표는 source / detector를 one-chip화 하는 것이다. 광통신용 송수신 module은 결국 driving / detection circuit와의 one-chip를 달성하는 것으로 현재의 기술개발 추세로 보아 가까운 장래에 실현될 것으로 예견된다.

3-3 광섬유

광통신용 광섬유는 주로 silica계 광섬유가 장거리 기간통신망용 광섬유로 이용되고 있으며 근거리 LAN용 또는 특수용도로 plastic fiber등이 사용되고 광직접증폭용으로는 희토류 금속(Er, Nd)이 첨가된 광섬유가 사용된다. Silica 광섬유는 광손실이 이미 이론적 한계에 가까운 0.2dB/km 정도의 것이 생산중이며 현재의 생산기술상으로도 활용에 문제가 없다. 초장거리 통신, coherent 통신 및 soliton 통신을 위해서는 특수한 기능의 광섬유가 필요한 바 특히 dispersion shifted / dispersion flattened fiber가 사용되고 있다. 광섬유의 분류는 사용과장에 따라 자외영역 광섬유, 가시광영역 광섬유, 근적외영역 광섬유, 적외영역 광섬유등으로 나눌 수 있다. 전달 모드에 따른 분류는 single mode fiber와 multi mode fiber가 있으며 전자의 경우 통신용 표준 광섬유, polarization maintaining fiber, dispersion shifted fiber가 있고 후자의 경우 step index fiber와 graded index fiber가 있다.

광섬유의 주요 응용분야중 하나는 광섬유 센서이다. 광섬유 센서의 계측원리는 측정대상에 의한 광섬유내의 광강도변화, 광주파수변화 및 광위상변화등을 측정함으로써 기본적인 물리량을 계측하는 방법으로 전류, 전압, 전계, 자계, 온도, 속도, 가속도, 유속, 변위, 가속도, 진동, 압력 등 광범위한 응용분야를 갖는다. 이러한 용도의 광섬유는 주로 편광면유지 광섬유를 사용하는 바, 단면구조는 cor내에 2-fold sym-

metry를 갖게 광섬유의 제조과정중 constraint를 준 구조이다. 주요 특성은 전송손실의 경우 0.4-0.8 dB/km(1.55um), 소광비 -30dB 정도로 실용화에 어려움이 없다.

3-4 광교환 소자 및 광교환 기술

광교환 기술은 초고속 광대역 통신망(B-ISDN)의 구현에 따라 HDTV전화, 동화상 TV전화, HDTV통신회의, CAT의 고품위 서비스, 공중망접속 CATV, 초고속 computer network, multi-media database, bit-rate-free 교환시스템등 장래 핵심기술이 될 것이다. 아울러 WDM-FDM, 광 interconnection, 광 computing등의 분야 역시 광교환기술의 중요한 분야가 될 것이다. 이와같은 첨단기술의 융화 시기는 향후 10년이내에 중요한 개발 결과가 제시될 것으로 예견된다.

광교환기술은 기능에 따라 space division, time division, wavelength division, free space switching 등 photonic switching과 광배선(photonic interconnection)으로 나눌수 있다. Photonic interconnection은 chip 내부배선, chip간 배선, module간 배선, board간 배선, system back-bone 및 system간 배선으로 활용할 수 있다. 광배선의 장점은 초고속 전송과 광대역 전송이 가능하고 고밀도의 parallel connection이 가능하며 배선 구조(configuration)의 재구성이 용이하고 ground의 필요성이 없는 점등 다수의 장점이 있다. 특히 전송방식이 non-interactive / inductive인 점은 기존의 전기적 배선으로는 해결할 수 없는 특징이다.

Photonic switching중 space division switch는 광스위칭을 위한 gate로 기계적소자, 광전변환 방식, coupled waveguide 방식, Bragg diffraction 방식, laser diode 방식등 여러가지가 있으나 주로 waveguide 방식이 많이 연구되고 있다. 스위칭의 원리는 전기광학효과 또는 열광학효과를 갖는 기관상에 directional coupler형의 광도파로와 제어전극을 사용하여 도파로의 스위칭 내지 변조를 달성한다. 사용기관은 Ti이 diffuse된 LiNbO₃를 도파로로 사용하는 LiNbO₃등 유전체 기관이나 실리카 도파로를 사용하는 실리콘 그리고 heterostructure의 도파로를 사용하는 III-V족 화합물 반도체(GaAs, InP)등 세가지의 기관이 주로 개발의 대상이 되고 있다. LiNbO₃ 기관상의 도파로형 광스위칭 소자는 통상 수mm 정도의 directional coupler에 Schottky형 제어전극을 가진 구조로 약 5V 정도의 전압에 의해 두개의 waveguide 사이의 광스위칭 효과를 얻는 것이다. 열광학효과를 사용하는 실리카 도파로

형 광스위치는 도파로 상단에 설치된 heater에 의한 유효굴절율의 변화에 의해 광스위칭효과를 얻는 것이다. III-V족 화합물 반도체의 경우 위의 두가지 구조와 유사하나 도파로의 제조방법상 약간의 차이가 있는 바 주로 MOCVD, MBE등의 방법에 의한 heterostructure epitaxial 기판을 사용한다. 위와같은 스위칭 소자를 기본구조로 하여 $N \times N$ 스위치망을 구성할 수 있다. 실리카 스위치망의 경우 이미 8×8 스위치망의 개발이 보고되었으며 LiNbO₃의 경우나 GaAs 또는 InP에 대해서는 4×4 스위치망이 보고되고 있다.⁽²⁰⁾

도파로형 광스위치망은 본질적으로 수동형 소자이며 스위치망의 복잡도에 따라 광손실이 크게 증가되며 아울러 적당한 단계마다 광증폭의 필요성이 생긴다. 이와 같은 난점을 해결하기 위해서는 결국 switching element로 laser diode등과 같은 active device가 요구될 것이다. 실제로 bistable laser diode를 gate switch로 사용하여 스위치망을 구성할 수도 있다. 따라서 장래 중요한 연구개발의 대상은 active gate형 스위치망이 space division switch의 중요한 연구대상이 될 것이다.⁽²¹⁾

Time division 스위치망은 주로 space division 스위칭과 함께 사용되어진다. 아울러 time switch를 위해 photonic memory가 필요한 바, bistable laser diode와 optical fiber delay line이 기억소자로 연구개발되고 있다. Bistable laser의 구조는 InGaAsP/InP double-heterostructure 구조에 두개의 제어용 전극이 saturable optical absorption 영역에 의해 분리되어 있다.⁽²²⁾ 이 소자는 optical output 특성이 hysteresis를 보이고 따라서 광스위칭 내지 메모리 기능이 가능한 optical flip-flop 특성을 보인다. 이 형태의 스위칭은 nano-second대의 스위칭 속도와 20dB 정도의 광이득을 보인다.

Wavelength division photonic switching은 광대역 multiplexing에 가장 유효한 방법으로 핵심소자는 wavelength converter와 tunable wavelength filter이다. 이 두가지 형태의 소자는 최근 DFB 또는 DBR 구조의 반도체 레이저 다이오드를 응용한 구조에서 구현된 바 있다.^(22, 23) Wavelength converter DBR의 기본적인 구조는 saturable absorption region으로 연결된 두개의 active section과 phase shift section 및 DBR 구조의 파장제어 부분으로 구성되어 있다. Tunable wavelength filter의 기본적인 구조는 phase shift control형의 DFB 구조와 유사하다. WD 방식의 스위칭 시스템이 실용화되려면 100channel 이상의 multiplexing이 가능한 소

자의 실용화가 달성되어야 할 것으로 인식되고 있다. 궁극적으로는 대용량의 $N \times N$ switching matrix가 필요할 것이며 SD 또는 TD 또는 WD등 단일 기술의 스위칭 기술이 활용되기 보다는 SD+TD, SD+WD, TD+WD 또는 SD+TD+WD형의 복합 스위칭 시스템 기술이 실용화될 것으로 예견된다.

Free space photonic switching은 spatial light modulator(SLM)를 사용하여 공간에서의 광스위칭이 이루어 지는 기술로 통상 $10 \mu\text{m}$ 까지의 공간 분해능을 가지며 이차원 array형의 발광, 수광 소자가 이용 가능하기 때문에 대용량 정보처리, 광컴퓨팅등 응용의 분야가 매우 큰 기술이다. SLM으로는 주로 LCD(liquid crystal display)형의 광스위치망을 사용하여 이 경우 가장 큰 장점은 reconfigurable이 가능하다는 점이다. 다른 한가지의 유용한 형태의 SLM은 S-SEED(symmetric self electro-optic effect device)이다. S-SEED의 경우는 LCD light wave와는 달리 all optical switch가 가능하여 응용의 잠재력이 매우 큰 소자로 연구개발이 활발히 진행되고 있다.⁽²⁴⁾

현재 사용되고 있는 전자식, digital 교환 시스템은 35년의 개발 역사의 산물로 반도체 집적회로의 개발에 기인하여 특히 ISDN등 정보화 사회의 구현에 따라 그 필요성이 크게 대두된 것 또한 중요한 원인이 되었다. 오늘날의 광교환 기술은 전자식 교환기술의 초기 단계와 유사하다고 할 수 있으며 따라서 광교환 기술의 보편화된 실용은 아직도 상당한 시간이 요구될 것이며 아울러 유효한 개발의 목표설정이 매우 중요한 점일 것이다. 그러나 B-ISDN등이 실용화되고 고도로 정보화된 사회가 도달하면 현재의 전자식 교환기술에는 그 수요에 한계가 있을 것이고 이 경우 광교환 기술의 개발필요성은 유일한 선택이 될 것이다.

3-5 광증폭 소자

광직접 증폭기술은 장거리 광통신 분야뿐만 아니라 광교환기술, 광정보처리기술, 광컴퓨팅기술등 여러 분야에서 필수적인 기능을 수행하는 소자이다. 현재까지 여러 형태의 증폭기술이 제시되어 있는 바⁽²⁵⁾, semiconductor laser amplifier(SLA), fiber Raman amplifier(FRA), fiber Brillouin amplifier(FBA), Er-doped fiber amplifier(EDFA)등이 주로 개발되고 있다. 특히 EDFA는 장거리 통신망에 직접 접속이 가능하여 signal level 및 receiver sensitivity를 크게 개선시킬 수 있다.

SLA는 초소형이고 전자적 제어가 가능하고 LD와 같이 파장선별성이 있으며 여타광 내지 전자회로(IC)와의 집적화가 가능한 장점이 있다. 특히 마지막 특징은 전송정보의 대량, 고속화에 따른 제어회로의 monolithic integration의 필요성을 충족시키기 때문에 크게 각광을 받을 것으로 예견된다. 아울러 광측폭의 과정에서 새로운 광신호의 첨가 내지 가외적 처리가 가능한 점은 EDFA에서는 불가능하기 때문에 새로운 활용의 가능성을 제시하고 있다. SLA의 종류 Fabry-Perot type과 distributed feedback type 및 traveling wave type의 3종류로 나눌 수 있고 FP 또는 DFB형은 통상의 레이저다이오드와 같은 구조로 threshold 바로 밑의 조건에서 동작시키며 실용화에 충분한 이득을 얻을 수 있으나 상대적으로 낮은 bandwidth를 보인다. 한편 TW형 SLA는 매우 높은 대역을 얻을 수 있어 최근의 개발노력은 주로 TW-SLA의 개발에 치중되어 있다. SLA의 핵심 기술은 이득의 편광의존성을 최소화 내지 제거하는 것과 포화출력의 증대 및 잡음성능을 향상시키는 것이다. 포화출력의 경우 최근 MQW 구조의 소자에서 30mW의 결과가 보고되고 있다.⁽²⁶⁾

EDFA는 광섬유내에 doping된 Er ion간의 에너지 차가 실리카 광섬유의 최저 손실대인 1.5 μ m 부근으로 population inversion은 0.98 내지 1.48 μ m의 파장에 의해 이루어진다. EDFA는 적은 core 영역에 signal 및 pump광이 매우 긴 길이동안 서로 interact 하기때문에 적은 이득계수에도 불구하고 매우 긴 길이동안 서로 interact 하기때문에 적은 이득계수에도 불구하고 매우 큰 이득을 얻을 수 있다. 아울러 전송선과의 접속이 fiber-to-fiber로 무시할 수 있을 정도의 낮은 접속 손실을 보이고 있는 점이 중요한 장점의 하나이다. Er의 upper level은 lifetime이 10ms정도로 충분히 길어 입력 광신호 개개에 영향을 받기보다 평균 입력 power에 의해 결정되며 따라서 큰 이득포화의 경우에도 signal distortion이 없어 post amplifier로 이용되어 질 수 있다. EDFA module의 구성은 dichroic mirror 또는 coupler에 의한 signal과 pump의 결합부와 결합부로부터의 반사에 의한 영향을 배제하기 위한 polarization independent optical isolator 및 pump LD로 구성된다. FDFA의 개발현황은 크게 발전하여 최대의 gain은 0.98 μ m에서 10.2dB/mW(1.534 μ m signal), 1.48 μ m에서 5.1dB/mW(1.552 μ m signal)정도로 25dB의 gain을 위해 5mW의 LD이면 충분할 것이다.⁽²⁷⁾

광측폭소자가 필요성은 광통신의 발전전망이 장거리화, 고속화 및 다중화도의 향상에 따라 더욱 재고될

것이다. FDFA와 SLA는 각각 그 특성이 다르나 응용의 분야가 통신분야를 벗어나 크게 확장될 수 있으므로 개발의 노력이 배가되어야 할 것이다.

3-6 기타의 광부품

광통신에 필요한 제반 집적회로 소자들의 광학적 연결은 평면 광도파로를 응용한 광합과/분과기의 형태로 이용되는 바 directional coupler, x-branch, y-branch등의 종류가 있다. 그 종류는 크게 나누어 optical fiber를 융착한 광섬유계 coupler와 LiNbO₃, silicon, GaAs, InP등의 기판상에 2차원 도파로 구조의 coupler를 사용한 것들 등 두가지가 있다. 도파로 구조의 합/분과기는 사용 기판의 종류에 따라 그 제조의 방법이 다른 바, LiNbO₃ 기판의 경우 이미 언급한 바와 Ti이 diffusion된 도파로를 이용하며, 실리콘 기판의 경우 주로 flame을 이용한 열분해증착을 이용하고 III-V족 반도체 기판의 경우 MOCVD, MBE, CBE등이 이용되며 patterning의 기술은 반도체 소자공정과 동일하다.

광변조기의 경우 현재의 transmitter가 주로 레이저 다이오드의 직접 변조를 이용하나 변조속도가 10 GHz를 넘으면 wavelength chirping등 많은 문제가 발생하므로 외부 변조기의 사용이 불가피하게 된다. 현재의 수준에서 외부 변조기는 20GHz정도의 변조 대역을 보이고 있으나 수년 내지 10년 정도의 개발 기간후에 40-100GHz 정도의 변조 대역을 무난히 달성할 수 있을 것으로 예견된다. 삽입손실은 현재 수dB 정도이나 1dB 이하의 삽입손실을 갖는 삽입기술이 개발되어야 할 것이며 소광비(extinction ratio)역시 현재의 10-20dB 정도에서 30dB 수준까지 개선될 필요가 있다. 구동전압은 LiNbO₃의 경우 5V 정도로 현재의 반도체 IC 기술에 합당하나 화합물반도체 기판을 사용하는 경우에는 변조특성이나 여타 광기능소자와의 집적화에 유리한 점에도 불구하고 구동전압의 감소에 많은 개발노력이 필요할 것이다. 아울러 편광의존성의 개량이 요구된다.

광 connector의 경우 접속손실 0.2dB 이하, return loss 30dB 이하 접속 광섬유의 수 수10 내지 100 정도의 것이 저가로 실용화가 되어야 할 것이다. 이와 같은 부류의 소자들은 그 필요기술이 첨단기술의 성격을 갖고 있지는 않으나 초정밀 가공기술등 실제 생산기술상의 해결되어야 할 문제가 많다.

3-7 광계측 소자

최근의 반도체 레이저, LED, 광섬유등 개별소자의 실용화에 따라 이들 소자를 이용한 광계측 기술은 크게 진보하여 소형, 고감도, 다기능의 광계측기술이 산업화되고 있다. 광계측기술은 크게 두가지로 나눌 수 있는 바, 광응용계측과 광과계측이다. 광 응용계측의 경우 광손실의 변화를 이용한 경우와 전파시간의 변화를 측정하는 방법, 편광변화를 측정하는 방법, 광주파수의 변화를 측정하는 방법 및 위상의 변화를 이용하는 방법으로 나눌 수 있고 광과계측의 경우 광주파수, 광위상, 스펙트럼의 선폭 편광면, 광 power등을 측정하는 방법으로 계측을 하는 원리이다.

광응용계측 분야중 광손실을 이용하는 방법은 도파로형의 경우 노출된 도파로의 일부에 기름등이 유출, 접촉되면 경계면에서의 광손실의 변화에 따라 기름의 유출여부를 판정하는 것으로 광섬유를 사용하여 동일한 원리를 이용한 액면계로 활용할 수도 있다. 전파시간의 변화를 이용한 방법은 OTDR(optical time domain refractrometry) 원리로 광섬유 회로중의 분포된 물리량 변화를 측정하는 방법으로 온도, 액면, 기름의 유출등 distributed sensing이 가능한 방법이다. OTDR의 경우 통상 20ns정도의 단펄스를 사용하여 거리 분해능 약 1m정도를 얻을 수 있고 femto-second대의 광원이 실용화 되면 mm이하의 분해능을 얻을 수 있다. 따라서 상기의 광원과 함께 저가격, 저잡음의 수신소자가 개발되어야 할 것이다. Polarization을 이용한 계측은 Faradat 효과를 이용하여 자계, 전류등을 계측할 있고, Pockels의 효과를 사용하여 진계나 전압등을 계측하며, 광탄성효과를 이용하여 진동이나 압력등을 계측할 수 있다. 광주파수를 이용한 계측중 가장 앞선 부분은 laser Doppler velocimetry이다. 현재까지의 개발실적은 측정가능 범위가 0.2mm/s-34m/s 정도로 초저속의 측정기술이 더 발전되어야 할 것이다. 광위상을 이용한 계측은 Mach-Zehnder형 간섭계, Michelson형 간섭계, Fabry-Perot형 간섭계, Sagnac형 간섭계 등 광섬유 시스템과 광도파로형 간섭계등을 기본 구조로하여 한쪽의 도파계에 physical constraint를 가하여 위상변화로 검출하는 원리이다. 가장 활발히 개발되고 있는 시스템은 fiber gyroscope로 저가의 gyroscope의 실용화가 가능하다.⁽²⁶⁾

광과계측의 경우 광주파수의 측정은 레이저의 절대파장을 측정해야할 필요가 있고 현재 사용하고 있는 reference로 CO(4-5um), He-Ze(2.03um), He-Ne(3.39um, 1.15um, 633nm, 612nm), dye laser(576nm), Ar ion laser(515nm)등을 사용하고 있다. 특히 coher-

ent 광통신용 광원의 절대파장 제어가 필요한 바, 광기능소자와의 집적화가 가능한 형태의 소형화가 필요하다. 광위상의 측정 역시 coherent 통신용 핵심 기술이될 것인 바, spectral의 선폭 측정과 편광의 측정 및 광 power의 절대적 측정기술이 높은 정밀도를 갖고 개발되어야 할 것이다.

V. 결 론

광기능소자의 주된 응용분야가 비록 광통신 분야라 하더라도 광계측, 광정보처리, 광컴퓨팅 및 기타 활용의 가능성이 매우 높 것으로 예견되어 이 분야의 연구, 개발 노력이 배증되어야 할 것이다. 국내의 한정된 연구 인력과 개발자금의 제한이 있다 해도 이 분야의 기술자립이 이루어지지 아니하면 장래 막대한 산업의 분야가 해외 기술에 종속 될 것이므로 타당한 개발계획의 수립과 지속적인 개발의 노력이 필요할 것이다.

광기능소자의 효율적인 국내 개발을 위해서는 현재 국내에서 개발중인 과제의 분류와 21세기를 위한 광통신 시스템의 구현에 필요한 소자류의 분류가 필요할 것이며 이에 따라 국내의 개발분야의 재도출과 개발전략이 세워질 수 있을 것이다. 지금까지 국내에서 개발되어온 광통신용의 기능소자는 주로 MOCVD에 의한 laser diode기술에 국한되어 있었으며, 광섬유의 경우는 이미 국내에 4개사의 생산공장이 가동중이어서 특별히 어려운 문제는 없으나 그외에는 어느 소자를 막론하고 체계적인 개발계획이 수립되어 개발노력을 집중한 실적이 없었다. 따라서 광기능소자의 국내개발을 위하여 가장 먼저 해결해야할 목표는 국내 광통신의 10년 내지 20년 후의 개발목표를 설정하고 소자분야의 목표를 명확히 해야할 것이다. 특히 transmitter, receiver, 광증폭소자, 주파수 및 위상의 변복조기등 핵심 소자의 국내 기술에 의한 독자적 개발이 필수적일 것이다.

이러한 광기능소자들의 개별소자 수준에서의 개발이 완료되면 이들의 집적화(monolithic integration) 기술의 개발이 필요할 것이다. 특히 coherent 통신의 실용화를 위해서는 광주파수의 절대적 제어기술과 광위상 제어기술등이 아울러 개발되어야 할 것이다. 또한 광기능소자 기술의 개발과 함께 반드시 고려되어야 할 사항은 위에 열거된 모든 소자들의 구동이 10GHz 이상의 고속에서 이루어지며 소자기술의 개발과 함께 동작속도의 급속한 증가가 예상되므로 초

고속 IC 기술개발이 병행되어야 한다는 점이다.

参 考 文 献

1. T.Ohtsuka et al, J. Lightwave Tech, LT-5, p1534 (Oct. 1987)
2. T.P.Lee & C.E.Zah, IEEE Commun. Mag., 27, p42 (Oct. 1987)
3. K.Uomi et al, IEEE J. Quantum Electron., 27, p1705(June 1991)
4. T.Kunil et al, ibid. 27, p1773(June 1991)
5. C.A.Zmudzinski et al, ibid. 25, p1539(June 1989)
6. R.S.Geels et al, ibid. 27, p1359(June 1991)
7. C.T.Chang-Hasnain et al, ibid, 27, p1368(June 1991)
8. P.J.A.Thijs et al, ibid. 27, p1426(June 1991)
9. S.D.Offsey et al, ibid. 27, p1455(June 1991)
10. G.Hatakashi et al, ibid. 27, p1476(June 1991)
11. D.Z.Garbuzov et al, ibid. 27, p1531(June 1991)
12. K.Kobayashi & I.Mito, J.Lightwave Tech., LT-6, p1623(Nov.1988)
13. T.Hirata et al, IEE J. Quantum Electron., 27, p1609(June 1991)
14. M.Schillinga et al, ibid. 27, p1616(June 1991)
15. N.Matsumoto et al, ibid. 27, p1790(June 1991)
16. C.Kazmierski et al, ibid. 27, p1794(June 1991)
17. J.C.Campbell et al, ibid. 27, p496(June 1991)
18. J.C.Renaud et al, J.Lightwave Tech., LT-6, p1507 (Oct. 1988)
19. W.P.Hong et al, Electron. Lett., 25, p1561(1988)
20. IEEE J. Sel Areas Commum., Special Issue on Photonic Switching, Vol.6, Aug. 1988.
21. P.Fortenberry et al, Electron. Lett., 27, p1305(1991)
22. K.Kondo et al, OFC-'88 Postdeadline Paper, PD.10
23. T.Numai, IEEE J.Quantum Electron., 28, p1508 (June 1992)
24. A.L.Lentine et al, ibid. 25, p1928(1989)
25. T.Saitah & T.Mukai, J. Lightwave Tech., 7, p1071
29. M.Yamaguchi and K.Kikuchi, Electron. Lett., 23, p120(1987)

강 광 남

- 1964. 3.-1968. 2. : 서울대학교 물리학과 이학사
- 1969. 3.-1971 2. : 서울대학교 대학원 이학석사
- 1980.10.-1983.10. : ENSERG-INPG(France) 공학박사
- 1968. 3.-1979.9. : 한국과학기술연구소 반도체재료 연구실 선임연구원
- 1979.10.-1984.2. : LPCS-ENSERG, INPG, Grenoble, France 객원연구원
- 1984. 3.-1989.6. : 한국과학기술원 광전자공학연구실 연구실장
- 1989. 7.- 현 재 : 한국과학기술연구원 광전자연구실 연구실장