

WDM 광통신용 폴리머 광소자 연구동향

한 선 규

Zen Photonics

sghan@zenphotonics.com

1. 서론

1.1) WDM 광소자 연구동향

WDM(Wavelength Division Multiplexing)용 광소자 연구는 21세 정보통신기술 확보를 위해서는 필수적인 분야이며, 초고속 광정보 통신망 구축을 위한 핵심 기술이다. 이와 같은 광소자 기술의 국내 자체 기술 확보 없이는 궁극적으로 기술 경쟁력 상실 및 지금까지 쌓아 온 국내 광 시스템 기술마저도 외국 기술에 종속되는 경우도 배제하기 어려운 실정이다. 따라서 광소자 기술은 본격적인 시스템 개발에 선행하여 필수적으로 이루어져야 함은 물론 국내 독자적인 고유 모델 개발 및 지적 특허권의 다량 확보로 앞으로의 첨예한 기술 경쟁에 대비하여야 한다.

현재 사용되고 있는 WDM 용 광소자는 크게 LD(Laser Diode), PD(Photo Diode), SOA(Semiconductor Optical Amplifier) 등과 같은 InP 반도체 기반의 능동소자, LiNbO₃를 이용한 고속 광변조기/스위치, 그리고 저속의 다양한 기능성 소자, 파장 다중/역다중화기와 광파워 분리기 등과 같은 순수한 수동 광소자 등으로 나눌 수 있다.

단일 모드 폴리머 광소자의 경우에는 특히 저속의 기능성 소자들에서 많은 장점을 갖고 있다. 이들 기능성 소자들을 살펴보면 MxN 공간 스위치(Optical Space Switch), 가변 광감쇄기(Variable Optical Attenuator), 가변 파장필터(Tunable Wavelength Filter) 등이 있다. 또한 전광 네트워크 구성을 위해 필수적인 gain equalizer, ADM(ADD-Drop Multiplexer), OXC(Optical Cross-Connector) 등과 같이 좀더 복잡한 기능을 갖는 집적형 광소자들은 저속의 기능성 소자들과 광분리기나 AWG(Arrayed Waveguide Grating) 등과 같은 순수 수동소자들의 집적에 의해서 만들어진다^[1-8].

저속의 기능성 소자들은 매우 다양한 원리와 물질기반으로 제작, 연구되고 있으며 대략 광섬유 기반의 기계식 소자, 광도파로 기반의 집적화된 소자, 그리고 OMEMS(Optical Micro-ElectroMechanical Systems) 등과 같은 범주로 나뉘어 진다.

광섬유 기반의 소자들은 광신호를 자유공간에서 신호를 처리한 후 다시 광섬유로 입사시키는 광소자로서 소형의 모터에 의한 기계적인 움직임이나, 광자기 효과(Magneto-optic effect), 광음향 효과(Acousto-optic effect), 압전 효과(Piezo-electric effect) 등을 갖는 물질을 이용하여 제작된다. 광도파로 기반의 광소자들은 주로 실리카(Silica), SOI(Silicon On Insulator), 폴리머 등을 이용하여 제작되고 있다. OMEMS의 경우 대용량 공간 스위치의 제작에 큰 장점이 있는 것으로 인식되고 있으며, 가변 광감쇄기 및 필터 등도 연구되고 있다. 단일 1×2 및 2×2 스위치 등이 OMEMS 기술로 상용화되었다. 최근에는 Agilent Technologies사에서는 실리카 광도파로와 inkjet bubble을 결합한 32×32 대용량 공간 스위치를 발표하여 새로운 형태의 공간 스위치 제작 가능성을 보여 주었다.^[9]

1.2) 폴리머 광소자 연구동향

세계적인 폴리머 광소자의 본격적인 연구는 1985년경 미국의 Hoechst-Celanese에서 고속의 전기광학 폴리머를 이용한 전기광학 변조기로 시작하여 1993년경까지 세계적인 연구를 주도하였고^[10], 현재는 미국의 UCLA(U. of California, Los Angeles), USC(U. of Southern California, Los Angeles) 등이 공동연구를 통하여 고속 전기광학 폴리머 광소자 분야에서는 가장 앞선 결과들을 발표하고 있다.^[11]

그러나 전기광학 폴리머에서 초기 예상과는 달리 폴리머 전기광학 소자개발이 지연되면서 1993년경부터 실제 시스템에 먼저 사용이 가능하다고 판단되는 수동 및 열광학 폴리머 소자에 대한 연구를 네덜란드의 AKZO Nobel에서 시작하여 1×2, 2×2 등의 열광학 스위치를 상용화 시켰다. 이후 일본의 NTT 등에서도 스위치, 파장 다중화/역다중화기(AWG), 파장 라우터(Router)등을 발표하였으며,^[12,13] 독일의 Heinrich-Hertz Institut(HHI)에서 4×4 열광학 스위치,^[14,15] 미국의 Allied Signal 에서 가변 파장 필터 등을 발표하여 폴리머 열광학 소자에 대한 연구를 진일보시켰다.^[5] 현재는 AKZO Nobel을 인

수한 캐나다의 JDS Uniphase에서 유일하게 1×2, 2×2 스위치 및 어레이 소자, 4×4 스위치 등을 시판하고 있다. 미국의 몇 개 업체에서도 폴리머 광소자 상용화를 위한 준비를 하고 있는 것으로 알려져 있다.

1.3) 폴리머 광소자 연구동향

광도파로 소자에 있어서 기본적인 요소가 되는 것은 저손실 단일모드 도파특성을 갖는 광도파로 소재이며, 유리 광섬유 재료인 실리카 재료를 근간으로 하여 이러한 광통신 관련 기술이 발전되어 왔다. 실리카를 이용한 광도파로 소자는 0.01dB/cm 이하의 낮은 광도파로 손실과 높은 안정성 때문에 많은 연구가 진행되어 다양한 광소자가 상용화되고 있다. 그러나 실리카를 이용해 광도파로를 제작하려면 1,000°C 이상의 고온 공정을 거치므로 실리콘 기판과 실리카 간에 열팽창 계수 차이로 오는 열 스트레스(thermal stress)에 의해 복굴절이 유기되는 문제점이 있으며, 이는 기판을 동일 실리카 물질로 사용하거나, 도핑(doping) 등의 공정기술 및 half-wave plate 등을 이용해 해결하고 있다. 이러한 복굴절의 제거는 편광의존손실(Polarization Dependent Loss)을 줄일 뿐만 아니라, AWG나 가변파장필터 등과 같이 파장을 다루는 WDM 소자제작을 위하여는 필수적인 요소이다.

폴리머의 경우 지금까지 사용된 많은 폴리머 소재들이 저손실 광도파로 소재에 적합하게 개발된 것이 아니라 광투과성이

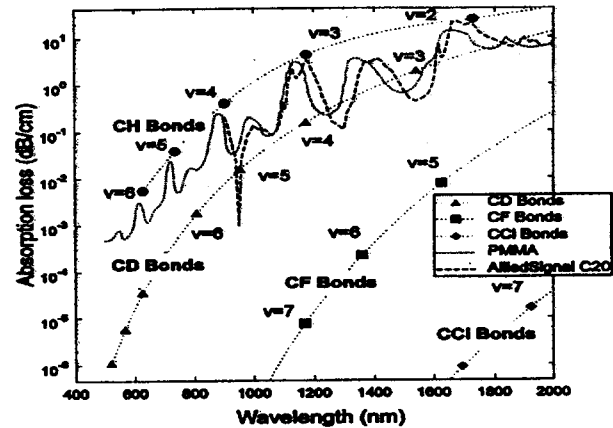


그림 1. 분자의 진동운동에 의해 유기되는 흡수손실을 계산한 결과.

좋은 기존의 폴리머 물질 및 반도체용 저유전상수 고분자 물질 등의 소재를 응용하고 있었다. 그러나 최근 들어 광통신용 폴리머 광도파로 물질에 초점을 맞추어 광손실 및 복굴절을 개선한 많은 물질들이 개발되고 있다. 일반적으로 폴리머 물질은 가시광선 영역에서는 흡수율이 매우 낮다. 그러나 1.5 um 대역에서는 물질의 C-H 결합의 진동흡수 때문에 흡수손실이 높아지게 된다.^[16] 따라서 저손실 폴리머 물질개발은 C-H 진동대역을 좀더 장파장으로 이동시켜 물질의 고유흡수를 줄이는 작업으로부터 시작된다. 진동 대역을 장파장으로 이동시키기 위해서는 H 대신 좀더 무거운 Deuterium(D), Fluorine(F)이나 Chrolene(Cl) 등을 H 대신 치환하면 가능하다. 그림 1에 H를 D, F, Cl 등으로 대체하였을 때 1.5um 대역에서의 흡수율 변

표 1. 광도파로에 사용되는 물질별 비교 분석

사용 재료	제작 방식	장점	단점
수동, 열광학 폴리머	폴리머 기판 및 Si 기판 위에 폴리머를 다층으로 스펀 코팅하여 제작.	- 제작 공정이 상대적으로 간단함. - 진행손실이 낮음.(0.02 dB/cm) - 광섬유와의 결합손실이 낮음. - 능동 광소자와의 집적 가능. - 편광 의존성을 적절한 물질의 합성으로 없게 할 수 있음. - 같은 성능에 저가로 제작가능	- 광소자의 크기가 큼(수 cm). - 국내의 자체 물질 개발이 필요.
실리카	Si 기판 위에 SiO ₂ 를 FHD, CVD 방법 등을 통해 후막 증착(50 μm 정도)하여 제작.	- 진행손실이 낮음.(>0.01 dB/cm) - 광섬유와의 결합손실이 낮음. - 안정된 물질 특성을 보임.	- 제작단가가 상대적으로 비쌈 - 광소자의 크기가 큼(수 cm). - 편광 의존성 제거를 위하여 매우 정밀한 공정을 확보 해야 함. - 능동 광소자와의 집적이 불가.
반도체(InP)	InP 기판 위에MOCVD를 이용한 에피 결정 성장 기술을 통하여 제작.	- 광소자의 크기가 작음(수 mm) - 레이저등 다른 능동 광소자와의 집적이 가능함.	- 제작공정 단가가 비쌈. - 도파로 손실이 큼(>1 dB/cm) - 광섬유와의 결합손실이 높음. - 집적시 제작공정이 어려움.

화를 나타내었다.

폴리머 박막에서도 실리카와 유사한 이유로 박막의 복굴절이 생겨나며, 크게 물질자체의 화학적 구조에서 기인하는 것과 박막 spinning 및 열경화(Thermal curing)등 공정에서의 발생요인으로 나눌 수 있다. 화학적 구조에서 나타나는 복굴절은 적절한 물질 설계를 통하여 제거할 수 있지만 공정상의 복굴절 제거는 많은 실험적 노력이 요구된다. 폴리머의 경우도 박막을 spinning 한 후 고온(300°C) 열경화 시키는 과정에서 기판(주로 Si)과 폴리머 박막의 열팽창 계수 차이로 인하여 복굴절이 유기 된다. 따라서 폴리머의 경우도 실리카와 유사한 방법으로 복굴절을 제거할 수 있다. 그러나 상온에서 박막을 경화시키는 UV(Ultra-Violet) 경화물질을 이용하면 열팽창 계수의 차이에서 오는 박막의 복굴절 유기는 최소화 할 수 있다.

현재 가장 낮은 손실을 갖는 폴리머 물질은 미국의 Allied signal에서 발표한 Acrylate 계통의 UV-curable epoxy이며, 진행손실이 0.07 dB/cm, 복굴절이 10^{-6} 수준으로 잘 제작된 실리카 광도파로의 특성과 유사한 수준이다.^[16] 표 1은 대표적인 3가지 광도파로 소자 재료에 따른 제작방식 및 각 기술의 장단점을 개략적으로 비교한 것이다.

2. WDM 광통신용 폴리머 광소자

폴리머의 광도파손실은 대략 $0.05\text{--}0.3\text{ dB/cm}$ 정도로 현시점에서 볼 때 실리카의 광도파손실(> 0.01 dB/cm) 보다 다소 떨어진다. 반면 SOI 광도파로나 $\text{SiN}_4(0.1\text{--}0.3\text{ dB/cm})$ 등과 비교하면 우수하거나 대등한 수준이다. 그러나 폴리머의 열광학 계수가 무기물의 10배 정도로 크기 때문에 열광학 효과를 이용한 $1 \times N$ 광스위치, 가변광감쇄기, 가변파장필터 등의 저속 기능성 소자에서는 매우 유리하다. 따라서 AWG(Arrayed Waveguide Multiplexer)나 광분리기(Optical Power Splitter) 등이 이들 저속의 기능성 소자들과 집적화된 ADM, OXC 등의 개발에는 폴리머 광도파로 소자가 많은 장점이 있다. 본 논문에서는 타 물질 기반의 소자에 비하여 폴리머 광소자가 장점을 갖는 이들 기능성 소자들을 중심으로 간략하게 살펴보고자 한다.

2.1) 폴리머 열광학 스위치

열광학 스위치는 온도에 따라 굴절률이 변화하는 열광학 효과를 이용한 소자로서 광도파로의 특정한 부위에 전극을 부착하여 흐르는 전류를 조절함으로써 광의 경로를 조절하는 소자이다. 열의 전달속도가 msec 정도로 매우 느리기 때문에 열광학 스위치는 고속 스위칭 소자로는 부적격 하지만 신호 전달순

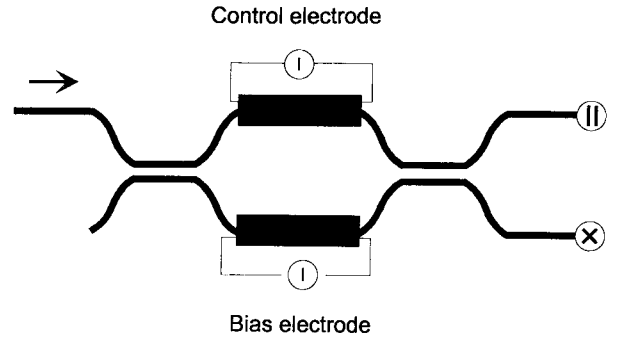


그림 2. Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 광스위치 구조.

실이 매우 낮고 제작공정이 상대적으로 단순해 대규모의 스위치 어레이가 가능하여 WDM 광전송 시스템에서 그 진가를 발휘할 수 있다. 1×2 , 2×2 열광학 스위치는 자체적으로 광섬유의 절단 등에 대비하여 우회 경로를 만들어 주는 절체용 등으로 사용되며, 이들 스위치 어레이는 파장 다중/역다중화기 또는 파장 라우터 등과 결합하여 ADM(Add-Drop Multiplexer)이나 OXC(Optical Cross Connector) 등의 구성에 사용되는 초고속 광 네트워크 구성을 위해 기본이 되는 소자이다.^[17-19]

열광학 광스위치는 주로 실리카나 폴리머등을 이용하여 제작된다. LiNbO_3 를 이용한 열광학 스위치도 보고 되지만 열광학 계수가 낮고 물질 자체의 가격이 고가인 관계로 별로 연구되지 않고 있다. 실리카는 열광학 계수가 $\sim 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 정도로 폴리머의 $\sim 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 에 비하여 상대적으로 낮지만 공정이 잘 발달되어 있고 광손실이 낮은 관계로 일본 및 미국 등에서 연구되고 있다. 특히 일본의 NTT에서는 실리카를 사용한 8×8 규모의 광스위치 어레이 직접회로를 발표하였으며, 집적도를 더욱 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이와같은 도파로형 열광학 광스위치의 구조는 그림 2와 같이 빛의 간섭을 이용한 Balanced Bridge Mach-Zehnder 형태와 그림 3과 같이 광진화(Mode evolution) 특성을 이용한 DOS(Digital Optical Switch) 형태의 스위치가 있다.^[20,21] 일반적으로 간섭계 구조는 온도에 민감하며, 누화율이 낮은 단점이 있으나 스위칭 파워가 낮은 장점이 있다. 반면에 DOS 스위치는 반응특성이 디지털 형태로서 간섭계 형태보다 온도 및 편광특성이 뛰어나다. DOS 스위치는 그림 3(a)에 나타난 개략도에서와 같이 분기각이 약 $0.1\text{--}0.15^{\circ}$ 정도로 매우 작은 Y-분기 형태이다. 모드 진화특성을 이용하기 때문에 한쪽 팔의 온도가 증가하여 양팔의 굴절률 차이가 어느 이상이 되면 더 이상 출력 특성의 변화가 없는 그림 3(b)와 같은 디지털 특성을 나타낸다. 따라서 도파로의 복굴절이 존재하여도 편광특성에 무관하게 동작하는 장점이 있다. 또한 스위칭 누화도 쉽게 -25 dB 이하로 얻을 수 있다. 그러나 간섭계형 스위치와 비교하여 스

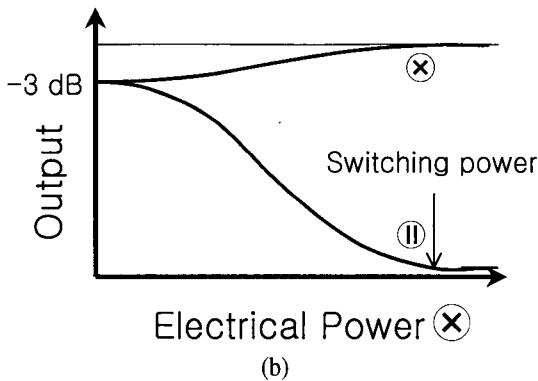
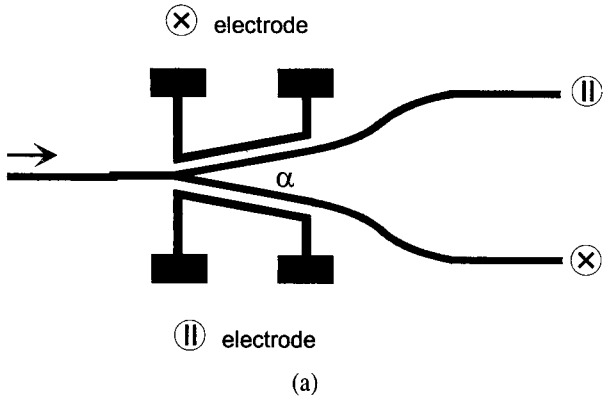


그림 3. 모드전환 특성을 이용한 광스위치 구조(a) 및 응답특성(b).

위칭 전력이 높은 단점이 있다. 이와 같은 이유로 열광학 계수가 상대적으로 낮은 실리카 광도파로 소자에서는 주로 간섭계형 스위치를 제작하며, 열광학 계수가 큰 폴리머 광도파로에서는 DOS 형태의 스위치를 제작한다. 2×2 스위치는 일반적으로 4개의 1×2 스위치의 조합으로 구성된다. 1×2 DOS 스위치를 이용한 경우에 2×2 스위치를 구동하기 위해서는 모두 8 개의 조절 전극(control electrode)이 필요하다.

광도파로 형태의 스위치 이외에도 광스witch는 모터와 프리

즘 등을 이용한 광섬유형 스위치, OMEMS 소자등 매우 다양한 종류의 소자가 있다. 표 2와 표 3에는 폴리머 1×2, 2×2 열광학 스위치와 그 외 시판되고 있는 여러 가지 스위치 소자들의 성능을 비교하여 나타내었다. 전체적으로 삽입손실, 누화, PDL 등의 측면에서 볼 때 fiber-optic 스위치가 우수하며, 스위칭 시간은 폴리머 소자가 빠른 특성을 보인다. 다채널 array 소자 제작에는 폴리머나 실리카 광도파로 소자가 유리하다. 그러나 광도파로 소자의 특성이 매우 빠른 속도로 발전하고 있어 삽입손실도 조만간 많은 진전이 있을 것으로 예상된다.

2.2) 폴리머 열광학 가변 광감쇄기

가변 광감쇄기는 입력광 세기에 따른 시스템 특성 측정용이나, 수신단 앞에서 수신감도 증가 및 과부하 방지(Overload protection) 등의 용도로 사용되어 왔지만, 최근에는 WDM 광전송 시스템에서 다채널 전송 신호의 광세기 평탄화를 위한 핵심 광소자로서 인식되고 있다. WDM 기반의 광시스템에서는 여러 파장의 광신호들이 전송거리나 시스템내부의 여러 광소자들이 갖고 있는 파장 의존성 때문에 각자 서로 다른 광세기를 가지게 된다. 이를 균일한 수준으로 맞추지 못하면 WDM 광증폭기 특성이 저하되거나, 수신단 등에서 채널별 수신감도가 균일하지 못하여 전체 광시스템의 질적 저하를 가져온다. WDM 기반의 광시스템에서 가변 광감쇄기는 파장 역다중화기의 뒷단에 위치하여 각 파장 별로 분리되어진 광신호의 세기를 전기적 제환조절을 통하여 일정세기로 평탄화하는 기능을 한다.

광도파로 소자에서의 광감쇄기는 주로 Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 경우가 많다. Nortel 에서는 silica 광도파로를 이용하여 cascaded MZ 간섭계 형태의 감쇄기를 상용화하였고, JDS Uniphase 에서는 폴리머를 이용한 Balanced bridge 형태

표 2. 종류별 1×2 스위치 성능비교

	JDS-Uni.phase	E-Tek	Prima Wave	OPLINK	Leti
Types	Polymer(W)	Fiber(OM)	Fiber(OM)	Fiber(OM)	OMEMS
Wavelength Window(nm)	1.3 & C band	C or L band	1.3 & C band	1.3 & C band	1.3 & C band
Insetion Loss(dB)	< 2.5	0.6	0.8	< 0.5	3
Cross-talk(dB)> 25	60	90	> 60	30	
PDL	< 0.2	< 0.15	0.05	< 0.07	-
Return Loss(dB)	> 50	> 50	55	> 55	-
Switching Time(msec.)	< 2	8	15	< 10	8
Switching Power(mW)	200 ~ 350	-	500	150	-
Driving Voltage(V)	5 ~ 10	5 ~ 10	5	5	28
Package Dimension(cm)	10×2×0.76	4.2×1.8×0.9	7×3×2	4.2×2×1	-

*W : Waveguide type, OM : Opto-Mechanical type

표 3. 종류별 2x2 스위치 성능비교

	JDS-Uni.phase	E-Tek	Prima Wave	OPLINK	Leti
Types	Polymer(W) Fiber(OM)	Fiber(OM)	Fiber(OM)	OMEMS	
Wavelength Window(nm)	1.3 & C band	C or L band	1.3 & C band	1.3 & C band	1.3 & C band
Insetion Loss(dB)	< 3.5	< 6	< 1.5	< 2.5	0.6
Cross-talk(dB)	> 30	> 35	> 16	-	60-80
PDL	< 0.3	< 0.5	-	< 0.3	0.05
Return Loss(dB)	> 50	-	> 55	> 50	55
Switching Time(msec.)	< 2	< 3	< 2	< 3	5-10
Switching Power(mW)	350 ~ 650	-	600	-	-
Driving Voltage(V)	7 ~ 12	5	5	< 10	-
Package Dimension(cm)	10x2x0.76	-	7.5x1.5x0.6	-	6.7x3.2x1.6

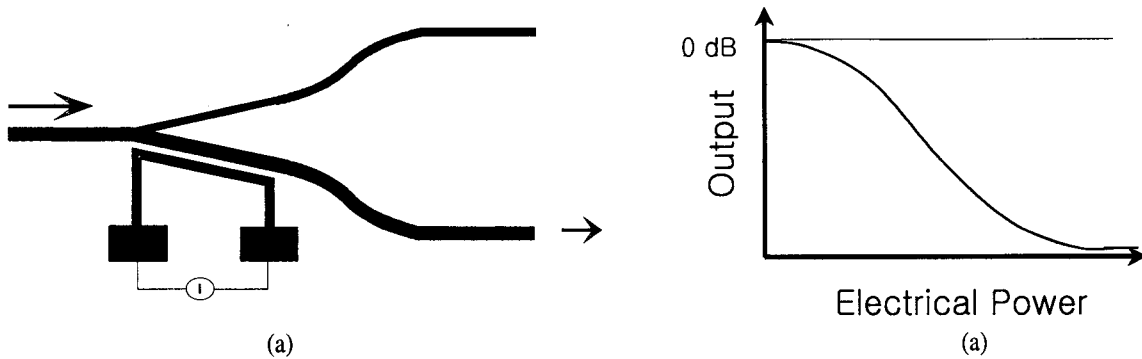


그림 4. 비대칭 DOS 구조의 가변 광감쇄기의 구조 예시 (a) 및 감쇄특성 (b).

의 MZ 간섭계 감쇄기를 상용화하였다. 그러나 간섭계를 이용하는 경우는 간섭계의 초기 상태 조절을 위한 추가적인 바이어스(bias) 전극이 요구되는 단점이 있고, 감쇄 범위가 좁은 단점이 있다. MZ 간섭계 이외에 비대칭 DOS 구조의 감쇄기를 도입하여 초기 상태의 조절이 필요 없이 넓은 범위의 감쇄특성을

얻을 수 있는 감쇄기도 발표되었다.^[4] 그림 4(a), (b)에 비대칭 DOS 구조의 가변광감쇄기 구조 및 감쇄특성을 나타내었다. 표 4는 광도파로 소자를 중심으로 현재 시판되고 있는 가변 광감쇄기의 성능을 비교한 것이다. MOEC사의 감쇄기는 광섬유 클래딩을 제거하고 그 위에 특정 폴리머를 코팅한 후 폴리머의

표 4. 상용화된 가변 광감쇄기 성능비교

	JDS. E-Tek	JDS-Uni.phase	LMC	Nortel	BOOKham	MOEC
Types	Fiber(OM)	Polymer(W)	Silica(W)	Silica(W)	Silicon(W)	Fiber/polymer
Wavelength Window	C or L band	C band	C or L band	C band	1.3 & C band	C band
Insetion Loss(no Tap)	0.5 ~ 1.2	1.4 dB	< 1.5 dB	< 2.0 dB	2.1 dB	< 0.2dB
Attenuation Range	> 30	> 20 dB	> 25 dB	> 15 dB	30 dB	> 30 dB
Driving Votage for Max. Att	2 ~ 5 V	< 10 V	-	5 V	-	-
Driving Power for Full Att.	5 ~ 24	< 250 mW	-	625 mW	250 mW	-
PDL(@ 10 Att.)	< 0.2 dB	0.45 dB	< 0.5 dB	0.4 dB(?)	0.3 dB	-
(@ 15 Att.)	< 0.5 dB	1.0 dB	< 0.5 dB	0.4 dB(?)	0.4 dB	< 0.2 dB
Spectral Nonuniformity						
(@ 10 Att.)	< 0.2 dB	1.0 dB	< 0.5 dB	-	-	-
(@ 15 Att.)	< 0.2 dB	2.0 dB	< 0.5 dB	-	-	< 0.3 dB
Response Time	-	30 ~ 120 msec	-	-	-	-
Optical Return Loss	-	-	< 0.5 dB	> 45 dB	> 50 dB	-
Package Dimension(cm)	-	10x1.8x0.75	-	8.2x1x0.8	7x2.8x1.2	-

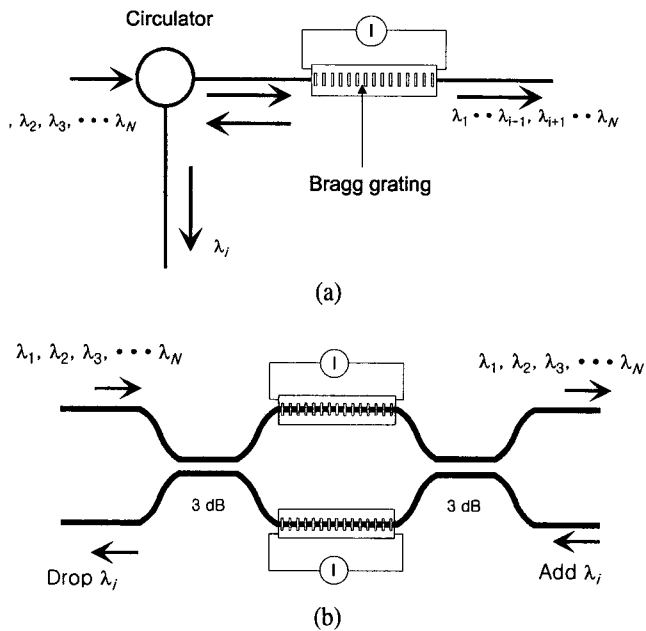


그림 5. 브래그 격자를 이용한 반사형 가변 파장필터 (a)와 투과형 파장필터 (b).

열광학 효과를 이용하여 동작하는 소자로서 삽입손실 및 감쇄 범위에서 우수한 특성을 나타내고 있다.

이와 같은 가변 광감쇄기는 현재 광도파로 소자에서보다는 fiber와 소형모터를 이용한 Opto-Mechanical 광소자들이 많이 개발되었고, 현재도 그 성능이 나날이 향상되고 있다. 이러한 소자의 동작 속도는 일반적으로 10 msec 정도였으나 최근 수 msec, 수백 usec의 소자들도 개발되었다. 최근에는 액정을 이용한 광감쇄기도 발표되어 실용화 가능성이 연구되고 있다.

2.3) 폴리머 열광학 가변 파장 필터

폴리머 열광학 가변 파장 필터는 그림 5(a)와 같이 광도파로

상에 브래그 격자를 만들어 반복적인 굴절률 차이를 주어 입사 광의 파장을 선택하는 소자이다. 열광학 효과를 이용한 파장가변을 위해서 도파로 상부에는 열 발생을 위한 변조 전극을 만들며, 전극에 전류를 흘려 온도를 상승시키면 폴리머 광도파로의 유효굴절률이 감소하고 이로 인해 브래그 반사 파장이 변하게 된다. 이 기술은 그림에서와 같이 투과형이 아닌 반사형태로 작동되는 단점이 있다. 이것은 circulator와 같은 보조장치를 사용하면 해결이 될 수 있으나 circulator의 비싼 가격 때문에 경제성이 보장되지 않을 수 있다. 그림 5(b)는 소자의 입출력단에 종래에 사용되는 circulator를 사용하지 않고 3-dB Mach-Zehnder 커플러를 집적시켜 소자의 광손실과 집적도를 향상시킬 수 있는 구조이다. 입사광은 3-dB Mach-Zehnder 커플러를 통하여 브래그 격자가 새겨진 도파로로 도파되며 여기에서 격자 주기에 맞는 특정 파장만이 반사하고 다른 파장은 통과하게 된다. 반사광은 다시 3-dB Mach-Zehnder 커플러를 통하여 drop port로 나가게 된다. MZ 간섭계형 가변 파장 필터는 그 자체로 ADM의 기능도 가능하다. 그러나 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. 그러나 최근 bi-metal plate를 이용한 온도 보상 패키징이 도입되어 온도 조절기가 필요 없는 가변 파장필터의 실용화 가능성도 매우 높다.^[22]

브래그 격자를 이용한 도파로형 파장 가변 필터에 대한 연구 결과로는 1998년 한국의 ETRI에서 surface relief 형태의 브래그 격자를 이용하여 처음으로 발표하였으며,^[23] 같은 해 Allied signal에서는 클래드/코어/클래드 전체에 volume bragg grating을 형성하여 광 삽입손실이 손실이 1.0 dB, 편광의존성이 0.02 dB 이하, side lobe suppression이 -40dB 이하의 매우 우수한 특성을 갖는 폴리머 파장 가변 필터를 발표하였다.^[5,16] 현재 상용화되고 있는 파장 가변 필터는 미국의 MOI사와 JDS-

표 5. 상용화된 가변 파장필터 및 예상되는 폴리머 파장가변 필터 성능비교

	Dim	Loss(dB)	Tuning Range	-3dB BW (nm)	Speed (ms/nm)	Tuning Voltage/Power	PS(nm)	TS(dB) (nm/C)	PDL (dB)	Remarks
Dielectric Filter(Tilting)	S	< 3	C-band	1.5	Manual	-	-	-	-	-
Fiber Fabry -Perot(Piezo)	S	1.5	C-band	0.1 ~ 4	< 0.1	< 10 V	0	1.5	0.1	-
Polymer (heating)	S	< 0.5	C-band	0.5	< 5	< 100 mW	< 0.05	-	< 0.3	Expedited by 2001
	D	< 0.5	C-band	0.5	< 5	< 100 mW	< 0.05	-	< 0.3	
	Q	< 0.5	C-band	0.5	< 5	< 100 mW	< 0.05	-	< 0.3	

*PS : Polarization dependent wavelength shift, TS : Temperature dependent wavelength shift, PDL : Polarization Dependent Loss.

Uniphase사의 piezo-electric을 이용한 fiber Fabry-Perot 타입의 제품이 주류를 이루고 있다. 그러나 fiber Fabry-Perot 타입의 경우는 두 거울 면에서의 반사 스펙트럼이 브라그 격자에 비해 broad 하기 때문에 누화율이 크고, 다른 소자와의 집적성이 없으며, 채널수 확장에 따라 크기가 커지는 단점이 있다. 표 5는 현재 상용화되어 있는 파장가변필터와 2001년 정도에 기대되는 폴리머 파장가변필터의 특성을 비교하여 나타내었다.

2.4) 파장 다중/역다중화기, 라우터

파장 다중/역다중화기(MUX/DeMUX), 파장 라우터(Router)는 광송신부에서 여러 가지 파장을 다중화하고, 수신부에서는 전송된 신호를 역다중(DeMUX) 하기 위해서 사용된다. 또한 응용분야로서는 스위치와 함께 집적된 구조의 ADM, 파장 선택 스위치, OXC 등이 있고, 또한 반도체 레이저와 AWG를 hybrid 상태로 집적한 구조의 다중파장 레이저에 대한 연구 결과들도 발표되었다.^[24,25]

파장 다중 역다중화기는 크게 유전체 다중박막을 이용한 자유공간형^[26]과 도파로 형태의 AWG(Arrayed Waveguide Grating)소자로 나눌 수 있다.^[25] 유전체 박막을 이용한 다중/역다중화기는 유리등의 기판에 굴절률이 각기 다른 박막을 여러 층 쌓아서 여기에 광신호가 지나갈 때 각층 간의 간섭을 이용한다. 따라서 설계를 적절히 하면 원하는 파장을 선택적으로 반사시키거나 투과시킬 수 있는 박막 구조를 만들 수 있다. 이러한 필터는 한 파장만을 추출하므로 여러 개의 필터를 직렬로

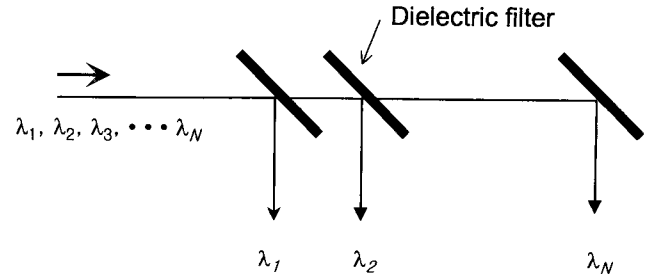


그림 6. 유전체 박막을 이용한 파장다중/역다중화기의 구조.

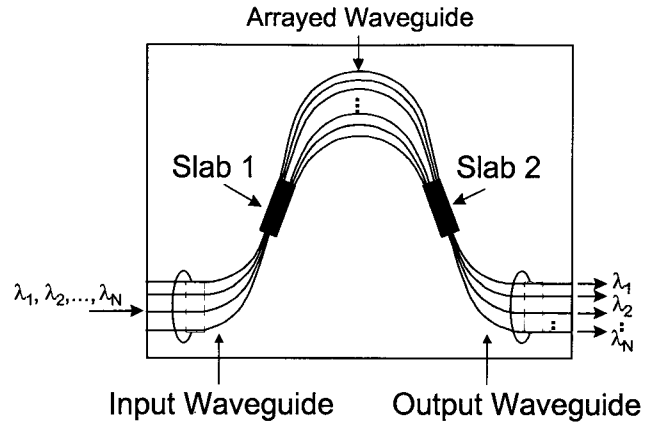


그림 7. AWG(Arrayed Waveguide grating) 형태의 파장다중/역다중화기의 구조.

연결하면 그림6과 같이 파장 역다중화 기능을 얻을 수 있다. 그리고 공정과 물질을 적절히 선택하면 온도에 거의 무관한 필터를 구성할 수 있다($\sim 2 \text{ pm}^\circ\text{C}$). 따라서 온도 조절을 위한 복잡한 부가 기술이 필요 없게 되어 가격과 복잡성에서 유리하다.

표 6. 상용화된 파장 다중/역다중화기 성능비교

	Dim	Loss(dB)	BW(nm)	Adj. isolation (dB)	Non-adj. isolation (dB)	Channel uniformity (dB)	PS(nm)	PDL(dB)	TS(nm/C)	Remarks
Dielectric Filter	1×4(100)	< 4	> 0.22	> 25	> 40	< 1.5	0	< 0.1	0.002	E-Tek, JDS, EC, \$6,000
	1×8(100)	< 5	> 0.22	> 25	> 30	< 0.2	0.2	< 0.1	0.002	E-Tek, JDS, NEC, \$12,500
	1×16(100)	< 7	> 0.22	> 25	> 30	< 0.2	0.5	< 0.1	0.002	E-Tek, JDS, NEC, \$14,500
Silica waveguide	1×16(100)									PIRI, TC
	1×32(100)	8	0.34	> 22	> 40	< 1.5	0	< 0.5	0.004	Normal band
	1×40(100)									\$13,000(1×16)
Silica waveguide	1×4(100)									APA, E-Tek,
	1×8(100)	< 4.5	0.3>	35	-	-	-	-	-	NEC
	1×16(100)									\$12,000
Polymer	Similar performance as silica is expected									

*Adj. isolation : Adjacent channel isolation, Non Adj. isolation : Non-adjacent channel isolation

단점은 0.8 nm 이하의 분해능을 갖는 필터제작이 어렵고, 또한 필터기능이 직렬로 일어나므로 채널이 많아질수록 초기에 분리된 신호와 최종으로 분리된 신호의 세기 차이가 많이 나게 된다. 따라서, 이 기술은 채널간의 광파워 차이가 많이 나므로 16 채널 이하의 시스템에 적합한 것으로 인식되고 있다.

한편 AWG 광소자는 그림 7에서 보는 바와 같이 일정 길이가 차이나는 광도파로를 배열하여 고차의 격자와 같은 특성을 갖게 하는 것이다. 입력단에서 성형 분리기(Star coupler)로 분리된 여러 광들은 일정한 위상 차이를 겪은 후 다시 출력단 성형 결합기에서 간섭하여 하나의 광도파로로 출력된다. 따라서 파장에 따라서 서로 격는 위상차이가 달라서 여러 파장이 다중화 된 입력 광 신호가 입사될 때 각 파장에 따라 서로 다른 광도파로로 출력되게 된다. 이 소자는 광도파로만으로 구성되는 수동소자이기 때문에 파장 수가 증가하더라도(즉, 채널이 늘어나도) 가격이 별로 늘어나지 않는 장점이 있다. 그러나 AWG 소자는 온도에 매우 민감하므로 온도를 일정하게 유지 시켜주기 위한 cooler와 heater가 부수적으로 필요하다. 그러나 최근 온도 보상 패키징 기술이 발달함에 따라서 온도 조절기가 필요 없는 AWG의 상용화도 조만간 가능하리라 생각된다.

폴리머를 이용한 광소자는 Akzo Nobel, NTT 등에서 활발히 연구되었다. 그 특성은 아직 실리카에 다소 떨어지는 상황이다. 그러나 최근 일본의 NTT에서 실리카와 비슷한 특성을 갖는 소자를 발표하여 향후 급진적인 연구의 진전이 있을 것으로 예측되고 있다.^[27-31] 표 6은 현재 시판하는 유전체 박막과 실리카 AWG 소자를 비교한 것이다. 폴리머의 경우에 조만간 실리카 소자와 비슷한 특성의 AWG를 개발 할 수 있을 것으로 예측된다.

3. 앞으로의 전망

이상에서 언급된 폴리머 광소자들은 실리카 및 여러 가지 광섬유형 소자들과 경쟁적인 관계에 있다. 폴리머가 일부 뛰어난 특성을 보이는 면도 있지만 총 삽입손실 및 편광 의존성에서 개선의 여지가 많다. 폴리머 광소자가 여러 광소자와 경쟁적인 우위를 차지하기 위해서는 소자 설계에 의한 극복방법은 한계가 있으며, 우수한 물질개발이 필수적인 요소이다.

그러나 폴리머의 경우는 LiNbO_3 , 실리카 등의 무기소재 보다 열광학 계수가 약 10배 정도 커서 열광학 소자 구동 전력 소비가 약 1/10 정도이다. 따라서 폴리머 열광학 소자가 저속의 광 스위치, 광 필터 등을 구현하는 가장 가능성이 높은 소자이다. 또한 광도파회로(Photonic Lightwave Circuit : PLC) 구성에서는 단순한 광도파로 회로보다는 제어 기능이 있는 능동

형 PLC에 대한 연구가 더 효과적이며, 이것은 저손실의 광도파로에 큰 열광학 효과를 이용한 폴리머 광도파로 소자가 가장 유망한 분야로 인식되고 있다.

본 논문에서 언급한 폴리머 광소자 이외에도 폴리머를 이용하여 개발하고자 하는 광소자들로서는 WDM용 고속 폴리머 전기광학 변조기 및 가입자망을 겨냥한 다중모드 폴리머 광섬유, 다중모드 폴리머 광도파로 소자 등이 있다.

외국의 연구팀에서도 광집적 회로용 폴리머 소재의 보다 향상된 특성을 확보하기 위해 집중적인 연구력을 투입하고 있고, 향후 3년이 내에 다수의 실용화 가능한 광집적회로용 폴리머 소재 및 소자가 개발될 것이며, 현재의 정보산업/통신산업의 발달 속도로 미루어 볼 때 향후 5~10년 안에 이를 이용한 거대한 광통신소자 시장이 형성될 것으로 예측된다.

참고문헌

1. Mac Donckers, "Space Switching and Wavelength Routing with Polymer Components", Integrated Photonics Research 1996, Technical Digest Series Vol.6, IThC2-1, pp. 630-632.
2. R. Moosburger, E. Brose, G. Fischbeck, C. Kostrzewa, B. Schuppert, and K. Petermann, "Robust Digital Optical Switch Based on a Novel Patterning Technique for 'Oversized' Polymer Rib Waveguides", ECOC'96, Oslo, TuC.1.5, pp.67-70.
3. C. Marxer, P. Griss, and N. F. de Rooij, "A Variable Optical Attenuator Based on Silicon Micromechanics", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 11, No. 2, pp.233-235, 1999.
4. S.-S Lee, Y.-S Jin, Y.-S Son, and T.-K Yoo, "Polymeric Tunable Optical Attenuator with an Optical Monitoring Tap For WDM Transmission Network", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 11, No. 5, pp.590-592, 1999.
5. L. Eldada, S. Yin, C. Poga, C. Glass, R. Blomquist, and R. A. Norwood, "Integrated multi-channel OADM's using polymer Bragg grating MZIs", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 10, pp. 1416-1418, 1998.
6. K. Okamoto, M. Okuno, A. Himeno, and Y. Ohmori, "16-channel optical add/drop multiplexer consisting of arrayed-waveguide gratings and double gate switches", Electron. Lett., Vol. 32, No. 16, pp.1471-1472, 1996.
7. G. H. B. Thompson, S. P. Parry, S. Day, S. Ojha, and C. B. Rogers, "Planar waveguide filters for dynamic equalization of EDFA spectra", ECOC'99, Nice, pp. 320-321.
8. C. Marxer, C. Thio, M.-A. Gretillat, O. Anthamatten, R. Baettig, B. Valk, P. Vogel, and N. F. de Rooij, "Vertical Mirrors Fabricated by Deep Reactive Ion Etching for Fiber Optic Switching Applications", IEEE J. Microelectromech. Syst., Vol 6, No. 3, pp. 277-285, 1997.
9. A. Ware, "New Photonic-Switching Technology for All-Optical Networks", Lightwave, March 2000, pp. 92-98.

10. C. C. Teng, "Traveling-Wave Polymeric Optical Intensity Modulator with more than 40GHz of 3-dB Electrical Bandwidth", *Appl/ Phys. Lett.*, Vol. 60, pp. 1538-1540, 1992.
11. D. Chen, H. R. Fetterman, A. Chen, W. H. Steier, L. R. Dalton, W. Wang, Y. Dhi, "High-bandwidth polymer modulator", *SPIE Vol.3006*, pp.314-361, 1997.
12. Y. Hida, H. Onose, and Saburo Imamura, "Polymer Waveguide Thermo-optic switch with low electric power consumption at 1.3 mm", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 5, No. 7, pp. 782-784, 1993.
13. 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.
14. N. Keil, H. H. Yao, and C. Zawadzki, "Integrated Optical switching devices for optical telecommunications", *Proc. Plastics in Telecommunications conf.*, Vol. 8, pp. 11-17, 1998.
15. N. Keil, H. H. Yao, C. Zawadzki, and B. Strelbel, Rearrangeable nonblocking polymer waveguide thermo-optic 4x4 switching matrix with low power consumption at 1.55 μm , *Electron. Lett.* Vol. 31, No. 5, pp403-404, 1995.
16. L. Eldada and L. W. Shacklette, "Advances in polymer integrated optics", *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 6, No. 1, pp. 54-68, 2000.
17. C. A. Brackett, Dense wavelength division multiplexing networks: Principle and application, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 8, pp.948-964, Aug. 1990
18. 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.
19. Abdellatif Marrackchi, *Photonic Switching and Interconnects*, Marcel Dekker Inc., 1994.
20. 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.
21. J.Kobayashi, T.Matsuura, Y. Hida, S.Sasaki, and T. Maruno, *J. of Lightwave. tech.*, "Fluorinated Polyimide Waveguides with Low Polarization-Dependent Loss and Their Applications to Thermo-optic Switches", vol16, pp.1024-1029(1998)
22. S. Takasugi, S. Kajiyama, H. Nounen, H. Arai, S. Sato, H. Uetsuka, A. Hongo, and H. Ouchi, "Temperature compensation package for optical add/drop filter using PLC", *ECOC'99*, Nice, pp. 108-109.
23. 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.
24. Abdellatif Marrackchi, "Photonic Switching and Interconnects", Marcel Dekker Inc., 1994.
25. 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.
26. M. A. Scobey and D. E. Spock, "Passive DWDM components using microplasma optical interference filters", *OFC'96*, ThK1, San Jose, CA, Feb. 1996.
27. 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
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. O. Ishida, H. Takahashi, Y. Inoue, "Digitally Tunable Optical Filters Using Arrayed-Waveguide Grating(AWG) Multiplexers and Optical Switches", *J. lightwave Techol.*vol. 1, No. 2, pp321-327, 1997.

저자약력

성 명 : 한선규
 근 무 처 : (주)젠포토닉스 대표이사
 최종 학력 : 1976~1981. 한양대학교 원자력공학과 학사
 1983~1991. University of Utah 고체물리 박사
 주요 경력 : 1991. 11~1994. 1 한국전자통신연구원 기초기술연구부(선임연구원)
 1994. 2~1998. 12 한국전자통신연구원 광교환연구실(책임연구원/팀장)
 1999. 1~1999. 12 한국전자통신연구원 원천기술연구본부(책임연구원/팀장)
 Email : sghan@zenphotonics.com