

論文97-34D-11-10

폴리머 광도파로열을 이용한 파장 분할 다중화기의 제작

(Fabrication of a Wavelength Division Multiplexer Based on the Polymeric Arrayed-Waveguide Grating)

吳泰元*,李云榮*,申相永*

(Tae-Won Oh, Woon-Yeong Lee, and Sang-Yung Shin)

요 약

폴리머 광도파로열을 이용한 파장 분할 다중화기를 설계, 제작하였다. 파장 분할 다중화기는 4개 채널을 가지며, 각각의 채널 간격은 3.2 nm로 설계되었다. 파장 분할 다중화기는 유효 굴절률 방법을 이용해 2차원 빔전파 방법으로 설계하였다. 광도파로는 자외선 경화 에폭시인 NOA73을 도파층으로, 수동 폴리머인 PMMA를 하부 클래딩으로 이용하여 제작하였다. 폴리머 광도파로는 반응 이온 식각 방법을 이용하여 제작되었으며, 제작된 소자의 광학적 특성을 측정하였다. 소자의 중심파장은 1548.3 nm, 채널간 파장 간격이 설계치와 같이 3.2 nm였으며, 채널간의 누화는 -18 dB미만이었다.

Abstract

A wavelength division multiplexer based on a polymeric arrayed-waveguide grating has been designed and fabricated. A 4-channel multiplexer with a spacing of 3.2 nm is designed by using the 2-dimensional beam propagation method. A UV-curable epoxy, NOA73, is used for the core layer, and a passive polymer, PMMA, for the cladding layer. The polymer waveguides are fabricated by the reactive ion etching method and their optical properties are characterized. The fabricated device has a center wavelength of 1548.3 nm, and the wavelength spacing between the channels is 3.2 nm. The measured crosstalk is better than -18 dB.

I. 서 론

화상 회의, HDTV 등의 광대역 통신 서비스의 증가에 따라 통신 시스템에서 필요로 하는 전송속도도 빠르게 증가하고 있다. 그러나, 광통신 시스템의 전송 용량은 광섬유의 전송 용량에 훨씬 못미치는 송수신단의 전기신호 처리속도에 의하여 제한되고 있다. 이러한 전기적인 대역폭의 제한을 극복하며, 광섬유의 넓은 전송 대역폭을 이용하기 위하여, 서로 다른 파장의 광

신호를 하나의 광케이블에 다중화하여 전송하는 파장 분할 다중화 방법이 이용되고 있다^[1].

파장 분할 다중화를 위해서는 여러개의 신호를 자기 다른 파장에 실고, 이들을 하나의 광섬유로 보내는 다중화기와 광섬유를 통하여 전송된 광신호를 파장별로 분리해내는 역다중화기가 필요하다. 이를 위해 다양한 방법들이 제시되었다. 이들 중에서 신뢰성이 높은 평면 광회로 기술을 이용한 방법으로는 대표적으로 간섭 필터형과 도파로열 격자 다중화기가 있다^[2,3]. 간섭 필터형은 방향성 결합기와 마하젠더 간섭계로 구성이 된다. 간섭 필터형의 경우 통과대역이 평탄하지 못하며, 많은 수의 채널을 다중화하기 위해서는 여러 단을 직, 병렬로 연결해야하는 단점이 있다. 최근에는 채널

* 正會員, 韓國科學技術員 電氣 및 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Korea Advanced Institute of Science and Technology)

接受日字:1997年8月1日, 수정완료일:1997年10月15日

간의 짧은 파장 간격을 가지는 고밀도 파장 분할 다중화에 적합한 도파로열 격자 다중화기(arrayed-waveguide grating multiplexer)에 대한 연구가 활발히 진행중이다. 도파로열 격자 다중화기는 파장 간격이 짧고 많은 수의 채널을 필요로 하는 과밀도 파장 분할 다중화 방식(Dense WDM)에 적합하며 NxN 상호 결합(interconnection)이나 애드-드롭(add-drop) 기능 등 다양한 응용 분야를 가지고 있는 장점이 있다^[4,5]. 도파로열 격자 다중화기는 저손실의 수동 광도파로 제작이 가능한 실리카, 반도체, 폴리머 등을 이용하여 제작되어 왔다^[6-8].

본 논문에서는 폴리머 광도파로열을 이용한 파장 분할 다중화기를 설계, 제작하였다.

폴리머 광도파로 소자는 저가의 제작이 가능하며, 기판의 제약이 적고 제작 공정이 간단하다. 또한 다른 광소자나 전자소자와의 집적이 용이한 장점이 있다. 파장 분할 다중화기는 4개 채널을 가지며, 각각의 채널 폭은 3.2 nm로 설계되었다. 파장 분할 다중화기는 유효 굴절률 방법을 이용해 2차원 빔전파 방법(beam propagation method)으로 설계하였다. 광도파로는 자외선 경화 에폭시인 NOA73을 도파층으로, 수동 폴리머인 PMMA를 하부 클래딩으로 이용하여 제작하였다. 채널 광도파로의 제작은 반응 이온 식각 방법을 이용하였다. 제작된 소자의 광학적 특성은 1550 nm 대역의 파장 가변 레이저를 이용하여 측정하였다. 소자의 중심파장은 1548.3 nm, 채널간 파장 간격이 설계치와 같이 3.2 nm였으며, 채널간의 누화는 -18 dB 미만이었다. 제II장에서는 다중화기의 동작원리에 대해 알아보고, 제III장에서는 설계 및 제작 방법에 대해 설명하겠다. IV장에서는 제작된 다중화기의 특성을 측정하고 개선점에 대해 논하겠으며, V장에서는 결론을 내린다.

II. 동작원리

도파로열 격자 파장 분할 다중화기는 두 개의 슬랩 도파로(slab waveguide)와 각기 균일한 길이 차이를 갖는 광도파로열로 이루어져 있다. 그림 1은 파장 분할 다중화기의 개략도이다. 입력단중의 한 단자에 여기된 빔은 슬랩 도파로에서 퍼져나가 도파로열에 결합되며, 도파로열은 두개의 슬랩 도파로 사이에 정렬이 되어 파워를 전달한다. 도파로열의 인접한 도파로들은

일정한 길이차이(ΔL)가 나므로, 파장에 따른 인접한 도파로들간의 위상 차이($2\pi n_c \Delta L / \lambda$)를 일으키며, 이는 두번째 슬랩 도파로에서 집중되는 빔의 방향에 영향을 주게 된다. 따라서 같은 입력 단자에서 결합된 빔은 파장에 따라 다른 출력 단자로 전달된다.

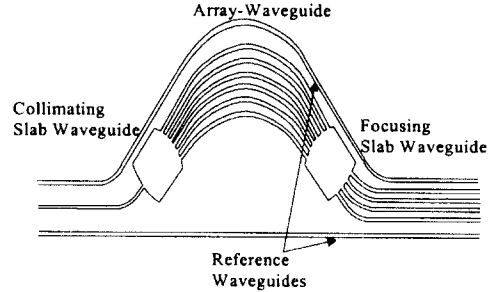


그림 1. 도파로열 다중화기의 구조
Fig. 1. Schematic layout of the arrayed-waveguide grating multiplexer.

도파로열로부터 빛이 θ 의 각으로 회절 된다면, 위상 정합 조건으로부터

$$n_c \Delta L + n_s d \sin \theta = m \lambda \quad (m : \text{정수}) \quad (1)$$

을 만족하여야 한다. 여기서 n_c 는 도파로열에서의 도파로의 유효 굴절률, n_s 는 슬랩 도파로의 유효 굴절률, d 는 도파로열간의 간격, m 은 회절 계수(diffraction order)이다. 중심 파장 λ_0 에서는 $n_c \Delta L = m \lambda_0$ 을 만족한다. (1)식으로부터 파장의 변화에 따른 집중되는 방향의 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{n_s d} \quad (2)$$

초점 위치 $x = f\theta$ (f : 초점 거리)이므로, (2)식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dx}{d\lambda} = \frac{fm}{n_s d} \quad (3)$$

파장의 작은 변화에도 크게 초점 위치를 변화시키기 위해서는 초점 거리가 길거나 회절 계수가 커야만 한다. 또는 n_s 나 d 를 줄일 수 있지만, n_s 는 물질을 정하면 크게 변화시킬 수 없으며, d 가 너무 작으면 인접한 도파로들 사이의 상호 결합에 의한 원하지 않는 위상의 변화를 일으킬 수 있다.

다중화기는 주기적인 동작 특성을 가진다. 다중화기

의 FSR(free spectral range)는 (1)식이 인접한 회절 계수를 만족하는 경우를 고려함으로 구할 수 있다.

$$FSR = \frac{\lambda_0}{m} \quad (4)$$

출력쪽 슬랩 도파로에서는 회절 계수를 만족시켜 원하는 방향으로 집중되는 빔 뿐만 아니라 인접한 회절 계수를 만족시켜 원하지 않는 방향 ($\pm \lambda_0 / n_s d, \pm 2\lambda_0 / n_s d, \dots$)으로 집중되는 성분들이 존재하게 된다¹⁹⁾. 다중화기에서의 손실을 줄이기 위해 집중되는 빔은 원하는 회절계수를 만족하는 방향으로만 집중되어야 한다. 회절 효율은 도파로열의 전체 파워중 슬랩 도파로에서 원하는 방향으로 집중되는 파워의 비로 정의되며, 회절 효율은 각각의 도파로들의 슬랩 도파로에서의 회절 패턴을 이용하여 계산할 수 있다. 그림 2에서 접선은 각 도파로의 회절 패턴이며, 실선은 도파로열에 의한 간섭에 의해 형성되는 스펙트럼들이다.

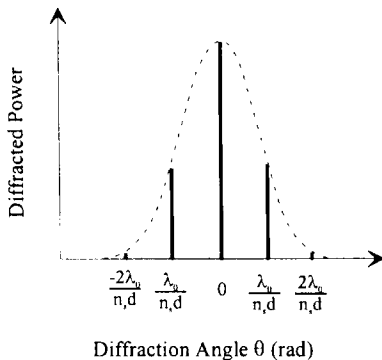


그림 2. 도파로열에 의한 회절 패턴
Fig. 2. Diffraction pattern of arrayed waveguides.

III. 설계 및 제작

제작하고자 하는 광도파로는 하부클래딩으로 PMMA(Poly methyl methacrylate, $n = 1.480$), 코아층으로는 NOA73 (Norland Optical Adhesive, $n = 1.546$)을 이용하여 제작한다. 그림3은 제작하고자 하는 광도파로의 단면 구조이다. 광도파로의 폭과 코아층의 두께 및 식각 깊이는 유효 굴절률 방법을 이용하여 단일 모드가 도파되는 조건을 설정하였다.

다중화기를 설계하기 위해서는 앞에서 언급한 몇 개의 식을 만족하는 변수들을 설정해야 한다. 제작하고자 하는 다중화기는 3.2 nm의 파장 간격을 가지는 4

채널 다중화기이다. 먼저 $\Delta\lambda$ 와 d 를 결정한다. 도파로열의 시작 부분에서 도파로 사이의 상호 결합에 의한 원하지 않는 위상의 변화를 제거하기 위하여 도파로들 사이의 간격은 충분한 거리를 두어야 한다. 그러나 도파로들 사이의 간격이 넓으면 슬랩 도파로에서 도파로열로 전달되는 파워의 양이 줄어들므로 가능한 최소값으로 설정하고, 각각의 도파로들이 슬랩 도파로와 만나는 부분에 테이퍼를 두어 파워 전달이 최대로 이루어지게 하였다.

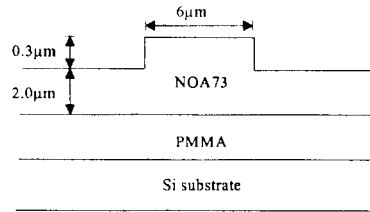


그림 3. 폴리머 광도파로의 단면 구조
Fig. 3. The cross section of the polymeric waveguide.

$\Delta\lambda$ 는 (3)식으로 부터 f 와 m 의 곱에 의해 결정되며, 많은 조합의 값들이 존재하게 된다. 이 중 m 은 FSR와 관계 되므로 원하는 채널의 수를 고려하여 결정하게 된다. 제작하고자 하는 다중화기는 3.2 nm 파장 간격의 4채널 다중화기이므로, FSR는 12.8 nm 이상이면 된다. 그러나 각 채널의 회절 효율은 FSR 내에서 균일하지 않으며 중심 파장에서 최대값을 가지고 중심파장 $\pm FSR/2$ 에서 최소값을 가지므로, 4채널 모두 고른 최대 출력 파워를 얻기 위해서는 FSR를 크게 설정해 주었다. 제작하고자 하는 다중화기의 회절 계수는 50이며 그때의 FSR는 31 nm이다.

도파로열 격자의 도파로 수는 많을수록 첫번째 슬랩 도파로에서 여기된 빔을 대부분 전달받을 수 있고 두번째 슬랩도파로에서 집중되는 빔의 폭을 작게 할 수 있다. 그러나 지나치게 많은 수의 도파로는 소자의 크기를 증가시키므로 첫번째 슬랩도파로에서 여기된 빔이 도파로열로 대부분 전달될 수 있을 정도로 정해준다.

그림 4는 입력쪽 슬랩 도파로에서 빔이 퍼져 나가는 모양과 광도파로열의 입력단에 결합된 후의 모양을 빔전파 방법을 이용한 전산 모의 결과이다. 사용된 광도파로열의 도파로 수는 61개이다.

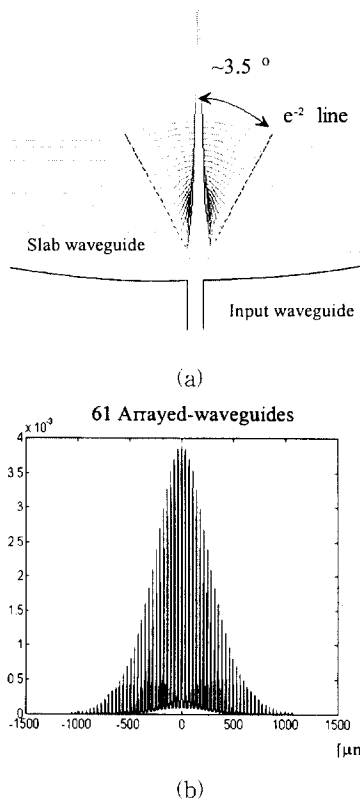


그림 4. (a) 입력측 슬랩 도파로에서의 빔전파 전산 모의 (b) 광도파로열의 입력단에 결합된 파워 분포

Fig. 4. (a) BPM simulation at the input slab waveguide (b) Power distribution at the input of arrayed waveguides.

표 1. 다중화기의 설계변수들

Table 1. Design parameters of the multiplexer.

N	채널수	4
f	슬랩 도파로의 초점 거리	5969.4 μm
ΔL	인접한 광도파로열 사이의 길이차	50.86 μm
m	회절 계수	50
d	슬랩 도파로부근에서의 광도파로열 사이의 간격	25 μm
Δx	출력 도파로 사이의 간격	25 μm
$\Delta \lambda$	파장 간격	3.2 nm
FSR	Free Spectral Range	31 nm
n_s	슬랩 도파로의 유효 굴절률	1.5256
n_c	채널 도파로의 유효 굴절률	1.5239
M	도파로열에서의 도파로 수	61

수동 폴리머 광도파로를 제작하는 방법으로는 대표

적으로 광표백에 의한 방법과 반응 이온 식각을 이용하는 방법 등이 있다. 광표백에 의한 방법은 정확한 굴절률의 변화를 알기 어려운 단점이 있는데 반하여, 반응 이온 식각을 이용한 방법은 원하는 패턴으로 적은 손실을 가지는 광도파로를 쉽게 제작할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 반응 이온 식각 공정을 이용하여 광도파로를 제작하였다. 실리콘 기판위에 PMMA를 스핀 코팅하여 하부 클래딩층을 형성하였다. 광도파로의 코어층으로는 NOA73을 2.3mm의 두께가 되도록 스핀 코팅하고 진공상태에서 자외선에 노출하여 경화시켰다. 각각의 폴리머층을 스핀코팅한 후 용매를 제거하기 위해 충분히 베이킹하였다. 코어층 형성후 포토리소그래피(photo-lithography)공정으로 식각 마스크를 만든 후 반응 이온 식각 공정을 이용하여 채널 광도파로를 제작하였다.

IV. 측정

반응 이온 식각 공정을 이용하여 제작한 폴리머 광도파로는 TE/TM 모두 도파되었다. 제작된 도파로열 다중화기의 특성 측정을 위한 장치의 개략도가 그림 5에 도시되어 있다. 파장 가변 레이저 다이오드를 이용하여 특성을 측정하였다. 입력단에서 결합된 빔은 파장에 따라 다른 출력포트로 나오게 되고 이를 집속하여 CCD 카메라 및 파워미터를 이용하여 파장에 따른 출력 포트의 변화를 측정하였다.

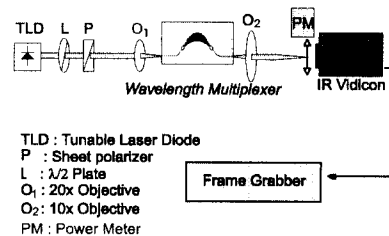


그림 5. 측정 장치

Fig. 5. Measurement set-up.

그림 6 (a)는 입력 파장의 변화에 따른 각 출력 도파로의 출력을 측정한 것이다. 채널간 파장 간격은 3.2 nm를 유지하였으며 측정된 FSR는 30.3 nm이었다. 평균 3dB 통과 대역은 1.2 nm이며, 채널간 누화(crosstalk)은 -18 dB미만이었다. 그림 6 (b)는 각 출력 도파로의 파워가 최대일 때 출력단을 측정한 것이다.

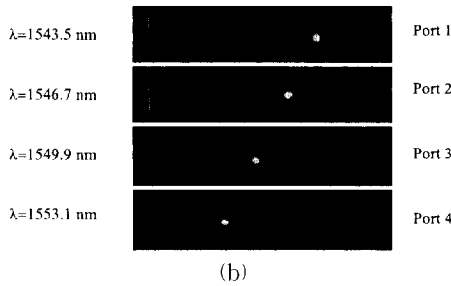
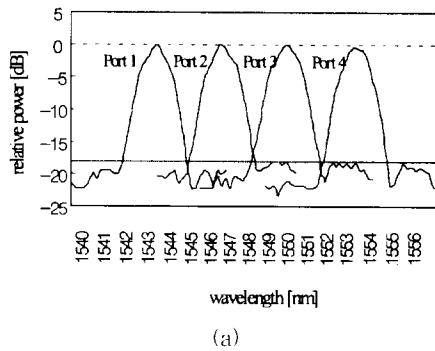


그림 6. (a) 입력파장에 따른 출력 포트의 전달 특성
(b) 출력면에서의 카메라 측정

Fig. 6. (a) Transfer characteristics of output waveguides according to the input wavelength (b) Camera observations at the output facet.

다중화기의 주위에는 소자 길이와 같은 길이의 직선 도파로와 도파로열의 최소 곡률을 가지는 도파로들이 있어 다중화기와의 삽입손실을 비교하였다. 직선 도파로와 곡선 도파로사이에는 1.5 dB 미만의 파워 차이를 보였으며, 직선 도파로와 다중화기의 최대 출력간에는 8 dB의 파워 차이가 있었다.

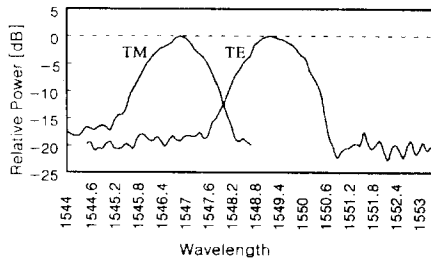


그림 7. 편광 의존성
Fig. 7. Polarization dependency.

그림 7은 편광의존성을 측정된 것이다. TM모드의 중심파장이 단파장쪽으로 2.3 nm이동하였다. 이러한 TE-TM 편광 의존은 링형의 광도파로 구조에 따른 유효 굴절률의 차이에 기인하며 측정된 결과로부터 얻

은 유효 굴절률은 TE모드의 경우 1.5221(중심 파장 = 1548.3 nm), TM모드의 경우 1.5198 (중심파장 = 1546.0 nm)이다.

도파로열 격자 다중화기는 출력쪽 슬랩도파로에서 집중되는 빔의 방향이 변화되어 동작하므로 통과 대역의 중앙에서 출력의 크기가 최대가 되는 현상이 있다. 그러나 실제 시스템에서 사용되는 광원은 중심 파장에서 조금씩 변화하는 주파수 떨림 현상이 있으므로 다중화기의 통과 대역이 평탄한 특성을 가져야만 한다. 또한 광섬유를 통해 전달되는 신호는 임의의 편광을 가지고 있으므로 편광에 대한 의존성이 없어야 한다. 편광 무의존 다중화기를 제작하는 방법으로는 유효 굴절률이 같은 도파로를 이용하는 방법, 1/2 plate를 이용하는 방법 등이 제안되었으며^[4], 평탄한 통과 대역을 위해서는 출력측 광도파로를 멀티모드 광도파로로 만들거나, 첫번째 슬랩 도파로와 만나는 부분의 입력측 광도파로에 멀티모드 간섭계를 넣어줌으로서 개선시킬 수 있을 것이다^[10].

V. 결 론

본 논문에서는 폴리머 광도파로를 이용한 도파로열 격자 파장 분할 다중화기를 제작하였다. 광도파로는 PMMA와 NOA73를 이용하여 반응 이온 식각 방법으로 링 형태로 제작하였으며 제작된 도파로는 TE모드와 TM 모드가 모두 도파되었다. 도파로열 다중화기는 TE모드를 기준으로 설계하였으며, 설계된 모드의 중심 파장은 1550 nm, 채널 간격은 3.2 nm인 4 채널 다중화기이다. 제작된 다중화기는 중심 파장이 1548.3 nm이며 채널 간격은 3.2 nm이다. 이때의 누화는 -18 dB 미만이었다. TE모드와 TM모드간에는 2.3 nm의 이동이 있었다. 제작된 다중화기는 편광 의존적이며 통과 대역의 중심파장에서 출력이 크게 나오는 문제점이 있다. 이에 대한 개선 방안들이 제시되었으며, 조금 더 많은 연구가 있어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] C. A. Brackett, "Dense wavelength division multiplexing networks : principles and applications," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 8, no. 6, pp. 948-964, 1990.
- [2] B. H. Verbeek, C. H. Henry, N. A. Olsson,

- K. J. Orlowsky, R. F. Kazarinov, and B. H. Johnson, "Integrated four-channel Mach-Zehnder multi/demultiplexer fabricated with phosphorous doped SiO₂ waveguides on Si," J. Lightwave Technol., vol. 6, no. 6, pp. 1011-1015, 1988.
- [3] C. Dragone, "An NXN optical multiplexer using a planar arrangement of two star couplers," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 3, no. 9, pp. 812-815, 1991.
- [4] H. Takahashi, K. Oda, H. Toba, and Y. Inoue, "Transmission characteristics of arrayed waveguide NXN wavelength multiplexer," J. Lightwave Technol., vol. 13, no. 3, pp. 447-455, 1995.
- [5] B. Glance, I. P. Kaminow, and R. W. Wilson, "Applications of the integrated waveguide grating router," J. Lightwave Technol., vol. 12, no. 6, pp. 957-962, 1994.
- [6] C. Dragone, C. A. Edwards, and R. C. Kistler, "Integrated optics NXN multiplexer on silicon" IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 3, no. 10, pp. 896-899, 1991.
- [7] M. Zirngibl, C. Dragone, and C. H. Joyner, "Demonstration of a 15X15 Arrayed Waveguide Multiplexer on InP," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 4, no. 11, pp. 1250-1253, 1992.
- [8] Y. Hida, Y. Inoue and S. Imanura, "Polymeric arrayed-waveguide grating multiplexer operating around 1.3 μ m," Electron. Lett., vol. 30, no. 12, pp. 959-960, 1994.
- [9] H. Takahashi, S. Suzuki, and I. Nishi, "Wavelength Multiplexer Based on SiO₂-Ta₂O₅ Arrayed-Waveguide Grating," J. Lightwave Technol., vol. 12, no. 6, 1994.
- [10] M. R. Amersfoort, J. B. D. Soole, H. P. LeBlanc, N. C. Andreadakis, A. Rajhel and C. Caneau, "Passband broadening of integrated arrayed waveguide filters using multimode interference couplers," Electron. Lett., vol. 32, no. 5, pp. 449-451, 1996.

저 자 소 개



吳泰元(正會員)

1973년 7월 18일생. 1995년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(학사). 1997년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사과정 졸업(석사). 1997년 3월 ~ 현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정. 주관

심분야는 폴리머 광도파로 소자, 그리고 광연결 등임



李云榮(正會員)

1971년 6월 10일생. 1995년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(학사). 1997년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사과정 졸업(석사). 1997년 3월 ~ 현재 한국통신 연구개발본부 재직중. 주관심분야는 집적

광학 소자 등임

申相永(正會員)

1946년 9월 14일생. 1968년 서울대학교 전지공학과 졸업(학사). 1973년 Polytechnic Institute of New York, 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