



# 차세대 광통신 소자 기술 개발 방향

김경현 / 한국전자통신연구원, 원천기술연구소 광통신소자연구부장

## I. 서론

오늘날 보편화된 인터넷 시대를 열게된 결정적인 계기는 근본적으로 광통신 기술의 발전과 이로 인한 대용량 정보 전송이 가능하게된 점이라고 볼 수 있다.

지난 20세기 중 1959년에 이루어진 레이저의 발명과 70년 중반에 들어와 확보된 저 손실 실리카 광섬유 제작 기술은 우리 인류에게 광통신 기술을 실용화할 수 있게 하는 직접적인 동기가 되었다. 그후 1980년 중반 이후에 개발된 어븀첨가된 광섬유와 이를 이용한 광 증폭기 (EDFA) 기술은 실리카 광섬유를 전송 매질로 한 광전송 시스템 용량을 20세기가 끝나기 전에 이미 초당 수 테라비트 (Tb/s)급 이상의 데이터를 대륙 저편으로 전송할 수 있는 수준으로 올려 놓았다. 이러한 수준에 오르기 까지는 단일 모드 레이저 발진이 가능한 반도체 레이저와 고감도 광검출 소자, 다양한 능동 및 수동형 광 소자들의 개발과 기술 축적도 같이 이루어져 왔기 때문에 가능하였다.

특히 지난 1990년대 초반

에만 해도 테라비트급 광전송 기술이 광통신 및 광소자 기술 분야 연구자들의 큰 이정표였으나, 1996년 초에 일본과 미국 연구진들이 파장분할다중 (WDM) 기술을 이용하여 1 Tb/s 광전송 기술 시대를 열어가게 됨으로써, 광통신 기술 분야의 새로운 시대가 전개되게 되었다.[1,2] 특히 이 Tb/s 광전송 시대의 서막 이후 불과 몇 년만에 이미 Tb/s 광전송 기술은 많은 연구기관들에 의해 쉽게 접근이 가능한 기술로 인식되는 시점에 와 있어, 그 동안 빠르게 발전해 오던 연구개발 추진력이 앞으로는 어느 방향으로 전개가 될지가 특히 이 분야의 연구자

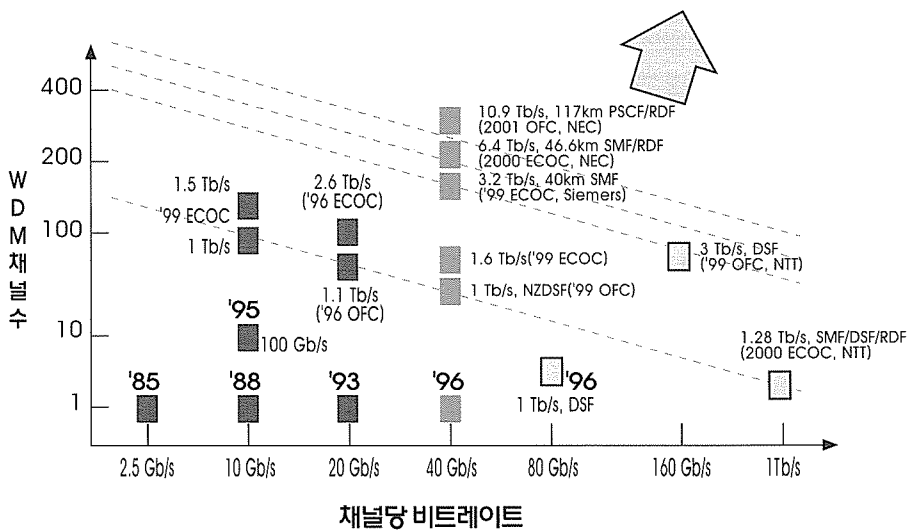


그림1. 광전송시스템 기술개발 동향

들의 많은 관심의 대상이 된다.

본 글에서는 이러한 대용량 광통신 기술의 발전 방향과 이에 따른 광통신 소자 기술의 연구개발 추세와 향후 발전 방향에 대해서 논의해 보고자 한다.

## II. 광통신 시스템 및 네트워크 발전 전망

### 가. 광전송 기술 분야

그 동안의 광통신 기술은 주로 국간 점대점 (point-to-point) 전송 기술로써 빛의 고유 주파수인 200 THz와 실리카 광섬유의 저 손실 파장대 (50 THz; 400 nm)를 최대한으로 이용하여 수십 Tb/s급 이상의 디지털 광전송 용량을 얻으려는 노력으로 전개되어 왔다. 하지만 아직은 광전송

러 연구 기관에서 이들 광 증폭기의 이득 파장 영역 이외의 파장대를 커버하여 그 이상의 WDM 전송 용량을 가능하게 할 수 있는 광 증폭기 기술에 대한 연구도 이루어지고 있는 상황이다.

비록 실험실 수준에서는 100nm급 광 증폭기를 이용하여 10 Tb/s급 광전송 기술을 구현하였으나, 아직은 실용화 측면에서의 시스템 안정성과 내구성을 보장하기 위해 광전송 시스템 구축에 주로 EDFA의 30~70 nm 파장대 역폭이 주로 쓰이고 있다. 주어진 광 증폭기의 파장 영역을 최대한도 효과적으로 이용한 대용량 광전송 기술의 확보를 위해 다양한 방법에 대한 연구가 현재 진행 중에 있다. 기존에 포설되어 있고 흔히 쓰이던 일반적인 단일모

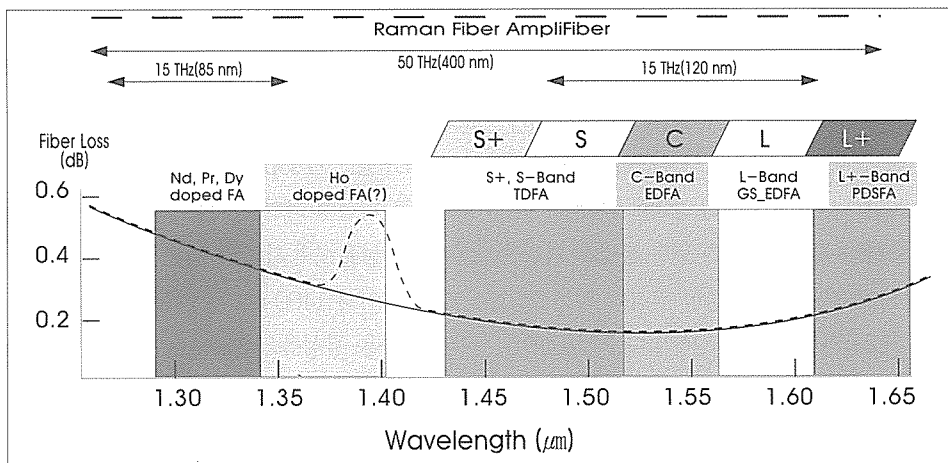


그림2. 실리카광섬유의 손실곡선 및 광증폭기 기술개발동향

기술에 있어서는 이제까지 가장 잘 개발되어 온 광 증폭기인 어븀첨가된 광섬유 증폭기 (EDFA)가 커버하는 약 30~80 nm 영역과 기타 라만 광섬유 증폭기 (Raman fiber amplifier) 또는 Tm<sup>3+</sup> 첨가 광섬유 증폭기 (TDFA) 영역을 포함하여 약 100nm 파장영역을 이용한 10 Tb/s급 광전송 기술이 구현되어진 상황이다.[3] 선진국의 여

드 광섬유의 경우에는 1.5 micron 파장대에서 색분산 값이 커서 채널당 비트레이트(bit rate)가 10 Gb/s 이상만 되어도 분산 보상이 필요하다. 채널당 비트레이트를 고속화하기 위해 낮은 분산값을 갖는 광섬유로서 분산천이 광섬유(DSF) 또는 비영분산 천이 광섬유(NZDSF) 등이 쓰이며, 아울러 WDM 광전송에 따르는 비선형 효과에 의

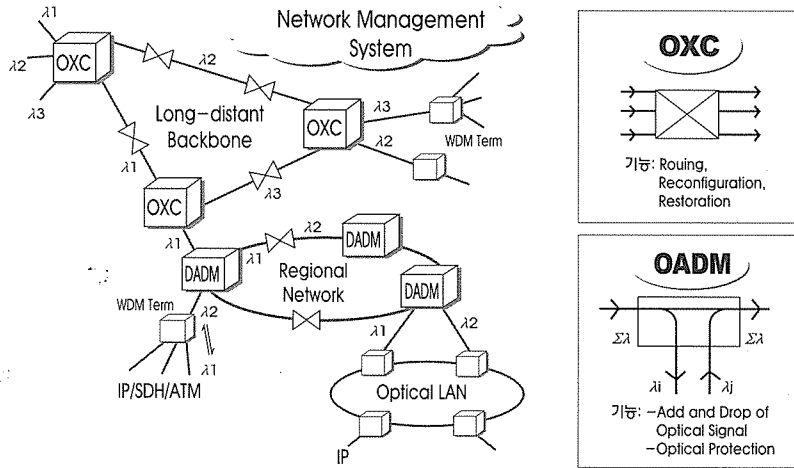
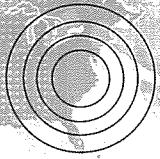


그림3. 차세대 광통신 네트워크와 광입출력 및 회선분배 장치

한 제약을 줄이기 위해 광섬유의 코어를 크게 한 (large-core) NZDSF 광섬유의 도입과 한편으로는 채널당 비트레이트를 최대 높이고 WDM 채널 수를 줄이려는 연구가 동시에 진행되고 있다. 궁극적으로는 어느 방법을 택하던 이 80nm급 C-, L-밴드 EDFA의 영역을 1bit/Hz 수준으로 최대 이용하면 약 10 Tb/s의 전송 용량을 가질 수 있다. 현재로서는 물리학적 불확정성 원리에 의해 고속 시간분할다중(TDM)과 고밀도 파장분할다중(WDM)을 동시에 사용하는 방법은 불가능하기 때문에 이러한 최대 전송 용량을 확보하기 위해 채널당 낮은 비트레이트로 고밀도 WDM을 이용 하는데에 따른 고밀도 다채널 WDM 광소자와 비선형 보상 기술들에 대한 해결책을 찾거나, 다른 한편으로는 낮은 밀도의 WDM 채널 수와 채널당 비트레이트를 20 Gb/s 및 40 Gb/s 이상으로 높이는 데 따른 고속 광전자소자와 광섬유의 색분산 및 편광분산 보상 기술에 대한 해결책이 모색되어야 한다. 근래에 들어와 새로운 신호 코딩 및 신호 복원 방식을 이용하여 기존 방법보다 광전송 용량을 극대화하려는 시도도

이루어지고 있다.

기존의 실리카 광섬유의 저 손실 파장대역인 1450~1650 nm 파장대역을 이용하기 위해 EDFA가 커버하는 C- 및 L-밴드 (1530~1610 nm) 이외 파장대에서의 광 증폭기로 비선형 라만 광섬유 증폭기와 톨륨 (Tm) 첨가 신조성 광섬유 증폭기 기술들이 연구되고 있으며, 아울러 근래에 들어와 1400 nm 파장대에서의 OH 흡수대를 제거한 전송용 광섬유의 출현으로 향후 1250~1650 nm 파장대 전체를 이용할 수 있는 광 증폭기 기술과 최대 용량이 약 50 Tb/s급인 광전송 기술에 대한 도전이 향후 전개되리라 전망된다.[4,5,6] 근래에 들어와 편광다중 광전송 방식 기술의 발전으로 최대 전송 용량을 기존 WDM 용량의 2배로 증가시킬 수 있는 기술이 시현되고 있으나, 아직 실용화에 대해서는 충분한 신뢰성이 확보되어 있지 못한 상태이다.

#### 나. 광 네트워크 기술 분야

점대점 광전송 기술은 이미 상대적으로 성숙단계에 접어들었다고 볼 수 있으며, 앞으로는 대용량 광통신 네트워

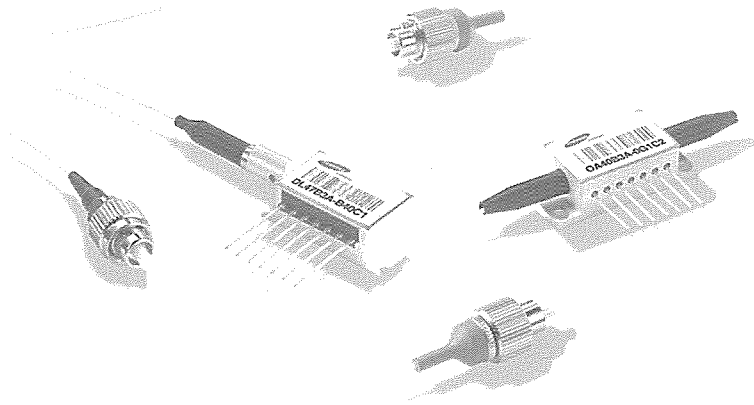


그림4. 광통신용 부품 및 소자

크 구성 기술에 더 많은 노력이 기울어질 전망이다. 기존의 채널당 낮은 비트레이트와 적은 수의 WDM 채널 광통신 운용에서는 기존의 전자식 교환기와 라우팅 기술로도 어느 정도 수용이 가능하다. 하지만 향후 전개될 테라비트급 광전송 시스템을 연결하는 대용량 네트워크 구성에서 기존의 전자식 방식으로는 다소 어려울 것으로 전망된다. 이에 따라 근래에 들어와 광신호 입출력 다중(OADM) 신호처리 기술과 광 회선분배(OXC) 및 라우팅 기술, 광교환 기술, 광 네트워크 감시 및 보호 기술들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 앞으로 전개될 주요 기술로 부각되고 있다. 특히 최근에 들어와 컴퓨터간의 정보가 활발히 일어나고 인터넷 트래픽의 급격한 증가로 WDM 광통신 기술을 이용한 인터넷 기술(IP over WDM)에 대한 기술적인 중요성과 필요성도 증가하여 이 기술에 대한 연구 개발의 활동도 점차 열기를 더하고 있다.

이미 개발된 테라비트급 수준의 광전송 기술에 비하여 광통신 네트워크 노드상의 라우터나 회선분배 장치의 용량을 증대시키는 기술에 대한 개발이 시급한 실정이다. 기존 전자식 라우터 기술은 아직 수백 기가비트(Gb/s)급

에서 수 테라비트(Tb/s)급 이하 수준에 머물고 있다. 향후 고화질 영상 정보를 각 개인이 자유롭게 주고받기 위해서는 교환기 및 컴퓨터의 정보처리 기능이 병렬 방식으로 용량이 극대화되어야 할 필요가 있다. 예로써, 고화질 영상정보 서비스가 보편화되어 각 가입자들에게 155 Mb/s급 채널 용량을 제공하게 된다면, 이러한 정보 용량을 처리하는 데에 있어서 기존의 10만 음성 전화 가입자

를 처리하는 전자식 교환기를 대체하는 라우터나 교환기 등에 필요한 정보처리 능력은  $155 \text{ Mb/s} \times 10\text{만 채널} = 15.5 \text{ Tb/s}$  수준이 요구된다. 기존 전자식으로는 이 정도의 정보 처리 용량을 얻는 데에는 기술적인 어려움이 많으므로 향후 병렬 광 신호처리 방식의 정보 처리 기술이 요구되리라 전망된다.

### III. 광통신 소자 발전 방향

그동안 광전송 시스템용 광소자로 가장 잘 개발되어 온 소자들은 광원 및 광송신기, 광 검출기, 광신호 다중/역다중용 수동 소자, 광 증폭기 등과 같은 단일 광소자 위주이 었으나, 앞으로 점점 광학적인 방법에 의한 대용량 병렬 신호처리 기술의 필요성에 의해 기능형 광 능동 소자에 대한 수요와 기존의 전자 소자들이 그러하듯 단일 광소자에서 집적형 광소자로 발전되어질 전망이다.

광전송 시스템용 TDM 광소자의 상용화 기술은 현재 2.5 Gb/s급 이하 수준에서 가장 많이 개발되어 보편화 되어있는 상황이며, 10 Gb/s급 기술도 이미 상용화되어 있

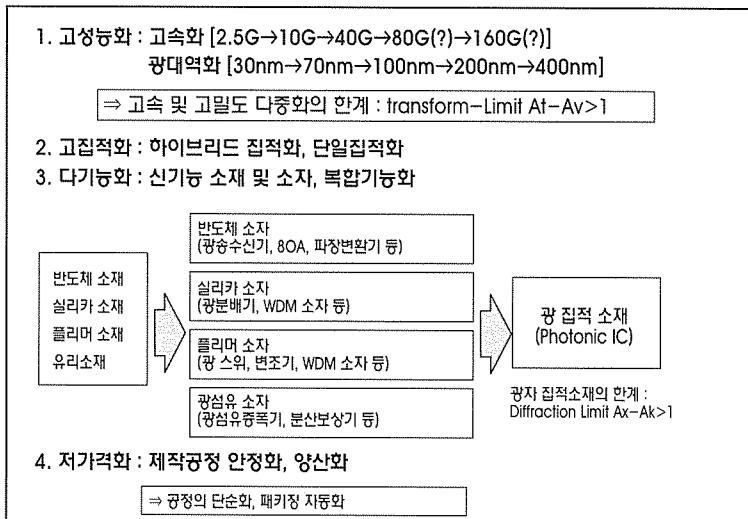
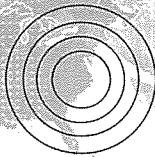


그림5. 광통신용 소자 및 소재 기술의 발전 방향

는 수준이다. 20 Gb/s급 이상 40 Gb/s급 광소자 기술은 부분적으로 구현되거나 아직 실용화 개발단계에 있는 수준이며, 일부 연구기관에서 100 Gb/s급 이상의 OTDM (optical time-division-multiplexing) 광소자 기술도 연구 개발하고 있는 수준이다.

이러한 고속 광소자의 응용 및 시장 전망은 향후 다채널 저속 WDM 시스템 소자에 비해 아직 충분히 검증이 되어 있지 못한 상태이나, 서로 다른 응용 기술로 발전될 수 있다. WDM 광소자는 상용화 기술이 현재 약 32채널 이하 수준에서 가장 널리 보편화되어 있고, 64 및 128 채널 기술은 일부 구현되거나 연구개발단계에 있는 수준에 있다.

광광전송 시스템용 광원 소자는 향후에도 당분간 직접 변조형의 2.5 Gb/s급 이하의 레이저 다이오드 (LD)들이 가장 많이 사용될 것으로 보이며, 고밀도 다채널 WDM을 위해 10 Gb/s급 EA 변조기 집적 DFB-LD와 나이가 어레이형 다채널 LD 들의 수요가 점점 많아질 전망이다. 광

전송 시스템용 광증폭기는 현재 잘 개발되어 있는 EDFA의 C, L-밴드 영역인 약 70 nm 수준으로부터 다채널 대용량 WDM 광통신을 위해 라만 광섬유 증폭기 집적형으로나 Tm3+ 첨가 광섬유 증폭기를 추가로 사용하여 100 nm 이상의 광대역 광증폭기로 발전되어 지고 있다. 아울러 채널당 비트레이트가 10 Gb/s급 이상인 광전송 시스템에서는 리피터 (repeater) 간의 간격을 극대화하기 위해 색 분산을 보상하는 기술로 분산 보상 광섬유 (DCF)가 가장 많이 실

용화되어 있으나, 저손실 및 다채널용의 능동형 제어 가능한 분산 보상 기술에 대한 수요도 증대되고 있다. 아울러 40 Gb/s급 이상의 시스템에서는 편광 분산도 보상을 해 주는 기술이 요구되므로, 전송용 편광 특성이 낮은 광섬유와 더불어 편광분산 보상 기술에 대한 연구도 진행되고 있다. 특히 40 Gb/s급 채널의 WDM 광전송에서는 색분산과 비선형을 줄이기 위해 역분산 광섬유를 일반형 광섬유와 교대로 연결하여 사용하는 분산제어형 광섬유와 코어 구경을 키우기 위해 순수 실리카 코어의 단일모드 광섬유 등이 등장하였다.[7,3]

그림 5에 보여지는 바와 같이 고속 TDM 기술과 광대역 고밀도 WDM 기술은 물리적 한계성 (Transform limit, 불확정성 원리)에 의해 서로 제한되어 있다. 만약 100 GHz 채널 간격의 WDM 광 전송에 있어서는 채널당 비트레이트 (bit rate)가 100 Gb/s 이상이 될 수 없다.

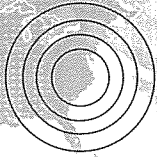
현재의 WDM 광통신 기술이 채널간 간격이 100 GHz

에서 50 GHz 수준으로 발전하고 있는 상황이므로, 궁극적으로 40 Gb/s 급 수준 보다 더 빠른 고속 TDM 기술과 채널 간격이 50 GHz 보다 더 좁은 고밀도 WDM 기술은 당분간 큰 실용성이 없을 것으로 전망된다. 반면에 실리콘 광섬유의 저손실 영역인 1250 nm ~ 1650 nm 영역 전체를 다 이용할 수 있는 광대역 WDM 기술이 대용량 광통신 기술로 부각될 전망이다.

통신 시스템을 이용한 대용량 네트워크 구성을 위해 이미 선진국들에서는 고정형 광신호의 Add/Drop 구도를 구현한 바 있으며, 향후 가변성이 있는 가변형 광신호 Add/Drop 구도를 시연하기 위해 관련 스위치 및 가변형 필터, 파장변환기, 파장가변 광원 등의 개별 소자와 연계 모듈 구도에 대한 연구 노력이 이루어지고 있다. 아울러 인터넷의 활성화에 따른 IP 네트워크의 발전으로 광 라우터 및 광 회선분배기 기술에 대한 개발이 요구되고 있는 상황이므로, 이들에 필요한 주요 광소자로는 AWG 라우터, 가변 광 감쇠기, 광 스위치, 파장변환기, 파장가변 광원 등의 개발이 요구되고 있다. 특히 기존의 저속 채널의 스위치용 광 라우터 및 회선 분배기에 사용되는 광 스위치로 광 MEMS 스위치와 열광학 스위치, 기계적인 광 스위치, 버블형 광 스위치 등이 있으며, 향후 고속 광 패킷 신호처리용 고속 ns급 광 스위치로 반도체 광 스위치, 전기광학 광 스위치 등이 있다. 근래에 들어와 WDM 광 전송 장치의 예비 광원과 가변형 광 ADM, 광 스위치 페브릭용 핵심 소자로 파장가변형 반도체 광원 (tunable LD) 이 부각되고 있으며, 저속 가변형에서 고속 가변형 tunable LD로 발전될 전망이다. 이들 광소자들 중 광 스위치 어레이와 파장가변 광원과 같은 대부분의 광소자들이 아직은 시스템의 실용화에 적합한 수준까지의 성능 구현과 저가격화가 이루어지지 못한 상황에 있다.

궁극적으로 광 라우터 및 광 회선분배, 광교환기 등에 필요한 광 신호처리 기술이 보편화되기 위해서는 기존의 단일 광 소자 기술에서 이들 소자들이 집적화된 기능성 광자 집적 소자로 발전될 전망이다. 기능성 광자 집적 소자로 대표적인 소자는 광 변조기와 미세선폭 반도체 광원이 집적된 (EML : electro-absorption modulator integrated laser diode)와 기존의 실리콘 광 AWG 소자 및 반도체 광 스위치가 집적화된 파장선택기가 있으며, 파장 가변 광원과 파장변환 소자가 집적화된 파장변환기 등이 있다. 앞으로 광 신호처리 기술의 필요성이 증대됨과 동시에 이에 필요한 기능성 광자 집적 소자로 하이브리드형 집적 광소자에서 단일 반도체 소재에 의한 단일 집적 (monolithic integrated) 광소자로 발전될 전망이다. 광자 집적 회로에 사용되는 광신호의 파장은 0.8 ~ 1.5 m 파장대이므로 물리적 회절한계성에 의해 메모리 전자소자에서와 같이 서브 마이크로 이하의 고집적 소자로 발전하기는 곤란하다. 반면에 빛이 가지는 병렬성인 파장 및 편광, 공간적인 물리적 특성을 최대한 이용하는 광자 집적회로 기술로의 발전이 기대된다.

향후 가입자제까지 광섬유 선로를 구축하게 되면 각 가입자까지 100 Mb/s급 이상의 광송수신기가 필요하게 되며, 여기에서 가장 중요한 부분은 소자의 저가격화에 있다. 그러므로 기존의 155 Mb/s ~ 2.5 Gb/s급 광송수신기도 소자의 저가격화와 성능 향상을 위해 새로운 소자 구도와 제작 공정을 도입한 광소자 기술로 발전되어질 전망이다. 아울러 가입자용 광분배기 등에 사용될 광 증폭기도 모듈당 1,000불 이하의 저가격화가 요구되고 있어 고효율 펄스 레이저 다이오드 및 관련 부품들도 저가격화 할 수 있는 기술로 개발되어질 전망이다. 특히 기존의 반도체 광소자에서 가장 가격 상승 요인이 높은 부분은



패키징 기술인 만큼, 이를 해결하기 위한 패키징 공정의 자동화 기술의 개발이나 한편으로는 양자구조의 다층 박막 구조로 된 표면방출형 광원 소자와 같은 새로운 소자 구조를 도입하려는 방법 등에 대한 연구도 진행되고 있으며 향후 이 분야의 발전도 전망된다.

광통신 소자 기술 분야에서 이미 선진국 연구기관의 기술 개발 수준이 우리 보다 월등히 앞서 있는 현실에서 차세대 기술에 있어서라도 가장 핵심이 되는 주요 부품 기술에 우리의 역량을 모아 선도적인 기술을 확보할 필요가 있다. 정보통신 부품 분야에서 가장 앞선 기술을 보유하고 있는 국내의 산업 기반이 기존의 반도체 메모리 전자소자 산업인 점과 향후 광통신 부품 분야에서도 반도체 광소자의 비중이 큰 점을 고려해 볼 때, 향후 반도체 광소자에 대한 우리의 투자와 연구개발 노력은 지속되어야 한다고 본다. 기본적으로 반도체 광소자는 고가 장비와 연구 시설이 뒷받침되어야 하고, 여기에 걸맞는 고급 전문 인력의 수급과 충분한 연구비 지원이 있어야만 세계 시장에 내놓을 수 있는 우리 고유의 핵심 기술 확보를 가능하게 할 수 있다. 아울러 수많은 다양한 광통신 소자를 전부 다 개발하기보다는 가장 비중이 크고 우리가 경쟁력을 가지기가 용이한 1~2개의 부품이라도 우리의 전력을 다 모으는 지혜도 필요하다고 본다. 새로운 다양한 아이디어 기술을 시도하게끔 하고 그 중에서 가장 가능성이 높은 기술이 부각되면 그것을 골라 집중적으로 투자하여 국제 경쟁력을 갖도록 하는 방법도 한가지의 기술 개발 전략이라고 생각이 되며, 이러한 방향의 기술 개발 정책을 구현하기 위한 제도적인 뒷받침과 기술 개발 경영 전략도 필요할 것이다.

#### IV. 결론

그동안 광전송 시스템용 광소자로 가장 잘 개발되어 온 소자들은 광원 및 광송신기, 광 검출기, 광신호 다중/역다중용 수동 소자, 광 증폭기 등과 같은 단일 광소자 위주이었으나, 앞으로 점점 광학적인 방법에 의한 대용량 병렬 신호처리 기술의 필요성에 의해 기능형 광 능동 소자에 대한 수요와 기존의 전자 소자들이 그러하듯 단일 광소자에서 집적형 광소자로 발전되어질 전망이다.

결론적으로 광통신 기술은 기존의 점대점 광전송 시스템 기술에서 광 신호처리 기술이 요구되는 광 입출력 장치(OADM), 광 라우터, 광 회선분배(OXC), 광교환, 광인터넷 기술 등을 융합하는 광통신망 기술로 발전될 전망이고, 광소자들도 단일 기능의 광소자에서 점점 복합화 및 집적화 기능 소자들로 발전하리라 기대된다. 특히 광전송 기술에서는 실리카 광섬유의 저손실 영역인 1250 nm ~ 1650 nm 파장 영역 전체를 활용하는 광대역 WDM 광통신 기술과 이에 필요한 광대역 광증폭기 및 관련 광송수신 소자, 파장다중 소자들의 발전이 기대된다. 한편으로는 OADM, OXC, 광패킷교환 등에 필요한 광신호처리 기술의 개발에 있어서는 물질에서의 빛과 전자의 관계는 밀접하게 연관되어 있는 만큼, 빛이 가지는 고주파수 특성 및 병렬 신호처리 기능의 광자 집적 소자와 우수한 제어 기능을 가진 집적형 전자 회로를 가장 효과적으로 이용하는 기술이 21세기 초반에 펼쳐질 차세대 광통신 시대의 기술로 등장하리라 전망된다. 광통신 소자 및 소재 개발에 따르는 고가 장비와 시설 등의 기본 인프라 구축 비용을 고려하면, 광통신 소자 기술 분야에서 국제 경쟁력이 있는 국가 전략적인 핵심 광통신 소자 개발을 위해서는 선택과 집중의 지혜가 더욱 필요하다.

※ 참고 문헌

1. H. Onaka, et. al., OFC'96, San Jose, California, Feb. 1996, PD19.
2. A. H. Gnauk, et. al., OFC'96, San Jose, California, Feb. 1996, paper PD20
3. K. Fukuchi, et. al., OFC'2001, Anaheim, California, March. 2001, paper PD24.
4. S. Aozasa, et. al., OFC'2001, Anaheim, California, March. 2001, paper PD1
5. J. Bromage, et. al., OFC'2001, Anaheim, California, March. 2001, paper PD4..
6. <http://news.fibers.org/main/article/2/36/4> (Sept. 7. 2000)
7. (a) Furukawa Rvwiew, No. 19 (April 2000),  
(b) OFC 2000, PD 24  
(c) <http://www.nec.co.jp/english/today/newsrel/0005/3002.html>

※ 약어 해설

APD : Avalanch Photodiode  
 ATM : Asynchronous transfer mode  
 AWG : Arrayed Waveguide Grating  
 C-Band : Conventional band  
 DCF : Disperion compensation fiber  
 DFB LD : Distributed Feedback Laser diode  
 DSF : Dispersion-shifted fiber  
 DWDM : Dense WDM  
 EA : Electro-absorption  
 EDFA : Erbium doped fiber amplifier  
 ETDM : Electrical TDM  
 OTDM : Optical TDM

GC-SOA : Gain Clamped SOA  
 GS-EDFA : Gain-shifted EDFA  
 IC : Integrated Circuit  
 IP : Internet protocol  
 L-Band : Long band  
 LAN : Local area network  
 LD : Laser diode  
 NZDSF : Non-zero dispersion-shifted fiber  
 OADM : Optical Add/Drop Multiplexing  
 OFC : Optical fiber communication conference  
 OXC : Optical Cross Connect  
 PDFFA : Praseodymium doped fiber amplifier  
 PSCF : Pure-silica core fiber  
 RDF : Revere-dispersion fiber  
 S-Band : Short band  
 SDH : Synchronous digital hierarchy  
 SMF : Single-mode fiber  
 SOA : Semiconductor Optical Amplifier  
 TDFA : Thulium doped fiber amplifier  
 TDM : Time-Division Multiplexing  
 WB-OA : Wide Band Optical Amplifier  
 WDM : Wavelength-Division Multiplexing