

1. 서론

전자 소자의 집적도와 클럭 스피드의 증가에 따라 효과적인 성능을 위해 소자, 보드 레벨의 통신 대역 폭의 증가가 반드시 수반되어야 한다. 그러나 기존의 전기적 연결의 경우 전자파 간섭, 누화, 신호 왜곡 현상 등의 여러 가지 심각한 문제점이 발생하여 연결 길이가 제한된다. 구리와 새로운 유전물질을 사용한 전기적 연결이 어느 정도 문제점을 해결해 주지만 미래의 고속 데이터 통신을 위해서는 궁극적으로 새로운 구조의 연결이 필요하다.

그 중 광 연결이 미래의 고속, 고용량의 데이터 통신의 대안으로 생각되어 왔다^[1]. 광 연결은 전기적 연결과 비교하여 누화 문제와 전자파 간섭에 민감하지 않고 2D array의 경우 수 Tbps/cm²의 높은 대역폭도 가능하다^[2]. 위와

이 점유할 것으로 예상된다.

고분자 광 도파로 재료는 1990년대 IBM사에서 p-nitro aniline 계 고분자를 이용한 초고속 광변조기 제작 가능성이 보고된 후 전기 광학 효과를 이용한 초고속 광변조기 연구에서 시작하여 WDM 방식의 광통신 시스템에 사용되는 다중 모드 광도파로를 이용한 광 분배기와 단일 모드 도파로를 이용한 가변 광 감쇄기, 광 스위치, 광 분배기, 파장 다중/역다중화기와 같은 여러 소자들에 대한 연구와 개발이 이루어져 왔다.

그러나 초기 저손실 광 도파로 고분자 소재들은 저손실 광 도파로 소재에 적합하게 개발된 것이 아니라 일반적인 광투과성이 좋은 기존의 플라스틱 광섬유용 물질 및 반도체용 저 유전상수 고분자 물질 등의 소재를 응용하고 있거나, 1.3 μ m이나 1.55 μ m의 파장에서 광흡수에 의한 광전송

특집 ─ 광 연결(Optical Interconnection)

광 연결용 고분자 광 도파로 재료 및 제작

노영욱*, 이형중*

같은 장점을 구현한 여러 가지 형태의 광 연결 시스템이 자유공간, 광 섬유, 그리고 평판 광 도파로를 이용하여 소자 레벨과 보드 레벨에서 제안되어 왔는데 전송경로에 따라 1, 2, 3세대로 구분하며, 현재 공존하여 발전하고 있다.

제 1세대 광 PCB는 광 섬유를 사용하여 mother board와 daughter card를 링크시키는 시스템을 말하며 제 2세대는 광섬유를 고분자 필름에 결합한 flexfoil을 이용한 시스템을 말한다. 여기까지는 국내 및 국외에서 이미 생산현장에서 양산체제까지 진행이 되고 있는 수준이며, 최근에는 광 섬유와 광 도파로를 PCB 기판 내에 내장된 embedding 시스템으로 전기적 신호를 광신호로 변환하여 전송하는 hybrid 시스템인 제 3세대 광 PCB에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 향후 대부분의 PCB 시장은 제 3세대 기술

손실을 낮추기 위해 이중 수소 및 불소 치환한 예에 지나지 않아, 내열성, 다층 박막화를 위한 내약품성, 전기적 특성, 투명성, 복굴절을 등의 기본적인 저손실 광 도파로 고분자 소재 요구 특성을 만족시키지 못했다. 최근에 들어서는 저손실 고분자 광 도파로 소재(low-loss polymeric optical waveguides, LLPOW)가 속속들이 개발되어 이들의 낮은 광 도파로 손실, 높은 열광학 효과, 편리한 가공성을 이용한 다양한 광소자 연구가 진행되고 있다.

고분자 재료는 열광학 계수가 높고 굴절을 조절이 쉬우며 접착성, 적층성, 유연성, 경제성 등의 많은 장점을 가지고 있지만 실리카에 비해 열안정성이 나쁘고 C-H bond의 overtone의 영향으로 1.3 μ m와 1.55 μ m 대역의 광손실이 상대적으로 크다. 그러나 광 연결에 사용되는 파장은 고분

자 재료의 손실이 가장 작은 800nm 대역으로 유리하다. 특히, 광 연결에 사용되는 도파로는 다중모드 광도파로이므로 각 층 특히 코어의 두께가 약 50~200 μ m가 필요한데, 실리카의 경우는 후막 형성이 아주 어려운데 반해 고분자 재료는 분사, dipping, 스펀코팅 등을 이용하여 쉽게 두꺼운 막을 형성할 수가 있다. 기판의 종류에도 무관하게 제작 가능하기 때문에 FR4 기판을 이용한 광 PCB에도 쉽게 적용 가능하고, 유연성을 가지는 고분자 재료를 이용하면 flexible 광도파로도 제작 가능하다.

2. 광소자용 고분자 재료 및 응용

2.1 고분자 광도파로 재료 특성

고분자 광도파로 소재는 앞에서 언급했듯이 종합 정보통신망의 구현에 절대적으로 필요한, WDM 관련 광소자 뿐만 아니라 광 연결 소자에 응용되는 핵심소재이다.

고분자 광도파로 소재로 요구되는 기본 재료 특성은 높은 열 및 환경 안정성, 통신 파장 대역에서의 낮은 광손실, 굴절률 조절성, 낮은 복굴절성, 다양한 기판의 사용 가능한 접착성, 다층 적층성, 경제성 등이다. 표 1은 여러 가지 응용에 따라 요구되는 고분자 재료의 특성을 요약한 것이다.

단일 모드 광소자의 경우에는 광손실, 복굴절율이 아주

중요한 특성이고, 특히 광 감쇄기나 광 스위치와 같이 열광학 효과를 이용하는 소자에서는 구동 전력을 낮추기 위해 높은 열광학 계수가 필요하다. 반면, 다중 모드 광도파로의 경우는 전송 파장 대역이 800nm이므로 손실과 복굴절에는 민감하지 않은 반면 100 μ m 이상의 후막을 형성할 수 있어야 한다. 또한 광 PCB는 기존의 PCB 공정과 동일한 lamination 공정을 적용하게 되는데, 다층 PCB 제조 시에는 170 $^{\circ}$ C에서 1시간 이상의 lamination 공정과 230 $^{\circ}$ C에서 10초 이상의 soldering 공정이 필요하다. 따라서 광 PCB의 제조 공정에 부합되는 고분자 광도파로 소재의 안정성을 확보하기 위해서는 180 $^{\circ}$ C 이상의 열 안정성을 가져야 한다.

일반적인 요구사항으로 광소자의 사용 온도는 -40~85 $^{\circ}$ C이므로 이 온도 범위에서의 열 안정성은 필수적이다. 고분자 재료의 열 안정성은 온도 변화에 따른 광학적 특성 변화와 물리적인 재료의 분해 온도를 측정함으로써 그 안정성을 알 수 있다.

첫째, 광학적 특성 변화는 고온에서의 장시간에 걸친 고분자 박막의 굴절을 변화로 알 수 있다. 고분자 박막 내부의 물성 변화 예를 들어, 내부 응력의 증가, micro crack 발생, 일부 성분의 분해 등 그 재료의 초기 상태에서의 변화가 발생하면 가장 민감하게 굴절률의 변화로 나타난다. 고분자 필름 자체의 신뢰성은 결국 고분자를 이용한 광소자의 신뢰성에 가장 큰 영향을 미친다. 신뢰성 평가는

표 1. 광소자의 종류에 따른 주요 요구 사항

Mode/Application	Key features
Single mode - VOA, Switch - Splitter, AWG	- Propagation loss(< 0.3dB/cm @ 1550 nm) - Birefringence(< 10 ⁻⁴) - Thermo-optic coefficient(core/clad, TE/TM) - Wide range refractive index control - Environmental stability(Td, Tg control)
Multimode - Optical PCB - Splitter - Platform	- Propagation loss(< 0.2dB/cm @ 850, 1310 nm) - Thick film formation(> 100 nm) - Easy waveguide patterning - Low cost fabrication - Compatibility with any substrate - Resistance to lamination and solder reflow process
Process Properties	- Wide range film thickness controllability - Thickness uniformity control - Planarization, Adhesion - Pattern ability(Dry or Wet etching, embossing) - Resistance(Humidity, Chemical, Thermal) - Dimensional stability



Acetylene Terminated Fluorinated polyethers

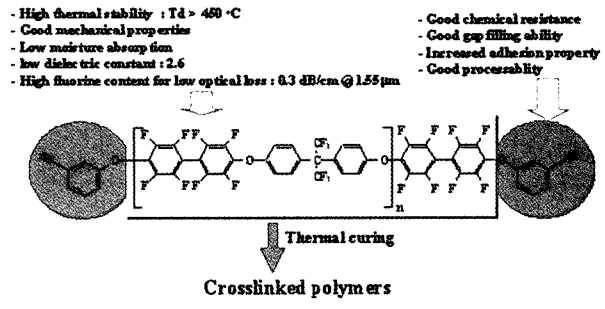


그림 1. ETRI에서 개발된 불소 치환 폴리 아틸렌 에테르의 구조 및 특성.

최근에는 독일의 Microresistor사, 호주의 Redfun 등에서 개발되고 있는 Sol-gel을 이용한 재료가 많이 발표되고 있다. 과거에는 sol-gel 재료가 재현성 문제와 완전한 gelation 공정의 어려움 등으로 광손실이 커서 실용화에 문제가 많았지만 최근에는 이러한 문제를 해결한 제품이 선보이고 있다.

위의 재료들은 대부분 열 경화성 고분자 재료인데 반해, 1998년에는 미국의 Allied Signal사에서는 아크릴레이트(acrylate)의 광가교 특성을 이용하여 350°C 이상의 열안정성을 가지는 자외선 경화가 가능한 불소 치환 아크릴레이트(UV-curable fluorinated acrylate)를 이용한 광소자를 발표하였다⁷⁾. 이 물질의 특징은 기존의 photo-lithography 공정이나 레이저 직접 전사(laser direct-writing) 공정으로 쉽게 소자 제작이 가능하여 열 경화성 고분자 물질에 비해 소자 제작 단가를 낮출 수 있고, 1.3μm 또는 1.55μm에서의 광 손실이 각각 0.03, 0.07dB/cm로 아주 낮으며, 굴절률을 1.3에서 1.6까지 단계적으로 조절 가능하며, 복굴절이 0.0008정도로 편광 의존성이 아주 낮았다.

캠옵틱스사는 perfluorinated acrylate monomer를 이용한 UV curable fluorinated polymer(ZPU series)를 개발 시판하고 있다. 이 재료는 AlliedSignal과 유사한 acrylate monomer를 기반으로 광특성이 우수하며 광소자 공정에 최적화되어 주로 단일 모드 도파로를 이용하는 광 스위치 및 광감쇠기 제작에 응용되어왔다^{8,9)}.

앞의 재료들은 주로 재료는 주로 건식 식각을 이용하여 도파로를 제작하는데 다중 모드 도파로 제작 시 공정 비용과 시간이 많이 걸리고 기판의 크기 등에 제한이 있으므로 이를 해결할 수 있는 공정 방법인 wet etching과 UV-

embossing 가능한 재료를 각각 개발하였다. 첫째는 Wet etching이 가능한 ZPU-W380 series이다. ZPU-W380은 광소자 제작을 위하여 100um 이상의 후막 제작이 가능하고, 형성된 후막은 기존의 photo-lithography 공정에 의하여 마치 photoresist와 같이 현상에 의해 도파로 형성이 가능하다. 두 번째는 다중모드 광소자 제작에 가장 유리하다고 생각되는 UV-embossing 기술 적용이 가능한 WIR30-RI이다. 이 재료는 자외선에 의한 경화 후의 수축이 매우 작으며 몰드에 의하여 패턴의 복제가 이루어지므로 용제와 같은 비 반응성 휘발 물질이 전혀 함유되지 않았다. 개발된 재료는 광 진행 손실이 850nm에서 slab waveguide로 측정된 결과 측정 한계인 0.1dB/cm 이하로 나왔다. 또한 1310nm 대역에서는 약 0.12dB/cm로 우수한 광 손실 특성을 보여주고 있다. 또한, 굴절율을 1.4500에서 1.5100까지 쉽게 조절 가능하기 때문에 다양한 크기의 도파로 제작이 가능하다. 열 안정성은 TGA(Thermogravimetric analysis)로 측정된 결과 1% 열 분해 온도가 300°C로 일반적인 acrylate 폴리머의 경우 보다 약 50°C 정도 높은 안정성을 보여 주었다. 이것은 불소계 폴리머의 안정성에서 기인한다.

3. 고분자를 이용한 광 연결용 광 도파로

고분자 재료를 이용한 다중모드 광도파로의 제작 방법은 매우 다양하다. 일반적으로 그림 2에서 기술한 바와 같이 먼저 Si wafer와 같은 기판에 굴절률이 잘 조절된 폴리머를 하부 클래드 재료로 spin coating 후 자외선 경화를 통

광연결용 고분자 광도파로 재료 및 제작

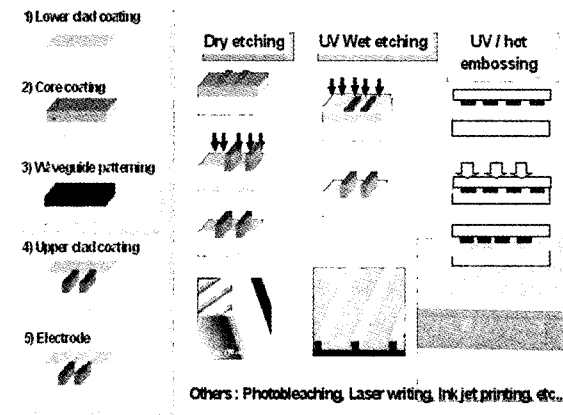


그림 2. 고분자 광도파로 소자 제작 공정.

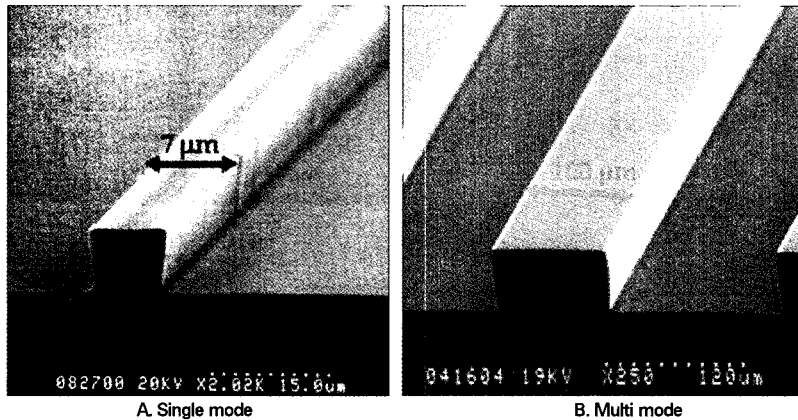


그림 3. 습식 식각으로 제작된 광도파로의 SEM 사진.

하여 박막을 형성한다. 그리고 그 위에 클래드보다 굴절률이 높은(약 0.6~1.5%) 코어를 같은 방법으로 형성한다. 그 후 코어에 광을 confine 시키기 위하여 다양한 방법으로 waveguide patterning 작업이 이루어진다. 그 후 상부 클래드 층을 형성하게 된다.

광도파로 코어를 만드는 방법은 산소 이온을 이용한 건식 식각, UV 조사 후 현상액을 이용하는 습식 식각, 최근 고분자의 장점을 잘 살린 금형을 이용한 UV Embossing 또는 Hot Embossing, 광개시제(photoinitiator)를 이용한 광표백이나, 광가교가 이용되고, 레이저를 이용한 직접 전자(direct writing) 방법을 사용하기도 한다. 광도파로 패턴 형성 방법에 따라 공정의 용이성 및 비용의 차이가 발생한다. 또한 각 공정에 따라 적용 폴리머 재료 및 공정 장비가 달라지게 된다.

먼저 일반적인 방법은 기존의 단일모드 광도파로 제작과

동일한 ICP에 의한 건식 식각법을 이용한 도파로 제작이다. 건식 식각 공정은 고가의 식각 장비에 의하여 매우 정밀하게 도파로 형태 및 식각 깊이를 조절할 수 있다. 또한 폴리머 재료의 특성에 관계없이 박막 형태만 얻을 수 있으면 공정이 가능하다. 이 경우 폴리머는 단순히 산소 plasma에 의하여 쉽게 식각 되므로 ICP 마스크로는 주로 Cr과 같은 금속을 사용하거나 실리콘이 함유된 photoresistor를 이용하면 아주 용이하게 작업할 수 있다. 그러나 건식 식각의 경우 고가의 ICP 장비와 plasma 식각을 위한 etching mask 공정이 추가되어야 하므로 저가의 양산에는 비용적인 부담이 따른다. 그래서 이 방법은 주로 고가이면서 정밀한 패턴을 요구하는 단일모드 광도파로 제작에 많이 사용된다.

습식 식각(Wet etching) 방법에 의한 광도파로 제작은 그림 2와 같이 공정 자체는 매우 단순하다. 도파로 코어

폴리머 재료 자체가 photoresister와 같은 특성을 가지고 있어 코어를 코팅한 후에 도파로 마스크를 Mask aligner에 장착 한 후 단순히 UV exposure만 시키면 도파로 코어 폴리머가 광에 노출된 부분은 화학적 광 반응에 의하여 현상액에 녹아 나가지 않고 광에 노출되지 않은 부분은 현상액에 모두 녹아 제거되어 광도파로가 형성된다. 기술한 고분자 재료 중에 ZPU-W380 series는 이와 같은 습식 식각 특성을 가지게 개발되었다. 그림 3은 습식 식각법에 의하여 제작된 단일모드 및 다중모드 광도파로의 SEM 사진으로 우수한 수직도를 보여준다.

UV-embossing 방법에 의한 다중모드 광도파로 제작은 최근 많은 연구가 이루어 지고 있다. 이 방법은 폴리머 재료의 가장 큰 장점이 몰드에 의한 복제로 대량 생산이 가능하다는 것이다. 그러나 문제점은 매우 정밀한 패턴을 몰드로 구현하는 것이고 또한 몰드 내에서 제작된 도파로가 수축 등의 상태 변화를 일으키는 것이다. 그림 4는 WIR30-RI로 제작한 도파로의 현미경 사진이다. 사진에서 보는 바와 같이 몰드의 형상이 도파로에 매우 정교하게 복제됨을 알 수 있다.

마지막으로 Laser writing 은 형성하고자 하는 도파로를 강한 레이저를 직접 조사하여 도파로 패턴을 형성하는 방법이다. 이 방법은 대면적의 기판에 긴 도파로나 PCB 기판과 같은 반도체 공정에 사용할 수 없는 기판 위에 직접 도파로를 형성해야 할 경우 아주 유용하다. 이러한 Laser direct Writing에 필요한 광폴리머 재료의 특성은 습식 식각 공정에 필요한 재료의 특성과 거의 동일하다. 이 경우도 강한 레이저에 의하여 레이저의 조사가 있는 부분은 광교 반응에 의하여 crosslinking이 일어나고 조사되지 않

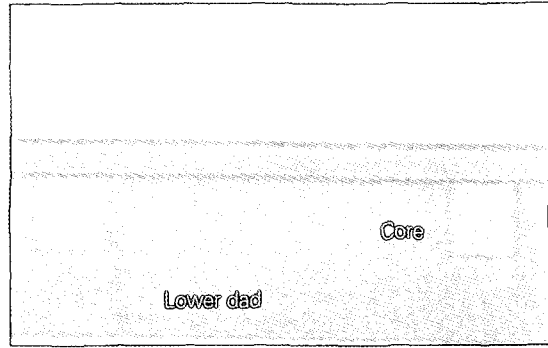


그림 4. UV embossing방법으로 제작된 광도파로의 현미경 사진.

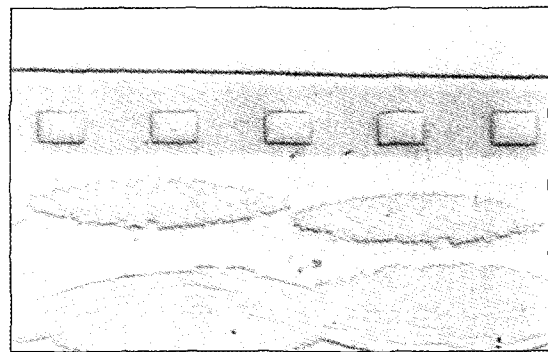


그림 5. FR4 기판에 제작된 다채널 광도파로의 폴리싱된 단면의 현미경 사진.

은 부분은 현상액에 의하여 제거된다.

다음은 FR4 기판을 이용하여 개발된 ZPU-W380 재료와 WIR30-RI 재료를 사용하여 광도파로를 제작한 결과이다. ZPU-W380 재료는 wet etching 가능한 물질로 mask aligner를 이용한 wet etching 공정으로 도파로를 제작하였고, WIR30-RI의 경우는 기존의 ICP를 이용한 dry etching 공정에 의하여 제작하였다. 그림 5는 FR4 기판 위에 제작된 multi-channel straight waveguide의 단

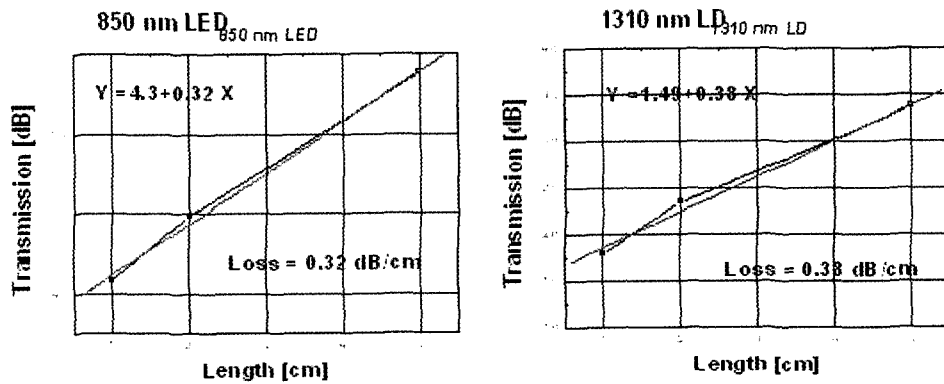


그림 6. FR4 기판 위에 제작된 광도파로의 손실(cutback method).

광연결용 고분자 광도파로 재료 및 제작

면 사진이다. 사진에서 보는 바와 같이 FR4 계면과 폴리머 사이에 gap-filling이 매우 잘되어 우수한 집착 특성을 보여 주었다. 또한, FR4 기판 위에 제작된 straight waveguide를 cutback 법에 의하여 광도파 손실을 측정하였다. 그래프에서 보는 바와 같이 850nm LED를 이용하여 측정한 결과 도파 손실이 0.32dB/cm 나왔다. 또한 1310nm LD를 이용하여 측정한 결과 0.38dB/cm의 광손실을 보여주었다.

4. 결론

본 논문에서는 기존의 광 소자뿐 아니라 최근 연구가 활발하게 진행되고 있는 광 연결에 사용 가능한 고분자 재료들의 요구 사항, 개발 현황, 제작 방법 등을 살펴보았다. 850nm 대역에서의 저손실, 집착력, lamination과 soldering 온도를 견딜 수 있는 내열성, 신뢰성, 제작 용이성이 광 연결에 사용되는 재료의 필수 조건이었다. 또한 습식 식각 또는 embossing을 이용하여 간단한 광 연결용 다중모드 도파로를 제작 하였다.

이상에서 본 바와 같이 고분자를 이용한 다중모드 광도파로 제작은 현재 연구단계에서 점차 실용화 및 상용화의 단계로 나아가고 있다. 상용화의 가장 큰 문제점은 역시 광소자의 높은 가격인데 고분자를 이용한 광도파로 소자의 경우 그 특성이 우수할 뿐 아니라 제작이 용이하고 또한 가격 경쟁력을 확보할 수 있으므로 향후 매우 경쟁력 있는 기술이 될 것이다.

참고문헌

- (1) J.W. Goodman et al., *Proc. IEEE* 72, 850-866(1984).
- (2) A. L. Lentine et al., *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2, 77-84(1996).
- (3) T. Matsuura, et al., *Electron letter.*, 29, 269(1993).
- (4) T. Matsuura, et al., *Macromolecules*, 25, 5858(1993).
- (5) K. Petermann et al., *Electron. Lett.* 33, 518(1997).
- (6) H. -J. Lee, et al., *J. Polym. Sci. Poly. Chem.*, 36, 2887(1998).
- (7) L. Eldada, et al., *SPIE*, 3006, 344(1997).
- (8) Y.-O. Noh et al., *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 16, 446-448(2004).
- (9) Y-O Noh et al., *Optics Communications*. 242, 533-540(2004).

약 력



노영욱

~ 현재 (주)캠옵틱스 팀장
 2000 ~ 2004 (주)제포토닉스 팀장
 2004 한국정보통신대학교 공학부 (박사)
 1999 광주과학기술원 정보통신공학과 (석사)
 1997 한국과학기술원 물리학과 (학사)



이형종

~ 현재 : (주)캠옵틱스 대표이사
 2004 ~ 2005 한국전자통신연구원 BoN단 선임연구원
 2000 ~ 2004 (주)제포토닉스 이사/연구소장
 1995 ~ 2000 한국전자통신연구원 원천기술 연구본부
 선임연구원
 1995 한국과학기술원 화학과 (박사)
 1992 한국과학기술원 화학과 (석사)
 1990 부산대학교 화학과 (학사)