

論文97-34D-4-10

광표백으로 유기되는 복굴절을 이용한 전기광학 폴리머 광도파로 편광기의 제작

(Fabrication of Integrated Optical Waveguide Polarizer by Utilizing the Birefringence Induced by Photobleaching in an Electro-Optic Polymer)

安世源*, 李相信*, 申相永*

(Seh-Won Ahn, Sang-Shin Lee, and Sang-Yung Shin)

요 약

상온에서 광표백을 할 때 유기되는 복굴절을 이용하여 1.55 μm 파장대에서 동작하는 폴리머 광도파로 TE 통과 편광기를 제작하였다. 반응이온식각법을 이용하여 제작된 릿 광도파로 중간에 TE 모드만을 도파시키는 광표백 광도파로를 집적함으로써 광도파로 TE 통과 편광기를 구현하였다. 제작된 편광기는 구조가 간단하고 전계 폴딩과 같은 고온 공정이 없다는 장점이 있다. 제작된 소자의 편광 소멸비는 약 21 dB이며 모드 부정합에 의한 추가 손실은 약 0.4 dB이다.

Abstract

A polymeric waveguide TE-pass polarizer operating at wavelengths around 1.55 μm is realized by utilizing the birefringence induced by photobleaching at room temperature. To implement the polarizer, the photobleached waveguide supporting only TE mode is integrated in the middle of the etched rib waveguide that supports TE and TM modes. It has a simple structure and requires no high temperature process like poling. The measured polarization extinction ratio is about 21 dB and the estimated excess loss is about 0.4 dB.

I. 서 론

광도파로 편광기는 집적광학 기술이 발달함에 따라 많은 연구가 되어왔다. 전기광학 효과를 이용한 광정보 처리 소자들은 큰 전기광학 효과를 얻기 위해 입력광의 한가지 편광성분만을 사용하기 때문에 이러한 소자를 레이저 다이오드나 다른 광정보처리 소자와 집적하기 위해서는 광도파로 편광기가 필요하게 된다. 또한 광센서나 광계측기에서도 단일 편광을 주로 사용하

므로 소멸비가 큰 편광기의 역할이 중요하다.

지금까지 광도파로 편광기는 주로 LiNbO₃ 등의 강유전체를 이용하여 제작되어 왔다. LiNbO₃ 기판 위에 광도파로 편광기를 제작하는 방법은 크게 두가지가 있다. 첫째는 양자교환 (proton exchange) 으로 인해 유기되는 복굴절을 이용하는 방법^{[1]-[4]}이고, 둘째는 금속 클래딩으로 인한 TE, TM 편광 성분의 도파손실의 차이를 이용하는 방법^{[5]-[8]}이다. 후자의 방법은 금속 클래딩으로 인한 도파손실 때문에 광도파로 편광기의 성능을 결정하는 중요한 요소인 추가손실 (excess loss) 이 크다는 단점이 있으므로 전자의 방법이 많이 이용되고 있다. 그러나 LiNbO₃ 등의 강유전체 기판 위에 소자를 제작하게 되면, 기판의 제약 때문

* 正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科

(Dept. of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

接受日字:1997年1月15日, 수정완료일:1997年4月4日

에 다른 광정보처리 소자나 전기회로와의 대규모 집적에 불리하므로 이러한 문제를 극복하기 위해서 전기광학 폴리머를 이용한 집적광학 소자가 활발히 연구되고 있다. 최근에는 전계 폴링으로 인해 유기되는 복굴절을 이용한 전기광학 폴리머 광도파로 편광기가 제작되어 발표되었다^{[9], [10]}.

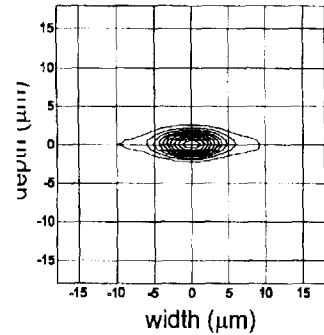
전기광학 폴리머에 강한 자외선을 쬐면 전기광학 폴리머와 결합하고 있는 색소 분자가 변형되면서 굴절률이 낮아지게 되는데, 이러한 현상을 광표백이라 한다. 광표백 현상은 전기광학 폴리머의 굴절률을 정밀하게 변화시킬 수 있으므로 저손실 광도파로 제작에 많이 이용되어 왔다. 그런데 최근 전기광학 폴리머인 PMMA-DR1을 상온에서 광표백을 하게 되면 TE 모드와 TM 모드에 대한 광표백 효율의 차이 때문에 TE 모드에 대해서는 굴절률이 감소하지만 TM 모드에 대해서는 굴절률이 거의 감소하지 않고 오히려 약간 증가한다는 연구결과가 발표되었다^{[11], [12]}. 즉 상온에서 전기광학 폴리머 박막에 자외선을 쬐어 주면, 폴리머 박막과 나란하게 배열된 색소 분자에 대한 광표백 효율이 폴리머 박막과 수직하게 배열된 색소 분자에 대한 광표백 효율보다 더 크기 때문에 폴리머 박막에 복굴절이 유기된다. 이 현상은 아조 (azo) 계 전기광학 폴리머인 PMMA-DR1에서만 관측되어 보고되었으며 이를 이용하여 광도파로를 제작하게 되면 TE 모드만 도파되므로 광도파로 TE 통과 편광기를 제작할 수 있게 된다.

본 논문에서는 상온에서 광표백을 할 때 유기되는 복굴절을 이용하여 광도파로 TE 통과 편광기를 제작하였다. 제II장에서는 광표백법을 이용한 전기광학 폴리머 광도파로 TE 통과 편광기의 동작원리에 대하여 알아보고 제III장에서는 소자의 제작과정과 특성측정 및 결과에 대해 언급하고 제IV장에서는 결론을 맺는다.

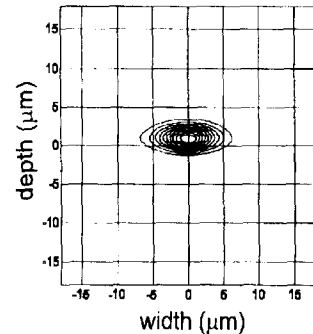
II. 소자의 동작원리

광표백으로 유기되는 복굴절이 광표백 광도파로 (photobleached waveguide) 의 도파특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 다음의 두가지 광표백 조건으로 광도파로를 제작하였다. 우선 상온에서의 광표백 효과를 알아보기 위해 기판 위에 하부 클래딩, 도파층, 상부 클래딩을 차례로 스펀코팅한 후 광도파로가 형성될 부분을 가리고 광표백을 하여 광도파로를 제작하였다.

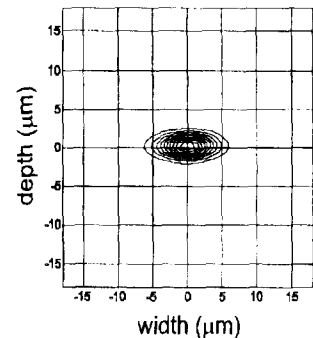
이 때 광도파로의 도파층으로는 전기광학 폴리머인 PMMA-DR1을 사용하였고, 클래딩으로는 자외선 경화 에폭시의 일종인 UV15를 사용하였으며, 도파층의 두께는 $2 \mu\text{m}$, 클래딩의 두께는 $4 \mu\text{m}$ 로 하였다. 광표백은 1 kW 자외선 광원을 이용하여 하였다. 이렇게 제작된 광도파로는 예상대로 TE 모드만이 도파되었고 TM 모드의 편광 소멸비는 본 실험실의 측정 한계치인 35 dB 이상이었다.



(a) 1 hours ($14.8 \mu\text{m}$)



(b) 2 hours ($11.5 \mu\text{m}$)



(c) 3 hours ($11.0 \mu\text{m}$)

그림 1. 광표백 시간에 따른 TE 모드 형태의 변화 (채널 폭 : $7 \mu\text{m}$)

Fig. 1. Change of a TE mode profile with photobleaching time. (channel width : $7 \mu\text{m}$)

그림 1에 광표백 시간에 따른 TE 도파 모드의 변화를 나타내었다. 광표백 시간이 길어질수록 도파 모드의 폭이 점점 줄어들음을 알 수 있다. 다음 경우로서, 앞에서와 같이 상온에서 광표백을 하여 광도파로를 제작한 다음 유리천이온도 (glass transition temperature) 근처에서 열처리를 한 후 특성을 측정하였다. 이것은 기존의 광표백 광도파로의 제작 공정을 모사한 것으로 보통 광표백법으로 광도파로를 제작할 때는 도파층을 완성한 후 채널 광도파로 형성을 위한 광표백을 하고 상부 클래딩을 스펀코팅한 다음에 유리천이온도 근처에서 베이킹 (baking) 을 하기 때문이다. 광표백 후에 열처리를 하게 되면, 열에 의해 전기광학 폴리머의 색소 분자들이 불규칙하게 재배열 되면서 각 편광 성분에 대한 광표백된 색소 분자의 비율이 점차 동일해지므로 광도파로의 편광 의존성이 사라지게 된다. 실제로 열처리를 한 후 도파 모드를 측정한 결과 TM 모드도 도파되며, 열처리 시간이 길어질수록 광도파로의 편광 의존성이 점차 사라졌다.

작하게 되면 TE 모드와 TM 모드에 대한 광표백 효율의 차이 때문에 복굴절이 유지되어서 TE 모드에 대해서는 채널 광도파로가 형성되지만 TM 모드는 채널에 한정되지 못하고 채널 밖으로 빠져나가게 된다. 이를 이용하면 광도파로 TE 통과 편광기를 제작할 수 있다. 그러나 광표백 후 열처리를 하게 되면 TM 모드도 도파되기 때문에 편광기로서의 역할을 못하게 되므로 광도파로 편광기 주위의 온도가 높아지지 않도록 해야 한다.

그림 2에 본 논문에서 제안된 폴리머 광도파로 TE 통과 편광기의 구조를 나타내었다. 편광기의 입력부와 출력부에는 TE 모드와 TM 모드를 모두 도파시키기 위해 반응이온식각법 (reactive ion etching method) 으로 릿 광도파로 (rib waveguide) 를 제작하였고, 편광 영역 (filtering section) 에는 TE 모드만을 도파시키기 위해 광표백 광도파로 (photobleached waveguide) 를 제작하였다. 릿 광도파로와 광표백 광도파로의 채널 폭 (W) 은 동일하고, 편광 영역의 길이 (L_f) 는 편광 효율과 관계가 있다. 그리고, 소자 제작 후 광표백 시간을 조절함으로써 릿 광도파로와 광표백 광도파로의 모드 불일치로 인한 추가 손실을 줄일 수 있다.

본 논문에서 제안된 광도파로 편광기는 제작공정이 간단하고 풀림과 같은 고온, 고전압 공정이 없기 때문에 다른 광정보처리 소자나 전기회로와의 집적에 유리하고, 소자를 제작한 후 광표백 시간을 조절함으로써 소자의 추가 손실을 줄일 수 있다는 장점이 있다.

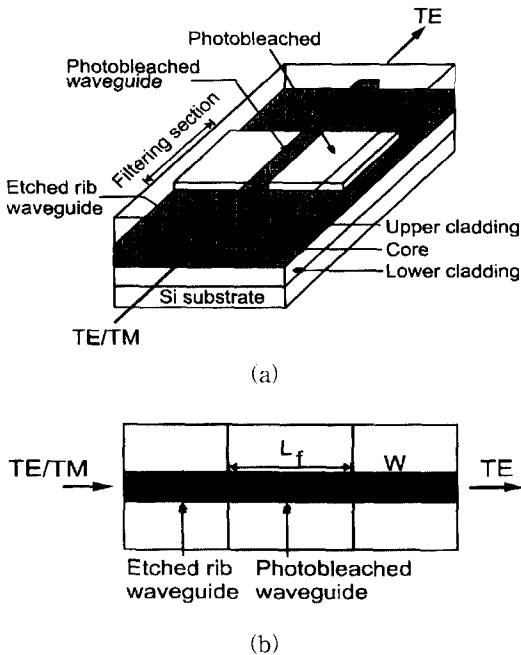


그림 2. 광표백을 이용한 폴리머 광도파로 TE 통과 편광기의 구조 (a) 개략적인 형태 (b) 평면도

Fig. 2. Configuration of the proposed polymeric waveguide TE-pass polarizer. (a) A schematic view (b) A top view

III. 소자 제작 및 특성 측정

본 논문에서 제안된 광도파로 TE 통과 편광기의 제작공정은 다음과 같다. 기판으로는 SiO_2 가 약 $1 \mu\text{m}$ 정도 증착된 Si 기판을 사용하고, 도파층으로는 IBM-Almaden Research Center에서 개발된 전기광학 폴리머인 PMMA-DR1 (poly (disperse red1 methacrylate-co-methyl methacrylate)을 사용하였으며, 클래딩으로는 Master Bond사에서 공급하는 자외선 경화 에폭시의 일종인 UV15을 사용하였다. 먼저 Si 기판 위에 하부 클래딩으로 UV15을 $4 \mu\text{m}$ 의 두께로 스펀코팅한 후 수십 mtorr의 진공 상태에서 자외선으로 경화시킨다. 광도파로의 도파층으로는 PMMA-DR1을 $2.5 \mu\text{m}$ 의 두께로 스펀코팅을 한다. 도파층이 완성된 후 도파층 위에 PR (photoresist) 을 이용하여 광도파

결론적으로 상온에서 광표백을 하여 광도파로를 제

로 편광기의 입력부와 출력부를 이루고 있는 립 광도파로를 위한 패턴을 제작한 다음, O_2 를 이용하여 반응이온식각을 하면, 광도파로 편광기의 입력부와 출력부에 립 광도파로가 완성된다. 립 광도파로를 제작한 후 다시 상부 클래딩으로 UV15을 $4\ \mu\text{m}$ 의 두께로 스펀코팅하고 자외선으로 경화시킨다. 각각의 폴리머층을 스펀코팅한 후에는 용매를 제거하기 위해 충분히 베이킹을 해 준다.

상부 클래딩 위에 편광 영역의 광표백 광도파로를 제작하기 위한 마스크를 만들기 위해 Au를 진공증착한 후 PR로 광표백 광도파로 패턴을 제작한 다음 에칭하면 상부 클래딩 위에 광표백 광도파로를 위한 마스크가 완성된다. 그 다음 위에서 자외선을 쬐어 광표백을 하면 편광 영역에 광표백 광도파로가 제작된다. 마지막으로 광도파로 편광기의 입출력면을 얻기 위해 Si 기판을 단면절개 (cleaving) 한다. 그림 3에 대략적인 제작공정을 나타내었다.

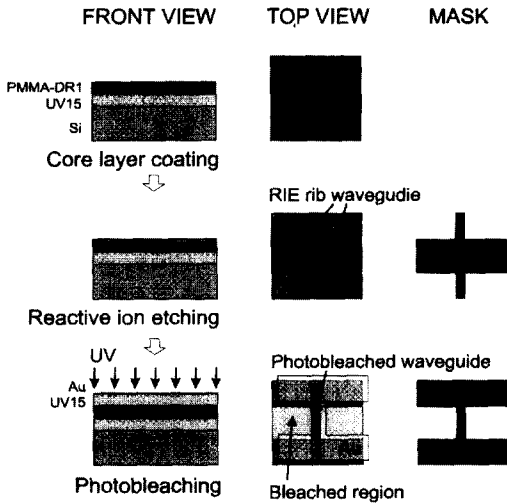


그림 3. 폴리머 광도파로 TE 통과 편광기의 제작공정

Fig. 3. Fabrication procedure of the proposed polymeric TE-pass waveguide polarizer.

입출력부에 제작된 립 광도파로와 편광 영역에 제작된 광표백 광도파로의 도파 모드 형태가 거의 같고 광도파로 편광기의 편광 소멸비가 크게 되는 광표백 조건을 찾기 위해, 일정한 시간 간격으로 광표백을 하며 광도파로 편광기와 그 옆에 같이 제작된 립 광도파로와 광표백 광도파로의 도파 모드를 살펴 보았다. 광도파로의 편광 소멸비를 측정하기 위해 우선 입력광이

TE, TM 모드 성분을 같은 비율로 갖도록 광원 뒤에 있는 $\lambda/2$ plate를 조정하고, Glan-Air 편광기를 TE, TM 모드 방향으로 조정해 가며 출력광의 세기를 측정하였다.

채널 폭 (W) 이 $4\ \mu\text{m}$, $6\ \mu\text{m}$, $8\ \mu\text{m}$ 이고 각각의 채널 폭에 대해 편광 영역의 길이 (L_i) 가 $1\ \text{mm}$, $3\ \text{mm}$, $5\ \text{mm}$ 인 소자를 제작하여 측정을 하였는데, 이들 중 채널 폭이 $4\ \mu\text{m}$ 이고 편광 영역의 길이가 $5\ \text{mm}$ 인 소자가 가장 좋은 성능을 나타내었다. 광표백은 $1\ \text{kW}$ 자외선 광원을 사용하여 3 시간 동안 하였으며, 립 광도파로의 식각 깊이는 $0.55\ \mu\text{m}$ 이다. 이 소자의 편광 소멸비는 약 $21\ \text{dB}$ 로 측정되었고, 추가 손실은 약 $0.4\ \text{dB}$ 로 추정된다. 광표백 광도파로의 도파 손실은 일반적으로 이주각기 때문에 제작된 광도파로 편광기의 추가 손실은 주로 립 광도파로와 광표백 광도파로의 모드 불일치로 인해 발생하게 된다. 광표백 광도파로를 제작할 때 광표백 시간을 조절하면 두 도파로 사이의 모드 불일치를 줄일 수 있다. 그림 4에 제작된 광도파로 편광기에서 립 광도파로와 광표백 광도파로의 모드 형태를 나타내었다.

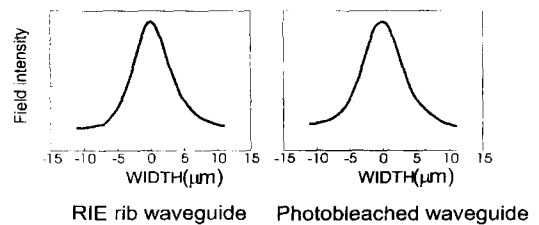


그림 4. 립 광도파로와 광표백 광도파로의 모드 형태 비교

Fig. 4. Guided mode profiles of rib waveguide and photobleached waveguide.

앞에서 광표백 광도파로를 제작하여 편광 특성을 측정하였을 때는 편광 소멸비가 본 실험실의 측정 한계치인 $35\ \text{dB}$ 이상이었으나 제작된 광도파로 편광기의 편광 소멸비가 그만큼 크지 않다. 이처럼 편광 효율이 저하되는 이유는 입력부의 립 광도파로에서 도파되던 TM 모드 성분이 편광 영역에서 채널 밖으로 빠져나간 후 소자의 바깥 경계면에서 반사되어 다시 출력부의 립 광도파로에 커플링되기 때문이다. 이러한 현상은 소자의 바깥 경계면에 격자를 제작하여 출력부의 립 광도파로 쪽으로 반사되는 양을 줄임으로써 해결할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 전기광학 폴리머인 PMMA-DR1을 상온에서 광표백할 때 유기되는 복굴절을 이용하여 광도파로 TE 통과 편광기를 제작하였다. 광표백 광도파로를 제작하여 각 편광 성분에 대한 도파 특성을 측정하고 열처리에 따른 도파 특성의 변화를 관찰함으로써 광표백 공정을 이용하여 TE 통과 편광기를 제작할 수 있으며 열에 의해 동작 특성이 크게 영향 받음을 보였다. 제작된 TE 통과 편광기의 편광 소멸비는 약 21 dB이며 광표백 광도파로와 립 광도파로의 모드 불일치로 인해 발생하는 추가 손실은 약 0.4 dB이다. 본 논문에서 제작된 광도파로 TE 통과 편광기는 구조가 간단하고 전계 폴링과 같은 고온 공정이 없으므로 다른 광정보처리 소자나 전기회로와의 집적이 용이하므로 광집적회로에 유용하게 이용되리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Uwe Hempelmann, Harald Herrmann, Gerd Mrozynski, Volker Reimann, and Wolfgang Sohler, "Integrated optical proton exchanged TM-pass polarizers in LiNbO₃: Modelling and experimental performance," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 8, pp. 1750-1759, 1995.
- [2] Pisu Jiang, Feng Zhou, P. J. R. Laybourn, and R. M. De La Rue, "Buried optical waveguide polarizer by titanium indiffusion and proton-exchange in LiNbO₃," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 8, pp. 881-883, 1992.
- [3] M. Papuchon, S. Vatoux, "Integrated optical polarizer on LiNbO₃:Ti channel waveguides using proton exchange," *Electron. Lett.*, vol. 19, no. 16, pp. 612-613, 1983.
- [4] J. J. Veselka, G. A. Bogert, "Low-loss TM-pass polarizer fabricated by proton exchange for Z-cut Ti:LiNbO₃ waveguides," *Electron. Lett.*, vol. 23, no. 1, pp. 29-30, 1987.
- [5] T. Findakly, B. Chen, "Single-mode transmission selective integrated-optical polarizers in LiNbO₃," *Electron. Lett.*, vol. 20, no. 3, pp. 128-129, 1984.
- [6] J. P. G. Bristow, A. C. G. Nutt, P. J. R. Laybourn, "Novel integrated optical polarizers using surface plasma waves and ion milled grooves in lithium niobate," *Electron. Lett.*, vol. 20, no. 25, pp. 1047-1048, 1984.
- [7] L. L. Buhl, "Optical losses in metal/SiO₂-clad Ti:LiNbO₃ waveguides," *Electron. Lett.*, vol. 19, no. 17, pp. 659-660, 1983.
- [8] G. Stock, "Realization of integrated optical polarizers for Ti:LiNbO₃ with Au, Al, and Ti metal cladding," *Electron. Lett.*, vol. 24, no. 14, pp. 899-900, 1988.
- [9] Min-Cheol Oh, Sang-Yung Shin, Wol-Yon Hwang, and Jang-Joo Kim, "Poling-induced waveguide polarizer in electrooptic polymers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, no. 3, pp. 375-377, 1996.
- [10] Min-Cheol Oh, Sang-Yung Shin, Wol-Yon Hwang, and Jang-Joo Kim, "Wavelength insensitive passive polarization converter fabricated by poled polymeric waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 67, no. 13, pp. 1821-1823, 1995.
- [11] Jiong Ma, Sihan Lin, Wei Feng, Robert J. Feuerstein, Brian Hooker, and Alan R. Mickelson, "Modeling photobleached optical polymer waveguides," *Appl. Opt.*, vol. 34, no. 24, pp. 5352-5360, 1995.
- [12] Wei Feng, Sihan Lin, Brian Hooker, and Alan R. Mickelson, "Study of UV-bleached channel-waveguide performance in nonlinear optical polymer films," *Appl. Opt.*, vol. 34, no. 30, pp. 6885-6891, 1995.

저 자 소 개



安世源(正會員)

1972년 9월 6일생. 1994년 2월 한국과학기술원 과학기술대학 전기 및 전자공학과 졸업(학사). 1996년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사과정 졸업(석사). 1996년 3월 ~ 현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정 재학중. 주관심분야는 폴리머 광도파로 소자, 그리고 광연결 등임.



李相信(正會員)

1968년 9월 5일생. 1991년 2월 한국과학기술원 과학기술대학 전기 및 전자공학과 졸업(학사). 1993년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사과정 졸업(석사). 1997년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정 졸업(공학박사). 1997년 3월 ~ 현재 한국과학기술원 부설 정보전자연구소 연수연구원 (postdoctoral researcher). 주관심분야는 폴리머 및 리튬나리오베이트 광도파로 소자 등임.



申相永(正會員)

1946년 9월 14일생. 1968년 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1973년 Polytechnic Institute of New York, Brooklyn, NY, 전기물리(석사). 1976년 Polytechnic Institute of New York, Brooklyn, NY, 전기물리(박사). 1975년 ~ 1977년 Polytechnic Institute of New York, Brooklyn, NY, 연구원. 1978년 ~ 현재 한국과학기술원 교수. 1986년 ~ 1987년 Optical Science Center, University of Arizona, Visiting Scholar. 주관심분야는 집적광학 소자, 레이저 다이오드의 동력학, 그리고 광연결 등임.