

主 題

광교환 소자 기술

한국정보통신대학원, 광통신 및 광자공학 그룹 원 용 협
한국전자통신연구원, 광스위칭 연구팀 한 선 규

차 례

- I. 서론
- II. WDM 관련 광소자
- III. 광변조 소자
- IV. 광증폭 소자
- V. 공간 광 스위칭 소자
- VI. 결론

1. 서론

광교환 기술은 크게 두개의 방향으로 발전되어 가고 있다. 그 중 하나는 광교환 소자의 기술이고 다른 하나는 광교환 시스템 구성 기술이다. 여기서 우리는 광교환 소자에 대하여 편의상 다음과 같이 정의하고자 한다. 즉, 광교환 소자는 가장 대표적인 공간 광 스위치를 비롯하여 공간, 시간, 파장분할 교환 등 각 방식별 주요 핵심소자를 통칭 하는 것으로 한다. 일견, 광교환 시스템기술과 광교환 소자 기술은 전혀 다른 배경에서 시작되어 각기 별도로 발전되어 가고 있는 듯 하지만 결국 두 기술이 서로 통합되어야 함은 말할 나위가 없고 이제 이러한 통합 연구가 본격적으로 이루어 지고 있다. 경제성과 신뢰성이 보장된 광교환 소자가 개발되어야 만 이 광교환 시스템의 구현이 가능함은 물론이고 반대로 시스템의 구체적인 목적과 사양이 분명히 제시되어야 시스템에 제대로 쓰일 수 있는 광소자의 개발이 가능할 것이다. 특히 최근에 광교환 방식의 하나인 WDM방식이 광교환 시스템이나 광네트워

크의 주요기술이 될 전망이어서 광교환 소자의 연구방향도 이에 맞추어가는 추세에 있다. 그러나 현재로선 광소자의 기술개발이 상대적으로 낙후되어 있어 광교환 시스템의 발전에 커다란 장애요인이 되고 있으므로 광소자의 기술개발이 시급한 실정이다.

광교환 방식에는 유도된 광도파로 상에서 광신호의 교환이 이루어지는 space division switching 방식, 시간 분할을 이용한 Time Division Multiplexing (TDM) 방식과, 파장 분할을 이용한 Wavelength Division Multiplexing (WDM) 또는 Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) 방식 등이 사용될 수 있다. 이에 필요한 광소자에는 Time Multiplexer/Demultiplexer (M U X / D e M U X), w a v e l e n g t h multiplexer/demultiplexer, optical wavelength converter, optical wavelength filter, Add/Drop Multiplexer (ADM), 안정화된 광원과 고속 광변조기, 신호를 증폭하기 위한 광대역 증폭기, 매트릭스 광도파로 스위치와 Router등이 있다.[1],[2],[3] 광

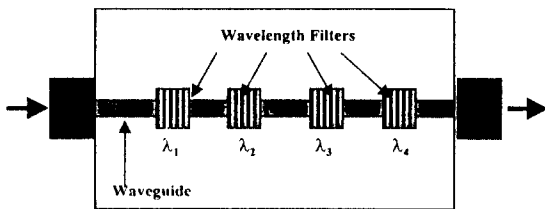
교환 시스템에서 고려되어야 할 주요 핵심적인 사항으로 시스템의 capacity, flexibility, reliability, cost-effectiveness 등이 있으며 광소자의 연구개발도 이에 초점을 맞추어야 한다.

본 고에서는 앞에서 언급한 여러 광소자 중에서 최근 WDM 방식을 이용하는 광교환 시스템의 핵심 광소자와 고속 광변조소자, 광 증폭소자, 매트릭스형 광 스위칭 소자 등을 등을 중심으로 개략적으로 소개 하고자 한다.

2. WDM 관련 광소자

기술적 상황, 경제성 등을 고려할 때 현재로서는 WDM 방식이 광통신망에 가장 적합할 것으로 예측된다. 여기에 TDM 방식을 첨가하여 사용하면 시스템의 신뢰성 및 경제성이 더욱 좋아질 것이다. 최근 광전송로 상에서의 광신호의 증폭을 위해서 광섬유 증폭기(EDFA: Erbium doped fiber amplifier)가 크게 각광을 받고 있는데, 단일 EDFA에서 파장으로 분할된 채널간격이 더욱 작아질수록 더 많은 가입자를 수용할 수 있고, 광증폭에 대한 가입자 채널 대비 가격부담이 크게 낮아 지므로 경제적으로 매우 유리하다. 따라서 이러한 경제성과 성능을 만족하기 위해 주어진 광파장 대역폭 내에 얼마나 많은 광파장을 다중화 할 수 있느냐

〈그림 1〉 4개의 광파장 필터를 series로 연결한 파장 역다중화기



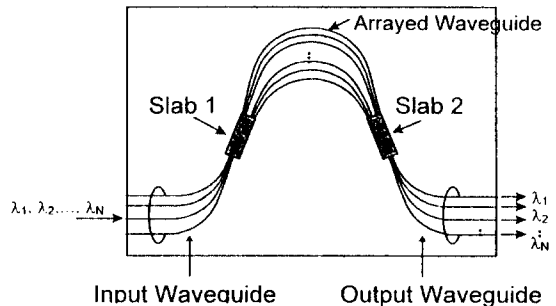
하는 것과 아주 좁은 파장간격으로 다중화된 신호 중에서 원하는 파장을 error 없이 잘 선택할 수 있

느냐 하는 것이 중요한 관건이 된다. WDM에 관련 되는 광소자로서, 광 파장을 선택하는 광파장 필터, 복수의 광파장을 다중화 또는 역다중화 하는 소자, 그리고 광파장을 필요할 때 바꾸어 주는 광파장 변환 소자 등 크게 3 가지로 요약될 수 있다.

2-1. Dielectric 광파장 필터

유리 등의 기판에 굴절률이 각기 다른 박막을 여러 층 쌓아서 여기에 광신호가 지나갈 때 각층 간의 간섭을 일으키게 한다. 따라서 설계와 공정 시 굴절률을 적절히 조절하면 원하는 파장을 선택적으로 반사 시키거나 투과 시킬 수 있는 구조를 만들 수 있다. 이러한 필터는 한 파장만을 추출하므로 여러 개의 필터를 series로 연결하면 파장 역다중화 기능을 얻을 수 있다 (그림 1). 그리고 공정과 물질을 적절히 선택하면 온도에 거의 무관한 필터를 구성할 수 있다 ($2\text{pm}/\text{C}^\circ$). 따라서 온도 조절을 위한 복잡한 부가 기술이 필요 없게 되어 가격과 복잡성에서 유리하다. 단점은 필터기능이 serial하게 일어 나므로 채널이 많아 질수록 초기의 filtering 된 신호와 최종으로 filtering 된 신호의 세기 차이가 많이 나게 된다. 따라서, 이 기술은 채널간의 power 차이가 많이 나므로 16 채널이하의 시스템에 적합하다.

〈그림 2〉 AWG의 개략도.



여러 파장으로 다중화된 입력신호는 출력 단에서 각 파장에 따라 여러 채널로 나누어져서 출력된다.

2-2. Arrayed Waveguide Grating (AWG) 소자

AWG 광소자는 그림 (2)에서 보는 바와 같이 광도파로 상에서 grating (주름)을 만들어 주고 또한 분리된 여러 광도파로의 위상차이를 유도하게 한 구조로서 여러 파장이 다중화 된 입력 광 신호가 입사될 때 각 파장에 따라 다른 광 도파로로 나오게 하여 광파장 역다중을 실현하게 하는 소자이다.[4],[5] 이 소자는 광도파로만으로 구성되는 수동소자이기 때문에 파장수가 증가 하더라도(즉, 채널이 늘어나도) 가격이 별로 늘어나지 않는 장점이 있다. 따라서 이 소자는 cost-effectiveness가 크게 강조되는 MAN(Metropolitan area network) 이상의 광통신망에도 무리없이 적용 가능한 매우 유망한 소자이다. 이 소자는 scalability가 좋을 뿐만 아니라, 광섬유 접속을 전체 하나로 하기 때문에 광섬유 접속을 각 채널당 해야 하는 dielectric optical filter 방식보다 다채널에서 가격 경쟁력이 매우 좋다. 현재 100GHz의 파장 간격을 가지고 uniformity가 우수한 AWG가 발표되고 있다.[6] 이것은 온도에 매우 민감하므로 온도를 일정하게 유지 시켜주기 위한 cooler 와 heater가 부수적으로 필요하다.

의 특성에서 대부분 실리카 AWG의 특성에 거의 근접되어 있고, 도파로의 크기가 작은 관제로 광섬유와의 삽입손실이 크고, 또한 도파 손실이 큰 관제로(0.5dB/cm) 전체손실이 7~8 dB로 큰 편이다. 편광의존성은 도파로 패턴 제작기술과 편광보상법 등을 이용하여 현재 0.008 nm로 매우 작은 편이다. 최근에는 소자의 온도의존성을 낮추기 위해 도파로 내에 온도에 따라 다른 굴절률 변화를 갖는 물질을 삽입시키는 새로운 구조를 제안하여 AWG 소자의 주변 온도변화에 따른 파장변화를 최소화시키는 연구결과가 발표되고 있다. 반도체는 하나의 웨이퍼 상에서 다른 능동소자와의 집적이 가능하다는 장점이 있어 광검출기, 광증폭기 등과의 집적된 형태의 AWG 소자가 이미 발표되었고, 응용 분야로서 증폭기를 집적한 다중파장 레이저, electro-optic switch가 집적된 구조의 add-drop multiplexer, wavelength selective switch, cross-connector 등의 연구결과가 발표되기 시작하였다.[7],[8],[9] 향후 반도체는 AWG의 파장 다중 및 역다중 기능 외에 작은 소자 크기로 집적화 할 수 있는 장점을 살려 WDM 시스템에 응용가능한

<Table 1> 각 재료별 AWG 연구현황

재료	연구 기관	크기 (mm ²)	채널수	채널간격 (nm)	Cross-talk (dB)	편광의존성	Insertion loss
실리카	NTT	25x35	16x16	0.8	<-25	-	2.7~5.3 dB
반도체(InP)	Bellcore	2.8x3.2	1x8	1.6	<-26	0.008	6.7~7.3 dB
폴리머	NTT	-	16x16	0.8	<-20	<0.35	9~13 dB

AWG를 이용한 파장다중/역다중 소자는 Silica를 이용하여 NEL/PIRI 등에서 32채널까지 상용화 되고 있다. silica 16 채널AWG 파장다중/역다중 소자의 경우 현재 약 10,000 \$ 정도에서 상용화 되고 있다. 반도체 및 폴리머 재료를 이용한 AWG 파장 다중/역다중 소자의 경우 아직까지 상용화 되지 못하고 있다.

반도체(InP)는 Bellcore, NTT, Alcatel, Lucent Tech. 등에서 가장 활발히 연구되고 있으며, AWG

AWG 집적소자 구현에 역점을 두고 발전하리라 예상된다.

실리카(silica)로 만든 AWG 광소자는 Lucent Tech., NTT/PIRI 등에서 가장 많은 연구결과를 발표하였으며, 현재 상용화되고 있는 소자이다. 광도파로손실이 0.05 dB/cm로 매우 작은 이점을 살려 전체 광섬유 삽입손실이 3~5 dB 로서 다른 재료의 소자에 비해 가장 우수한 특성을 보이고 있으며, 최대 단점인 큰 편광의존성 (제작공정 온도가 높아

기판과 도파층과의 큰 열팽창계수차에 의해 발생) 도 half wave plate를 사용하여 해결하였다.[10] 소자의 온도의존성을 최소화 시키는 구조에 대한 연구와 flat top response 특성을 갖는 연구가 현재 진행 중이다. 현재까지 발표된 최대 채널 수와 파장 간격은 각각 128x128 과 0.2 nm (FDM) 이다. 응용 분야로서는 thermo optic switch가 함께 집적된 구조의 add-drop multiplexer, wavelength selective switch, cross-connector 등의 연구결과가 발표되기 시작하였다. 또한 반도체 레이저와 AWG를 hybrid 상태로 집적한 구조의 다중파장 레이저에 대한 연구결과도 발표되었다.[11] 향후 실리카는 AWG의 안정된 특성에 힘입어 thermo-optic switch가 집적된 구조의 add-drop multiplexer, wavelength selective switch, cross-connector 등의 상용화에 최대 역점을 두리라 예상된다. 나아가 반도체 능동소자(LD, PD, amplifier)와의 집적연구와 planar 증폭기와의 집적을 통해 Si optical bench를 구현하는 방향으로 발전하리라 예상된다.

폴리머(polymer)를 이용한 광소자는 Akzo Nobel, NTT 등에서 가장 활발히 연구되고 있으며, 그 특성은 아직 반도체나 실리카에 다소 떨어지는 상황이다.[12],[13],[14] 특성에 있어서는 전체 삽입손실이 크고 (9~13 dB), cross-talk이 -20 dB, 편광의존성이 0.35 nm 로서 기본적인 AWG 소자의 특성 측면에서 많은 개선이 요구되고 있는 실정이다. 따라서 현재의 연구동향은 AWG의 응용분야 보다는 기본 특성 개선에 중점을 두고 있다. 폴리머 물질의 낮은 광도파손실, 낮은 편광의존성과 제작공정의 개선 등이 이루어진다면 가장 경제성 있는 AWG 광소자의 공급이 가능하리라 예상된다. 향후 발전방향은 thermo optic switch가 집적된 구조의 add-drop multiplexer, wavelength selective switch, cross-connector 등의 WDM 시스템의 핵심소자 개발에 역점을 두리라 예상된다.

2-3. FBG(fiber Bragg grating) 광파장 필터

FBG filter는 광섬유상에 미세주름을 만들어 각

주름사이에 반복적인 굴절을 차이를 주어 입사광의 파장을 선택하는 소자로서, 이때 수백 내지 수천개의 미세 간섭 element (grating)를 사용하므로 필터 특성곡선의 line shape 와 파장선택 특성이 (square type) 다른 종류의 파장 필터에 비해 가장 좋다. 하지만 이 기술은 투과형이 아닌 반사형태로 작동되는 단점이 있다. 이것은 circulator와 같은 보조장치를 사용하면 해결이 될 수 있으나 circulator의 비싼 가격 때문에 경제성이 보장되지 않을 수 있다. circulator 이외에 Mach-Zehnder 를 이용한 기술도 가능하다. 이 기술은 매우 좋은 필터 특성을 가질 수 있으나 채널 수가 많아지면 구조가 복잡해질 뿐만 아니라, 온도에 매우 민감하므로 온도 조절 장치가 필요하다는 단점이 있다.

2-4. 파장가변 필터

한 개의 광섬유에 파장별로 각 채널의 신호를 할당하여 동시에 보내는 파장다중 방식은 차세대 광통신기술에서 가장 중요한 핵심기술 중의 하나가 될 예상이고, 향후 이것을 이용한 다양한 구조의 네트워크가 개발될 것이다. 파장필터는 원하는 채널의 신호를 선택하거나 라우팅을 변환하는 매우 중요한 역할을 하는 것으로 파장다중 방식에서 가장 중요한 광소자 중의 하나이다. 이러한 파장 필터를 파장가변으로 가능하게 함으로써 시스템에서 필터의 수를 크게 줄일 수 있어 경제성 및 신뢰성을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 시스템이 수용할 수 있는 가입자 수도 크게 증가시킬 수 있다. 파장가변 필터에서 사용용도에 따라 파장 가변 속도가 중요한 요소가 된다. 광 CATV 수신이나 multi-access data network 등과 같은 것에는 수 밀리 초(10⁻³ sec)에서 수 초 정도의 가변 속도를 갖는 필터면 충분하고, packet switching이나 ATM switching 등과 같은 곳에는 나노 초(10⁻⁹ sec) 이하의 가변 속도를 갖는 필터가 필요하다. 현재 저속 파장 가변 필터는 이미 상용화되어 여러 회사에서 판매중이나, 고속 파장 가변 필터는 아직 연구 중에 있다. 현재까지 발표된 고속 파장 가변 필터

는 3가지 종류가 있는데 각 방식별 특성 및 장단점은 <Table 2>에 나타낸 바와 같다.

반도체를 이용한 파장 가변 필터는 가변 속도의 한계가 carrier life time (~1 나노초 수준)에 의해 정해지기 때문에 초고속의 파장 가변이 근본적으로 어렵다. 반면 반도체 증폭기와 같은 원리로

optical gain을 얻을 수 있다는 큰 장점이 있다. LiNbO3를 이용한 파장 가변 필터인 경우는 반도체에 비해 가변 속도가 10배 이상 빨라서 초고속의 파장 가변이 가능하지만 물질에 대한 내구성 및 가격 등의 문제가 있다. 그러므로 이러한 문제를 극복하기 위해 지금까지 개발된 파장 가변 필터 방식

<Table 2> 주요 방식별 파장가변 필터의 특성비교

필터종류	Fiber Fabry-Parot	Liquid Crystal Fabry-Parot	Sliding Tuning	Mach-Zehnder	Acousto-optic TE/TM	Acousto-optic LP01/Lp11
Tuning Range(nm)	50	50	>30	4.5	400	100
Bandwidth(nm)	< 0.01	0.2	~1	0.04	1	2.0
채널수	>100	50	>30	128	> 100	> 10
삽입손실 (dB)	5	7	< 3	7	5	<1
가변속도	msec	msec	< 50 msec	msec	10 μsec	20~50 μ sec
주요 장점	Narrow bandwidth 편광의존성이 적음		온도변화에 대한 안정성 편광의존성이 적음	Wide tuning range, narrow channel spacing	High speed wide tuning range	High speed wide tuning range, 편광의존성이 적음
주요단점	mechanical unstable, 온도에 민감, reliability가 낮음		크기제한, 지속, 고속 정밀모터 구동	공정어려움, multi stage control operation	Acoustic wave generator 필요, 크기제한, 집적성이 없음	
관련연구기관	BT, AT&T		Santec	NTT	Belcore	FiberPro

〈Table 3〉 고속 파장가변 필터의 일반적 특성 비교

고속필터종류	반도체	Electro-optic Fabry parot	Electro-optic TE/TM
Tuning Range(nm)	1~4	1	16
Bandwidth(nm)	0.05	~0.05	0.6
채널수	> 10	> 10	~10
삽입손실(dB)	-	5	5
가변속도	nsec	nsec	nsec
주요 장점	Optical gain,	Very high speed	Very high speed
주요단점	Narrow bandwidth	Narrow tuning range, high voltage tuning	Narrow tuning range, high voltage tuning
관련연구기관	NEC	-	AT&T

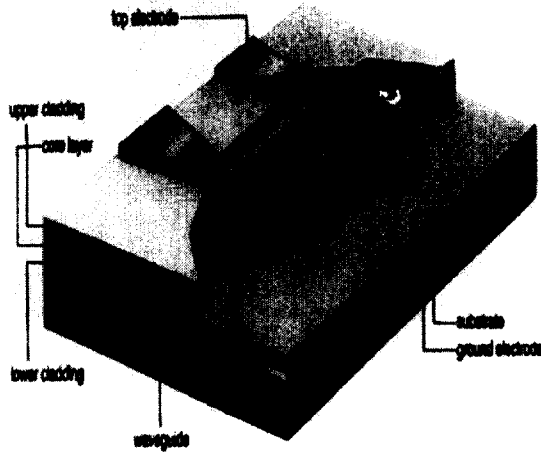
과 다른 새로운 물질을 이용한 고속 파장 가변 필터의 연구가 필요하다. 폴리머는 LiNbO₃ 보다 더 빠른 가변속도의 구현이 가능하며, 공정이 간단하고 어레이 형태의 고속 파장 가변 필터로 대량 생산이 가능하다. 더욱이 다양한 물질의 개발이 가능하므로 성능 개선의 가능성이 매우 높다. 이러한 고속 파장 가변 필터를 이용하면 대용량 WDM 광통신망 및 광ATM에서 필요한 다기능 필터 시스템을 만들 수 있다. 저속 파장 가변 필터와 고속 파장 가변 필터는 그 특성과 용도에 따라 제각기 별도의 방향으로 연구가 진행되고 있다. 파장 다중방식의 CATV나 crossconnect에 필요한 저속 파장 가변 필터의 경우는 안정된 성능의 가변 필터가 개발되어 이미 상용화 단계에 들어가 있다.[15]주요 방식별 파장가변 필터의 특성비 고속 파장 필터의 경우 저속의 파장 가변 필터와 달리, 아직까지 광 ATM 교환기에 사용될 만한 상용화된 파장 가변 필터는 아직 없다. 고속 파장 가변 필터 방식 및 일반적 특성은 〈Table 3〉과 같다.

3. 광변조 소자

반도체 레이저(InP 또는 GaAs)를 직접적으로 변조시키는 것이 가장 간단하나, 변조속도가 빨라지거나 전송거리가 길어지면 문제가 발생한다. 가장 문제가 되는 것이 electron density와 굴절률 사이에 일어나는 chirping이 가장 큰 문제이다. 이러한 chirping은 설계와 공정을 주의깊게 잘 조절 하면 최소화 시킬 수 있으나, 현재로서는 external modulation을 이용하는 것이 더 좋은 방법으로 평가되고 있다. 이렇게 하면 레이저는 CW로 일정한 power level만 유지시키고, 별도의 변조기를 외부에 부착하여 데이터 신호를 CW 레이저 빔에 실어 보내면 된다. 따라서 이 방법에서는 레이저의 transient 특성에 의한 chirping 문제가 해결된다. 변조기는 LiNbO₃, InP, polymer를 이용한 Mach-Zehnder (MZ)형의 광변조기와 electro-absorption (EA)을 이용한 EA 광변조기가 이용될 수 있다.[16],[17] MZ 광변조기는 두개의 도파로 팔(arm)의 결합체로 이루어진 간섭계로(그림 (3)) 두 도파로 사이의 위상차이를 이용하여 출력측의 광신호를 단절(ON/OFF)하여 변조하는 것이다. 한편 EA 광변조기는 인가된 전계에 의하여 band gap의 변화를 유도하고 이에 따른 반도체의 흡수

〈그림 3〉 마호젠더형 광변조기의 개략도.

Polymeric Mach-Zehnder Modulator



하부 클래딩, 코어, 상부 클래딩의 3층 구조로된 광변조기의 한쪽 도파로 위에 있는 전극에 전압을 가하면 굴절률이 변하게 되고 그에 따라 도파광의 위상이 다른 한쪽의 도파광 신호의 위상에 비해 0 또는 180도로 변화되어 출력단에서 다시 결합된 광신호가 전극에 가해진 전압의 변화에 따라 변조되게 한다.

변화를 이용한 것으로, 기본적으로 다른 방식보다 linearity가 떨어진다. 또한, 이 방식은 power, extinction ratio, chirp 간에 상호 연관이 있으므로 성능에서 optimum한 점을 잡기가 매우 어렵다. 장 점으로는 아주 compact한 size로 만들 수 있고 다른 레이저와 함께 집적이 가능하다. 반대로, 반도체(InP) MZ 변조기는 linearity가 좋을 뿐만 아니라, 마찬가지로 optimum point 잡기가 용이하며, compact하고 integration이 가능하다. LiNbO3를 이용한 MZ 변조기는 linearity가 매우 좋고, 광손실이 적지만, 비교적 부피가 크고, 비싸다는 단점이 있다.

4. 광증폭 소자

광증폭 소자는 광도파로나 광섬유로 전송되는 광신호의 손실을 보상하고자 기존의 광/전기 변환을 통하여 전기증폭을 하는 개념에서 크게 변화하여 광/전기 변환 없이 광신호 그대로 증폭하는 소

자이다. 70년대에 처음으로 캐리어 주입(carrier injection) 형태의 반도체 광증폭기(semiconductor optical amplifier: SOA)의 개념이 도입되기 시작하여[18], 80년대에 약 10 dB의 이득을 갖는 반도체 광증폭기가 개발되었고, 90년대에 이르러서는 반사 코팅기술을 발전시켜 InP계 반도체 증폭기에서 30dB 이상의 이득을 갖는 소자가 Ericsson(스웨덴)에서 1995년에 처음으로 상용화 되기 시작하였다. 이러한 반도체 광증폭기는 초기에는 순수한 광증폭용으로만 사용이 제한되어 왔으나 최근에는 광파장 변환 소자, 광파장 다중 버퍼 등 광통신 시스템의 새로운 기능소자로 크게 각광 받고 있다. 이러한 반도체 광증폭기 외에 광신호가 광섬유 상에서 그대로 증폭되는 광섬유 증폭기가 개발되었는데 80년대 말 10Gbps에서 300km까지 전송 가능한 희토류 첨가 광섬유 증폭기(Erbium-doped fiber amplifier, EDFA)가 처음으로 개발되어 현재 해저 중계망에 이용될 정도로 그 기술이 발전되어 왔다.[19],[20]

폴리머 광증폭 기술은 1980년 후반부터 증폭기의 개념이 도입되어 1993년에 일본의 Keio 대학에서 로다민(Rhodamine)계 염료를 폴리머 매트릭스에 doping하여 500 ~ 600 nm 파장영역에서 약 27dB의 이득을 갖는 도파로형 폴리머 광증폭기가 발표되었다.[21] 이때 광섬유의 길이는 50 cm로 가시광선 영역에서(570 nm, 620 nm) 30dB의 증폭이득을 얻었으며, 네덜란드의 Phillips'에서는 PMMA 계통에 희토류 족인 Eu3+를 도핑한 후 1.5 cm 정도의 폴리머 광섬유 형태의 광증폭기를 개발하여 증폭 이득은 4.1 dB를 얻었다. 미국의 Texas/Austin 대학에서 수용성 폴리머인 photolime gel에 Nd3+를 도핑하여 근적외선 영역인 1.06 μm에서 증폭 이득은 8.5dB를 발표하였다.[22] 최근에 미국에서는 DARPA를 중심으로 연구가 시작되고 있다. 이상과 같이 여러 형태의 광증폭 기술이 발표되었으나 현재까지 시스템에 제대로 적용할 수 있는 광증폭 소자는 EDFA가 가장 유력하고 이미 상용화되어 사용되고 있다. 최근에 WDM이 광통신망의 핵심기

술로 더 오름에 따라 이에 발 맞추어 EDFA에 대한 수요가 더욱 증대되었다. 이에 필요한 EDFA의 기술적 요구사항은 다음과 같다.

1. 광파장 스펙트럼의 전체 window상에서 일정한 증폭도(gain)를 가질 수 있는 gain flattening EDFA가 필요하다. 보통 gain의 window가 1530-1560 nm이지만 gain 특성이 일정하지 않고 gain peak이 발생한다. 이러한 gain peak을 suppression 하기 위하여 복잡한 형태의 필터가 사용된다. 여기서 주된 기술은 필터와 gain peak 을 정확히 맞추는 것인데 이것을 전체 온도 영역에서 optimize 해야 하는 것이다. 현재 1.0dB 이하로 flat 한 것이 가능하다. (0.5 dB for red band)

2. 입사광의 power에 무관하게 gain profile을 가질 수 있게 하는 dynamic gain tilt(data stream 에서 다른 파장 들의 신호가 동시에 add/drop 될 때에 system 의 performance 가 변하지 않고 유지 되는 기능)가 필요하다. 이것은 feedback loop을 사용하여 해결한다. 즉, gain의 변화를 감지하고 re-balance를 하여 조절한다.

3. 좀 더 많은 파장을 수용 할 수 있는 광대역 증폭 기능이 필요하다. Paraseodymium-doped fiber 는 1300 nm 에서 증폭 기능이 확인 되었으나[23], 상용화에는 실패 하였다. 1530-1660 nm 에서 1570-1600nm 로 shifting 이 가능하여 더 넓은 영역에서의 증폭이 가능하다. tellurite fiber 를 사용하면 1530-1610 nm 에서 가능한 것으로 알려져 있으나 상용화는 아직 안되었다.

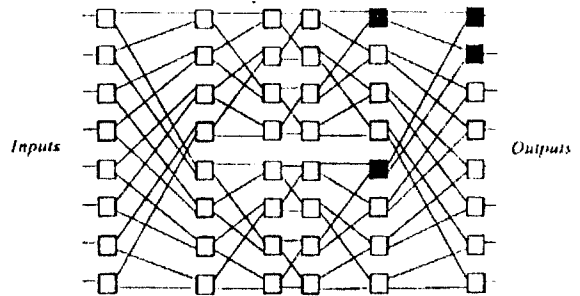
4. 고풍력 pumping 레이저를 사용하여 더욱 높은 이득을 달성할 필요가 있다. 현재 pump laser의 발전으로 20-23 dBm 출력이 가능하다. 여러가지 pumping 레이저(pumping fiber cladding, with broad-area multimode pumping 또는 매우 높은 pumping power 를 갖는 레이저)로 매우 높은 gain 이 가능하다. 이 기술은 broadcasting 기능을 구현

하는 cable TV에 매우 유용하게 쓰일 수 있다.

5. 공간 광 스위칭 소자

공간 광 스위치는 광교환 소자의 가장 기본적인 소자로서 1X2 또는 2X2 등을 단위소자로 하여 큰 규모의 광 스위치 구조를 만들 수 있다. 단위소자를 사용하여 대규모의 스위칭 구조를 구성할 때 스위치의 입력단과 출력단 사이에 여러 단위 스위치 소자를 경유하는 신호의 경로상에서 제각기 출력단의 특정한곳으로 향하여 통과하는 신호들 사이에 blocking이 생기지 않도록 해야 한다. 이러한

〈그림 4〉 8X8 Dilated Benes Network 구성도



그림속의 작은 네모는 2X2 단위 스위치를 나타낸다. 이 구성도는 스위칭 경로상에서 blocking이 발생하지 않도록 구성되어 있고 누화(crosstalk)가 최소가 되도록 고안된 구조이다.

non-blocking 구조를 구성할 수 있는 여러 가지 방법이 오래 전부터 연구되어 왔다. 그림(4)는 48개의 2X2 단위소자를 사용하여 8X8 non-blocking 스위칭을 구현할 수 있는 dilated benes switching Structure의 예를 나타낸 것이다. 시간분할 다중 방법을 혼용하지 않고 이러한 공간 광스위칭만으로 광교환 시스템을 구성하게 되면 광스위칭의 스위

칭 속도에 무관하게 시스템을 구성할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 이렇게 개별적 단위 스위치를 연결하여 대규모의 non-blocking 스위치 구조를 구성할 때 크게 문제가 되는 것이 광손실이다. 이러한 광전달 손실이 공간 광스위치의 규모 및 크기를 증가시키는 데 직접적인 제약을 주기 때문에 공간 광스위치만으로 광교환 시스템을 구성하는 것은 교환용량의 측면에서 큰 한계에 부딪히게 된다. 따라서 대규모의 스위치 어레이(2X2 단위스위치로 구성된 스위치 어레이)를 하나의 칩으로 집적화 하던지, 공간 광 스위치를 다른 교환 방식, 예컨대 파장다중 교환, 시간다중 교환 등과 혼합하여 교환용량을 증대시킬 수 있다. 이 중에서 수 많은 도파로 스위치를 하나의 칩으로 집적화 하는 기술도 아직은 초보 단계여서 현재 반도체를 이용하여 4X4 정도의 규모의 소자와 폴리머, LiNbO3 등의 소재를 이용하여 8X8 정도의 집적화가 가능한 실정이다.[24],[25] 그리고 공간 광스위치를 시간다중 교환 방법과 혼합할 경우, 상대적으로 작은 규모의 공간 광 스위치로 교환용량을 크게 증가시킬 수 있으나 이때는 그만큼 공간 광스위치의 스위칭 속도가 빨라져야 하는 부담이 있다. 요즘 폴리머 소재의 전기광학 효과를 이용한 공간 광스위치의 연구가 활발히 진행되고 있는데, 이러한 소자는 이론적으로 단위소자 당 400GHz까지 처리할 수 있는 기능을 구현할 수 있다고 보고 있다. 그러나 공간 광스위치를 파장분할 교환방식과 혼합할 경우, 이 같은 스위칭 속도는 크게 문제가 되지 않는다. 보통 밀리초(10-3 초) 정도면 충분하다. 따라서 공간 광스위치를 어떤 교환방식과 혼합 하느냐에 따라 그 선택 사양이 달라진다. 다음은 현재 연구되고 있는 대표적인 2가지 방식의 공간 광스위치를 소개한다.

5-1. 열광학 광스위치 (thermo-optic switch)

열광학 스위치는 온도에 따라 굴절률이 변화하는 물질로 광도파로를 만들어 특정한 부위에 전극을 부착하여 이 전극에 가해진 열을 이용하여 광의

경로를 스위칭 하는 소자이다. 열의 전달속도가 매우 느리기 때문에 열광학 스위치는 고속 스위칭 소자로는 부적격 하지만 신호 전달손실이 매우 낮고 제작공정이 상대적으로 단순해 공간 광스위치 만으로 대규모의 스위치 어레이가 가능하고 파장다중교환 방식과 혼합하여 사용할 때 그 진가를 발휘할 수 있다. 또한 그 외의 용도도 매우 다양할 것으로 예측된다.

열광학 광스위치는 주로 LiNbO3, 실리카와 폴리머를 사용하여 제작된다.[26] LiNbO3는 열광학 계수가 낮고 물질 자체의 가격이 고가인 관계로 별로 연구되지 않고 있다. 실리카는 열광학계수가 낮지만 실리콘 공정이 잘 발달되어있고 광손실이 낮은 관계로 일본 및 미국 등에서 매우 활발히 연구되고 있다. 특히 일본의 NTT에서는 실리카를 사용한 8X8 규모의 광스위치 어레이 직접회로를 발표하였으며, 집적도를 더욱 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 8X8 광직접 회로를 사용하여 광교환 시스템에 직접 활용하는 연구도 병행하고 있다. 물질별 열광학 소자의 특성을 요약하면 <Table 4>와 같다.

5-2. 전기광학 광스위치 (electro-optic switch)

전기광학 광스위치는 전기적 특성에 의해 굴절률이 변화하는 물질을 사용하여 광도파로를 만들고 전기광학 효과에 의한 굴절률 변화를 유도하여 광신호의 경로를 스위칭 할 수 있다. 전기광학에 의한 굴절률 변화의 속도가 나노초 이하로 매우 빠르기 때문에 고속의 스위칭 기능을 갖는 광스위치가 가능해 진다. 이러한 고속의 공간 광스위치는 시간분할 교환 방식과 혼합하여 사용될 때 대용량의 교환용량을 얻을 수 있으며 파장분할 교환 방식까지 첨가하면 광의 여러 자원(resource)을 충분히 활용한 초대용량의 교환용량을 얻을 수 있다. 이때 공간 광스위치는 부가적으로 여러 파장에 대한 안정화 기술과 색분산 보상 (dispersion compensation) 기술이 필요하다. WDM 기술에서 파장과 파장 사이의 간격이 좁으면 온도 등 주변환경에 대하여 매

〈Table 4〉 재료별 열광학 특성을 이용한 광소자의 특성비교

	LiNbO ₃	실리카	폴리머
열광학계수 (K ⁻¹)	4.7 x 10 ⁻⁴	1 x 10 ⁻⁴	1 x 10 ⁻⁵
소비전력(mW)	~200	500	5~50
구조	MZ	MZ, DC, X	MZ, DC, X
광손실(dB/cm)	< 0.5	< 0.03	< 0.1
편광의존성(nm)	1	1	0.3
주요연구기관	Osaka Univ.	NTT, Lucent	AKZO, HHI

우 민감해 지기 때문에 파장 간격이 좁아 질수록 파장 안정화 기술은 더욱 중요해진다. 파장이 주변 환경에 의하여 drift 하게 되면 시스템이 불안정해져 성능의 저하가 일어난다. 파장간격이 약 400 GHz 간격 정도일 때에는 이러한 drift 가 크게 문제가 되지 않으나 이 이하로 좁아지게 되면 문제가 된다. 이것은 FBG와 dielectric filter(etalon) 등과 같은 feedback control로 해결이 가능하다. 즉, 미세한 파장 변화를 감지하여 레이저의 온도조절로 레이저의 파장을 tuning 할 수 있다. Dielectric filter의 경우 온도에 따라 거의 변하지 않으므로 이를 이용하여 소자 수명까지 0.05 nm 변화 이내가 가능하다.

LiNbO₃는 오래 전부터 연구개발이 진행되어왔기 때문에 기술적으로 다른 재료보다 제일 성숙되어 있어 상대적으로 가장 앞선 성능의 소자가 개발되어 있는 상태이나, 상용으로 사용될 정도의 안정도를 달성 하는 데는 한계가 있다. 또한, 4X4 이상의 광소자를 제작하려면 매우 큰 LiNbO₃ 결정체가 필요한데 이러한 결정체를 만드는 것은 거의 불가능하여 실제로 광교환 시스템에 적용하기에는 한계가 있다. 또한, 재료자체가 회귀하여 가격 경쟁력이 없는 것이 흠이다. 이러한 제반이유로 LiNbO₃를 소재로 한 광스위치 개발은 점점 줄어들고 있는 실정이다.

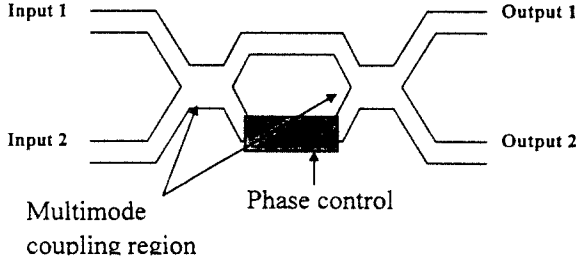
반도체의 경우 광손실이 다른 소재에 비해 큰 것이 단점이다. 그러나, LD 게이트형을 채택할 경우 광증폭 기능을 얻을 수 있기 때문에 광손실을 보상

할 수 있는 장점도 있다. 광손실을 보상하기 위해서는 전류를 사용하여 광소자를 구동하여야 하는데, 광전류의 생성 및 소멸 시간 때문에 반도체 광소자는 1GHz 이하의 속도 제한이 있다. 반도체 광소자는 제작 하기는 매우 까다롭지만 집적도에서는 다른 재료에 비하여 매우 우수하므로 광교환 시스템의 소형화에 매우 유리하기 때문에 현재 많은 연구가 진행되고 있다. [27],[28]

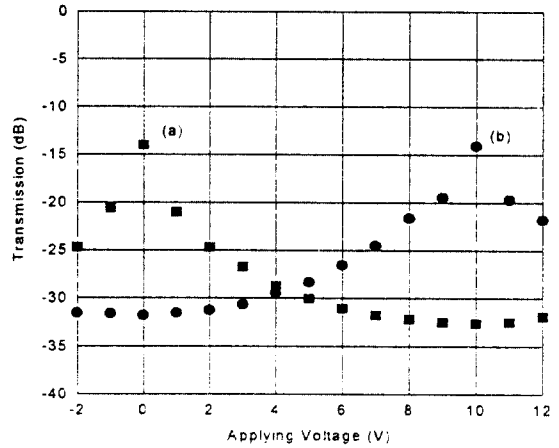
폴리머를 사용한 전기광학 소자는 다른 소재보다 개발 기간이 짧아 소자의 성숙도가 비교적 낮은 편이다. 하지만, 폴리머를 이용한 광소자는 소자 제작의 용이성과 저렴한 가격의 광소자를 제작 할 수 있다는 장점으로 최근에 많은 각광을 받기 시작하였다. 폴리머는 물질이 매우 다양하여 원하는 기능에 맞는 물질을 합성할 수 있고, 공정 장비도 간단하여 제작이 용이하다. 광소자의 구동은 전압을 사용하여 열이 발생되지않고 다른 물질에 비해 매우 빠른 속도를 갖는다.[29] 따라서 수십 GHz 이상의 초고속 광교환 시스템에 적합하다. 그림5(a)는 폴리머 소재를 이용한 MBOA(modified bifurcation optical active) 2X2 광스위치의 구조를 나타낸 것이다. 실제로 그림5(b)의 실험결과에서 구동전압(10V)에 따라 출력측의 광신호가 스위칭 되는 것을 볼 수 있다. 종합적으로 LiNbO₃, 반도체 및 폴리머를 이용한 광소자별 특성비교를 〈Table 5〉에 나타내었다.

6. 결론

〈그림 5〉 폴리머를 이용한 전기광학 2X2 광 스위치:
(a) MBOA 형 구조도



(b) 실험 결과.
스위칭 시간: 0.1ns, 구동전압: 0V (cross 상태), 10V (bar 상태).



〈Table 5〉 재료별 전기광학 효과를 이용한 광소자의 특성비교

	LiNbO ₃	반도체(InP)	폴리머
대역폭(10 GHz.cm)	10	10	>100
전기광학계수 (pm/V)	32	1.5	10~50
광손실(fiber-to-fiber, dB)	<4	<15 ~0 (with gain)	< 8 dB
광도파로 형태	방향성 결합기	LD gate	방향성결합기
이득기능	불가능	가능	불가능
편광성	있음	있음	있음
공정	<10 단계	<100 단계	<10 단계
온도 조절 필요성	불필요	필요	불필요
광도파로 제조 방식	확산법	결정성장법	폴링
크기	<1X30 mm	작다 <1X5 mm	<1X30 mm
패키징 난이도	좋음	나쁨	중간
가격	높다	높다	낮다
총 합	가장 잘 발달되어 있음	집적도가 가장 좋음	속도가 가장 빠름 다양한 기능을 가질 수 있음.

이상에서 열거한 광소자들은 굳이 광교환 시스템에만 사용되는 소자가 아니라 광전송 시스템 나아가 광통신망 전체에서 널리 쓰일 수 있는 핵심 소자 들이다. 광통신 망에서 세가지 신호 다중 및 교환 방식으로 공간분할 다중교환 방식(SDM), 시간분할 다중교환 방식(TDM), 그리고 파장분할 다중교환 방식(WDM)이 있으나 SDM 방식의 공간 광스위치는 광교환 시스템에서 가장 핵심적인 소자로 대표성을 띄고 있는 소자이지만 그 자체만으로는 용량증대를 위한 규모 확대에 한계가 있고 TDM 방식이나 WDM 방식과 혼합하여 사용하는 것이 바람직하다. 이때 TDM 방식을 혼용할 경우, 공간 광 스위치의 스위칭 속도가 그에 상응하여 빨라져야 한다. 이때 외부에 연결된 광스위치 제어 회로가 전기적 속도한계에 부딪히게 되어 광스위치의 스위칭 속도가 아무리 빠르더라도 전체 시스템의 교환용량을 더 이상 증대시킬 수 없게 된다. 현재 기술로 약 10GHz가 그 한계로 보고 있다. 또한 광 메모리 소자의 기술이 현재로선 매우 취약하기 때문에 이에 의한 용량한계를 극복하기 위하여 WDM을 첨가하는 것이 가장 유력한 방법으로 평가되고 있다. 따라서 일본, 미국, 유럽 등 선진국에서는 이미 WDM을 기본으로 하는 여러가지 광 네트워크와 광전송 및 광교환 시스템의 testbed를 구축하여 활발히 연구 중에 있다. WDM 관련 광소자로서 광파장 필터, 광파장 변환 소자, 파장 가변 레이저 어레이, 파장 다중/역다중 소자 등이 있으며 그의 관련 소자로서 광증폭기, 고속 및 저속 광변조기 등이 주요 핵심소자라 할 수 있다. 이러한 광소자 들의 기술이 시스템 전반의 기술의 발전을 좌우 하지만 소자의 기능면에서나 가격, 신뢰성에서 충분히 성숙되어야 시스템에 적용 가능하다. 현재 반도체, LiNbO₃, 폴리머, 실리카 등 여러 가지 소재를 사용하여 다양한 기능의 광소자가 개발되고 있다. 재료나 소자의 성능을 선택할 때 우선 시스템의 용도, 사양 등이 먼저 설정되고 나서 각 재료별 소자의 장단점을 가려 선택하면 빠른 시일 내

에 적정 규모의 광교환 시스템이 실현되리라 본다. 이러한 관점에서 볼 때 WDM을 기본으로 하는 광교환 네트워크 구축은 현재의 소자기술 및 국제적 기술 추세 등을 고려할 때 가장 성공 가능성이 높은 선택이 될 수 있으리라 생각된다.

참고 문헌

- [1] C. A. Brackett, "Dense wavelength division multiplexing networks: Principle and application," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 8, pp.948-964, Aug. 1990
- [2] Michael S. Borella, Jason P. Jue, Dhritiman Banerjee, Byrav Ramamurphy, Biswanath Mukherjee, "Optical components for WDM Lightwave Networks", Proc. of the IEEE, Vol. 85, No.8, 1997, 1274-1307.
- [3] Abdellatif Marrackchi, "Photonic Switching and Interconnects," Marcel Dekker Inc., 1994
- [4] P. K. Houselander and J. T. Taylor, "Arrayed-waveguide grating for wavelength division multi/demultiplexer with nanometer resolution", Electron. Lett., Vol. 26, No. 2, pp87-88, 1990
- [5] M. R. Amersfoort, C. R. de Boer, F. P. G. M. van Ham, M. K. Smit, P. Demeester, J. J. G. M. van der Tol and A. Kuntze, "Phase-array wavelength demultiplexer with flattened wavelength response", Electron. Lett., Vol. 30, No. 4, pp300-301, 1994.
- [6] Y. Inoue, H. Takahashi, S. Ando, T. Sawada, A. Himeno, M. Kawachi, " Elimination of Polarization Sensitivity in Silica-Based Wavelength Division Multiplexer Using a Polyimide Half

- Waveplate," J. lightwave Technol. Vol. 15, No. 10, pp 1947-1957, 1997.
- [7] W. Idler, K. Daub, G. Laube, M. Schilling, P. Wiedemann, K. Dutting, M. Klenk, E. Lach, and K. Wunstel, "10 Gb/s Wavelength Conversion with Integrated Multiquantum-Well-Based 3-Port Mach-Zehnder Interferometer", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 8, no. 9, pp219-221, 1996.
- [8] O. Ishida, H. Takahashi, Y. Inoue, "Digitally Tunable Optical Filters Using Arrayed-Waveguide Grating(AWG) Multiplexers and Optical Switched," J. lightwave Technol., vol. 1, No. 2, pp321-327, 1997.
- [9] Y. Tachikawa, Y. Inoue, M. Ishii, T. Nozawa, "Arrayed-Waveguide Grating Multiplexer with Loop-Back Optical paths and Its application, J. lightwave Technol , Vol 14, No. 6, pp977-984, 1996.
- [10] Y. Inoue, Y. Ohmori, M. Kawachi, S. Ando, T. Sawada, H. Takahashi "Polarization Mode-Converter with Polyimide Half Waveplate in Silica-Based Planar Lightwave Circuits," IEEE. Photon. Technol. Lett., Vol. 6, No. 5, pp626-628, 1997.
- [11] Y. Tachikawa and K. Okamoto, "32 wavelength tunable arrayed-waveguide grating laser based on special input/output arrangement," Electron. Lett., Vol. 31, No. 19, pp1665-1666, 1995.
- [12] T. Watanabe, Y. Inoue, A. Kaneko, N. Ooba and T. Kurihara, "Polymeric arrayed-waveguide grating multiplexer with wide tuning range," Electron. Lett., Vol. 33, No. 18, pp1547-1548, 1997.
- [13] Y. Hida, Y. Inoue and S. Imamura, "Polymeric arrayed-waveguide grating multiplexer operating around 1.3 μm ," Electron. Lett., Vol 30, No. 12, pp 959-960, 1994
- [14] L. Eldada, K. M. T. Stengel, L. W. Shacklette, R. A. Norwood, C. Xu, C. Wu, and J. T. Yardley, "Advanced Polymer Systems for Optoelectronic Integrated Circuit Applications", SPIE Vol. 3006, pp344-361, 1997.
- [15] 추광욱, 원용협, "파장가변 필터의 분석 및 비교", 전자통신동향분석, 제 11권 제 1호, pp19-27, 1996.
- [16] D. Chen, H. R. Fetterman, A. Chen, W. H. Steier, L. R. Dalton, W. Wang and Y. Shi, "Demonstration of 100 GHz electro-optic polymer modulators", Appl. Phys. Lett., Vol. 70, No. 25, pp3335-3337, 1997.
- [17] F. Kano, H. Ishii, H. Sanjo and Y. Hasumi, "Semiconductor Light Sources for WDM Network Systems", NTT Review, Vol. 10, No. 1, pp21-29, 1998.
- [18] T. Ducellier and M. B. Bibey, "Study of Optical Phase Conjugation in Bulk Travelling Wave Semiconductor Optical Amplifier", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 8, No. 4, pp135-137, 1996
- [19] S. G. Grubb, D. J. DiGiovanni, J. R. Simpson, W. Y. Cheung, S. Sanders, D. F. Welch and B. Rockney, "Ultrahigh power diode-pumped 1.5 μm fiber amplifiers", OFC' 96, pp30-31, 1996
- [20] M. Tachibana, R. I. Laming, P. R. Morkel, and D. N. Payne, "Gain Cross saturation and Spectral Hole Burning in Wideband Erbium Doped

Fiber Amplifier", *Opt. Lett.* 16, PP1499-1501, 1991

[21] T. Yamamoto, K. Fujii, S. Teramoto, A. Tagaya, E. Nihei, T. Kinoshita, Y. Koike, and K. Sasaki, "High-power Polymer Optical Fiber Amplifier and their application", *SPIE Vol. 2289*, pp142-152, 1994.

[22] R. T. Chen, M. Lee, S. Natarajan, C. Lin, Z. Z. Ho, and D. Robin, "Single-Mode Nd³⁺-Doped Graded-Index Polymer Waveguide Amplifier", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 5, No. 11, pp1328-1331, 1993.

[23] T. J. Whitley, "A review of recent system demonstration incorporating 1.3 μ m paraseodymium-doped fluoride fiber amplifiers," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.* Vol 13, pp.744-760, May 1995.

[24] Min-Cheol Oh, Hyung-Jong Lee, Myung-Hyun Lee, Joo-Heon Ahn, and Seon Gyu Han, "Asymmetric X-Junction Thermo-optic Switched Based on Fluorinated Polymer Waveguides", *IEEE Photon. Technol. Lett.* Vol. 10, No. 6, pp813-815, 1998.

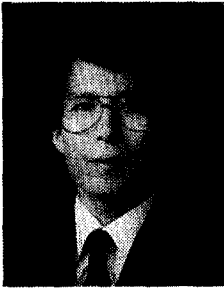
[25] T. A. Turnolillo Jr., M. C. J. M. Donckers, W. H. G. Horsthuis, "Solid state optical space switches for network cross-connect and protection applications", *IEEE Comm. Magazine*, pp124-130, Feb. 1997.

[26] N. Keil, H. H. Yao, C. Zawadzki, and B. Strebel, "Rearrangeable nonblocking polymer waveguide thermo-optic 4x4 switching matrix with low power consumption at 1.55 μ m", *Electron. Lett.* Vol. 31, No. 5, pp403-404, 1995.

[27] L. Eldada, C. Xu, K. M. T. Stengel, L. W. Shacklette, and J. T. Yardley, "Laser-Fabricated Low-Loss Single-Mode Raised-Rib Waveguiding Devices in Polymers", *IEEE J. Lightwave Technol.* Vol. 14, No. 7, pp1704-1713, 1996.

[28] Min-Cheol Oh, Myung-Hyun Lee, Joo-Heon Ahn, Hyung-Jong Lee, and Seon Gyu Han, "Polymeric wavelength filters with polymer gratings", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 72, no. 13, pp1559-1561, 1998

[29] D. Chen, H. R. Fetterman, A. Chen, W. H. Steier, L. R. Dalton, W. Wang and Y. Shi, "Demonstration of 100 GHz electro-optic polymer modulators", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 70, No. 25, pp3335-3337, 1997.



원 용 협

1974-1978 울산공과대학 전기공학과(공학사)
1979-1981 서울대학교 전자공학과(공학석사)
1986-1990 (미국) CORNELL UNIV. 전자공학과(공학박사)
1981-1985 한국전자통신연구원 광통신연구실 선임연구원
1990-1992 한국전자통신연구원 기초기술연구부 과제책임자
1992-1998 한국전자통신연구원 광교환연구실 실장
1998-현재 한국정보통신대학원 부교수(광통신 및
광전자공학 그룹)

주 관심분야: 광스위칭 (시스템 및 소자), Optical LAN 등

한 선 규

1976-1981 한양대학교 원자력공학과(공학사)
1984-1991 (미국) University of Utah 물리학과(이학박사)
1991-1994 한국전자통신연구원 기초기술연구부 선임연구원
1994-현재 한국전자통신연구원 광스위칭팀 팀장
(책임연구원)