

광기능 고분자 도파로 소자 연구 동향 및 특성

한선규 · 이형종 · 오민철 · 원용협

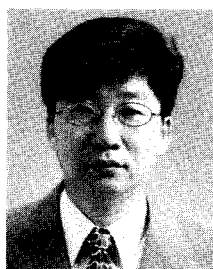
1. 서 론

고품질의 화상 서비스, 원격 진료, 화상 회의, 실감 영상 전달 등의 차세대 서비스에는 수 내지 수십 Tbps(bit per second) 급의 초고속, 대용량 정보의 통신, 처리 및 교환이 필요하지만 전자 소자에 바탕을 둔 현재의 정보통신 시스템은 전자 속도의 한계에 의한 대역폭의 제한으로 날로 발전하는 서비스를 충족시키기에는 미흡하다.

광의 전달자의 속도($\sim 10^{15}$ Hz)는 전자의 전달자 속도($\sim 10^9$ Hz) 보다 훨씬 빠르므로 이러한 광의 초고속성을 사용하여 통신 시스템에 적용하면 현재의 정보 처리 능력

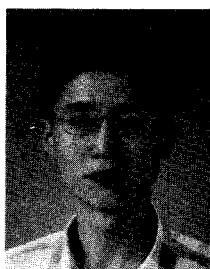
의 한계를 극복할 것으로 예측되어 광통신 연구가 시작되었다.

1980년대 초기에 광통신 시스템은 주로 시간 분할 다중(TDM)을 이용한 광신호의 속도의 증가에 초점이 되어 40 Mbps로부터 현재까지는 약 10 Gbps 시스템이 개발되었고, 향후 수백 Gbps까지 속도를 증가하기 위한 연구가 계획되고 있다.^{1,2} 광을 광으로 제어하는 것이 가장 효율적이나 아직까지는 완전 광통신으로 가기 위한 중간 단계인 전광(electro-optic) 효과를 이용한 광소자를 사용하여 광통신 시스템이 구성되고 있다. 따라서, 광소자의 속도를 증가시키려면 고속 구동을 위한 주변 전자 기



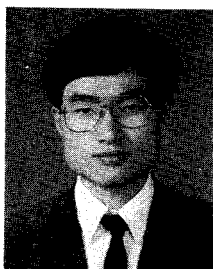
한선규

1976~ 한양대학교 원자력공학과(학사)
1981
1984~ University of Utah 물리학과
1991 (박사)
1991~ 한국전자통신연구원 기초기술
1994 연구부 선임연구원
1994~ 한국전자통신연구원 광교환연
현재 구실 선임연구원



오민철

1986~ 한국과학기술대학 정보통신공
1990 학과(학사)
1990~ 한국과학기술원 전기 및 전자
1992 공학과(석사)
1992~ 한국과학기술원 전기 및 전자
1996 공학과(박사)
1992~ 오사카대학 연수생
1993
1996~ 한국전자통신연구원 광교환연
현재 구실 선임연구원



이형종

1986~ 부산대학교 화학과(학사)
1990
1990~ 한국과학기술원(석사)
1992
1992~ 한국과학기술원(박사)
1995
1995~ 한국전자통신연구원 광교환연
현재 구실 선임연구원



원용협

1974~ 울산공대 전기공학과(학사)
1978
1978~ 서울공대 전자공학과(석사)
1981
1981~ 한국전자통신연구소 광통신연
1986 구실 연구원
1986~ Cornell University 전자공학
1990 과(박사)
1990~ 한국전자통신연구원 기초기술
1992 부 선임연구원
1992~ 한국전자통신연구원 광교환연
현재 구실 실장(책임연구원)

Characteristics and Trends in Photonic Polymer with Waveguide Structure

한국전자통신연구원 광교환연구실(Seon Gyu Han, Hyung-Jong Lee, Min-Cheol Oh, Yong Hyub Won, Photonic Switching Section, 161 Kajong-Dong, Yusong-Gu, Teajon 305-350, Korea)

기들도 고속으로 작동되어야 하므로 시간 분할 다중으로 시스템의 대용량화에는 무리가 있다. 따라서, 1980년 후반에 들어서는 광의 병렬성을 이용한 파장 분할 다중 방식(WDM)이 각광을 받기 시작하였다.³ WDM방식은 레이저 광원간에 서로 다른 파장 사이에는 서로 간섭을 하지 않으므로 동시에 여러 개의 파장을 전송 및 신호 처리가 가능하므로 비교적 낮은 속도로도 대용량의 광신호 전달 및 처리가 가능하다. WDM방식은 특히 미국을 중심으로 발전하고 있고, 일본과 유럽에서는 시간 다중과 파장 다중 방식을 혼용한 시스템 개발에 역점을 두고 있다.^{4,5}

광을 이용한 광통신 시스템에는 광원, 광신호 다중/역다중 소자, 광스위치, 광검출기, 광증폭기 등의 매우 다양한 광소자들이 필요하다. 광원과 광검출기는 주로 반도체를 사용하여 소자로 사용되고 있지만 안정성 등에서는 아직 개선 단계에 있다.

광신호의 능동적이고 효율적인 제어를 위한 기본적인 소자인 광신호 다중/역다중 소자와, 광스위치 등의 소자는 아직 개발 단계에 있다. 광변조기 및 스위치는 광전효과를 이용한 LiNbO_3 를 사용하여 수십 기가급의 속도를 얻기는 하였지만 스위칭을 위한 전자기파와 LiNbO_3 의 위상 속도 차이에 의해 이미 속도의 한계에 와있다.⁶ 또한, 4×4 광 공간 스위치를 제작하려면 매우 큰 LiNbO_3 결정체가 필요하지만 기술적인 한계가 있다.

실리카는 광섬유와 같은 물질로 이루어져 있으므로 광소자의 제작시 광섬유와의 접속에 의한 광손실이 매우 작으므로 소자 제작에 유리할 것으로 여겨져서, 열광학효과를 이용한 소자에 대한 연구가 시작되었다. 하지만, 최근에 들어서는 일본 NTT에서 실리카로 광도파로를 이용한 AWG(arrayed waveguide grating)형 파장 분할 소자를 제작하여 광도파로회로(PLC)에 대한 가능성이 보여지면서 열광학 스위치보다는 광도파로 회로에 더 적합한 것으로 보인다.⁷ 광집적화에 필요한 기본 요소는 다양한 기능을 하나의 기판에 집적하려면 일단 물질 자체의 광손실이 작아야 되고, 외부 환경에 의한 변화가 작은 안정된 소자로 꾸밀 수 있어야 하며 가격 경쟁력도 높아야만 된다. 실리카의 광손실은 0.01 dB/cm 정도로 매우 작지만 광도파로를 제작하려면 1000 °C 이상의 고온의 공정을 거치므로 실리온 기판과 실리카 사이에 열스트레스가 형성되어 편광에 의한 광굴절률이 달라지게 된다.^{8,9} 그러므로 실리카를 이용한 광도파로 소자는 도파시키고자 하는 광의 편광에 매우 의존하게 되므로 이러한 편광 의존성을 낮추기 위한 기능이 첨부되어야 한다.¹⁰

광을 이용한 정보 통신 및 교환에 있어 광소자와 광섬유를 통한 광신호 전송 및 광신호 변조, 스위칭 등의 신호 처리 과정에서 심각한 광손실이 일어나 광정보를 상실하게 되므로 반드시 광신호 증폭이 필요하다. 광증폭은

반도체를 이용한 반도체 광증폭기(semiconductor optical amplifier, SOA)의 전기광학적 증폭과 광섬유에 어븀(Er)을 첨부한 완전 광학적 증폭기가 있지만 아직 개발 단계에 있고 가격도 매우 높다.

SOA는 전달자 주입 방식(carrier injection)으로 70년대의 SOA 개념이 처음 도입되었고, 80년대에는 약 10 dB 이득인 광증폭기가 개발되었으며, 90년대에는 반사, 코팅 등을 개선하여 1995년에 스웨덴의 Ericsson사에서 InP계 반도체에서 이득 30 dB인 소자가 상용화가 되기 시작하였다.^{2,4}

광섬유를 이용한 증폭기술은 1980년대부터 희토류 원소를 사용하여 증폭에 대한 연구가 활발히 진행되어 10 Gbps로 300 km까지 전송 가능한 광섬유 증폭기(erbium-doped fiber amplifier, EDFA)가 개발되어 사용되고 있다. 고분자를 이용한 광소자 개발은 1980년대의 PMMA를 이용한 광섬유와 2차 비선형성 효과를 이용한 광전 소자의 개발이 주축이 되었으나 최근에 들어서는 열광학 효과를 이용한 광소자 및 광시스템의 집적용으로서의 개발이 더 활발하게 연구되고 있다.¹¹⁻¹³ 표 1에 나타나 있듯이 열광학 폴리머를 이용하면 현재 사용 중인 실리카와 같은 정도의 매우 낮은 손실을 제공하면서도 실리카나 반도체보다 제작 공정이 훨씬 용이할 뿐만 아니라 폴리머의 열광학 계수가 실리카보다 약 10배 정도 높으므로 매우 낮은 소비전력으로 우수한 스위칭 기능을 가질 수가 있다. 또한, 간단한 재료의 합성으로 다양한 기능의 광소자의 구현이 가능하고, 재료의 확보가 쉬우므로 실리카나 반도체를 이용한 경우보다 단가가 수배에서 수십배 정도로 낮아질 수 있으므로 매우 경쟁력있는 광소자 및 이를 이용한 광통신 시스템을 구현할 수 있다. 네덜란드의 Akzo사에서는 이미 열광학 폴리머 광소자의 상용화 시 제품을 선보였고, 미국의 Allied Signal, 일본의 NTT 등에서도 연구 개발을 활발히 진행하고 있다.^{14,15}

전기광학 효과를 이용한 폴리머 광소자는 LiNbO_3 나 반도체 등의 다른 재료에 비하여 유전상수가 작아 lumped

표 1

	실리카(SiO_2)	고분자
열광학 계수	낮다	높다
(dn/dT)	$(-1.4 \times 10^{-5}/\text{K})$	$(-10 \times 10^{-5}/\text{K})$
열전도성	높다	매우 낮다
	(1.4 W/m K)	(0.05~0.2 W/m K)
소비전력	높다(~500 mW)	매우 낮다(5~50 mW)
소자 구조	Mach-Zehnder, AWG filter	MZ, DC/X, Y switch, AWF filter
광손실	매우 낮다	낮다
(1.55 μm)	(<0.04 dB/cm)	(< 0.3 dB/cm)
속도	1 msec 정도	1 msec 정도
편광 의존성	낮다(<1 dB)	매우 낮다(<0.3 dB)
가격	저렴	저렴

표 2

	리튬나이오베이트 (LiNbO ₃)	반도체(InP)	고분자
대역 폭	중간정도 (10 GHz·cm)	작다 (1 GHz·cm)	크다 (>100 GHz·cm)
전기광학계수(r)	크다(32 pm/V)	작다(1.5 pm/V)	크다 (10~30 pm/V)
광손실 (Fiber-to-Fiber)	작다(<4 dB)	크다(15 dB, 이득이 있을 경우 0 dB)	중간(<8 dB)
광도파로 형태	방향성 결합기	LD gate	방향성결합기
이득 기능	불가능	가능	불가능
편광 의존성	높다	높다	높다
공정 복잡성	단순(<10 단계)	복잡(<100 단계)	단순(<10 단계)
온도 조절 필요성	불필요	필요	불필요
광도파로 제조 방식	확산법	결정성장법	광표백, 식각법
광소자 크기	크다 (<1×30 mm)	작다 (<1×5 mm)	크다 (<1×30 mm)
패키징 난이도	좋다	나쁘다	중간
가 격	높다	높다	낮다

회로에서의 capacitance가 작으므로 optical wave와 microwave와의 phase velocity의 mismatching이 없고, 유전상수가 nondispersive하여 초고속의 광소자 제작에 유리하다(표 2 참조). 또한, 공정이 간단하고 전기광학 계수가 LiNbO₃와 비슷한 정도이고, 제작 단가가 싸질 수 있다는 장점으로 연구가 진행되고 있다.

고분자를 이용하여 광도파로용 증폭기의 구현이 가능하다는 것이 인식된 후, 광집적회로 구성에 매우 유리한 잇점을 바탕으로 영국 BT, 네덜란드의 Phillips, 일본의 Keio 대학 등에서 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 고분자로 광증폭 소자를 만들면 광소자의 가격 경쟁력에서 매우 유리하다는 장점으로, 최근에 미국의 DARPA를 중심으로 연구가 시작되고 있다.¹⁴

2. 수동 소자 및 열광학 효과를 이용한 고분자 광소자

2.1 고분자 소재

수동 광소자용 고분자 물질 개발은 EO polymer와 같은 능동 소자용 물질에 비해 학계 및 기업에서 많은 관심을 끌지 못했었다. 그러나 최근 네덜란드의 Akzo에서 자체 개발한 고분자를 이용하여 thermo-optic(TO) device를 BeamBOX[®]란 상품명으로 시판하면서 일본 및 미국 기업들을 중심으로 개발 경쟁이 가열되고 있다. 평면 도파로형 광소자, 특히 TO 소자용 고분자 물질로 초기 연구진은 주로 기존의 PMMA를 사용하여 제작하였다.¹⁶ 그러나 PMMA는 NIR에서의 광손실이 1 dB/cm 이상으로 크기 때문에 이의 개선을 위하여 일본의 NTT에서는 deuterated MMA와 deuterated perfluoro methac-

rylate 단량체를 여러 조성비로 공중합하여 굴절율이 잘 조절된 물질을 클래딩 및 코어로 이용하여 광손실이 1.3 μm 에서 0.08 dB/cm로 아주 우수한 저 광손실 광소자를 구현하였다.^{17,18} 그러나 PMMA계는 T_g 가 100 $^{\circ}\text{C}$ 정도로 열안정성이 떨어진다. 이의 개선을 위하여 NTT에서 열분해 온도가 400 $^{\circ}\text{C}$ 이상인 열경화 deuterated phenyl polysiloxane을 개발하였다.¹⁹ 또한 내열성, 가공성이 뛰어난 다양한 종류의 perfluorinated polyimides를 개발하여 발표하였다. Perfluorinated polyimides의 경우 큰 복굴절로 인한 편광 독립이 어려우며, 비교적 큰 흡수성으로 인한 광손실이 나타난다. 미국의 Amoco Chemical사에서 광소자용으로 개발, 상용화한 fluorinated polyimides(Ultradel 9000D series)는 광손실이 1.3, 1.55 μm 에서 각각 0.5, 0.9 dB/cm로 비교적 크고 복굴절이 큰 단점은 있으나 photo-crosslinking 되도록 설계되어 photolithography를 통해 쉽게 광소자를 제작할 수 있어 많은 연구가 이루어졌다.^{20,21} 최근 미국의 Allied Signal사에서는 UV-curable fluorinated acrylate를 이용한 광소자 개발을 발표하였다.

이 물질은 acrylate의 photo-crosslinking 특성을 이용하여 350 $^{\circ}\text{C}$ 이상의 열안정성을 확보했을 뿐만 아니라 기존의 photolithography나 laser direct-writing 공정으로 소자 제작 단가를 낮출 수 있다. 또한 1.3, 1.55 μm 에서의 광손실이 각각 0.03, 0.05 dB/cm로 거의 silica에 필적할 수준에 이르렀으며 굴절율을 1.3에서 1.6까지 연속적으로 조절 가능하며, 복굴절이 0.0008 정도로 편광 독립되었다.^{14,22} 그 외에도 최근 고분자 광소자에 관한 중요성이 증가됨에 따라 물질의 요구 특성이 비슷한 기존의 고분자 광섬유(POF)용 물질 및 반도체용 low dielectric polymer 물질 등의 변조를 통한 광소자 제작이 활발하게 이루어지고 있다.^{15,23} 현재까지 발표된 1.55 μm 저손실용 고분자 재료의 화학식 구조가 그림 1에 나타나 있다.

광도파로용 고분자 재료의 많은 물질 특성 요구 사항 중 사용 파장에서의 낮은 광진행 손실은 가장 중요한 특성이다. 광도파로의 전체 광진행 손실은 물질 고유의 광흡수, 고유 광산란, 그리고 외부 요인(공정 부정확성, voids, crack, impurity 등)에 기인한다.²⁴

$$L_{\text{waveguide}} = L_{\text{absorption}} + L_{\text{scattering}} + L_{\text{extrinsic}} \quad (1)$$

고분자 물질에서의 광 산란에 의한 손실은 주로 Rayleigh 산란에 의해 일어난다.

$$\alpha_i = \frac{8}{3} \pi^3 \frac{kT}{\lambda^4} \beta \left[\frac{(n^2-1)(n^2+1)}{3} \right]^2 \quad (2)$$

α_i 는 내부 산란에 의한 광손실이고, β 는 isothermal

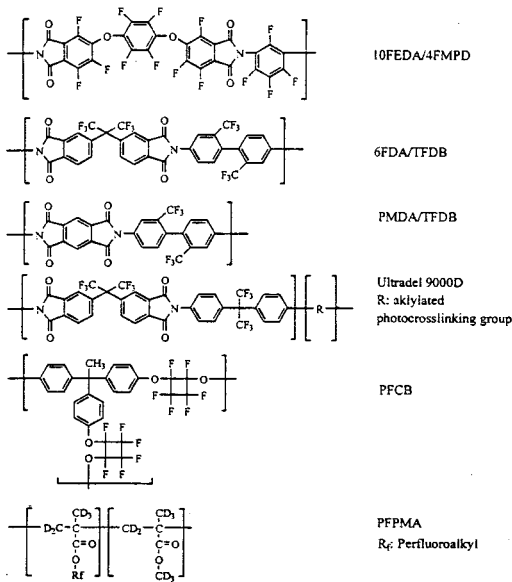


그림 1. 저손실 광소자용 고분자 재료의 화학식.

compressibility이다. 일반적으로 고분자의 광통신 영역에서의 $\alpha_i = 10^{-5}$ dB/cm 정도이다.

등방성 물질의 Rayleigh 산란 손실은 상온에서 $1.3 \mu\text{m}$ 에서 약 10^{-5} dB/cm로 광손실에 큰 영향이 없다. 그리고 외부 요인에 의한 광손실은 공정 최적화를 통해 최소화할 수 있다. 그러므로, 저 손실 고분자 합성을 위해서는 분자 설계 단계에서부터 $L_{\text{absorption}}$ 에 의한 고분자 물질 고유의 흡수를 최소화할 수 있도록 해야한다. 고분자 물질 고유의 광손실로 전자 천이 흡수(electronic transition absorption)과 적외선 진동 흡수(infrared vibrational absorption)에 기인한다. 고분자에서 전자 천이 흡수 손실은 주로 C=O 결합의 $n-\pi^*$ 천이와 C=C 이중 결합의 $\pi-\pi^*$ 천이에 따른 흡수로 UV-visible 영역에서는 그 영향이 크지만, 통신 파장 영역인 $1.3, 1.55 \mu\text{m}$ 에서의 전자 천이에 의한 흡수는 무시할 수 있다. 일반적으로 고분자는 적외선 영역에서 분자 구조 내의 진동에 의한 고유의 흡수 영역을 가지고 있다. 특히, carbonyl-hydrogen(or O-H, N-H) 결합에 의한 근적외선 영역의 진동 흡수 손실은 second 및 third harmonic overtone에 기인하는 것으로 광손실의 주된 원인이다. 그러므로 광소자의 광손실 중 가장 큰 부분을 차지한다. 이러한 손실 문제를 해결하기 위하여 C-H 결합을 무거운 원소인 중수소나 불소로 치환한, 즉, C-D 혹은 C-F 결합으로 치환한 고분자는 결과적으로 harmonic overtone을 장파장으로 이동시켜 원하는 파장대에서의 흡수를 최소화할 수 있다. Hoechst Celanese 사의 모델 용매들의 고유 흡수 실험 결과에 따르면 aliphatic C-H bond에 의한 흡수 손실이 aromatic C-H bond에 의한 흡수 손

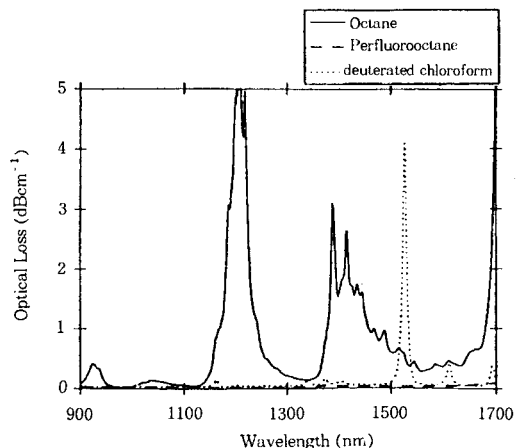


그림 2. 용매에 따른 광손실.

실에 비해 1.3 및 $1.55 \mu\text{m}$ 에서는 각각 3배, 5배 크다. 또한, 중수소로 치환했을 경우 $1.3 \mu\text{m}$ 에서는 현격한 흡수의 감소가 있으나 $1.55 \mu\text{m}$ 에서는 아직 약간의 흡수가 있으며 특히 $1.53 \mu\text{m}$ 에서 강한 harmonic overtone peak가 있다. 그러나 불소로 치환했을 경우 $1.1 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 에 걸쳐 거의 흡수에 의한 손실이 나타나지 않는다. 그림 2는 모델 용매의 파장에 따른 광손실을 보여준다.²⁵

2.2 고분자 소자

평면 도파로형 광소자 및 광 상호연결(optical interconnection)에 사용되는 고성능 재료는 높은 열적 및 환경 안정성, 1.3 및 $1.55 \mu\text{m}$ 파장에서의 저 광진행 손실, 미세한 굴절을 조절성, 다양한 기판의 사용 가능성, 적층성, 치수 유연성, 연결성, 미세 광부품과의 용이한 정렬, 근본적인 저가 기술이 크게 요구된다. 이러한 특성에 가장 적합한 재료로 고분자를 이용한 평면 도파로형 광소자 및 광 상호연결은 광전 집적회로(optoelectronic integrated circuit, OEIC) 응용에 중요한 모든 특성을 갖추고 있다. 고분자 물질은 평면 기판 위에 저가의 고밀도 광 상호연결 회로 구성의 가능성을 제공한다. 적당한 고분자 물질의 개발 및 특성 연구, 고분자 광도파로 소자를 위한 공정 개발, 광섬유와 고분자 도파로의 상호연결 기술 개발, 최종 광회로의 전체 특성 평가가 요구된다. 소자로서 활용되기 위해서는 물질의 저손실 이외에 공정 가공성과 안정성 등의 요소가 더 필요하다. 가공성에는 저손실 물질의 단층 박막 및 다층 박막이 가능하여야 하고, 광도파로를 구성하기 위해 RIE를 이용한 건식 식각, 습식 식각 또는 광표백 등이 가능하여야 한다.

광도파로 공정은 기본적으로 3층 구조로 되어있고(그림 3), 반도체나 실리카에 비해 매우 간단하다(그림 4). 또한, 코어 부분과 클래딩의 굴절률의 조합을 다양하게 할 수 있으므로 소자 제작에 매우 유리하다. 공정은 설계에 따라, 먼저 하부 클래딩을 스핀 코팅 등에 의해

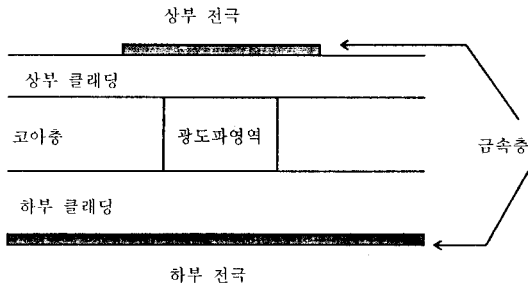


그림 3. 고분자 광도파로 소자의 개략도. 상부 전극과 하부 전극은 수동 소자일 경우에는 필요 없다. 광도와 영역의 굴절률은 상부 클래딩, 하부 클래딩과 코어층보다 높다.

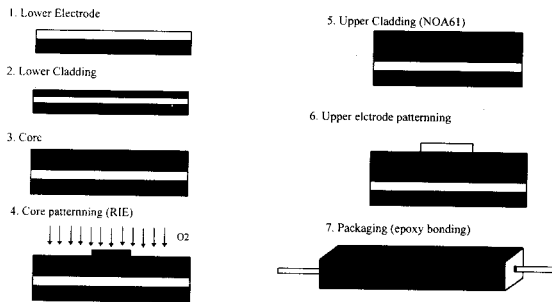


그림 4. 수동 및 열광학 소자의 공정 순서. 광도파로를 O₂ 식각을 이용한 경우를 나타낸다. 수동 소자일 경우에는 상·하부 전극 공정이 필요없다.

입히고 코아층을 다시 입힌 후 도파로 모양을 만든다. 도파로를 만드는 방법은 산소를 이용한 건식 식각, 습식 식각, photo initiator를 이용한 광포백이나, cross-linking이 이용되고, 레이저를 이용한 direct writing을 사용하기도 한다.²⁶⁻³⁰ 일반적으로 소자의 전체 두께는 광섬유와의 접속을 고려하여 5~20 μm 정도이다.

광소자가 편광에 의존하지 않고 안정되게 작동되려면, TE 모드와 TM 모드 사이의 굴절률의 차이가 $\lambda_{\text{TM}} - \lambda_{\text{TE}} < (1/10)\Delta\lambda$ 를 만족해야 한다. 비정질 물질의 복굴절률은 주로 공정상의 열스트레스(σ)에 의해 나타나는데, ($\Delta n = C_{50} \sigma$), C_{50} 는 스트레스 광학계수이고, 이것을 줄이려면 고분자의 경우 복굴절률이 반대로 나타나게 copolymerization을 시키거나, 다른 고분자를 blending하여 사용하면 된다. 하지만 실리카의 경우는 공정 시의 온도가 1000 $^{\circ}\text{C}$ 이상 온도가 올라가므로 실리온 기판과 실리카 사이의 열팽창 계수의 차이로 인하여 복굴절률이 심각하다. 이러한 경우에는 복굴절률의 차이를 없애기 위하여 고분자 quarter wave plate 등을 삽입하여 사용한다.¹⁰

저손실 도파로를 이용하여 능동형 소자를 만들려면 고분자의 열광학 계수를 이용하여 굴절률을 온도에 의해 조절할 수 있다. 일반적으로 고분자는 실리카나 반도체,

결정체 등에 비해 약 10배 정도 큰 열광학 계수를 갖는다. 고분자의 굴절률의 온도에 대한 실험결과 Lorentz-Lorenz 식에 잘 부합되므로 고분자 열광학 계수는 부피 팽창에 의한 것으로 판명되었다.^{31,32}

온도에 의한 굴절률 변화는 아래식으로 나타내어진다.

$$\frac{dn}{dT} = -q(n)\alpha = -q(n)\left\{\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}\right\} \quad (3)$$

$$q(n) = \frac{(n^2+2)(n^2-1)}{6n} \quad (4)$$

$q(n)$ 은 굴절률 국부 함수(local function of refractive index)이고, α 는 열에 의한 부피 팽창계수(thermal expansion coefficient), ρ 는 부피이다. 일반적으로 고분자의 dn/dT 는 약 $10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 이다.

열광학 계수를 이용하기 위해서는 열광학 계수가 커야 하지만 식 (3)에서 나타내어지듯이 열광학 계수가 커지려면 흡수도 커져야 한다. 따라서 능동 소자의 경우 열광학 계수와 광손실 간의 적절한 점을 찾아야 할 것이다.

광소자를 제작한 후 패키징을 하여야 하는데 이 공정은 광소자의 제작(특히 상품화)에 매우 중요한 역할을 한다. 반도체 및 무기 결정체의 경우 상품화된 광원, 광변조기, 광스위치 등의 가격의 50~80% 정도가 패키징의 가격이다. 광결합은 UV adhesive를 사용하여 ferrule과 칩을 붙이고, pigtailed 칩을 brass 케이스에 붙인다. 패키징 시의 가장 문제가 되는 것은 광손실이다. 광손실의 원인은 광소자 칩과 광섬유와의 모드 불일치, Fresnel 반사, 단면 반사 등의 요인 등이 있으나, 도파되는 광의 모드와 광섬유의 모드가 서로 맞지 않는 것이 주된 원인이다. 고분자 소자의 경우 소자에 사용되는 클래딩과 코어층의 굴절률을 쉽게 조절할 수 있으므로 모드 크기의 조절이 가능하여 광패키지에 의한 광손실은 매우 작은 편이다.

광소자 패키징 후의 안정성은 습도에 의한 안정성과 온도에 의한 열적 안정성 등이 고려되어야 한다. 최근의 연구 결과들은 dry-humid(85%RH, 85 $^{\circ}\text{C}$)에서 광손실의 변화가 없는 것이 발표되고 있다. 열적 안정성은 yellowing이라고도 불리우고, 주로 partially conjugated 분자 그룹에 의한 것으로 넓은 UV 영역에서의 흡수 peak와 가시광선 대의 tail에 의해 특성지어진다. 물론 이것은 화학 조성 및 성분에 따라 달라진다. 열적 안정성의 광손실의 변화(yellowing rate)는 Arrhenius의 형태로 변한다.

제작된 광소자는 msec 대의 공간 분할 광스위치, AWG 파장 선택 필터(그림 5) 등이 있다. 네덜란드의 Akzo사 제품의 경우 1 밀리초 스위칭 속도를 갖는 1×2 , 2×2 , 4×4 , 8×8 등의 공간 분할 스위치 등이 상품화가 시작되었고, 습도 및 온도에 대한 안정성도 매우 좋은 것

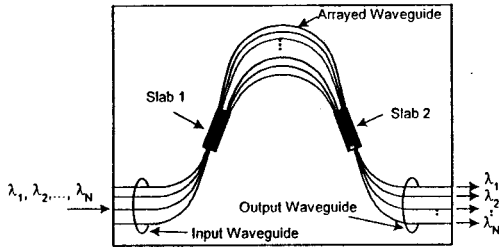


그림 5. AWG 필터의 개략도. 입력단에 입사한 광은 Slab1에서 평면 도파로를 Arrayed Waveguide를 지나면서 파장별로 다른 위상 차이를 겪는다. Slab2에서 다시 모인 빛은 파장에 따라 다른 도파로를 통하여 출력된다.

으로 발표되었다. 특히 최근에는 안정성을 증가시키기 위하여 패키징 내부를 질소나 아르곤 가스로 채워 넣고 밀봉시키는 hermetic 패키징을 하여 상품화를 하였다.

WDM 시스템의 기본 요소가 될 수 있는 광필터는 주로 arrayed waveguide grating을 이용한 AWG 필터 등이 연구 중에 있다.³⁵

3. 이차 비선형 효과를 이용한 고분자 광소자

3.1 이차 비선형 광고분자 소재

평면 도파로형 능동 광소자에 사용되는 EO 고분자는 5 V 이하의 낮은 구동 전압을 위하여 사용 파장에서의 30 pm/V 이상의 높은 전기 광학 계수, 풀링 및 공정 과정에서 열처리에 견디기 위해 250 °C 이상의 열분해 온도, 발색단의 이완을 방지하기 위한 150 °C 이상의 유리전이온도(T_g), 직류 표류 방지를 위한 산화 안정성 및 낮은 전기 전도성, 1.3 및 1.55 μm 에서의 저 광전행 손실, 다양한 기판의 사용 가능성, 다층 박막 형성을 위한 우수한 필름성 및 접착성 및 내약품성 및 치수 유연성, 습식 식각 및 도금 공정에서의 내습성, 광섬유와의 용이한 정렬을 위한 깨끗한 절단성(cleaving) 혹은 연마성(polishing)과 더불어 용이한 합성 기술이 크게 요구된다.³⁴ 이러한 특성을 완전히 만족하는 고분자 재료는 아직 발표되지 않았지만 많은 연구실에서 실용화에 근접한 재료 개발에 노력하고 있어 조만간 결실이 있으리라 본다. 자세한 EO 고분자 재료에 관한 기술은 고분자 과학과 기술, 5(5), 447 (1994)와 7(6), 667 (1996)에 잘 소개되어 있어 본 고에서는 생략하고 현재 광소자에 이용되고 있는 EO 고분자에 관해 간단히 기술하고자 한다. 가장 대표적인 물질로 Hoechst Celanese사와 Akzo Novel사에서 개발한 PMMA backbone에 DANS (dimethylamino-4-nitrostyrene) 또는 Disperse Red 1 발색단을 공유 결합시켜 얻은 고분자로 많은 광소자가 제작되었으며, 지금도 새로운 물질이나 소자 개발의 ref-

erence로 이용된다. 미국의 Lockheed에서는 DCM(4-(dicyanomethylene)-2-methyl-6-(*p*-dimethylamino-styryl)-4H-pyran) 및 열안정성이 뛰어난 donor-acceptor-donor type의 DCM 유도체 발색단을 guest로 폴리이미드를 host로 한 고분자 재료를 이용하여 3.5 V의 낮은 구동 전압을 갖는 MZI 광변조기를 발표했다. USC의 L. R. Dalton, W. H. Steier 등은 polyurethane backbone에 DR1 발색단을 공유 결합한 고분자를 이용하여 110 GHz bandwidth를 가진 광변조기를 발표했다. 이 물질은 Chromophore란 회사에서 상품화되어 시판되고 있다. 그외 polyimide backbone에 다양한 발색단을 도입한 고분자 물질이 IBM을 비롯한 여러 연구진에 의해 개발되어 광소자가 제작되었지만, 이들 물질은 아직 전기 광학 계수가 낮아서 발색단의 종류 및 함량 등의 최적화가 이루어져야 한다.

3.2 이차 비선형 효과를 이용한 소자 종류 및 특성

전기 광학 효과를 이용한 소자는 고속 MZ, 2×2 스위치 등과 같이 10 GHz 대의 고속에서 작동할 수 있는 고속 광소자와 편광에 의한 굴절률의 차이를 이용한 편광 분리기, 편광 조절기, 편광 선택기 등의 편광소자가 구성될 수 있다.

전기 광학 효과를 이용한 소자의 광도파로 설계는 먼저 원하는 특성에 맞는 소자의 구조에 따라 달라지고, 공정은 2장의 수동 및 열광학 소자와 기본적인 공정은 비슷하나, 고분자에 이차 비선형 효과를 주기 위한 풀링 공정이 첨부된다(그림 6). 일반적으로 풀링은 코로나 풀링, 전극 풀링, 광학적 풀링 등이 있는데, 코로나 풀링을 이용할 경우 풀링시 표면이 상하여 추가의 광손실을 줄 우려가 많으므로 광소자의 제작에는 주로 전극 풀링이 사용된다.³⁵⁻³⁸ 최근에는 1차 주파수와 2차 주파수의 간섭을 이용한 광학적 풀링이 시도되고 있으나 아직은 효율이 좋지 않다. 풀링은 주로 T_g 근처에서 약 50-200 V/ μm 의 세기로 된다. 이렇게 하면 P2ANS의 경우 약 10-20 pm/v의 전기광학 계수를 갖는다. 풀링 후 발색단의 정렬로 인하여 TM 방향의 굴절률은 증가하고 TE 방향의 굴절률은 감소한다. 따라서, TM 편광의 경우 광도파 내부의 굴절률이 클래딩 및 광도파로 외부의 굴절률보다 높아지게 되므로 광이 퍼짐이 없이 진행할 수 있으나, TE 경우는 클래딩이나 도파로 외부보다 굴절률이 작아지므로 광이 도파로를 따라 진행되지 않는다. 일반적인 고분자 고속광소자의 경우는 TM 모드만 사용이 된다. LiNbO₃를 이용한 광소자의 경우도 일반적으로는 TM 모드가 사용되지만 특정한 목적에 따라 결정체의 성장 방향 및 자르는 방향을 조절하여 TE 모드용 소자도 있다. 이러한 복굴절률을 이용하여 고분자의 구조에서 광축 방향을 제어할 수 있는 편광 소자가 제안되고 연구되고 있다.

3.2.1 고속 광소자

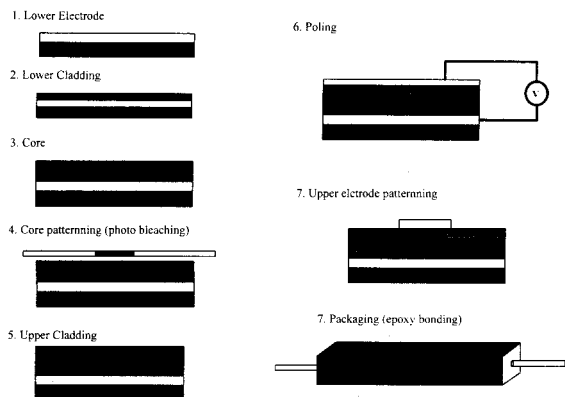


그림 6. 전기광학 소자의 공정 순서. 광표백 현상을 이용하여 광도파로를 새긴 경우이다. Dipole을 배향하기 위해 poling 공정을 사용하는 것이 수동 및 열광학 소자의 공정과 다른 점이다.

고속 소자의 경우 마이크로파로 구동될 수 있는 전극의 설계와 공정이 중요하다. 전극은 실제로 구동되는 micro strip line 형태로 설계 제작되며 구동시켜 주는 외부 구동 장치와 impedance matching이 잘 되어야 한다. 일반적인 micro strip line의 impedance는 50Ω 이며, impedance는 전극의 width와 전극의 간격에 의해 정해진다.

일반적인 micro strip line의 width는 수십 μm , 간격은 5-10 μm 이고, 전극의 두께는 수 μm 이다.

구동 전력을 공급하기 위해서는 SMA connector나 K-connector가 주로 사용되는데 이러한 connector 끝의 넓이는 약 300 μm 으로서 넓이가 수십 μm 인 micro strip line과의 연결이 필요하다. 반도체 및 무기 결정체 등에서는 연결용 micro strip line을 따로 제작하여 wire bonding 등에 두개에 micro strip line을 결합시키는데 매우 고도의 기술이 필요하다. 고분자 소자의 경우는 소자 제작 시(그림 7)와 같이 바로 연결시킬 수 있으므로 구동이 다른 물질로 만든 소자보다 비교적 용이하다.

광손실은 propagation loss와 fiber-waveguide coupling loss로 나누어진다. Propagation loss는 물질 자체의 손실, 도파로와 클래딩 층과의 산란, 폴링에 의한 산란 등에 의한 것이다. 전기광학 고분자 광소자의 패키징은 열광학 소자와 비슷하나 폴링에 의한 광손실이 더 생긴다. MZ의 경우 최고의 속도는 110 GHz까지 발표되었으나 구동 전압이 단일 전극을 사용한 $V\pi$ 는 약 23 V이나 두개의 전극에 위상이 180 차이 나는 전극 극성을 사용한 Push-pull로는 11 V의 $V\pi$ 였고, on-off ratio는 15-20 dB이었다. 최근의 국내 연구 결과는 on-off ratio는 약 30 dB이고, 구동 전압은 전극의 길이가 1.5 cm일 때 3.7 V 정도까지 떨어졌다 전기광학 고분자를 이용한 광소자는 속도 이외의 특성에서는 국내의 기술이 더 앞서 있다.³⁹⁻⁴² 현재까지 발표된 소자의 개개의 특성은 많이 개선되었으나 광소자로 시스템에 안정적으로 사용되기 위

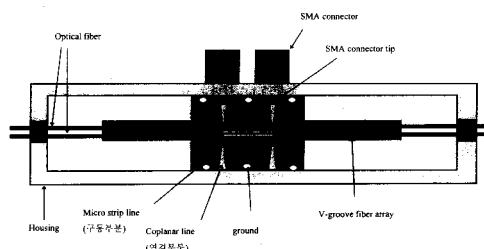


그림 7. 전기광학 소자의 패키징 개략도. 삼각형 부분은 SMA connector tip과 구동용 전극(micro strip line) 연결하는 전극으로 coplanar 형태로 되어있다. 다채널 광섬유 접속하기 위하여 Si V-groove를 사용하였다.

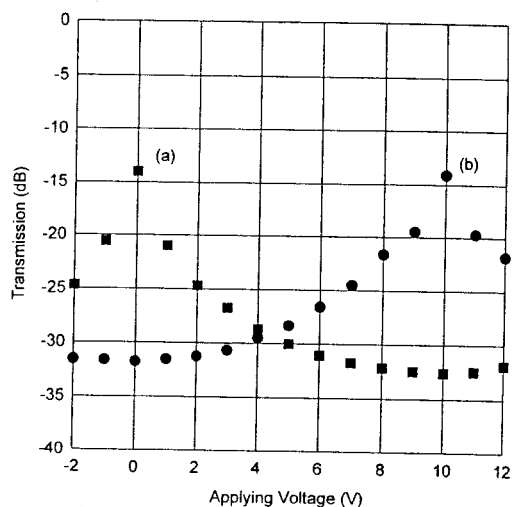
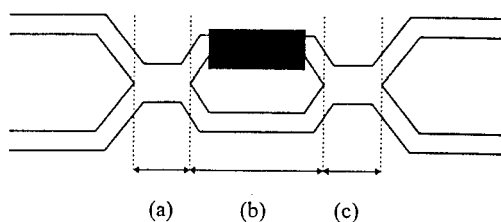


그림 8. Up : Schematic structure of the MBOA type wave guide; (a) and (c) are multimode region, (b) is phase controlling region and the shaded rectangular is an electrode on the top of the waveguide. Down : Measured transmittance of the 2×2 switch using MBOA waveguide at the wavelength of $1.3 \mu\text{m}$; (a) is cross state and (b) is bar state.

해서는 전체적인 특성이 골고루 좋아야 한다.

2×2 공간 분할형 스위치는 directional coupler(DC)형, X 형 형태를 기본 구조로 사용되었으나 광 coupling 영역에서의 공정 tolerance를 주어 보다 안정적인 소자를 제작하기 위한 modified bifunctional optical active (MBOA), mode evolution(ME)형 소자 구조가 제안되고 제작되었다(그림 8).⁴³ 구동 전압 11 V, on-off ratio

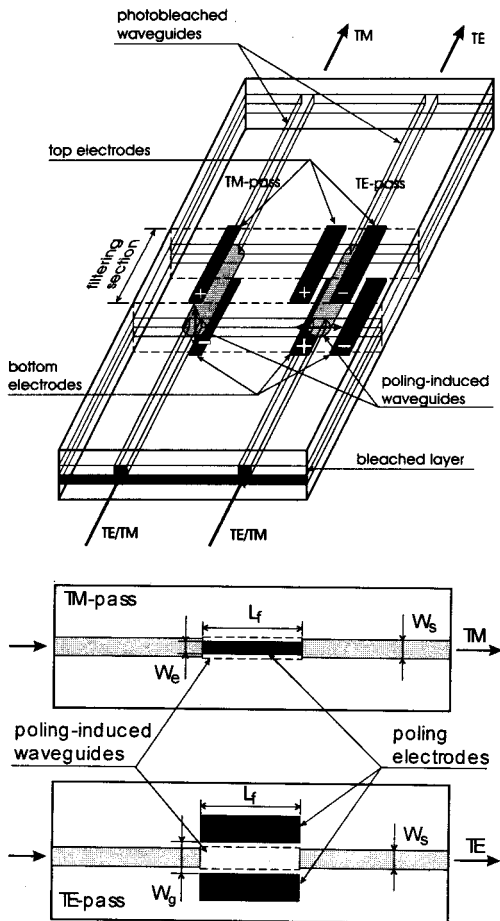


그림 9. Schematic diagrams and top-views of the TM-pass and TE-pass polymeric waveguide polarizers. The waveguides formed by photobleaching serially connects the two types of poling-induced waveguides.

18 dB, 광손실 14 dB, 구동속도 0.2 나노초의 특성을 가진 소자가 제작되었다.⁴⁴ 최근에는 구동 전압의 저전압화와 광안정성을 높이기 위한 연구가 진행되고 있다.

3.2.2 편광 소자

폴링의 방향에 따른 굴절률의 차이를 이용하면 광의 편광을 조절하는 소자를 제작할 수 있다.⁴⁵ 현재까지 제작되고 연구되는 소자는 편광 분리기, 편광 조절기 등과 편광에 의존하지 않는 변조기 등이 있다. 각각의 소자의 구조 및 특성은 그림 9~그림 14에 나타나 있다.⁴⁶⁻⁴⁸ 고분자 광도파로 편광 제어 소자로서는 편광되지 않은 도파광을 TE 또는 TM 상태의 선편광 상태로 만들어 주는 역할을 하는 TE 통과 편광기와 TM 통과 편광기를 제작하였으며 각각의 편광 소멸비는 7.1 dB, 20.7 dB가 되었다.

고분자 광도파로 편광 분리기를 제작하였는데 이는 도파광에 있는 각각의 편광 성분을 나누어서 출력시키는 역

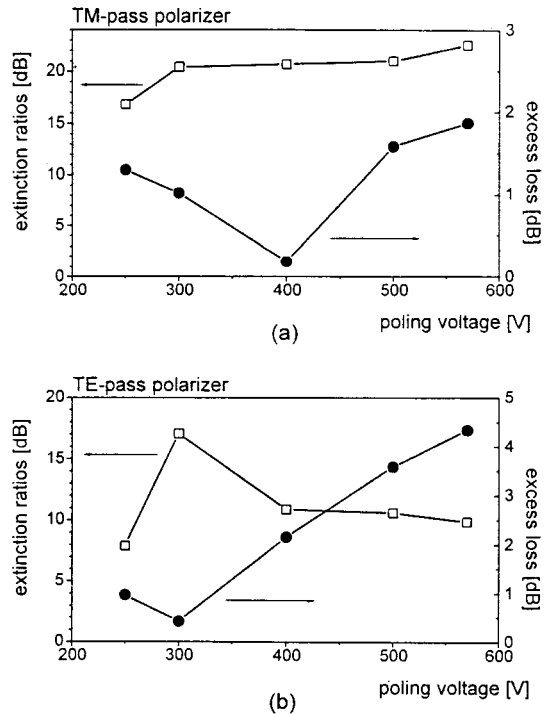


그림 10. Measured polarization extinction ratios and excess losses of the TM-pass and TE-pass polarizers.

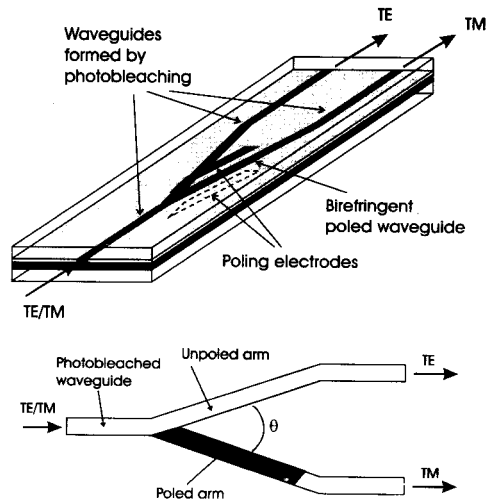


그림 11. Schematic diagrams and top-views of the polymeric waveguide polarization splitter. The two poling electrodes pole a branch of the Y-shaped waveguide to be birefringent.

할을 한다. 제작된 소자에서 TE, TM 편광 입력에 대한 분리비는 각각 10.1 dB, 14.2 dB의 결과를 얻었다.

도파광의 편광 상태를 TE에서 TM으로 또는 그 반대로 변화시킬 수 있는 기능을 가진 고분자 광도파로 편광 변환기를 제작하였으며 편광 변환 효율이 30 dB 이상이

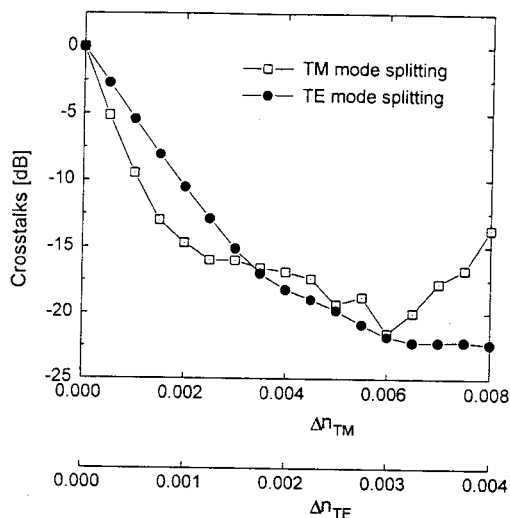


그림 12. (a) Calculation results based on the BPM simulation, (b) Measured crosstalks and fabrication conditions of the polarization splitters.

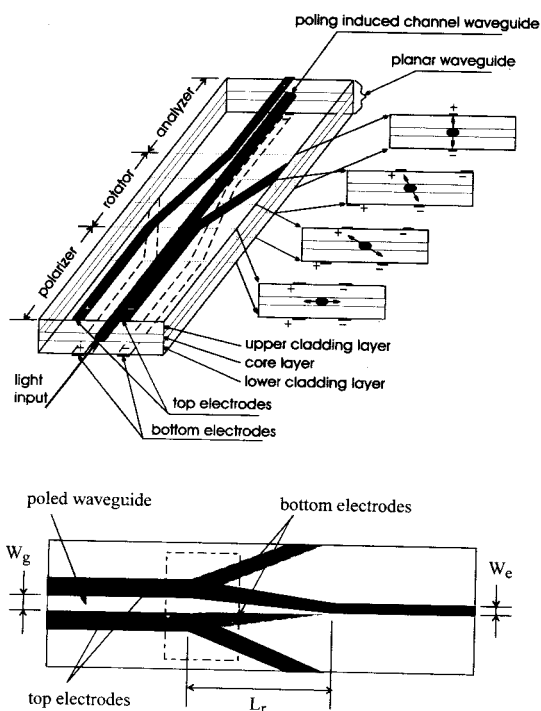


그림 13. Schematic diagram of the proposed polarization rotator. Cut-views show the major direction of the poling field or the optic axis of the poling induced waveguide for the given electrode structure.

었다. 이를 위하여 폴링에 의해 형성되는 고분자 광도파로의 광축 방향을 조절하는 새로운 방법을 사용하였으며 (그림 15), 제작된 소자는 광파의 파장에 무관하게 동작하고 제작상의 허용 오차 한도가 매우 큰 소자가 고분자

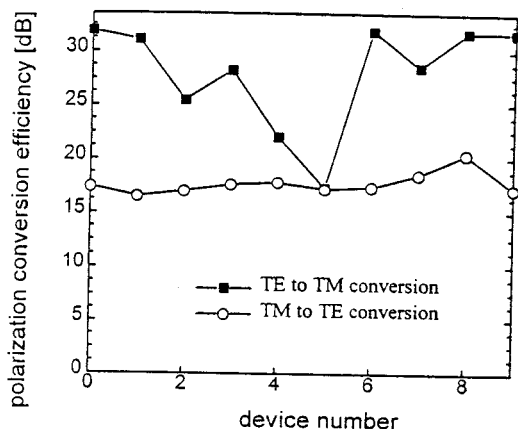


그림 14. Measured conversion efficiencies of the polymeric waveguide polarization converters with different device parameters. Both TE to TM conversion and TM to TE conversion are measured for 10 devices with different device parameters.

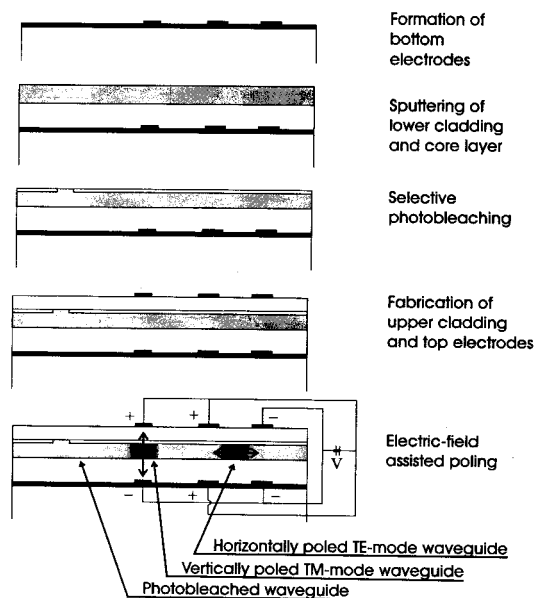


그림 15. Fabrication procedures of the photobleached and poling-induced waveguides in EO polymers.

를 이용하여 연구되고 있다.

차비선형 효과를 이용한 광소자를 시스템에 적용하기 위해서는 안정화가 이루어져야 한다. 안정성은 dc-bias 안정도, 화학적 안정도, 물리적 안정도 등이 있으나, 고분자와 직접적으로 연관이 있는 것은 dc-bias 안정도와 화학적 안정도이다.⁴⁹

고분자를 이용한 소자는 다층 구조를 갖는데 이러한 서로 다른 물질층 구조의 경계에서 전하가 쌓일 수 있다. 이렇게 쌓인 전하는 가해주는 전압을 screen 시켜서 bias 전압을 변형시킬 수 있다. 이러한 것은 광소자의 각

층의 저항과 capacitance를 조절하면 해결될 수 있다. 그리고, 폴링된 후 배향된 분자들의 원상 복구에 의해 bias 전압이 바뀌는데 이러한 문제는 높은 T_g 를 갖거나, crosslinking을 이용한 물질을 사용하여 배향된 분자의 움직임이 어렵게 만드는 연구가 많이 진행되고 있다.

일반적으로 광소자는 약 5-250 mW의 입력광이 조사되고 1-50 mW이 출력단으로 나온다. 이것은 10^4 - 10^6 W/cm²에 해당된다. 이는 일반적으로 damage threshold보다 낮은 값이나, 어떤 chromophore의 photosensitivity에 의해 물질의 degradation이 느리게 반응할 수 있다. 광소자는 수년 동안 계속되는 광조사에 아무런 변화가 없어야 하므로 이것은 심각한 문제가 될 수 있다.

1320 nm에서 약 150 mW로 조사할 경우 약 5 dB 정도 줄어드는 것이 관측되었다. DANS 경우 DR1보다 약 2 dB만큼 더 심한 것으로 보고되고 있다. 이러한 원인은 photochemical하게 불안정한 상태인 것으로 추정된다.

4. 광증폭 효과를 이용한 소자의 현황 및 특성

본격적인 고분자 광증폭기는 1993년에, 일본 Keio 대학의 Tsuyoshi 등에 의해 발표된 PMMA계 고분자 광섬유 코어에 유기 염료인 Rhodamine B, Rhodamine 6G, 그리고 Perylene Red를 1 ppm 정도의 농도로 도핑한 일종의 광섬유 증폭기이다(그림 16). 이때의 증폭 파장은 가시광선 영역인 570 nm와 620 nm이며, 증폭을 위한 광섬유의 길이는 50 cm로 비교적 길며, 증폭 이득은 30 dB 정도로 우수한 특성을 보였다.⁵⁰ 이들 연구팀은 현재까지 꾸준히 PMMA계 고분자 광섬유 제조 방법을 개선하여 graded-index(GI) 형의 고분자 증폭기를 발표하는 등 활발한 연구활동을 계속하고 있다.⁵¹ 이들과는 별도로 미국의 Texas/Austin 대학의 Kuzyk 등은 수용성 고분자인 photolime gel에 Nd³⁺를 도핑하여 스피ن 코팅법을 이용한 도파로 제작방법을 사용하여 도파로 길이가 2.2 cm로 매우 짧은 광증폭기를 제작 발표하였으며 증폭 파장은 근적외선 영역인 1.06 μ m이며 증폭 이득은 8.5 dB로 비교적 우수하였다.⁵² 특히 이들 연구진은 펄핑 레이저의 제작 및 광도파로 설계 등의 시현을 통해 소자 제작에 필요한 중요한 연구들을 발표하였다(그림 16).

최근에는 네덜란드 Philips사에서는 테프론 모세관에 PMMA 계통인 라울릴 메타크릴레이트 단량체를 채우고 나서 여기에 희토류족인 Eu³⁺를 도핑한 후 중합하는 방법을 이용하여 1.5 cm 정도의 매우 짧은 고분자 광섬유 형태의 광증폭기를 개발하였는데 이 증폭기의 증폭 이득은 4.1 dB로 발표하였다.⁵³ 고분자 광증폭기에 사용되는 대표적인 dopant가 그림 17에 나타나 있다.

표 3에서 본 바와 같이 지금까지 발표된 고분자 광증

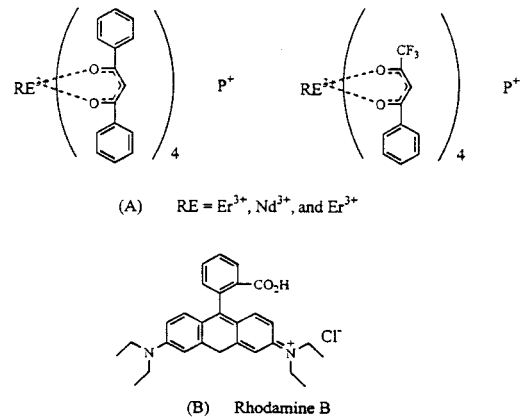


그림 16. 고분자 광증폭기에 사용되는 대표적인 dopant의 화학식 구조.

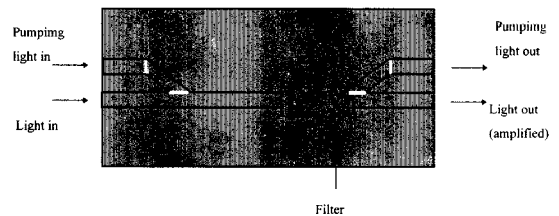


그림 17. 광증폭 소자의 개략도.

표 3

고분자 물질	Dopant	증폭파장	이득(dB)
고분자 광섬유 증폭기 (POFA)	Rhodamin 6G	0.57 μ m	30
	Rhodamin B	0.62 μ m	
	Perylene Red		
GRIN형 POFA	Rhodamin B	0.59 μ m	27(5 cm 광도파로)
Photolime Gel	Nd ³⁺ (1.03×1020 cm ⁻³)	1.06 μ m	8.5(2.2 cm 광도파로)
Teflon Capillary Filled with	Europium hexafluoro-		4.1
Poly(lauryl methacrylate)	roacetate		(1.5 cm $\times$ 180 μ m)

폭기는 플라스틱 광섬유(POF)에 유기 염료인 Rhodamine계 광염료를 도핑하여 550-650 nm 파장 영역에서 25 dB 이상의 큰 이득을 얻었다. 또한 수용성 고분자인 photolime gel에 Nd³⁺를 도핑하여 1.06 μ m 파장에서 8.3 dB의 이득을 얻었다.

하지만 가장 필요한 통신 영역인 1.3 μ m 및 1.5 μ m 파장 영역에서의 고분자 광증폭기는 아직 보고된 바 없다. 이러한 통신 영역에서의 증폭이 이루어지기 위해서는 고분자 매질에 희토류족 이온의 효율적인 도핑이 필요하다.

1960년대의 Snitzer는 Nd ion을 fused quartz fiber에 doping하여 보여 주었다. 1970년대에는 doped glass에 Nd³⁺를 doping하여 광도파로를 박막으로 제작하여 증폭 현상을 관찰하였다.

Inverted neodymium은 stimulated emission을 통하여 광증폭이 가능한 것으로 알려져 있다. 희토류의 경우

전자가 찬 두개의 외부 shell(5s & 5p)과 내부의 meta stable 4f shell과의 파장은 host 물질에 민감하지 않은 것으로 알려져 있다. 따라서 희토류를 사용한 소자에 증폭 효과를 줄 수 있다. 희토류가 도핑된 LiNbO₃, LiTiO₃ 등의 결정체 등을 사용되었고, 최근에는 NdCl₃-doped-photolime-gelatin-thin-film에서 광증폭이 보여졌다.⁵⁴

희토류 원소(RE salt ion)를 고분자에 용해시키는 것은 힘든 것으로 알려져 있다. 이러한 점을 해결하기 위하여 chelated RE ion을 사용하여 Host-guest 계에서 PMMA, PMMA-DR1, polystyrene를 호스트로 하여, tris(2,2,6,6-tetramethyl-3,5-heptanedionato) Nd[Nd(TMHD)₃], Nd hexafluoro-acetylacetonate, Nd trifluoro-acetylacetonate, Nd I-proposide를 guest로 하여, σ (absorption cross section) $\sim 10^{-20}$ cm², Nd³⁺ concentration은 $2 \sim 10 \times 10^{19}$ cm⁻³로 녹이는 것이 가능하였다.^{55,56}

5. 결 언

현재의 광소자는 전자소자와 비교하여 소자의 단가가 매우 높으므로 추후의 광시스템이 경쟁력을 갖추려면 광소자 및 시스템의 기술성 못지않게 경제성도 고려되어야만 하는데 반도체 및 무기체를 이용할 경우보다는 고분자를 사용하는 것이 적합할 것으로 예측된다. 고분자의 광소자로서의 역할은 비교적 역사가 짧지만 광손실, 열광학 계수, 전기광학 계수, 광증폭 기능 이외에도 완전 광소위칭 기능까지 모두 갖추 수 있으므로 연구 결과에 따라 고분자의 역할은 매우 중요해질 수 있다. 또한, 고분자 광소자의 연구 개발은 고분자 소재에 따라 성패 여부가 달려있으므로 다양한 광기능을 갖는 고분자 소재의 개발이 시급하다.

참 고 문 헌

1. M. Sakaguchi et al., Proceedings of ECOC/IOOC'85, 2, 81, Venezia, Italy (1985).
2. S. Suzuki et al., Proceedings of Topical Meeting on Photonic Switching, 21, Nevada (1987).
3. M. Renaud et al., IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, 2, 277 (1996).
4. E. Pennings et al., IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, 2, 151 (1996).
5. P. A. Perrier et al., OFC'96, 218 (1996).
6. G. K. Gopalarkrishnan et al., Electronic Lett., 28, 826 (1992).
7. M. Okuno et al., NTT Review, 7(5), 57 (1995).
8. U. Fischer et al., IEEE Photonic Technol. Lett., 5, 785 (1993).
9. N. Takato et al., IEEE, 6(6), 1003 (1988).
10. Y. Inoue et al., IEEE Photonics Technol. Lett., 6, 626

- (1994).
11. S. Suzuki et al., Electronic Lett., 30(8), 642 (1994).
12. H. M. M. Klein Koerkamp et al., Proceedings of Integrated Photonic Research, 274, San Francisco (1994).
13. M. Usui et al., Electronics Letters, 30, 958 (1994).
14. L. Eldada et al., SPIE, 3006, 344 (1996).
15. G. Fischbeck et al., Electron. Lett., 33, 518 (1997).
16. B. Strebel et al., Electronics Lett., 30, 639 (1994).
17. Tatsuo Izawa, ECOC '91, WEB6-1(1997).
18. Imamura et al., Electronics Letters, 27, 1342 (1991).
19. T. Matsuura et al., Electronics Letters, 29 (3), 269 (1993).
20. T. C. Kowalczyk et al., J. Appl. Phys., 76 (4), 15, 2505 (1994).
21. A. J. Beuhler et al., IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part B, 18, 232 (1995).
22. L. Eldada et al., J. Lightwave Technol., 14 (7), 1704 (1996).
23. P. R. Resnick et al., Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 167, 105 (1990).
24. L. A. Hornak, "Polymers for Lightwave and Integrated Optic", Marcel Dekker Inc., New York, 1992.
25. I. McCulloch et al., J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem., 33, 1177 (1995).
26. D. K. Paul et al., SPIE, 2153, 265 (1994).
27. D. W. Hewak et al., SPIE, 1213, 86 (1990).
28. J. M. Hagethorst-Trehwella et al., SPIE 1777, 379 (1989).
29. J. Vydra et al., SPIE, 2527, 171 (1995).
30. B. L. Booth et al., J. Lightwave Technol., 7, 1445 (1989).
31. J. M. Cariou et al., Appl. Opt., 25, 334 (1986).
32. M. Haruna et al., Appl. Opt., 21, 3461 (1982).
33. Y. Hida et al., Electronic Lett., 30, 959 (1994).
34. R. Lytel et al., SPIE, 2025, 14 (1993).
35. R. H. Page et al., J. Opt. Soc. Am. B, 7, 1239 (1990).
36. C. C. Teng et al., Appl. Phys. Lett., 66, 667 (1995).
37. F. Charra et al., QELS'95, QMA1-1(1995).
38. W. Chalupczak et al., Opt. Comm., 126, 103 (1996).
39. Y. Shi et al., III J. of Selected Topics in Quant. Electron., 2 (2), 289 (1996).
40. W. Wang et al., Appl. Phys. Lett., 67, 1806 (1995).
41. D. G. Girton et al., Appl. Phys. Lett., 58, 1730 (1991).
42. S. G. Han et al., OECC'96, 19C1-4 (1996).
43. A. Neyer et al., J. Lightwave Technol., 3, 635 (1985).
44. S. G. Han et al., Electron. Lett., 32 (1996).
45. S. Ura et al., Jpn. J. Appl. Phys., 31, 1378 (1992).
46. M.-C. Oh et al., IEEE J. Quantum Electron., 31, 1698 (1995).
47. M.-C. Oh et al., Appl. Phys. Lett., 67, 1821 (1995).
48. M.-C. Oh et al., Elect. Lett., to be published.
49. Y. Hida and S. Imamura, Jpn. J. Appl. Phys., 34, 6416 (1995).
50. K. Sasaki et al., Appl. Phys. Lett., 63(7), 883 (1993).
51. K. Sasaki et al., SPIE, 2289, 142 (1994).
52. R. T. Chen et al., SPIE, 1774, 87 (1993).
53. P. K. Sharms et al., POF'93, 115 (1993).
54. R. T. Chen et al., IEEE Photonic Tech. Lett., 5, 1328 (1993).
55. A. F. Garito et al., J. Opt. Soc. Am., 14, 155 (1997).
56. A. R. Mickelson et al., J. Appl. Phys., 79, 2868 (1996).