

ROADM 광통신 시스템용 폴리머 광소자

이형종

1. ROADM(Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer) 광통신 시스템 개요

최근 뉴스 매체에서 FTTH, IPTV, WiBro 서비스, 통방 융합과 같은 새로운 방송 통신 환경에 대하여 종종 접하게 된다. 이러한 새로운 통신 환경은 초고속 광통신 시스템을 바탕으로 하고 국가간 또는 대도시간의 기간망을 중심으로 포설된 광통신망이 점차 도시내의 메트로망, 가입자망으로 확대되고 있다. 그 결과 각 가정에서도 FTTH(fiber to the home)라 불리는 초고속 광인터넷이 빠른 속도로 포설되고 있다. ADSL이나, VDSL에서 10 M bps의 속도 환경에서 100 M bps 이상의 광인터넷으로의 변화로 IPTV 등 새로운 통신 서비스의 등장이 가능해졌다.

광통신망은 현재 전송량의 증가를 위하여 더 짧은 시분할 다중화(TDM)와 더욱 조밀하고 광범위한 파장 분할 다중화(wavelength division multiplexer, WDM) 방향으로 급속히 발전되고 있다. WDM은 전기통신과는 달리 광통신에서의 가장 큰 장점인 광의 병렬성, 즉 파장이 다른 광은 동시에 진행하더라도 서로 간섭하지 않는 특성을 이용한 시스템으로 전송에 이용되는 파장을 여러 개로 분할하여 신호를 실는 WDM으로 2000년대 이후 보편화된 시스템이다. **그림 1**은 WDM 광통신 시스템을 간략히 개념도로 나타내었다. 송신부에서 보내는 전기 신호의 데이터를 Transponder에서 레이저 다이오드(LD)에 의해 광신호로 변환한다. 이때 각 신호는 서로 다른 파장의 광신호로 변조된다. 이렇게 각각의 파장의 광신호로 변조된 신호는 광다중화기(optical mux.)를 거치면서 하나의 광섬유로 모아진다. 이렇게 동시에 모아진 신호는 광증폭기(optical amplifier, OA)를 통하여 신호를 증폭하고 장거리 전송을 거쳐 중간 기착지인 ADM(add drop multiplexer)으로 보내진다. ADM에서는 각 신호를 다시 각 파장별로 분리하고 일부 신호는 거기에서 drop시키고, 또 일부 신호를 add하여, 나머지 신호와 함께 다시 다중화하여 다음 도달지로 보내진다. 최종 도달지에서는 다중화된 광신호를 각 파장별로 광역다중화기(optical demultiplexer)에서 분리하고 이 분리된 광신호는 다시 Transponder에서 전기 신호로 변환되어 최종 전송이 이루어진다.

이와 같은 WDM 광전송 시스템은 매우 효과적으로 전송 용량을 늘일 수 있다. WDM 광통신에서 사용하는 파장 대역은 silica 광섬

유에서 가장 낮은 광전송 손실을 보이는 1550 nm 대역이며 1525 nm에서 1620 nm까지 사용이 확대되고 있다. WDM에서는 1.6 nm 또는 0.8 nm 간격으로 분할하여 각각 한 파장씩 사용한다. 최근에 파장의 수를 증가시키기 위하여 파장 간격은 0.4 nm로 줄이는 연구와 파장의 대역을 1310~1620 nm까지 다 사용하려는 연구가 많이 진행되고 있다.

WDM 광통신 시스템에서 광신호 처리를 위한 ADM은 고속 대용량 광스위치의 부재로 광신호를 전기 신호로 OE converter를 통한 변환이 이루어진 후 add/drop이 이루어지고 다시 EO converter를 통하여 광신호로 변환되어 전송되었다. 이 부분에서 많은 병목 현상이 있어 패킷 단위로 신호를 묶어 add/drop하는 optical ADM(OADM) 시스템이 등장했으며, 이 OADM 시스템의 발전된 최근의 시스템이 ROADM(reconfigurable OADM)이다. 본 특집에서는 ROADM 시스템 중에서 폴리머 광소자로 구현 가능하고 현재 상용화 되어 시판까지 되고 있는 PLC/Mux switch형 ROADM module을 소개하고 이 module에 필요한 폴리머 광소자에 대하여 좀더 자세히 소개하고자 한다.

저손실 고분자를 이용한 폴리머 광소자는 2000년대 들어 소자의 신뢰성이 확보 되면서 광통신 시스템에 처음 채용되기 시작하였다. 국내에서 90년대 초 KAIST와 ETRI에서 시작된 폴리머 광소자에 관한 연구는 현재 국가 출연연 및 대학 등에서 많은 연구가 진행 중이다. 특히 최근에 국내에서도 캠옵틱스의 폴리머 광스위치 및 가변 광감쇠기에 대한 신뢰성 검증이 성공적으로 완료되었으며 이후 광증폭기와 WDM 광통신 시스템에 채택되어 상업적인 결실을 맺기 시작하였다. 외국의 경우 미국의 Dupont Photonics, Gemfire, Photon-X 라는 회사에서 주도적인 연구를 수행하고 있으며 특히



이형종

1990 부산대학교 화학과(학사)
 1992 한국과학기술원 화학과(이학석사)
 1995 한국과학기술원 화학과(이학박사)
 1995~2000 한국전자통신연구원 선임연구원
 (주) 젠포토닉스
 2000~2004 (주) 캠옵틱스 대표이사
 2005~ 현재

Polymer Optical Devices for ROADM Optical Telecommunications

(주)캠옵틱스 (Hyung-Jong Lee, ChemOptics Inc., 104-11, Moonji-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon 305-380, Korea)
 e-mail: hjlee@chemoptics.co.kr

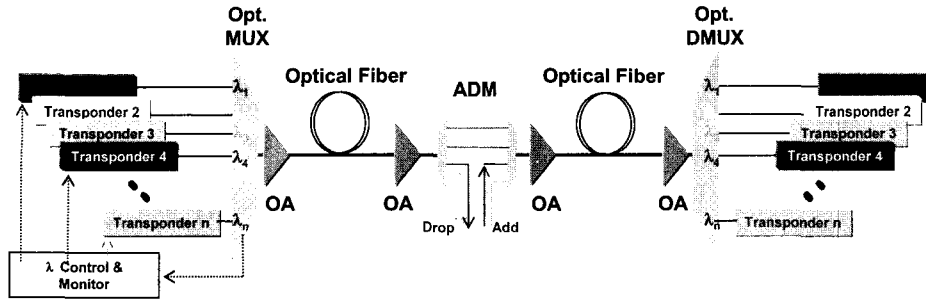


그림 1. WDM 광통신 시스템 개념도.

고성능의 고분자 재료 개발에 대한 연구에 중점을 두고 있다. Dupont Photonics는 0.05dB/cm 이하의 광손실을 가지는 자체 개발 고분자 재료를 바탕으로 폴리머 광도파로형 ROADM module을 상용화하여 이 분야 시장을 선점하고 있다.

2. 폴리머 광소자용 고분자 재료 개발 동향

2.1 폴리머 광소자용 고분자의 재료 요구 특성

폴리머 광소자는 광통신 시스템에 다양한 응용 가능성이 있다. 현재 열광학 효과를 이용한 가변 광감쇠기, 광스위치, 파장 가변필터, 가변 레이저 등이 있으며, 최근 휴대 단말기의 전송 용량의 증가로 인하여 flexible optical PCB를 폴리머 광도파로로 제작하려는 연구가 일본의 마쯔시다, 옴론 등에서 많이 진행되고 있다. 폴리머 광소자에 사용되는 고분자 재료는 최종 구현하고자 하는 광소자에 따라 요구 특성이 조금씩 달라지지만 근본적으로 요구되는 특성은 사용 파장 대역에서의 0.5 dB/cm 이하의 낮은 광손실, 낮은 광복굴절성(필요에 따라 10^{-5} 이하의 수준도 요구됨), 0.0005 이하의 정밀한 굴절률 제어와 같은 기본적인 광 특성 및 공정 시 수반되는 내화학적, 내열성, 적층성 등 제반 물성이 요구된다. 이들 요구 사항들 중에서 모든 부분들이 최종 소자를 위하여 중요하다. 그 중에서도 1.3~1.55 μm 파장 영역에서의 낮은 광진행 손실이 가장 중요한 특성이다. 일반적으로 광손실은 아래와 같이 dB 단위로 표현된다.

$$\text{dB (loss)} = -10 \log(P_{\text{out}}/P_{\text{in}})$$

즉, 광손실은 입사광의 세기와 출사광의 세기를 자연 로그를 취하여 얻는다. 고분자 재료에서의 광손실은 분자 내 C-H 결합의 고차 조화 진동에 의한 흡수, 유기물 오염, 흡습성으로 인한 O-H 분자의 흡수, 전이금속 impurity에 의하여 주로 나타난다. 조화 진동에 의한 흡수는 분자 구조에서 C-H 결합을 C-F 등으로 치환함으로써 최소화할 수 있다.

광도파로 소자 제작을 위해 코어층과 클래딩층의 굴절률 조절이 매우 중요하다. 이를 위해 고분자 소재의 광굴절률은 서로 다른 굴절률을 가지는 단량체의 공중합을 이용하거나 상용 고분자의 블렌딩에 의하여 굴절률 차이가 0.0001까지 제어 가능하다. 또한 복굴절률(Te mode 굴절률과 Tm mode 굴절률의 차) 제어는 광소자 특성에 매우 중요하다. 예를 들어 파장 다중/역다중 소자인 AWG

광소자가 편광에 의존하지 않고 안정되게 작동하려면, TE 모드와 TM 모드 사이의 굴절률의 차이가 10^{-5} 이하가 되어야 한다.

2.2 폴리머 광소자용 고분자 재료 개발 현황

폴리머 광소자용 고분자 재료는 최종 광소자의 특성에 직접적인 가장 큰 영향을 미치기 때문에 대부분 폴리머 광소자 제조사에서는 직접 고분자 재료를 개발하거나 외부 outsourcing에서도 재료 자체에 대하여는 철저한 비밀로 하여 그 정확한 연구 방향이나 물질 구조에 대하여는 잘 알려지지 않고 있다. 재료 개발의 기본 방향은 저 광손실을 위하여 불소계 고분자 재료를 선호하며, 공정에서의 내화학적, 내열성, 장기 신뢰성 등의 이유로 열 및 광경화성으로 하는 경향이 있다. 지금까지 연구용으로 발표된 재료에 대하여 살펴보면, 90년대 초 일본의 NTT에서는 이중수소화(deuterated) PMMA와 이중수소 및 불소가 함께 치환된(deuterated/perfluorinated) PMMA를 사용해 광손실이 1.3 μm 에서 0.08 dB/cm로 아주 우수한 저손실 광소자를 구현한 이후 많은 학문적 발표가 있었다. 여기에서는 광소자로 제작된 재료를 중심으로 간단히 기술하고자 한다. 처음 주목 받은 재료는 내열성, 가공성이 뛰어난 다양한 종류의 불소 치환된 폴리이미드(perfluorinated polyimides)를 개발하여 발표하였다. 폴리이미드는 이미 반도체 산업에서 전자 재료로서의 상업적 성공으로 인하여 광재료로의 가능성에도 많은 연구자들이 인정하고 있었다. NTT에서 발표한 가공성이 뛰어난 일부 perfluorinated polyimides는 일본의 히타치사에 기술 제공하여 히타치사에서 OPI-N3000 series로 시판되고 있다. 삼성전자의 chlorinated polyimide 등 다양한 폴리이미드 유도체가 발표되었지만 WDM 광소자 적용을 위하여 현재 폴리이미드 계열의 재료는 복굴절률을 10^{-4} 이하로 낮추어야 하는 문제를 가지고 있다(그림 2).

DOW Chemical사에서는 저 유전 상수를 가지는 반도체 절연막 재료의 개발을 위하여 BCB 계열 보다 불소 치환으로 인하여 유전율이 더 낮고 열안정성이 우수한 PFCB(perfluoro cyclo butane)을 개발하였다. 열적 안정성($T_g=400^\circ\text{C}$)이 우수하며, 불소 치환 고분자로 1.55 μm 의 광통신 영역에서 0.4 dB/cm 이하의 광손실 특성을 나타내고, 복굴절이 0.002~0.0008로 비교적 우수하고, 충전성(gap filling)이 뛰어나 PFCB는 폴리머 광소자 재료로 응용이 되어 많은 연구가 이루어졌다. PFCB는 박막 자체의 특성은 우수하나 기판에의 접착력이 떨어지고 다양한 유도체의 부재로 정밀한 굴절률 조절이 불가능하여 초기에 주로 코어 또는 클래딩층 한 부분만 담당하는 한계를 가지고 있었다. 그러나 최근까지도 기본 PFCB 구조가 가지는 저손실, 고온 안정성, 저 흡습성 및 우수한 박막 특성과 같은 장점으로 인하여 GIST를 비롯한 많은 국내외 연구진에 의하여 다

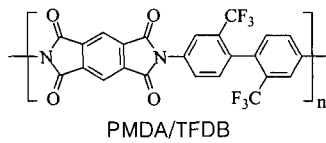
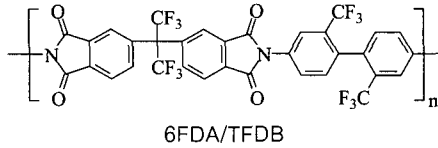
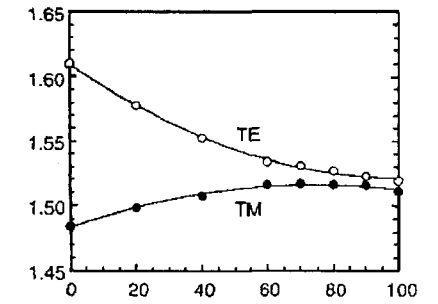


그림 2. NTT 발표 PI계 광고분자 재료 및 OPI-N3000 series PI 분자 구조.

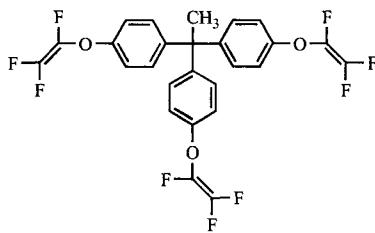


그림 3. Dow chemical의 PFCB 광고분자 재료.

양한 유도체들이 발표되고 있다. PFCB는 모노머 구조에서 보는 바와 같이 trifluoro vinyl ether 형태가 약 250 °C의 열에 의하여 2+2 cyclo addition 반응으로 cyclo butane ring을 이루어 안정한 형태를 취한다. 일반적인 thermal 2+2 cyclo addition 반응은 일어나지 않지만 불소 치환의 경우 가능하다. 중앙의 tri-phenol에 다양한 유도체를 만들어 경화 특성, 굴절률 변화 등의 개발이 이루어지고 있다(그림 3).

한국전자통신연구원(ETRI)에서는 소자제작 공정과 열 안정성, 화학적 안정성을 만족시키기 위하여 열경화 가능한 불소 치환 폴리 아릴렌 에테르(crosslinkable fluorinated poly(arylene ethers) : FPAAE)를 개발하였다. 이 재료는 고도로 불소화가 가능하며 다양한 단량체의 변화로 굴절률 조절이 용이하며, 특히, 1.55 μm에서 0.28 dB/cm 이하이며, 복굴절률이 0.0045 정도로 편광의존성이 낮은 특성을 나타내었다. FPAAE는 아래 화학 구조의 Oligomer 상태에서 250 °C로 가열하면 말단의 acetylene기가 서로 반응하여 열 가교를 이루는 형태로, 열가교를 위한 촉매와 같은 불순물이 전혀 필요 없고 또한 열 가교 반응으로 인한 휘발성 부산물이 전혀 발생하지 않는 장점이 있다. ETRI에서 개발한 Thermal curable perfluorinated arylene ethers series는 광소자로서의 적용 우수성이 확인되어 그 후 다양한 유도체가 개발되고 발표되었다. 화학 구조에서 알 수 있듯이 decafluorobiphenyl의 유도체로 decafluorobenzophenone,

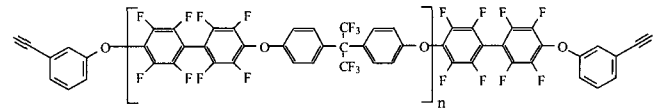


그림 4. ETRI의 FPAAE 광고분자 재료.

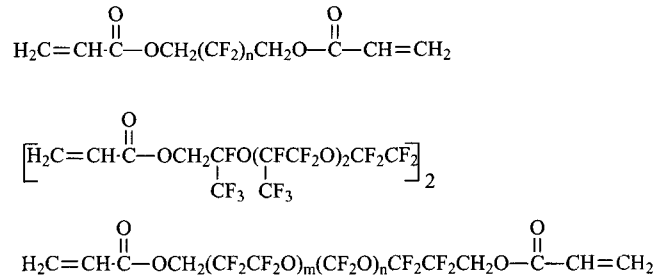


그림 5. Allied Signal의 광고분자 재료.

pentafluorophenyl sulfide 등이 도입되었으며, fluorinated diol part도 다양하게 도입되었다. ETRI에서 창업한 젠포토닉스에서 acetylene terminated fluorinated polyether 유도체의 열경화 특성과 미세한 굴절률 조절 및 복굴절을 개선한 상품명 ZP series를 개발했으며 이 재료를 이용하여 1×2, 2×2 광스위치 및 가변 광감쇠기 소자를 개발하였다. ZP series의 특성은 1.3, 1.55 μm에서의 광손실이 각각 0.11, 0.28 dB/cm로 비교적 우수하고 복굴절이 0.003~0.005이며, 열안정성이 420 °C 이상으로 120 °C에서 2000시간 이상 굴절률 변화가 없는 안정성을 보여주고 있다(그림 4).

미국의 Allied Signal사에서는 아크릴레이트(acrylate)의 광가교 특성을 이용하여 350 °C 이상의 열안정성을 가지는 자외선으로 경화가 가능한 불소 치환 아크릴레이트(UV-curable fluorinated acrylate)를 발표하였다. 1.55 μm에서의 광손실이 0.07 dB/cm로 발표하여 거의 실리카(SiO₂)에 대등한 수준에 이르렀으며, 복굴절률이 0.0008정도로 편광 무의존성이 매우 높았다. Allied Signal사의 광경화형 acrylate는 다양한 분자 구조의 perfluorinated diol 말단에 acrylate 반응을 시켜 만든 monomer, oligomer에 광개시제를 이용하여 용제가 필요없는 액체의 반응성 용액을 사용한다. 이 경우 박막은 회전 도포와 자외선 경화만으로 쉽게 제작 가능하다. Allied Signal사의 고분자 광재료 사업부는 여러 M&A 과정을 거쳐 현재 Dupont Photonics사에서 더욱 개발된 재료를 이용하여 폴리머 광소자를 개발하여 현재 시판하고 있다. 단지 최종 재료 자체는 철저한 비밀로 부쳐지고 광소자(가변광감쇠기, V-Mux, ROADM module)만 판매되고 있다(그림 5).

그리고 미국의 Gemfire사가 8채널의 폴리머 가변광감쇠기(VCA) 소자를 MEMS 기술로 제작한 VOA와 거의 유사한 수준으로 제작하여 판매하고 있지만 그 고분자 재료에 대한 언급은 전혀 없어 구조에 대하여 알 수 없다. 다만, T_g가 아주 낮은 silicone계 polysiloxane 일 것으로 추정만 할 뿐이다.

광학 고분자 광소자에 관한 관심이 증가됨에 따라 물질의 요구 특성이 비슷한 기존의 플라스틱 광섬유(plastic optical fiber)용 물질을 선형 광학 고분자 소재로 응용되고 있다. 아래 구조의 cytop(상품명)은 화학 구조에서 보듯이 완벽한 불소 치환 구조로 진동 흡수에 의한 광손실은 전혀 없다. 현재까지 알려진 완전 불소계 고분자

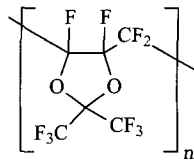


그림 6. Cytop 분자 구조.

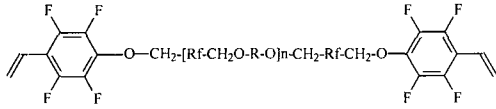


그림 7. 켈옵틱스의 광도분자 재료.

는 Teflon과 같이 어떠한 용매에도 용해되지 않아서 광소자와 같은 정밀 소자로의 공정이 불가능하였다. 그러나 Cytop은 불소계 용제에 용해되어 박막 공정이 가능하다. 최근 이 재료를 이용한 광분할기(optical power splitter)의 개발이 일본에서 이루어지고 있다. 발표된 광분할기의 특성은 현재 시판되는 최고 수준의 실리카 광분할기를 능가하는 수준이다. Cytop을 이용하여 게이오 대학의 Koike group이 POF로 제작하여 발표한 광손실은 850~1310 nm에서 15 dB/km로 0.00015 dB/cm 수준으로 완전 불소계 고분자의 경우 광흡수에 의한 광손실은 거의 무시할 수 있는 수준임을 알 수 있다(그림 6).

마지막으로 한국의 켈옵틱스사는 광경화 가능하면서 다양한 유도체의 도입으로 광학적 특성을 제어 가능하도록 설계된 perfluorinated monomer를 이용한 UV curable fluorinated polymer (ZPU series)를 개발 시판하고 있다. 화학 구조에서 보듯이 말단의 perfluorinated styrene 구조로 인하여 광경화 가능하고 고도의 불소 치환 가능하여 광손실이 0.3 dB/cm 이하로 낮고 복굴절성도 0.001 이하로 낮다(그림 7).

현재 광스위치, 가변 광감쇠기를 자체 제작하여 한국통신 광전송망에 공급되고 있다. 특히, 켈옵틱스사는 최근 ZPU series를 더욱 upgrade한 LFR series를 자체 개발 완료하여 광소자 적용하고 있다. LFR series는 광손실이 0.06 dB/cm 이하이고 복굴절성이 10^{-5} 이하로 편광 의존성이 없다. 특히, 열광학 계수가 기존 재료에 비하여 2~3배 이상으로 열광학 소자 제작에도 매우 유리하다.

3. 폴리머 광소자 제작 공정

폴리머 광소자는 먼저 제작하고자 하는 광소자의 기능, 특성 등을 BPM simulation 등을 통하여 광도파로를 설계하고 광도파로 마스크를 제작한다. 이 때 최종 제작될 광소자의 특성을 고려하여 적절한 코어 및 클래딩 폴리머 재료의 선정이 이루어 져야 한다. 선정된 재료를 이용하여 다층 박막을 쌓고 또한 광도파로를 식각한다. 최종적으로 wafer 상태의 광도파로를 절단, 연마 등을 통하여 패키징 완료 한다.

광도파로 소자 구조는 기본적으로 광섬유의 원리와 같이 낮은 굴절률을 가지는 두 클래딩 층(cladding) 사이에 보다 높은 굴절률을 가지는 코어(core)층이 있는 3층으로 구성되어 있다. 각 층간의 두께와 굴절률은 단일모드 진행 조건을 만족시키는 범위에서 결

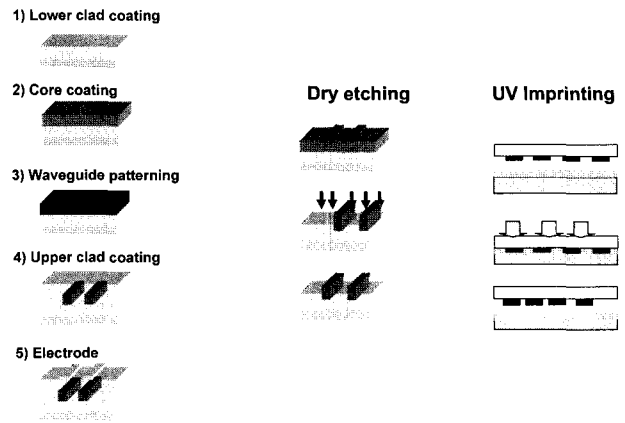


그림 8. 폴리머 광소자 제작 공정도.

정된다. 일반적으로 굴절률의 차이는 0.3~0.7% 정도이며 최근에는 아주 compact한 소자의 제작을 위하여 high delta 구조로 1.5~2.0% 정도의 소자도 많이 연구되고 있다. 각 층간의 두께는 core의 경우 광섬유와 유사한 5~8 um 정도로 하고 clad 층은 5~20 um 정도로 한다. 광스위치와 같이 열광학 효과를 이용하여 구동되는 소자는 열을 발생시키기 위한 전극, 일종의 히터가 필요하므로 상부에 thin film metal heater가 올라가야 한다.

광도파로 소자 제작 공정은 그림 8과 같이 반도체나 실리카에 비해 매우 간단하다. 제작 공정은 설계에 따라, 먼저 하부 클래딩을 스핀 코팅 등에 의해 필름을 형성하고 코어층을 다시 스핀 코팅으로 형성한 후 광도파로 모양을 만든다. 폴리머 광도파로 공정의 가장 큰 장점 중에 하나가 다양한 방법으로 광도파로 코어를 만들 수 있다는 것이다. 광도파로를 만드는 가장 보편적인 방법은 산소 이온을 이용한 건식 식각이다. 이 방법은 정밀한 구조의 도파로 형성에 매우 유리하고 잘 확립된 반도체 공정을 이용하므로 공정 안정성 및 재현성이 우수하다. 그러나 고가의 포토 및 식각 장비를 이용하여야 한다는 단점이 있다. 최근 폴리머의 장점을 잘 살린 몰딩에 의한 UV-imprinting or hot embossing법이 많이 개발되어 발표되고 있다. 이 방법은 마치 현재 CD나 DVD를 master 금형을 이용하여 찍어 양산하듯이 폴리머 광 도파로를 미리 금형을 만들어 imprinting 기술로 찍는 기술이다. 광도파로를 만든 다음, 위층의 클래딩 층을 스핀 코팅에 의해 입혀 만든다.

상부 클래딩 층까지 완료된 후에 열광학 효과를 이용한 능동 구동을 위하여 전극을 형성하여야 한다. 보통 전극은 Cr/Au를 사용한다. 경우에 따라서는 전극의 온도에 따른 저항의 변화를 최소화하기 위하여 니크롬을 이용하기도 한다.

4. PLC-Mux형 ROADM 폴리머 광소자

서론에서 설명한 바와 같이 최근 광통신은 점차 ROADM 시스템으로 발전하고 있으며 ROADM 광 모듈은 소형, 저 소모전력의 집적화가 이루어지고 있다. ROADM module은 wavelength blocker (WB), PLC-Mux switch, wavelength selective switch(WSS) 등 3가지 방식이 있으며 그중에 현재 개발 완료되어 시장 규모가 가장 큰 메트로 ROADM망에 가장 보편적으로 사용되는 PLC-Mux switch형 ROADM node에서의 폴리머 광소자 적용 가능성

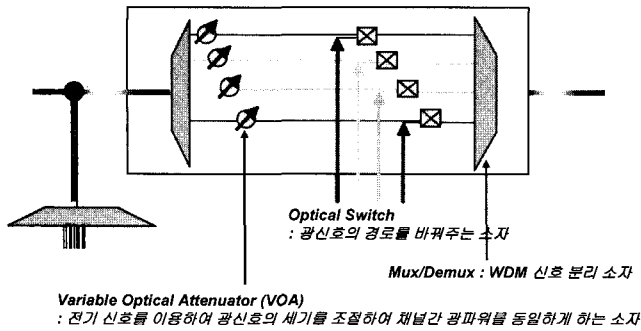


그림 9. PLC-Mux switch형 ROADM의 부품 구성도.

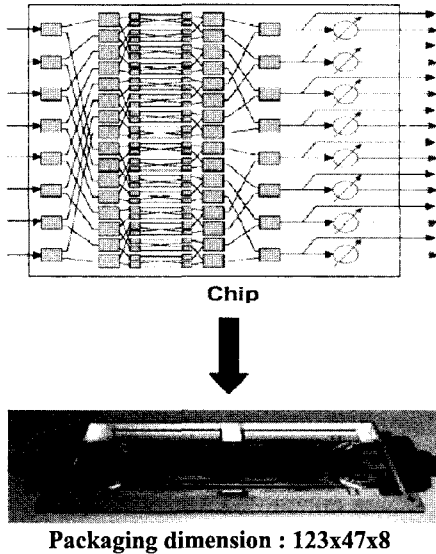


그림 10. DuPont Photonics의 폴리머 집적 광모듈.

에 대하여 살펴보고자 한다.

그림 9에서 보는 바와 같이 부품 구성은 각 채널의 파장을 Mux/DeMux하는 AWG와 AWG 뒤단에서 각 파장으로 분리된 광신호의 세기를 조절해 주는 다채널 arrayed VOA와 각 채널의 신호를 Add/Drop하는 광스위치 array로 구성되어 있다. 핵심 구성 광소자는 AWG, 다채널 VOA 그리고 arrayed 광스위치로 특히, VOA와 광스witch는 열광학 효과를 이용한 폴리머 광소자가 매우 유리하다. 폴리머 광도파로형 VOA와 광스witch는 실리카 광도파로 소자에 비하여 월등한 성능을 나타내고 있다. AWG의 경우 온도 변화에 따른 파장 안정성, 광손실 등에서 아직 실리카 AWG가 비교 우위에 있으며 현재 상용된 것은 모두 실리카로 제작되었다. VOA와 광스switch의 경우 MEMS 기반의 광소자와 실리카, 폴리머 PLC 광소자가 서로 경쟁하고 있다. 향후 연구 방향은 각각의 단위 소자들의 집적화 뿐만 아니라 AWG, VOA, 광스switch 모두 한 기판에서 integration 하는 방향으로 연구되고 있다.

그림 10은 DuPont Photonics사의 8×8 광스switch 어레이와 8 채널 VOA의 집적소자로서 128개의 개별 폴리머 광소자가 12.3×4.7 cm 크기의 단일칩으로 구현했다. 향후 AWG의 특성 개선이 이루어지면 ROADM node의 광소자 전체가 폴리머 광소자로 집적화 가능할 것으로 생각된다. 각 단위 폴리머 광소자에 대하여 구체적으로 살펴보고자 한다.

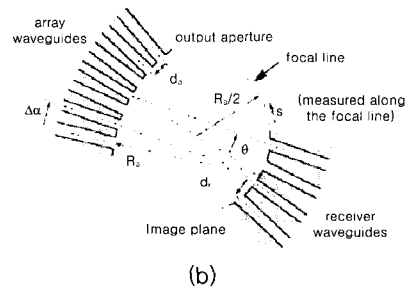
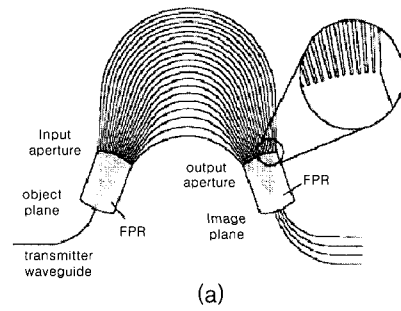


그림 11. AWG 광도파로 구조 (a) layout of AWG and (b) schematic diagram of output FPR.

4.1 AWG Mux/DeMux

AWG(arrayed waveguide grating) 파장 다중/역다중화기(wavelength mux/demux)는 여러 가지 파장을 다중(mux)화하거나, 신호를 역다중(demux)화 하기 위해서 사용된다. AWG 광소자는 그림 11에서 보는 바와 같이 일정 길이가 차이나는 광도파로를 배열하여 고차의 격자와 같은 특성을 갖게 하는 것이다. 입력단에서 입사된 광은 slap 도파로 형태의 FPR에서 분기된 여러 광들은 일정한 위상 차이를 겪은 후 다시 출력단의 FPR에서 간섭하여 하나의 광도파로로 출력된다. 따라서 파장에 따라서 서로 겪는 위상차이가 달라서 여러 파장이 다중화된 입력 광신호가 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.

ROADM의 핵심 소자로서, AWG의 가장 중요한 spec.은 낮은 광손실과 복굴절에 의하여 나타나는 편광 의존성이 작아야 한다. 현재까지는 고분자를 이용한 AWG는 연구 단계에서 많이 발표되었지만 상용화 수준에서는 실리카 AWG에 비하여 광손실과 편광 의존성이 커서 상용화되지 못했다. 그러나 최근 광소자용 고분자 재료의 광손실이 점차 실리카에 근접하는 0.1 dB/cm, 복굴절도 10^{-4} 이하의 수준으로 향상되어 폴리머 AWG도 상용화가 가능할 것으로 생각된다. 폴리머 AWG의 상용화는 ROADM module에서 폴리머 VOA와 광스switch의 직접화를 이룰 수 있어 매우 중요하다. AWG의 또 다른 응용으로, FTTH가 광통신 시장에서 최대의 화두가 되고 있으며, FTTH를 완성하는 한 방법 중에 가장 대용량을 보장하는 방식이 WDM-PON 방식인데 이 방식에서는 AWG가 핵심 소자이다. 특히, 전원의 공급이 불가능한 외부 환경에서 AWG의 사용이 필요하므로 온도에 무관한 Athermal AWG의 개발이 필요하게 되었다. 실리카 AWG에서 다양한 방법이 제시되고 있지만 특성의 하락이 불가피하고 수율의 저하로 Athermal AWG의 생산 단가가 높다. 최

wavelength shift : $\frac{d\lambda}{dT} = \left(\frac{dn}{dT} + n\alpha \right) \cdot \frac{\lambda}{n}$

(N. Keil et al., OFC2001, post-deadline paper PD7)

$\frac{dn}{dT} = -1.75 \times 10^{-4}/K, n=1.45, \lambda=1550nm$

$\alpha = \text{CTE of substrate}$
 $n = \text{core refractive index}$

그림 12. 폴리머 Athermal AWG 원리.

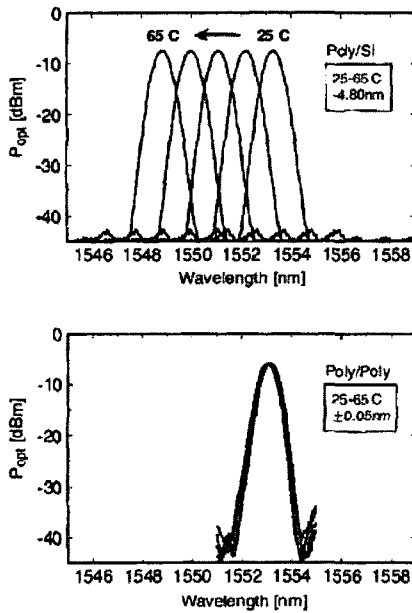


그림 13. 기존 AWG와 All polymer AWG의 온도 의존성 비교.

근 독일의 HHI에서 폴리머를 이용한 Athermal AWG의 가능성을 제시하였다.

$$\Delta L = m \cdot \frac{\lambda_c}{N_{eff}}$$

- ΔL : path difference
- m : diffraction order
- λ_c : center wavelength
- N_{eff} : effective index of waveguide

위 식에서 알 수 있듯이 AWG의 중심 파장은 도파로 재료의 유효 굴절률과 광이 실제로 지나가는 path length에 의존함을 알 수 있다. 모든 재료는 열광학 효과에 의하여 굴절률이 온도에 의존함을 보았다. 그림 12에서 보면 온도에 따른 파장의 의존성은 도파로 재료의 열광학 계수(dn/dT)와 기판의 열팽창계수(CTE)의 합으로 표현된다. 다행히도 폴리머의 열광학 계수는 음수이고 열팽창 계수는 양수 이므로 서로 상쇄되어 완전히 zero가 되는 AWG의 제작이 가능하다.

그림 13은 기존의 실리콘 웨이퍼에 제작된 폴리머 AWG의 온도 의존성과 CTE가 조절된 폴리머 기판에 제작된 폴리머 AWG의 외부 온도에 따른 파장의 변화를 도시하였다. All Polymer AWG의 경우 사용 온도 범위에서 파장의 변화가 전혀 없음을 알 수 있다. 아마도 폴리머 AWG가 삽입 손실과 편광 의존성 등의 특성이 실리콘과 유사할 정도가 되고 Athermal 특성을 부가하면 시장에서 성공할 것으로 예상된다.

4.3 어레이형 광스위치(Arrayed Optical Switch)

ROADM module에서 광신호의 add/drop을 위하여 다채널 어레이 형태의 광스위치가 필요하다. 폴리머 광스위치 소자의 작동원

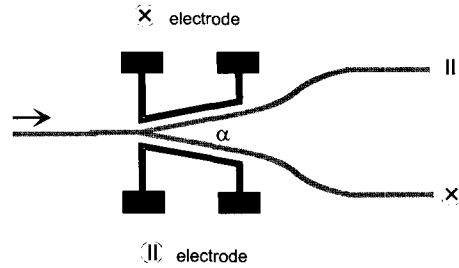


그림 14. 모드진화 특성을 이용한 광스위치 소자의 구조.

리는 도파로 상의 전극에 전류를 가해서 전류에 의해 발생된 열에 의해 광도파로 내의 코어층의 굴절률 변화를 야기시켜 광신호의 선로를 변경시킨다. 폴리머의 열에 대한 굴절률 변화는 온도에 따른 밀도 변화 즉 열팽창 계수와 밀접한 상관관계를 가지고 있으며, dn/dT 의 값은 무기물에 비해 10배 이상 크고 열전도도가 낮아 전력 손실을 크게 줄일 수 있다.

다채널 어레이형 도파로 광스witch는 실리콘이나 폴리머 등을 이용하여 제작된다. 실리콘은 열광학 계수가 $\sim 10^{-5}/^{\circ}C$ 정도로 폴리머의 $\sim 10^{-4}/^{\circ}C$ 에 비하여 상대적으로 낮지만 공정이 잘 발달되어 있고 광손실이 낮은 관계로 일본에서 연구되고 있다. 특히 일본의 NTT에서는 실리콘을 사용한 8×8 규모의 광스위치 어레이 직접 회로를 발표하였다. 광스위치의 구조는 다양한 형태가 발표되었지만 그림 14와 같이 광진화(mode evolution) 특성을 이용한 DOS(digital optical switch) 형태의 광스witch는 폴리머 광스witch에 많이 적용되며 Y-분기형 DOS는 특정 전압 이상으로 걸어주면 전압의 크기에 관계없이 스위칭 되므로 디지털의 특성을 갖는다는 의미에서 이름 붙여졌다. 이 DOS 스위치는 반송특성이 디지털 형태로서 간섭계 형태보다 온도 및 편광 그리고 파장 의존이 작은 장점은 있으나 소모 전력이 크다. 그러나 폴리머는 열광학 효과가 커서 상대적으로 낮은 소모 전력으로 구동 가능하다.

DOS 스위치는 개략도에서와 같이 분기 각이 약 $0.1 \sim 0.15^{\circ}$ 정도로 매우 작은 Y-분기 형태이다. 모드 진화특성을 이용하기 때문에 전극에 흘려주는 열에 의하여 한쪽 팔의 온도가 증가하여 양팔의 도파로간의 굴절률 차이가 어느 이상이 되면 완전히 열이 가해지지 않은 쪽 도파로로 광이 진행되어 흘려주는 전압에 관계없이 더 이상 출력 특성의 변화가 없는 디지털 특성을 나타낸다. 또한 광도파로의 복굴절이 존재하여도 편광특성에 무관하게 동작하는 장점이 있다. 2×2 스위치는 일반적으로 4개의 1×2 스위치의 조합으로 구성된다. 1×2 DOS 스위치를 이용한 경우에 2×2 스위치를 구동하기 위해서는 모두 3개의 조절 전극(control electrode)이 필요하다. DOS 형태의 광스위치 특성에서 실제 시스템에 가장 문제가 되는 점은 스위칭 누화율(crosstalk)로 최소 -35 dB 이상을 얻어야 한다. 그러나 지금까지의 DOS 형태는 -30 dB 이상을 얻기 어려웠다. 하지만 최근 쉴프텍스에서 개발한 DOS 구조로 제작된 스위치는 -70 dB 이상의 누화율을 얻을 수 있었다. 이것은 전극 구조를 변경하여 반대편으로 흐르는 광을 완전 감쇠시켜서 가능하였다.

그림 15는 기존 DOS 구조의 광스위치 특성 curve와 누화율이 크게 개선된 일종의 광감쇠기 기능이 집적된 DOS 구조의 광스위치 특성 curve를 비교하였다. 보는 바와 같이 기존 DOS의 경우

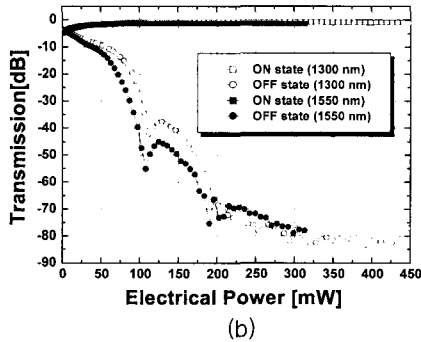
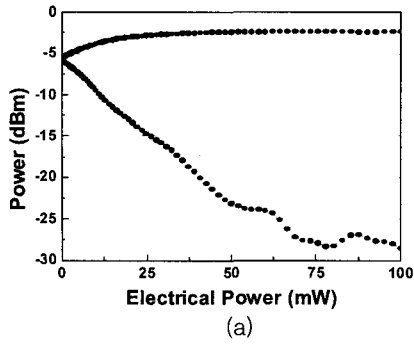


그림 15. (a) 기존 DOS 특성, (b) 누화가 개선된 DOS 특성.

-30 dB 이상을 얻기 어려웠지만 가변 광감쇠기 집적된 DOS는 -70 dB 이상을 얻을 수 있었다.

광도파로 형태의 스위치 이외에도 광스위치는 모터와 프리즘 등을 이용한 광섬유형 mechanical 스위치, OMEMS(optical micro-electro mechanical systems) 소자가 있다. 현재의 세계적 추세는 mechanical switch는 크기와 집적화에 불리하여 점차 사라지고 있으며, 전체적으로 삽입손실, 누화, PDL(polarization dependence loss) 등의 spec. 측면에서 볼 때 가장 유리한 OMEMS switch가 시장이 대체를 이루고 있다. 그러나 통신망의 소형, 저전력, 집적화가 계속 이루어지면서 다채널 array 소자의 필요성이 크게 부각되고 있는 시점에서 집적화에 가장 유리한 폴리머나 실리카 광도파로 소자가 유리하다. 특히, 폴리머 광도파로 소자의 특성이 매우 빠른 속도로 발전하고 있고 대부분의 spec.이 OMEMS switch와 유사한 수준에 있어서 가격적인 면과 집적화에서 가장 유리한 폴리머 광스위치 소자가 ROADM 시장의 대체가 되리라 생각한다.

4.3 다채널 어레이형 가변 광감쇠기(VOA)

가변 광감쇠기는 광신호의 세기를 가변적으로 즉, 전압과 같은 신호에 의하여 조절하는 소자이다. 이것은 전자소자에서는 일종의 가변 저항과 같은 개념이다. ROADM에서 VOA는 AWG 뒷단에서 각 파장으로 분리된 광신호의 세기를 평탄화하는 소자이다.

그림 16은 VOA의 대표적 적용 예를 보여주고 있다. 각 파장이 다중화된 상태로 전송되어온 신호를 AWG 등을 통해 역다중화하여 각 파장으로 분리한다. 이 때 분리된 각 파장의 신호는 그 세기가 제각각으로 일정하지 못하다. 이 신호를 VOA를 이용하여 세기를 일정하게 조절하여 주는 역할을 한다.

VOA 소자 역시 현재는 미국의 Lightwave사(현 NEO Photonics)에서 개발한 Deflection MEMS 기술을 이용한 MEMS VOA가 시장의 주도권을 쥐고 있다. 미국의 Gemfire사와 Dupont pho-

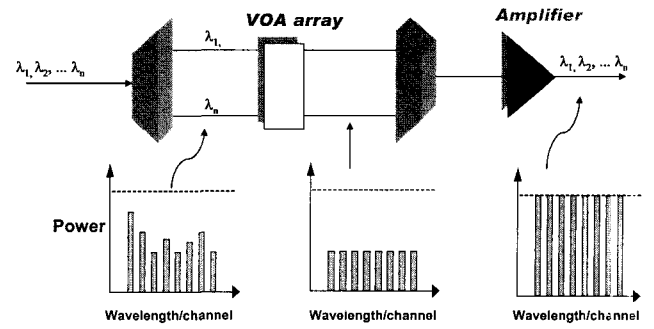


그림 16. 가변 광감쇠기(VOA)의 ROADM 시스템 적용 예.

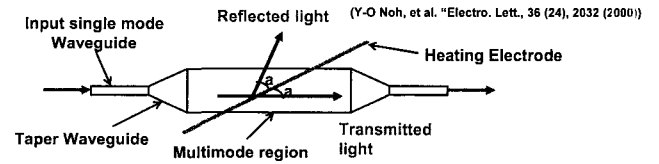


그림 17. 직선 도파로를 이용한 VOA의 설계 개념도.

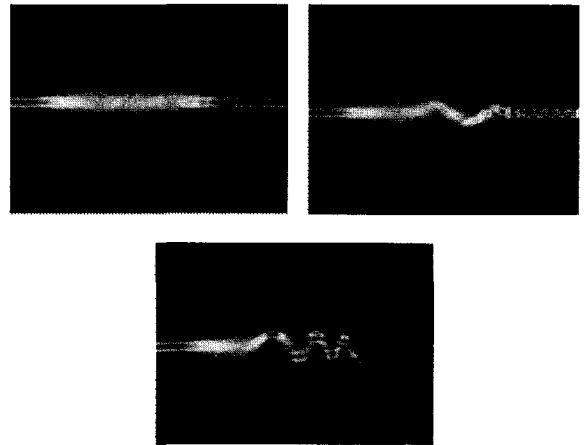


그림 18. VOA의 simulation 결과.

tonics사가 폴리머를 이용한 다채널 VOA를 상용화하여 판매되고 있다. 아직은 특성이 조금 뛰어난 MEMS VOA가 주로 단일 채널 시스템에 채용되어 사용되고 있지만 폴리머 VOA도 집적화와 경제성 등의 장점으로 시장 진입을 하고 있다. VOA는 다양한 도파로 구조가 발표되었지만, 캠옵틱스에서 상용화한 VOA는 구조가 직선 도파로 형태로 매우 간단하고 제어가 용이하며 소자의 길이가 짧아서 특성 개선에 많은 장점이 있다. 그림 17은 캠옵틱스 VOA의 구동 원리로 직선 도파로 중앙에 다중모드 영역을 만들어 이 영역에서 특정 각도로 제작된 전극에 열을 가했을 때 진행되는 광의 다중모드가 여기되고 여기서 여기된 다중모드 광은 뒤 부분의 단일모드 도파 영역에서 더 이상 진행하지 못하고 외부로 빠져나가는 구조를 가지고 있다.

그림 18은 VOA 작동의 simulation 결과로서 온도 차가 6 °C일 경우 일부 광이 외부로 빠져 나가고 약 42 °C가 되었을 경우 완전히 감쇠됨을 볼 수 있다.

이렇게 제작된 VOA의 특성은 삽입 손실, 소모 전력, 파장 의존성 등에서 MEMS VOA와 유사한 특성을 보이며, 폴리머 VOA로는 최고의 특성을 보인다. 그림 19는 제작된 VOA의 특성 curve를 도

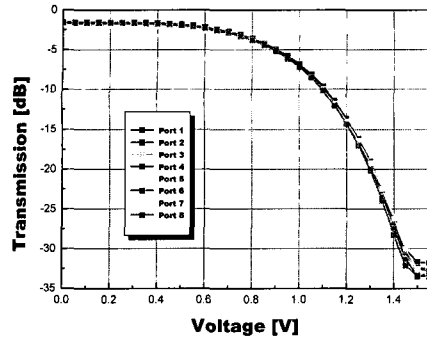


그림 19. VOA의 전압에 따른 광 감쇠 특성 curve.

시하였다. 그래프에서 보는 바와 같이 전극에 전압을 걸어줌에 따라 출력광의 세기가 점차 약해진다. 약 1.4 V에서 약 30 dB 정도 광 감쇠가 일어남을 볼 수 있다.

5. 결론

지금까지 고분자를 이용한 ROAD용 광도파로 소자에 대하여 간략하게 살펴보았다. 현재 폴리머 광소자는 아주 경쟁력 있는 저손실 고분자 재료가 속속 개발되고 있으며, 이들 재료를 이용한 열광

학 폴리머 소자, 특히, VOA 및 광스위치는 상용화 되어 현재 초고속 대용량 광전송 시스템에 채용되어 성공적으로 시장 진입을 한 상태이다. 또한 이러한 열광학 소자가 실제 사용 환경에서 모든 신뢰성을 만족하였다. 또한 Athermal AWG의 가능성을 확인하였으며 조만간 상용화의 길이 열릴 것이다.

한편 폴리머 광도파로 기술의 비약적인 발전은 지금까지 통신 시장에서만 활용되어 왔으나 앞으로는 응용 범위가 차츰 넓어져 의료 공학, 센서 공학 쪽으로 폭 넓은 발전이 기대되고 있다.

참고문헌

1. M. C. Oh, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 2543 (1998).
2. L. Eldada, *et al.*, *SPIE*, **3006**, 344 (1997).
3. T. Matsuura, *et al.*, *Macromolecules*, **26**, 419 (1993).
4. K. Petermann *et al.*, *Electron. Lett.*, **33**, 518 (1997).
5. H.-J. Lee, *et al.*, *J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed.*, **37**, 2355 (1999).
6. N. Keil, *et al.*, *SPIE*, **2449**, 281 (1995).
7. S.-S Lee, Y.-S Jin, and Y.-S Son, *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11**, 590 (1999).
8. M. C. Oh, J. H. Ahn, and S. G. Han, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 1559 (1998).
9. L. Eldada and R. A. Norwood, *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10**, 1416 (1998).