

고분자 광도파로 소재 개발의 최근 동향 및 전망

김 환 규 · 송 영 배 · 백 남 섭

1. 서 론

최근 폭발적으로 증가하는 인터넷의 보급으로 정보화 사회는 양적으로나 질적으로 우리들이 예상한 것보다도 훨씬 급속히 세상을 변화시키고 있다. 이와 같이 인류는 지금 “초정보화 시대”라고 불러야 할 전례 없는 신문명 사회에 돌입해가고 있다. 초정보화 사회에서는 컴퓨터가 온갖 시스템 기기에 내장되고 이것들 모두가 유기적으로 결합되어 전세계를 연결함으로써 폭발적으로 증가하는 다양한 형태의 정보(음성, 데이터, 문서, 영상, 동화상, CATV 및 HDTV 등)를 하나의 통신망으로 통합시켜 제공하는 광대역 초고속정보망의 구축이 새로운 초점이 되고 있다. 이와 같이 대용량의 정보 처리가 필요하게 될 새 천년의 초고속 정보 통신 시대에는 개인 당 수백 Mbps 내지 수 Gbps의 통신 대역폭이 필요할 것으로 예상되며, 이런 대역폭을 수용하기 위해서 수백 Tbps 규모의 광전송 기술이 요구되고 있다(그림 1).

새로운 변혁시대인 초고속 정보 통신시대에는 대

용량의 광통신 및 정보기록과 정보처리의 초고속화를 구현하기 위해서는 신 개념의 광소자 및 부품들의 개발이 필수적이다. 왜냐하면 현재의 눈부신 정보·통신 산업 발전의 물적 토대인 반도체 재료와 강유전체 무기재료를 근간으로 발전한 기존의 광소자들이 거의 한계 성능을 보이고 있기 때문이다. 또한 이러한 소재들은 형태의 변형이 어려움은 물론 제한된 분자구조 때문에 사용 목적에 부합되는 성능을 나타내도록 조성과 구조를 조절하기 매우 힘들다. 결국 초고속 정보 통신 사회를 조속히 실현하기 위



송영배
1990~ 1998 경일대 섬유공학과(공학사)
1998~ 현재 한남대 고분자학과(석사과정)



김환규
1980 울산대 공업화학(공학사)
1982 KAIST 화학(이학석사)
1986~ 1990 Carnegie Mellon Univ. 화학(이학박사)
1991~ 1993 Cornell Univ. 재료공학과 (post. doc.)
1982~ 1986 한국화학연구소 공업화학연구원 (연구원)
1993~ 1994 한국전자통신연구원 광고환연구실 (선임연구원)
1994~ 현재 한남대학교 화공·고분자학부 부교수



백남섭
1993~ 2000 한남대 고분자학과(이학사)
2000~ 현재 한남대 고분자공학과 (석사과정)

Recent Trends and Prospects for Development of Low-Loss Polymeric Waveguide Materials

한남대학교 화공·고분자공학부 (Hwan Kyu Kim, Young-Bae Song, and Nam-Seob Baek, Department of Polymer Science and Engineering, Hannam University, 133 Ojung-dong Daeduck-gu, Taejon 306-791, Korea)

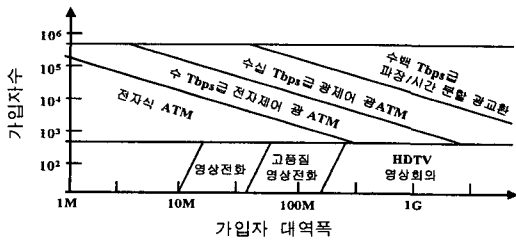


그림 1. 멀티서비스와 광기술의 전망.

해서는 기존 물질의 한계를 빨리 극복하도록 신 소재의 개발에 힘써야 한다. 이러한 시대 요구에 따라 유기고분자 소재 연구가 새 천년기의 종합정보통신망 구축을 위한 광정보 재료로서 지대한 관심의 대상이 되어 있으며, 첨단 연구대상으로 가장 각광받고 있다. 이는 유기고분자 소재가 무기재료와 반도체에 비하여 다음과 같은 우수성을 갖고 있기 때문이다. 즉, 분자 화학에 의해서 물질의 성능을 쉽게 제어/합성할 수 있고, 저렴한 가격으로 경제성이 아주 좋고, 응답속도가 빠르고, 광대역폭이 수십~수백 Tbps 정도로 매우 높으며, 소자 제작 공정이 저온에서 단순하고, 가공성이 좋고, 집적화가 매우 유리하기 때문이다. 그러나 유기 고분자 재료가 현재 사용되고 있는 무기재료보다도 특성이 월등히 우수함에도 불구하고 지금까지 상용화되지 않은 이유는 유기 고분자 물질의 광학 성질이 열적 불안정성과 광통신 파장영역($1.3\mu\text{m}$ 또는 $1.55\mu\text{m}$)에서 유기 고분자 재료의 근간이 되고 있는 C-H 결합 배진동(over-tone) 밴드의 광흡수에 의한 광전송 손실이 크기 때문이다. 이러한 문제점들로 인하여 유기 고분자 재료의 개발이 매우 제한되어 왔다.

그러나, 최근에는 광대역 종합정보통신망의 구현에 있어서 대용량 정보의 통신을 위하여 광의 초고속성 뿐만 아니라 병렬성을 이용하여 동시에 여러 개의 파장에 각각의 정보를 실어 전송하거나 신호 처리를 하는 파장분할 다중 방식(wavelength division multiplexing : WDM) 관련 광소자에 필요한 가변파장필터, Arrayed Waveguide Grating(AWG) 파장 다중/역다중 소자, 라우터(router) 등의 WDM 광소자의 개발·응용에 가장 핵심소재가 되는 저손실 단일 모드 도파 특성을 갖는 고분자 광도파로 소재(저손실 선형/열 광학 고분자 소재)의 개발이 절대적으로 필요해짐에 따라 광정보 고분자 소재에 다시 많은 관심을 가지게 되었다.¹⁻⁴

특히 고분자 광도파로 소재는 차세대 광대역 종합

정보통신망의 구현에 절대적으로 필요한 편광 무의존성(polarization insensitivity)을 가질 수 있어 WDM 관련 광소자, 광 상호 연결 소자, 광분할기 및 광결합기(combiner)와 같은 수동소자, 열에 의한 광신호를 제어하는 열 광학 스위치, 가변 감쇄기 등의 열 광학 소자에 응용이 가능하다.⁵

이러한 새로운 광소자에 있어서 기본적인 요소가 되는 것은 저손실 단일 모드 도파 특성을 갖는 광도파로 소재이며, 유리 광섬유(GOF) 재료인 실리카 재료를 근간으로 하여 이러한 광통신 관련기술이 발전되어 왔다. 실리카를 이용한 광도파로 소자는 0.01 dB/cm이하의 낮은 광도파로 손실과 높은 안정성 때문에 많은 연구가 진행되어 다양한 광소자가 상용화되고 있으나,^{6,7} 실리카를 이용해 광도파로를 제작하려면 1,000 °C 이상의 고온 제작 공정과 고가 제조 장비가 필요하다. 또한 고온의 공정을 거치므로 실리칸 기판과 실리카 간에 열팽창계수의 차이로 오는 열스트레스에 의한 편광으로 복굴절률(birefringence)이 달라지는 단점이 있다.⁸ 이러한 단점으로 인해 실리카를 이용한 광도파로 소자는 도파시키고자 하는 광의 편광에 의존하게 되므로 이러한 편광 의존성을 낮추기 위해, 고분자 기능 소자(quarter wave plate)를 삽입하여 사용한다. 그리고 또한 고분자에 비해 1/10정도의 낮은 열광학 효과로 인해 열광학 소자의 구동을 위해 높은 소비 전력이 필요하다. 이와는 달리 고분자 광도파로 소재는 무기재료인 실리카에 비하여 광도파로 소재로 요구되는 여러 가지 특성들, 즉 열 및 환경 안정성, 광통신 파장영역에서의 낮은 광 손실, 미세한 굴절률 조절성, 낮은 복굴절률, 다양한 기판에 대한 접착성, 다층 적층성, 치수 안정성 및 유연성, 연결성, 미세 광부품과의 집적화 용이성, 경제성 등에 있어서 훨씬 많은 장점을 갖고 있다.

지금까지 개발된 저손실 광도파로 고분자 소재들은 저손실 광도파로 소재에 적합하게 개발된 것이 아니라 일반적인 광투과성이 좋은 기존의 플라스틱 광섬유용 물질 및 반도체용 저유전상수 고분자 물질 등의 소재를 응용하고 있거나, $1.3\mu\text{m}$ 이나 $1.55\mu\text{m}$ 의 파장에서 광흡수에 의한 광전송손실을 낮추기 위해 이중 수소 및 불소 치환한 예에 지나지 않아, 내열성, 다층박막화를 위한 내약품성, 전기적 특성, 투명성, 복굴절률 등의 기본적인 저손실 광도파로 고분자 소재 요구 특성을 만족시키지 못하고 있는 실정이다. 최근에 들어서는 저손실 선형 광학 고분자

소재 또는 저손실 고분자 광도파로 소재 (low-loss polymeric optical waveguides, LLPWO)가 속속들이 개발되어 이들의 낮은 광도파로손실, 높은 열광학 효과, 편리한 가공성을 이용한 다양한 광소자 연구가 진행되고 있다.⁹⁻¹¹

2. 고분자 광도파로 소재의 재료 특성

고분자 광도파로 소재는 앞에서 언급했듯이 차세대 종합정보통신망의 구현에 절대적으로 필요한, WDM 관련 광소자뿐만 아니라 광 상호 연결 소자, 광분할기 및 광결합기와 같은 수동소자, 열에 의한 광신호를 제어하는 열광학 스위치, 가변 감쇄기 등의 열광학 소자에 응용되는 핵심소재이다. 이러한 광소자는 편광 무의존성 (polarization insensitivity)이 고속 스위칭 속도성보다 더욱 더 중요한 회상신호의 배분 및 AWG 파장분할형 소자, 단거리 LAN용 회선 다양화 소자, 광정보 통신망의 우회선 확보용 소자, TV수상기, CATV의 튜너 등의 응용되는 새로운 방식의 소자들이다. 이들 소자는 우리의 일 반생활에 현재의 가전제품과 같이 더욱 친밀한 용도로 사용될 것으로 예상되며, 이에 따라 향후 전기광학(또는 비선형 광학) 소자보다 훨씬 큰 시장성이 형성될 것으로 평가되고 있기 때문에, 광도파로 고분자 소재 기술은 차세대 광대역 종합정보통신망의 구현에 절대적으로 필요한 핵심 소재기술이다.

광도파로 소재로 요구되는 재료 특성은 높은 열적 및 환경 안정성, 1.3 μm 이나 1.55 μm 파장에서의 저광진행 손실, 미세한 굴절률 조절성, 다양한 기판의 사용 가능한 접착성, 다층 적층성, 치수 안정성 및 유연성, 연결성, 미세 광부품과의 집적화 용이성, 가격의 저렴성 등이며, 이런 특성에 가장 적합한 재료로 실리카 보다 고분자 광도파로 소재가 더 적합하다. 고분자 광도파로 소재가 요구되고 있는 재료 특성 중에서도 1.3 μm 또는 1.55 μm 에서의 낮은 광진행 손실이 가장 중요한 특성이다. 광도파로의 전체 광손실 ($L_{\text{waveguide}}$)은 물질 고유의 광흡수 ($L_{\text{absorption}}$), 고유 광산란 ($L_{\text{scattering}}$), 그리고 외부 요인 ($L_{\text{extrinsic}}$) 면지, 공정 상에서 야기되는 부정확성, voids, crack, impurities 등으로 구분된다.^{12,13}

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

고분자 물질에서의 광산란에 의한 손실은 주로 Rayleigh 산란에 의해 일어난다.¹⁴

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

α_i 는 내부 산란에 의한 광손실이고, β 는 등온압축률 (isothermal compressibility)이다. 일반적으로 고분자의 광통신 영역에서의 $\alpha_i = 10^{-5}$ dB/cm 정도이며, 등방성 고분자 물질의 Rayleigh 산란 손실은 상온의 1.3 μm 에서 약 10^{-5} dB/cm로 광손실에 큰 영향은 없으며, 외부 요인에 의한 광손실은 공정 최소화를 통해 최소화 할 수 있다. 그러므로, 저손실 고분자 합성을 위해서는 분자 설계 단계에서부터 $L_{\text{absorption}}$ 에 의한 고분자 물질 고유의 흡수를 최소화할 수 있도록 해야한다. 고분자 물질 고유의 광손실은 전자전이 흡수 (electronic transition absorption)와 적외선 진동 흡수 (infrared vibrational absorption)에 의한 것이다. 고분자에서 전자전이 흡수 손실은 주로 C=C 이중 결합의 $\pi-\pi^*$ 전이와 C=O 결합의 $n-\pi^*$ 전이에 따른 흡수로 자외선-가시광선 (UV-visible) 영역에서 일어나기 때문에, 광통신 파장 영역인 1.3 μm 또는 1.55 μm 에서의 전자 전이에 의한 흡수는 무시된다. 그러나 일반적으로 고분자 소재는 적외선 영역에서 분자 구조 내의 진동에 의한 고유의 흡수 영역을 가지고 있다. 특히, C-H(또는 O-H, N-H) 결합에 의한 근적외선 영역의 진동 흡수 손실은 2차 및 3차의 조화 배진동 (harmonic overtones)에 기인하는 것이 광손실의 주된 원인이다 (그림 2). 이러한 광손실 문제는 C-H 결합을 이중수소 (C-D)나 불소 (C-F)로 치환하여 환산 질량을 증가시킴으로써 조화 배진동은 장파장으로 이동하게 되고 결과적으로 광통신 파장 영역에서의 흡수 최소화에 의해 해결된다. Hoechst Celanese 사의 모델 용매들의 고유 흡수 실험 결과에 따르면 지방족 (aliphatic) C-H 결합에 의한 흡수 손실이 방향족 (aromatic) C-H 결합에 의한 흡수 손실에 비해 1.3 μm 또는 1.55 μm 에서 각각 3배, 5배 크고 중수소로 치환했을 경우 1.3 μm 에서는 현저히 흡수세기의 감소가 있으나, 1.55 μm 에서는 아직 약간의 흡수가 있으며 특히 1.53 μm 에서 강한 조화 배진동 흡수 피크가 있다. 그러나 불소로 치환했을 경우 1.1~1.7 μm 에 걸쳐 거의 흡수에 의한 손실이 나타나지 않는다 (그림 3).¹⁵ 다시 정리하면, 1.3 μm 에서는 C-H 대신에 C-D나 C-F로

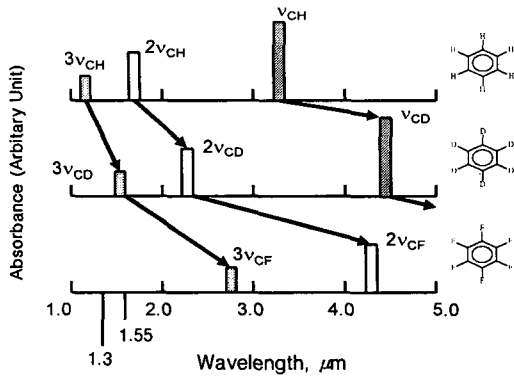


그림 2. C-H, C-D, 그리고 C-F 결합에 따른 2차 및 3차의 조화 배진동의 장파장으로의 이동.

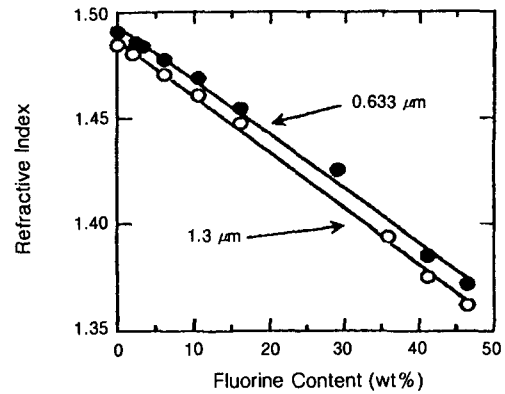


그림 4. Relationship between the d-PMMA fluorine content and refractive index. Refractive index were measured at both 0.633 and 1.3 μm.

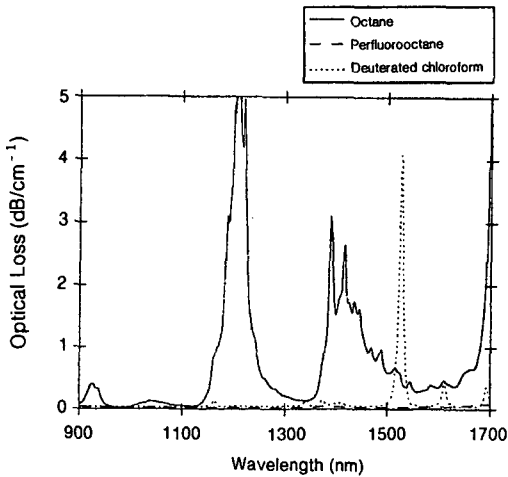


그림 3. Optical loss in the near infrared of solvents: octane, perfluorooctane, and deuterated chloroform.

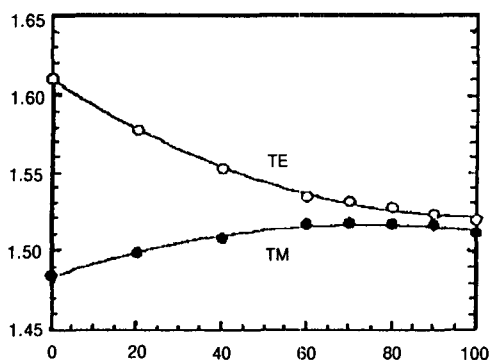
치환하면 광전송 손실을 줄일 수 있으나, 1.55 μm에서는 C-H 대신에 C-F로 치환해야 광전송 손실을 현저히 줄일 수 있다.

광도파로 소자 제작을 위해 코어 층과 클래딩 층의 굴절률 조절이 매우 중요하다. 이를 위해 고분자 소재의 광굴절률은 공중합을 이용하면 쉽게 조절할 수 있다. 그의 한 예를, 그림 4에서 d-MMA 및 d-FMA의 두 단량체의 조성비를 달리하면서 공중합시켜 얻어진 공중합체에 대한 불소 함유량에 대비한 굴절률 변화를 나타내었다. 그림 4에서 알 수 있듯이 불소 함유량이 증가하면 굴절률이 감소함을 보여 주고 있으며, 이 공중합을 이용하면 굴절률의 차를 0.0001까지 조절할 수 있다.^{16,17}

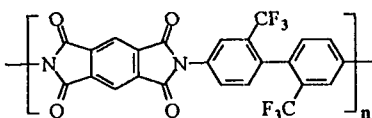
또한 광도파로형 고분자 소재의 요구되는 중요한

인자는 복굴절률이 없는 물질을 개발하는 것이다. 광소자가 편광에 의존하지 않고 안정되게 작동되려면, TE 모드와 TM 모드 사이의 굴절률의 차(복굴절률)가 $(\lambda_{TE} - \lambda_{TM}) < (1/10) \lambda$ 를 만족해야 한다.¹² PMMA이나 실리콘 레진 등과 같은 등방성 비정질 물질의 복굴절률($n = C_{60} \cdot \sigma$)은 주로 공정상의 열스트레스(σ)에 의해 나타나는데, C_{60} 은 스트레스 광학계수, 이것을 줄이려면 고분자의 경우 복굴절률이 반대로 나타나게 공중합과정을 시키거나, 다른 고분자를 블렌딩(blending)하여 사용하면 된다. 그러나, 폴리이미드와 같은 비등방성 비정질 고분자는 구조 자체가 비등방성 특성을 가지고 있어 복굴절률이 아주 큰 것이 단점으로 지적되고 있고, 이를 줄이는 분자 설계를 통한 등방성 특성을 가지는 소재 개발이 절대적으로 필요하다. 이를 위해 고분자 소재의 복굴절률은 공중합을 이용하면 쉽게 줄일 수 있다.

그의 한 예를, 그림 5에서 6FDA 및 PMDA의 두 단량체의 조성비를 달리하면서 TFDB와의 공중합시켜 얻어진 공중합체에 대한 6FDA 함유량에 대한 복굴절률 변화를 나타내었다. 그림 5에서 알 수 있듯이 굴곡된(kinked) 6FDA 함유량이 증가하면 복굴절률이 감소함을 보여 주고 있으며, 이 공중합을 이용하면 복굴절률의 차를 0.01 이내로 줄일 수 있다.¹⁸ 또한 NTT에서는 10FEDA의 단량체를 합성하여 다양한 디아민 유도체와 축중합하여 얻어진 여러 가지의 폴리이미드를 개발하여 구조-복굴절률 특성 조사를 하여 표 1에 나타내었다. 이 표에서 알 수 있듯이 선형 구조가 아닌 폴리이미드와 유연기를 가지는 폴리이미드는 낮은 복굴절률 값을 나타내었다.¹⁹



6FDA/TFDE



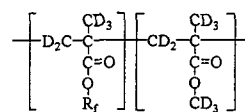
PMDA/TFDB

그림 5. Refractive indices of polyimides and their copolyimides for TE and TM polarization at a wavelength 1.3 μm.

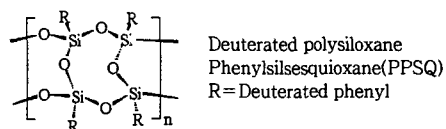
3. 고분자 광도파로 소재의 개발 현황

초기의 고분자 광도파로 소재를 이용한 평면 도파로형 광소자의 연구는 주로 기존의 PMMA를 사용하여 시작되어졌다.¹⁶ 그러나 PMMA는 근적외선(Near IR) 영역에서의 광손실이 1 dB/cm 이상으로 크기 때문에 이의 개선을 위하여 일본의 NTT에서는 이중수소화(deuterated) PMMA와 이중수소 및 불소가 함께 치환된(deuterated/perfluorinated) PMMA를 사용해 광손실이 1.3 μm에서 0.08 dB/cm로 아주 우수한 저손실 광소자를 구현하였다.^{17,20} 그러나 PMMA계는 T_g 가 100 °C 정도로 열 안정성이 떨어진다. 이의 문제점을 해결하고자 NTT에서는 열분해 온도가 400 °C 이상인 열경화성 이중수소 치환된 폴리실록산(deuterated polysiloxanes)을 개발하였고,²¹ 내열성, 가공성이 뛰어난 다양한 종류의 완전히 불소 치환된 폴리이미드(perfluorinated polyimides)를 개발하여 발표하였다.^{22,23} 또한 미국의 Cornell 대학에서는 열적 안정성을 가지며 광손실이 0.633 μm에서 2.0 dB/cm 이하이고, 라디칼 공중합으로 굴절률

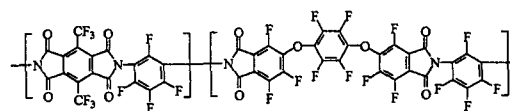
▶ Planar Waveguide Materials at NTT.



PFPMA, R_f: Perfluoralkyl

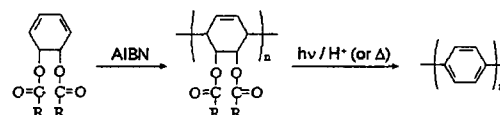


Deuterated polysiloxane
Phenylsilsesquioxane(PPSQ)
R=Deuterated phenyl



10FEDA/4FMPD

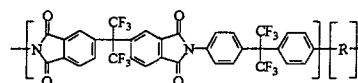
▶ Poly(p-phenylene)-based Materials at Cornell University.



조절이 가능한 폴리페닐렌(poly(phenylene))을 개발하여 발표하였다.²⁴

미국의 Amoco Chemicals사에서 광소자용으로 개발하여 상용화한 불소 치환된 폴리이미드(fluorinated polyimides) (Ultradel 9000D series)는 광손실이 1.3 μm이나 1.55 μm에서 각각 0.5, 0.9 dB/cm로 비교적 크고, 복굴절이 큰 단점이 있으나, 광가교(photo-crosslinking) 되도록 분자 설계되어 광가공기술(photolithography)에 의한 보다 더 단순한 제작 공정으로 쉽게 광소자를 제작할 수 있어 많은 연구가 이루어졌다.²⁵

▶ Ultradel 9000 Series at Amoco Chemical.



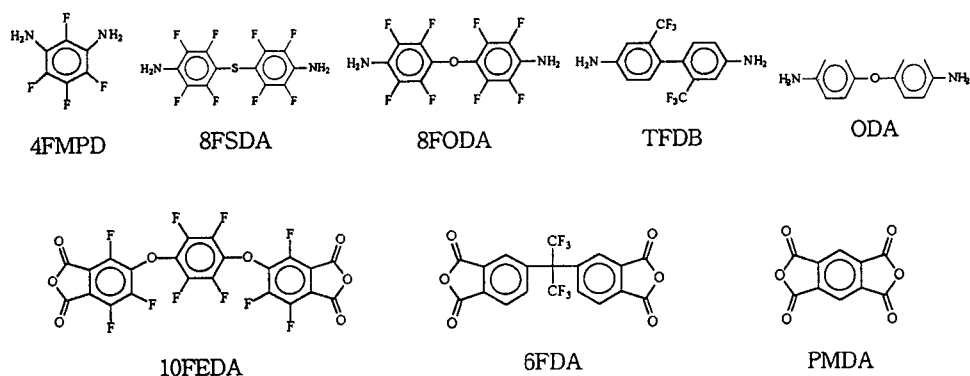
Ultradel 9020D, Ultradel 9120D

R: alkylated photocrosslinking group

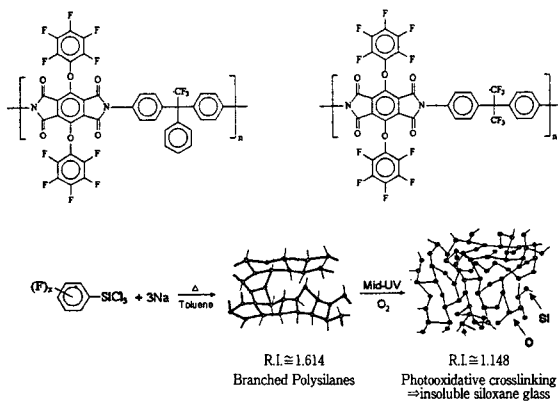
본 연구실에서는 폴리이미드의 구조 자체에서 기인하는 편광 의존성을 개선시키기 위한 방법으로 폴리이미드의 겹사슬에 불소 치환된 방향족 그룹을 도입하여 3차원 구조를 가지게 함으로써 등방성 특성을 가지는 불소가 치환된 폴리이미드를 개발하여 발

표 1. Properties of Perfluorinated, Partially Fluorinated, and Unfluorinated Polyimides

	Fluorine Cont.(wt%)	Decomposition Temp.(°C)	T_g (°C)	Dielectric Constant(ϵ_r)	Average Reflective Index(n)	Birefringence ($n_{TE} - n_{TM}$)
10FEDA-4FMPD	36.6	501	309	2.8	1.562	0.004
10FEDA-8FODA	38.4	485	300	2.6	1.552	0.004
10FEDA-8FSDA	37.7	488	278	2.6	1.560	0.006
10FEDA-TFDB	35.1	543	312	2.8	1.569	0.009
6FDA-TFDB	32.3	553	327	2.8	1.548	0.006
PMDA-TFDB	22.7	553	327	3.2	1.608	0.136
PMDA-ODA	0	613	>400	3.5	1.714	0.088
		608	>400			



▶ Fluorinated Polyimides and Polysilynes at Hannam University.



표하였다.²⁶ 또한 열적 성질이 우수하며 광산화 가교(photooxidative crosslinking) 반응으로 쉬운 제작 공정과 0.633 μm 에서 0.6 dB/cm 이하의 광손실을 가지는 불소 치환된 폴리실린(polysilynes)을 개발 발표하였다.²⁷

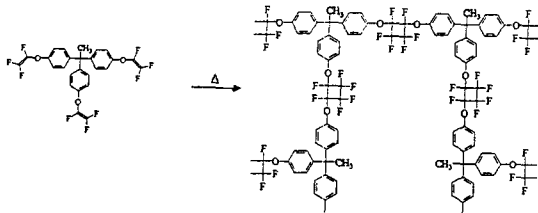
또한, DOW Chemical사에서는 열적 안정성($T_g = 400^\circ\text{C}$)이 우수하며, 1.55 μm 의 광통신 영역에서 0.25 dB/cm 이하의 광손실 특성을 나타내고, 충전

성(gap filling)이 우수한 PFCB(perfluorocyclobutane) 방향족 에테르 폴리머(aromatic ether polymers)를 개발 발표하였다.²⁸

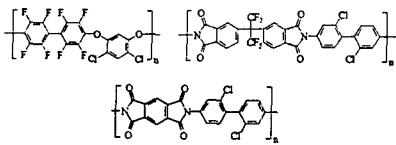
국내의 삼성전자에서는 완전히 불소가 치환된 폴리이미드의 경우 물질 자체의 접착력이 없어서 박막 가공이 어려움을 피하기 위해 주사슬의 디안하이드라이드(dianhydride)에 불소(C-F)가 치환되고 디아민에 염소(C-Cl)가 치환된 폴리이미드 및 불소와 염소가 치환된 폴리머를 개발 발표하였다. 염소와 불소의 함량에 따라 굴절률의 미세 조절이 가능하였고 열적성질이 우수한 특성을 보였다.²⁹ 한국전자통신연구원(ETRI)에서는 소자제작 공정과 작동상태에서 필요로 하는 우수한 열적 안정성과 화학적 안정성을 만족시키기 위하여 열경화에 의해 가교화된 불소 치환 폴리 아릴렌 에테르(crosslinkable fluorinated poly(arylene ethers))를 개발하여 광도파 손실이 0.5 dB/cm이하이며, 복굴절률이 0.003 정도로 편광의존성이 낮은 특성을 나타내었다.³⁰

최근에는 미국의 Allied Signal사에서는 아크릴레이트(acrylate)의 광가교 특성을 이용하여 350 $^\circ\text{C}$ 이상의 열안정성을 가지는 자외선으로 경화가 가능한 불소 치환 아크릴레이트(UV-curable fluorinated

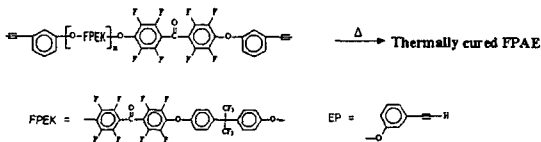
▶ PFCB(perfluorocyclobutane) Aromatic Ether Polymers at DOW Chemical.



▶ Chloro-fluorinated Polymers at Samsung.



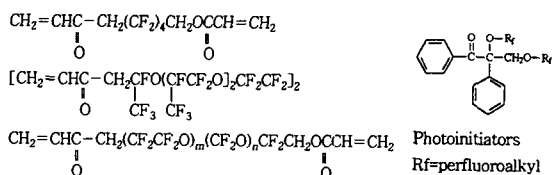
▶ FPEK-EP at ETRI.



acrylate)를 이용한 광소자 개발을 발표하였다.^{12,31} 이 물질의 특징은 기존의 광가공기술(photolithography)이나 레이저 직접 전사(laser direct-writing) 공정으로 쉽게 소자 제작이 가능하여 소자 제작 단가를 낮출 수 있고, 1.3 μm 또는 1.55 μm에서의 광손실이 각각 0.03, 0.05 dB/cm로 거의 실리카(SiO₂)에 대등한 수준에 이르렀으며, 굴절률을 1.3에서 1.6까지 단계적으로 조절 가능하며, 이의 복굴절률이 0.0008 정도로 편광 무의존성이 매우 높았다.

▶ UV-curable Fluorinated Acrylate at Allied Signal.

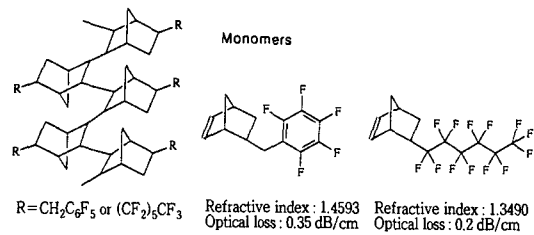
Fluorinated Acrylate prepolymer



BF Goodrich Chemicals사/Kent 주립대학교에서 는 불소가 치환된 방향족 및 지방족 결사슬을 가진

노보레인(Noborenes) 단량체를 공중합하여 복굴절률이 0.0002의 값을 가지며 열적 안정성($T_g=360 \sim 290 \text{ }^\circ\text{C}$)이 폴리이미드와 대등하고 굴절률의 미세 조절성이 우수하며 유리섬유와 동일한 굴절률(1.445)을 가지는 폴리노보레인(Polynoborenes)을 최근에 개발하였으며, 이에 대한 연구가 진행 중에 있다.^{32(a)}

▶ Polynoborenes at BF Goodrich Chemicals.



그 외에도 최근 선형 광학 고분자 광소자에 관한 중요성이 증가됨에 따라 물질의 요구 특성이 비슷한 기존의 플라스틱 광섬유(plastic optical fiber)용 물질 및 반도체용 저유전상수 고분자 물질 등의 화학적 구조의 변화를 통한 선형 광학 고분자 소재 개발 연구가 활발히 진행되고 있다.^{8(a),32(b,c)}

4. 열광학 소재에의 응용

현재의 광통신 시스템은 시간분할 방식(TDM)과, 파장 분할 방식(WDM) 등의 광대역화를 피하고 있으며, 이에 필요한 광신호의 발생은 반도체 레이저를 직접 구동시키는 직접 변조 방식을 사용하고 있으나 보다 높은 해상력과 고속정보 처리가 필요한 화상회의, 양질의 HDTV, 영상화면의 전송 등과 같은 고도의 종합통신망에서는 비선형광학 물질을 사용하는 수십 Gbps이상의 처리능력을 갖는 Mach-Zender interferometer(MZI) type의 간접 구동 방식이 사용될 전망이다. 이들이 바로 전기적 신호를 광신호로 변환시키거나, 신호전행 방향을 조정하는 스위칭 등으로 대별되는 전기광학(EO) 소자들이다. 이들 전기광학 소자들을 이용할 경우 nano second (10⁻⁹sec) 이하의 짧은 시간에 정보처리가 가능하다는 장점 때문에 모형 제작용(prototype) 전기광학 소자들이 미국, 일본, 독일 등에서 이미 발표되어 있으며 조만간 상업화 될 것으로 기대된다. 국내에

서도 비록 외국의 비선형광학 물질을 사용하였지만, 1995년에 한국전자통신연구소에서 구동 특성 등이 매우 우수한 전기광학 소자를 개발하여 외국의 전자박람회출품하여 호평을 받았다. 이에 따라 국내의 삼성전자 및 LG 전자에서도 이에 큰 관심을 가지고 연구를 수행하고 있다.

반면에 이러한 고속 통신용 WDM 광네트워크 속에 있는 단말기(port)를 약 10 ms이하의 짧은 시간에 연결하여 주면서 전기광학 소자의 단점인 편광 의존성, 장기 신뢰성(시간 및 온도에 따른 구동 성능(performance))의 감소, 광손실 등의 일반적인 문제를 해결할 수 있는 새로운 광소자의 개발이 필요하다. 이는 각 광소자의 사용분야에 따라 분류될 수 있는데, 경우에 따라서는 편광 무의존성(polarization insensitivity)이 고속 스위칭 속도보다 더욱 중요할 필요가 있는 TV수상기, CATV의 튜너, 광정보 통신망의 우회선 확보, 단거리 LAN용 회선 다양화, 회상신호의 배분 및 AWG 파장분할형 소자 등에서는 이러한 요구가 더욱 필요하며, 이들 새로운 방식의 소자들은 우리의 일반 생활에 더욱 친밀한 용도(예: 가전제품)로 사용될 것으로 기대되기 때문에 전기광학 소자보다 훨씬 시장성이 크다고 할 수 있다.³³ 이와 같은 특성을 가지는 가장 유력한 대체 소자가 바로 열광학 소자이다. 더욱이 전자산업에서의 회로기판에 비유될 수 있는 광도파로회(photoic lightwave circuit: PLC) 또는 광집적회로(integrated optical circuit)의 구성에서는 이 열광 소자의 필요성이 더욱 중요하며 이러한 광소자 기술들은 머지 않은 장래에 고속 광통신망의 필수 소자로 사용될 것으로 추정되고 있다. 열광학 소자의 작동원리는 전기광학 소자의 원리와 같이 광도파로내의 굴절률 변화를 응용한 것으로서 전기광학 소자에서의 전기적인 광신호를 열(heater)로 바꾸어 놓은 것으로서 **그림 6**과 같은 구조를 가진다.³⁴⁻³⁶

즉 열에 의해 코어층의 광굴절률이 변화하고, 이에 따라 도파로내의 광신호 진행 방향이 바뀌게 되어 스위칭 역할을 하게 되는 것이다. 이 열광 소자는 고분자계 전기광학 소자에 사용되는 전기광학 특성 부여를 위한 비선형광학 물질, 즉 극성(polar) 화합물인 발색단(chromophore)의 사용이 요구되지 않고, 또한 전장배열(poling)이라는 비대칭성(noncentrosymmetry) 구조제작 공정이 필요하지 않기 때문에 광도파로 및 스위칭의 제작이 매우 단순하다는 장점과 함께 시간에 따른 성능(performance)의

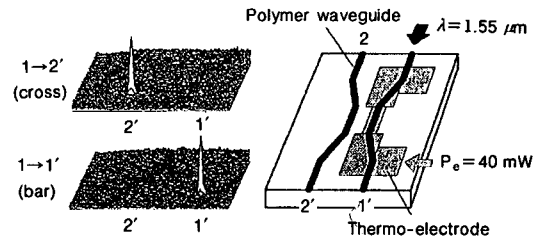


그림 6. Schematic layout and near fields of the switching states of an asymmetric polymer-based TO-(2×2)-DC-type switch ($\lambda=1.55 \mu\text{m}$).

감소(열적 안정성 문제), 극성물질 존재관련 광 진행 손실(optic loss)의 감소 등과 같은 비선형광학 소자에서 발생하는 제반 문제가 거의 없다는 큰 장점이 있다. 즉 열광 소자(thermo optic(TO) switch)에는 열에 의해 굴절률 변화(dn/dT)가 있는 모든 물질들, 예를 들면 무기물(silica, LiNbO_3), 및 유기 고분자가 사용될 수 있다.

최초로 제안된 TO 스위치는 1982년 M. Haruna 등에 의해 제작된 실리카(silica)를 이용한 것이며 이후 여러 가지 무기물, 그리고 고분자 물질들을 이용할 수 있음이 발표되고 있다.³⁷ 무기물과 고분자 물질들의 차이는 아래 표 2에 나타난 바와 같이 무기물의 dn/dT 의 값이 고분자의 그것에 비해 작기 때문에 구동소비전력이 매우 커 열광학용 소재로서는 부적합하다. 다만 TO의 특성 연구나 모형 제작용(prototype) 구동소자 연구 등에서는 아직도 많은 연구가 진행되고 있다.³⁵

반면 고분자의 열에 의한 광굴절률 변화는 온도에 따른 밀도 변화 즉 열팽창 계수와 밀접한 상관관계를 가지고 있으며, dn/dT 의 값은 무기물에 비해 10 배 이상 커 전력손실을 크게 줄일 수 있다. 고분자의 dn/dT 값은 $1.0\sim 3.0 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 범위로서 TO 소자로서의 요구 특성 범위에 잘 일치하고 있다.³⁶

열광 소자는 전기광학 소자에 반하여 편광 무의존도, 시간에 따른 성능의 안정성, 그리고 저손실 등의 장점 때문에 전화/통신회사들인 NTT(일본), AKZO Nobel(네덜란드) 등의 선진 우수 기업들을 중심으로 주도적으로 연구되고 있으며, 모형 제작용 실험소자들인 (2×2), (4×4), (8×8) 열광 소자용 스위치들의 개발을 최근에 발표하였다. 열광학 스위칭소자의 기본적인 개념 자체는 1982년 M. Haruna에 의해 제작된 실리카 물질을 이용한 무기계 소자에서부터 출발되었으며,³⁷ 1989년에 이르러서 네덜란드의 Diemeer 등에 의해, 매우 단순한 고

표 2. 열광학소자 (Thermo-optic Device) 의 비교

	실리카(SiO ₂)	폴리머
열광학계수(dn/dT)	낮다($-1.4 \times 10^{-5}/K$)	높다($-14 \times 10^{-5}/K$)
열전도성	높다(1.4 W/m K)	매우 낮다(0.05~0.2 W/m K)
소비전력	높다(~500 mW)	매우 낮다(5~50 mW)
소자구조	interferometric (Mach-Zehnder)	interferometric/digital (MZ, DC/X, Y-switch)
광손실(통신파장 영역)	매우 낮다(0.04 dB/cm)	낮다(<0.3 dB/cm)
속도	1 ms 정도	1 ms 정도
편광의존성	낮다(<1 dB)	매우 낮다(<0.3 dB)
가격	저렴	저렴
대표 소자	※ Power splitter ※ AWG WDM	※ Power splitter ※ Thermo-optic switch ※ AWG WDM

분자이며 T_g 를 가진 폴리우레탄(polyurethane)과 PMMA를 사용한 열광학 스위칭소자를 He/Ne laser에서 구동시킴으로서 고분자에 대한 관심이 높아졌다.³⁴

1.3 μm 의 광원을 사용한 본격적인 광통신용 고분자계 열광학 스위칭소자는 1993년에, NTT의 Hida 등에 의해 발표된 (2×2) 스위칭소자로서 이중수소화 또는 이중수소 및 불소가 함께 치환된 메타아크릴레이트(methacrylate)를 열광학 스위칭소자의 코어(core)물질로 사용한 것이다.³⁹ 이들 연구팀은 1994년 내열성이 우수한 이중수소화 방향족 실록산(siloxane)을 사용한 광도파로의 제작, PMMA계 고분자를 사용한 AWG 파장분할형 소자(arrayed-wave guide multiplexer)를 발표하는 등 활발한 연구활동을 계속하고 있다.^{10,33}

이들과는 별도로 독일의 Heinrich-Hertz Institutz (HHI)의 Strebel 등은 광경화성 고분자인 BDK/PMMA를 사용한 도파로 제작방법을 사용하여 1 ms의 응답시간과 편광의존도가 0.5 dB보다 작은 우수한 특성의(4×4) 열광학 스위칭소자를 제작 발표 하였으며 구동소자 제작 및 광도파로 설계 등의 시뮬레이션을 통해 소자 제작에 필요한 중요한 연구들을 발표하였다.^{35,40} 최근 네덜란드 AKZO Nobel 회사에서는 자세한 화학적인 구조가 전혀 밝혀지지 않은 “할로겐화고분자”를 사용한 (1×2) 스위치를 개발하였는데 이 소자의 특성으로서는 3.6 dB의 삽입 손실(insertion loss), 1 ms의 스위칭시간, 그리고 편광의존성은 거의 없다고 발표하였다. 이 AKZO Nobel에서는 개발된 (1×2) 스위치를 모형 제작으로 하는 열광학 스위칭소자를 Beam Box[®]이

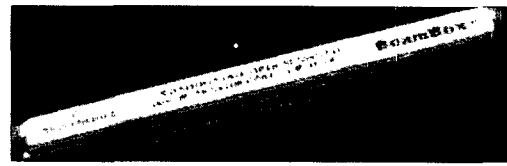


그림 7. 시판되고 있는 회사의 Beam Box[®] (JDS Uniphase가 98. 12 AKZO Nobel사를 합병함).

라는 상품명으로 판매하기에 이르렀다(그림 7).

5. 광증폭용 고분자 소재

광을 이용한 정보 통신 및 교환에 있어 광소자와 광섬유를 통한 광신호 전송 및 광신호 변조, 스위칭 등의 신호 처리 과정에서 광전송 손실이 심각하게 일어나서 광정보를 상실하게 되므로 반드시 광신호 증폭이 필요하다. 유리 광섬유에 Er³⁺ 이온을 도핑하여 1.55 μm 파장을 증폭할 수 있는 광증폭기(소자)의 개발은 기존의 광통신 개념을 바꾸어 놓은 하나의 혁명으로 받아들여지고 있다. 장거리 광통신에서의 주된 파장이 1.3에서 1.55 μm 파장 대역으로 바꾸는 계기가 되었으며, 최근에 많은 연구가 되고 있는 WDM에도 광증폭기가 필수적인 광부품으로 요구되고 있다. 광증폭은 반도체를 이용한 반도체 광증폭기(semiconductor optical amplifier, SOA)의 전기광학적 증폭과 광섬유에 어븀(Er)을 도핑한 완전 광학적 증폭기가 있지만 아직 개발 단계에 머물고 있는 상태이며, 또한 가격이 매우 높다. 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 광섬유 증폭기는 1993년에 PMMA계 고분자 광섬유 코어에 1 ppm 정도의 농도로 유기 염료인 Rhodamine B, Rhodamine 6G, 그리고 Perylene Red를 도핑한 광섬유 증폭기로 일본 Keio 대학의 Tsuyoshi 등에 의해 처음으로 발표되면서 시작되었다(그림 8). 이 고분자 광섬유 증폭기의 증폭 파장은 가시 광선 영역인 570 nm와 620 nm이며, 증폭을 위한 광섬유의 길이는 50 cm로 비교적 길고, 증폭 이득은 30 dB 정도로 아주 우수한 특성을 보였다.⁴¹ 그러나 이는 발광 과정이 유

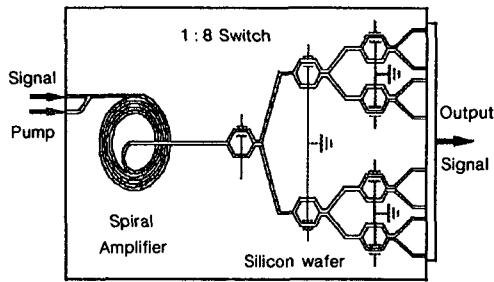


그림 8. 광증폭 소자의 개략도.

도 방출 과정(stimulated emission process)이 아닌 자발적 방출 과정(spontaneous emission process)에 근거를 두고 있는 형광(fluorescence)의 원리에 의한 것이어서 광증폭 시간이 짧아 평면 도파로 광증폭 소자에는 활용이 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 PMMA계 고분자 광섬유 제조 방법을 개선하여 유도 방출에 의해 증폭되는 희토류 금속을 도핑한 경사 굴절률(graded-index)형의 고분자 증폭기를 개발하여 발표하였다.⁴² 그 이후 미국의 Texas(Austin) 대학의 Kuzyk 등은 수용성 고분자인 photolime gel에 Nd^{+3} 를 도핑하여 스핀 코팅법을 이용한 도파로 제작 방법을 사용하여 도파로 길이가 2.2 cm로 매우 짧은 광증폭기를 제작 발표하였으며, 증폭 파장은 근적외 영역인 $1.06 \mu m$ 이며, 증폭 이득은 8.5 dB로 다소 우수하였다.⁴³ 특히 이들 연구진은 펄핑 레이저의 제작 및 광도파로 설계 등의 구현을 통해 소자 제작에 필요한 중요한 연구들

을 발표하였다. 최근에는 네덜란드 Philips 사에서는 테프론 모세관에 MA 계통인 라울릴 메타크릴레이트 단량체를 채우고 난 다음, 여기에 희토류 금속인 Eu^{+3} 를 도핑한 후 중합하는 방법을 이용하여 증폭 이득이 4.1 dB이며 1.5 cm 정도의 매우 짧은 고분자 광섬유 형태의 광증폭기를 개발하였다.⁴⁴

반면에 1970년대에 실리카에 Nd^{+3} 를 도핑하여 광도파로를 박막으로 제작하여 증폭 현상을 관찰하였다. 반전형(Inverted) neodymium은 유도 방출을 통하여 광증폭이 가능한 것으로 알려져 있다. 희토류 원소의 경우 전자가 찬 두 개의 외부 전자 궤도(shell) ($5s$ & $5p$)와 내부의 준안정 $4f$ 전자궤도(metastable $4f$ shell)와의 파장은 주인계(host) 고분자 매질에 민감하지 않은 것으로 알려져 있다(그림 9).⁴⁵ 따라서 희토류 금속이 도핑된 $LiNbO_3$, $LiTiO_3$ 등의 결정체 등도 사용되었고, 최근에는 $NdCl_3$ -doped-photlime-gelatin 박막에서도 광증폭이 보여졌다.⁴⁶

1996년도에 이르러서 희토류 이온(rare earth salt ions)을 졸-겔 과정으로 무기 매질에 도핑하여 스트립형 평면 도파로 광증폭 소자 제작과 WDM과의 집적화된 광증폭 소자 개발을 보고하였다.⁴⁷

희토류 이온(rare earth salt ions)을 고분자 매질에 용해시키는 것은 힘든 것으로 알려져 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 희토류 이온 착화합물(rare earth ion-chelated complexes)을 사용하여 주인-손님(host-guest)계가 주로 이용된다. 즉,

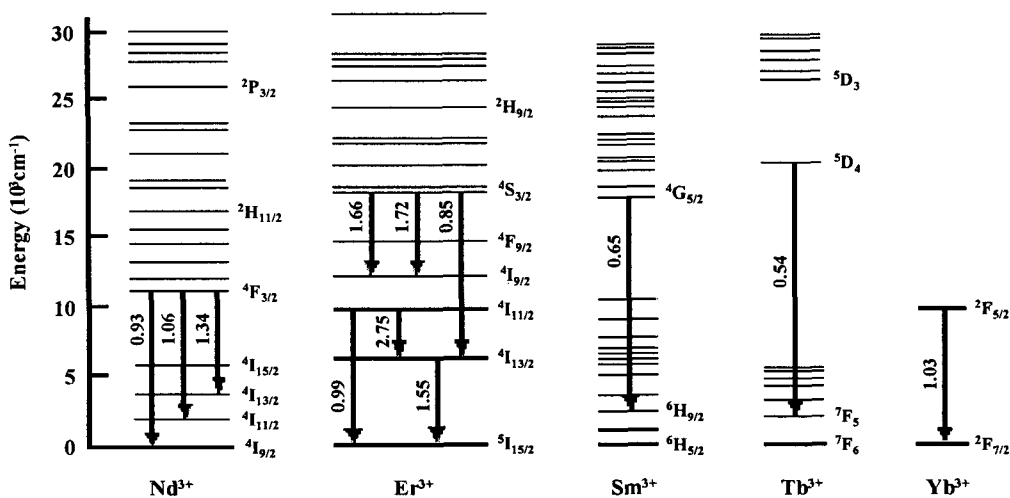


그림 9. Reported $4f \rightarrow 4f$ lasing transitions for trivalent rare earths in glass hosts and corresponding energy levels (Courtesy M. J. Webster, Lawrence Livermore National Laboratory).⁴⁵

PMMA, PMMA-DR1, 폴리스티렌(polystyrene)을 주인계 매질로 하여, (tris(2,2,6,6-tetramethyl-3,5-hetadionato) Nd[Nd(TMHD)₃], Nd hexa-fluoroacetate, 혹은 Nd trifluoroacetate를 손님계(guest)로 이용하여, σ (absorption cross section)가 10-20 cm²이고, Nd³⁺ 농도는 2~10×10¹⁹ cm⁻³로 녹이는 것이 가능함을 보여 주었다.^{48,49} 1998년도에 희토류 원소(rare earth salt ions)를 새장형태(cage)의 유기 polydentate에 착화(chelate)시켜 얻어진 착염 물질이 1.54 μ m 파장 영역에서 큰 증폭 특성을 보였다.⁵⁰ 지금까지 발표된 고분자 광증폭기에 대해 정리해보면, 플라스틱 광섬유에 유기 염료인 Rhodamine계 광염료를 도핑하여 550-650 nm 파장영역에서 25 dB 이상의 큰 증폭 이득을 얻었다. 또한 수용성 고분자인 photolime gel에 Nd³⁺를 도핑하여 1.06 μ m 파장에서 8.5 dB의 이득을 얻었다. 하지만 가장 필요한 통신 영역인 1.3 μ m나 1.5 μ m 파장 영역에서는 고분자 광증폭기는 보고 된 바가 없다. 이러한 통신영역에서의 증폭이 이루어지기 위해서는 고분자 매질에 희토류족 이온을 효율적으로 도핑 시켜야 한다. 하지만 Er의 도핑농도는 100~1000 ppm 정도이며 그 이상이 되면 Er 이온들 사이의 에너지전이 현상으로 인하여 여기 상태의 Er 이온이 기저상태로 떨어지는 전이 기구가 비발광 프로세스의 주를 이루게 되어 광증폭 효율이 급격히 떨어지게 된다. 이와 같은 이유 때문에 실리카에 Er을 도핑 시키는 방법으로는 더 이상 고효율의 광증폭을 기대하기 어렵고, 따라서 평면도파로형 광집적회로 형태로 30 dB 정도의 광증폭을 기대하기가 어렵기 때문에 이를 해결하고자 새로운 물질로서 고분자에 희토류 금속을 도핑시킨 평면 도파로형 광증폭 소재가 일본, 미국, 유럽 등의 선진 각국에서 소재의 개발에 대한 연구를 중점적으로 하고 있으며, 아직 개발 초기 단계에 있다. 이전의 평면도파로형 광증폭 소재는 무기물 매트릭스(SiO₂ 또는 SiO₂-Al₂O₃)/고분자 매질에 희토류 이온(Er, Nd, Sm 등)을 도핑 시킨 주인-손님계(host-guest system) 개발에 대한 연구가 주로 이루어져 왔다. 그러나 기존 연구 방식의 경화 조건에서는 -OH 그룹 및 무기물 매트릭스/고분자 매질에 대한 희토류 이온의 낮은 용해도(ppm 단위정도), 매질과 희토류 이온간의 상 분리로 인한 광증폭 특성이 낮다는 문제점이 야기되고 있다.

최근에는 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 방법

으로, 본 연구실에서는 분자 공학과 자연 광합성의 원리인 집광효과(light harvesting effect)를 이용하여 고분자 매트릭스에 우수한 용해도를 가지며, 희토류 금속의 문침이 없어서 이온-이온간의 상호작용이 없는 고효율 희토류 이온/리간드 착화물의 초분자의 합성 및 광증폭 원리 및 분광학에 관한 연구가 진행 중에 있다.

6. 고분자 광도파로 소자

광도파로 소자 구조는 기본적으로 광섬유의 원리와 같이 두 클래딩 사이에 코어층이 있는 3층으로 구성되어 있고(그림 10), 광도파로 소자 제작 공정은 그림 11과 같이 반도체나 실리카에 비해 매우 간단하다. 또한, 코어와 클래딩의 굴절률의 조합을 다양하게 할 수 있으므로 소자 제작에 매우 유리하다. 제작 공정은 설계에 따라,⁵¹ 먼저 하부 클래딩을 스펀 코우팅 등에 의해 입히고 코어층을 다시 스펀 코팅으로 입힌 후 도파로 모양을 만든다. 도파로를 만드는 방법은 산소 이온을 이용한 건식 식각, 습식 식각, 광개시제(photoinitiator)를 이용한 광표백이나, 광가교가 이용되고, 레이저를 이용한 직접 전사(direct writing) 방법을 사용하기도 한다. 광도파로를 만든 다음, 위층의 클래딩 층을 스펀 코팅에 의해 입혀 만든다. 일반적으로 소자의 전체 두께는 광섬유와 접속을 고려하여 5~20 μ m 정도로 한다.

저손실 도파로를 이용하여 능동형 소자를 만들려면 고분자의 열광학 계수를 이용하여 굴절률을 온도에 의해 조절 할 수 있다. 일반적으로 고분자는 실리카나 반도체, 결정체 등에 의해 약 10배정도 큰 열광학 계수를 갖는다. 고분자의 굴절률의 온도에 대한 실험 결과 Lorentz-Lorenz식에 잘 부합되므로 고분자 열광학 계수는 팽창에 의한 것으로 판명되었다.^{37,52}

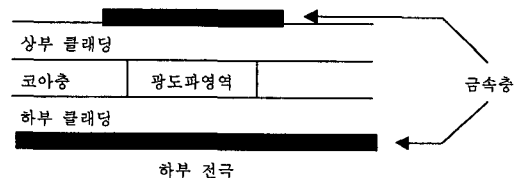


그림 10. 고분자 광도파로 소자 및 광섬유의 개략도 (상부 전극과 하부 전극은 수동 소자일 경우에는 필요 없음. 광도파 영역의 굴절률은 상부 클래딩, 하부 클래딩 및 코어층보다 높음).

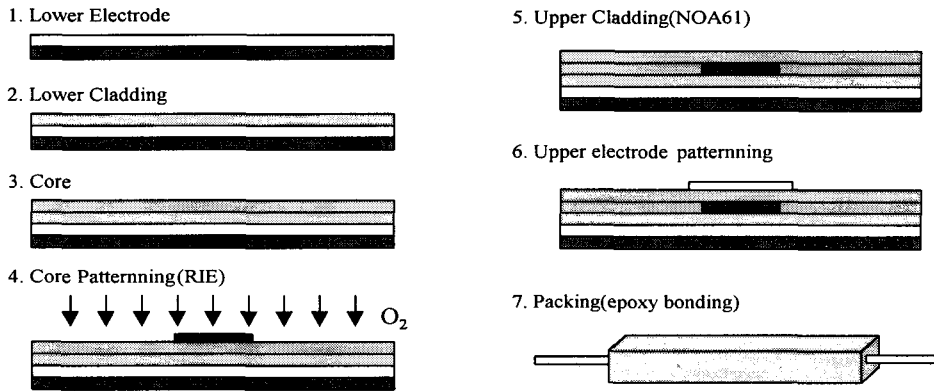


그림 11. 수동 및 열광학 소자의 공정 순서 (광도파로를 O₂ 식간을 이용한 경우를 나타냄. 수동 소자일 경우에는 상·하부 전극공정이 필요 없음).

온도에 의한 굴절률 변화는 아래 식 (3)과 (4)로 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 $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 이다.

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 자외선 접착제(UV adhesive)를 사용하여 물미(ferrule)와 칩을 붙이고, pig-tailed 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.

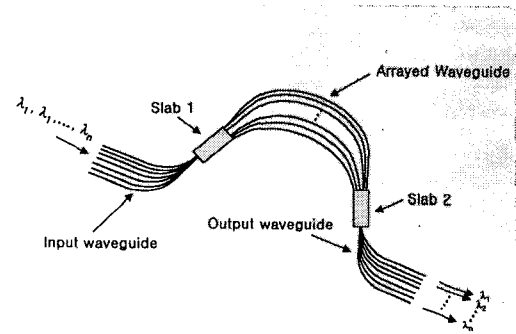


그림 12. AWG 필터의 개략도.

최근의 연구 결과들은 건습도(dry-humid) (85% RH, 85 $^{\circ}\text{C}$)에서 광손실의 변화가 없는 것이 발표되고 있다. 열적 안정성은 옐로잉(yellowing)이라고도 불리고, 주로 부분적 공액된(partially conjugated) 분자 그룹의 이중 결합에 의한 것으로 넓은 UV 영역에서의 흡수 피크와 가시광선 대의 연미 부분(tail)에 의해 특정 지어진다. 물론 이것은 화학 조성 및 성분에 따라 달라진다. 열적 안정성의 광손실의 변화는 Arrhenius의 형태로 변한다.¹²

제작된 광소자는 msec대의 공간 분할 광스위치, AWG 파장 선택 필터(그림 12) 등이 있다. 네덜란드의 Akzo사 제품의 경우 1 밀리초 스위칭 속도를 갖는 1 \times 2, 2 \times 2, 4 \times 4, 8 \times 8 등의 공간 분할 스위치 등이 상품화가 시작되었고, 습도 및 온도에 대한 안정성도 매우 좋은 것으로 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.⁵³

7. 결 론

최근에는 광통신에 있어 대용량 정보의 통신을 위하여 광의 초고속성 뿐만 아니라 병렬성을 이용하여 동시에 여러 개의 파장에 각각의 정보를 실어 전송하거나 신호 처리를 하는 파장분할 다중(wavelength division multiplexing, WDM) 방식이 각광을 받으면서 이에 필요한 가변파장필터(tunable wavelength filter), Arrayed Waveguide Grating (AWG) 파장 다중/역다중 소자, 라우터(router) 등의 WDM 광소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 WDM 광소자에 있어서 기본적인 요소가 되는 것은 저손실 단일 모드 도파 특성을 갖는 광도파로 소재의 개발이다. 또한 최근 다양한 기능을 하나의 기판에 집적화한 광집적 소자가 요구되고 있으며, 광집적화에 필요한 기본 요소는 일단 물질 자체의 광손실이 작아야 되고, 외부 환경에 의한 변화가 작은 안정된 소자가 꾸밀 수 있어야 하며, 가격 경쟁력도 높아야만 된다. 이런 특성에 가장 적합한 재료로 실리카 보다 더 고분자 소재가 평면 도파로형 광소자, 광 상호 연결, 열광 소자, 및 광전 집적 회로(optoelectronic integrated circuit) 응용에 중요한 모든 특성을 갖추고 있다. 이러한 선형/열광학 소자를 제작할 수 있는 기본 소재인 고분자계 선형/열 광학 물질에 대한 연구는 외국에서도 거의 초기 단계에 있을 뿐 아니라 고분자의 화학 구조 설계 개념조차도 발표되어 있지 않으며, 이 소재 개발에 대한 연구의 성공 여부가 소자 제작 및 상업화의 성패를 좌우할 수 있는 결정적인 요소이기 때문에 이 선형/열 광학용 고분자 소재 개발의 연구는 매우 중요하다.

최근 캐나다 JDS의 광부품 판매회사, Akzo Nobel의 고분자 광소자, Allied Signal 회사의 선형 및 열 광학 소재를 서로 기술제휴 또는 합병하여 한 회사를 설립하여 이 분야의 시장을 독점하려는 추세에 있다. 국내에서는 고분자 광도파로 소재를 이용한 광소자의 개발의 중요성이 인식되어서, 1996년 이후부터 한국전자통신연구원에서 저손실 고분자 광도파로 소재를 이용하여 WDM 광소자의 개발에 대

한 연구로부터 확보한 고분자 광소자 기술으로 벤처기업(젠 포토닉스)을 설립하여 상용화를 시도하고 있는 실정이다. 또한 수동 소자의 경제적인 잠재 시장성을 인식하여 국내의 삼성, LG, 한국 통신 등의 기업 연구소에서 소재 및 소자 개발의 연구 개발에 박차를 가하고 있으며, 특히 삼성전자에서 획기적인 소자 제작 공정을 개발하여 광분할기(power splitter)를 개발하여 상용화 단계에 있다. 이와 같이 광소자 개발에 대한 국내 수준은 선진국과 비교해 보면 거의 대등한 수준에 도달했지만, 이에 필요한 저손실 고분자 광도파로 소재 분야에서는 출원 연구소나 기업 연구소들은 초기 개발 단계여서, 일본·미국 등의 회사에서 기술 제휴하여 재료 특성이 만족하지 않은 소재를 수입하고 있는 실정이다. 또한 학계에서는 KAIST, 광주 파기원 등에서 소자 기초 연구를 하고 있는 실정이며, 본 연구실에서는 저손실 고분자 광도파로 소재 기술 개발을 위해 다년간 연구를 수행하고 있으며, 팔목한 연구 업적을 내고는 있지만 아직은 상용화하기에는 이르며, 많은 연구 시간이 필요하다. 이와 같이 국내에서도 이 분야 소재에 많은 관심과 연구를 수행하여 성공적인 신 개념의 신 기능 소재의 개발과 이에 따른 광전자소자 개발 등으로 정보 소재 및 광소자의 획기적인 발전을 도모하여, 지금까지 제한적인 유기 고분자 재료의 초고속 정보·통신 산업에의 응용성을 무한하게 할 수 있다. 또한 신 개념의 신 물질과 새로운 광전자 소자의 개발이 이루어진다면, 21세기 미래 사회에 요구되는 대용량의 광통신 및 정보기록과 정보처리 초고속화에 따른 다양한 통신 서비스(고화질 TV와 양방향 화상, 실감 통신 등)가 값싸게 보급되어 각 가정에까지 보급하는 "Fiber to the home" 시대가 실현 될 전망이다. 또한 이는 신기술 및 새로운 광자산업 발전으로 고도의 첨단광자기술 산업단지의 형성이 가능하며, 관련 산업의 새로운 산업이 조성될 것이다. 이에 따라 재료화학은 물론 물리, 광학, 재료공학, 전자공학 등의 발전과 정보·통신 산업 발전에 지대한 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글: 이 특집을 작성하는데 도움을 주신 한국전자통신연구원 원천기술본부의 이명현박사, 이형종박사, 황월연박사, 젠포토닉스 벤처기업의 한선규박사(대표이사), 안주헌박사님께 감사를 드립니다. 이 특집은 한국과학재단 특정기초 연구(1999-2-308-003-3)지원의 일부로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. M. Renaud, et al., *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, **2**, 277 (1996).
2. E. Pennings, et al., *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, **2**, 151 (1996).
3. P. A. Perrier, et al., OFC '96, 218 (1996).
4. M. C. Oh, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **73**(18), 2543 (1998).
5. M. C. Oh, et al., *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10**(6), 813 (1998).
6. N. Tacato, et al., *IEEE J. Lightwave Technology*, **16**(6), 1003 (1998).
7. Y. P. Li, et al., *IEEE Proc. Optoelectron.*, **143**(5), 263 (1998).
8. (a) U. Fischer, et al., *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **5**, 785(1993); (b) N. Takato, et al., *IEEE*, **6**(6), 1003 (1988).
9. R. Yoshimura, et al., *IEEE J. Lightwave Technology*, **16**(6), 1030 (1998).
10. T. Watanabe, et al., *IEEE J. Lightwave Technology*, **16**(6), 1049 (1998).
11. J. Kubayashi, et al., *IEEE J. Lightwave Technology*, **16**(6), 1024 (1998).
12. L. Eldada, et al., *SPIE*, **3006**, 344 (1997).
13. L. A. Hornak, "Polymers for Lightwave and Integrated Optic", Marcel Dekker Inc., New York, 1992.
14. M. Dettenmaier, et al., *Kolloid-Zu. Z. Polym.*, **251**, 922 (1973).
15. I. McCulloch, et al., *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem. Ed.*, **33**, 1177 (1995).
16. M. Usui, et al., *Electron. Lett.*, **30**(12), 958 (1994).
17. R. Yoshimura, et al., *J. Lightwave Technology*, **16**(6), 1030 (1998).
18. J. Kobayashi, et al., *Applied Optics*, **37**, 1032 (1998).
19. S. Ando, et al., Chemtech, December 20 (1994).
20. (a) T. Izawa, ECOC '91, WEB6-1 (1997); (b) S. Imamura, et al., *Electron. Lett.*, **27**, 1342 (1991).
21. T. Matsuura, et al., *Electron. Lett.*, **29**(3), 269 (1993).
22. T. Matsuura, et al., *Macromolecules*, **26**, 419 (1993).
23. S. Ando, et al., *Macromolecules*, **25**, 5858 (1992).
24. (a) H. K. Kim and C. K. Ober, *J. Macromolecular Sci., Pure and Appl. Chem.*, **A30**(12), 877 (1993); (b) H. K. Kim, C. K. Ober, et al., *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **24**, 347 (1992); (c) H. K. Kim, T. Mates, G. Barclay, and C. K. Ober, U. S. Patent 5,248,734. (1992).
25. (a) T. C. Kowalczyk, et al., *J. Appl. Phys.*, **76**(4), 15 & 2505 (1994); (b) A. J. Beuhler, *IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part-B*, **18**, 232 (1995).
26. H. K. Kim, et al., Korean Patent Filed(No. 10-1999-0032681)
27. (a) H. K. Kim, *Molecular Crystals & Liquid Crystals*, **247**, 149 (1994); (b) H. K. Kim, et al., *J. Macromolecular Sci., Pure Applied Chem.*, **A29**(9), 787 (1992).
28. K. Petermann, et al., *Electron. Lett.*, **33**, 518 (1997).
29. K. Han, et al., *Polym. Bull.*, **41**, 455 (1998).
30. H. J. Lee, et al., *J. Polym. Sci., Polym. Chem.*, **37**, 2355 (1999).
31. L. Eldada, et al., *J. Lightwave Technology*, **14**(7), 1704 (1996).
32. (a) H. J. Lee, et al., *J. Polym. Sci. Polym. Chem.*, **36**, 2887 (1998); (b) P. R. Resnick, et al., *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **167**, 105 (1990).
33. Y. Hida, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34**, 6416 (1995).
34. M. B. J. Diemeer, et al., *J. Lightwave Technology*, **7**(3), 449 (1989).
35. N. Keil, et al., *SPIE*, **2449**, 281 (1995).
36. S. Suzuki, et al., *Electron. Lett.*, **30**(8), 642 (1994).
37. M. Haruna, et al., *Appl. Opt.*, **21**, 3461 (1982).
38. (a) J. Brandrup, et al., "Polymer Handbook", Wiley Interscience, 3rd Ed., VI-451, 1989; (b) Personal communication with Dr. M. Y. Jin at KRICT.
39. Y. Hida, et al., *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **5**(7), 782 (1993).
40. B. Strebel, et al., *Electron. Lett.*, **33**, 1342 (1994)
41. K. Sasaki, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **63**(7), 883 (1993).
42. K. Sasaki, et al., *SPIE*, **2289**, 142 (1994).
43. R. T. Chen, et al., *SPIE*, **1774**, 87 (1993).
44. P. K. Sharms, et al., *POF '93*, 115 (1993).
45. E. Desurvire, "Erbium-doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994.
46. R. T. Chen, et al., *IEEE Photon. Technology Lett.*, **5**, 1328 (1993).
47. X. Orignac, et al., *SPIE*, **2997**, 271 (1997).
48. A. F. Garito, et al., *J. Opt. Soc. Am.*, **14**, 155 (1996).
49. A. R. Mickelson, et al., *J. Appl. Phys.*, **79**, 2868 (1996).
50. L. H. Slooff, et al., *J. Appl. Phys.*, **83**(1), 497 (1998).
51. R. Soref, et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-27**(8), 1971 (1991).
52. J. M. Cariou, et al., *Appl. Opt.*, **25**, 334 (1986).
53. Y. Hida, et al., *Electron. Lett.*, **30**(12), 959 (1994).