

論文95-32A-12-20

폴링된 폴리머 광도파로의 광축을 조절하여 제작한 수동형 편광 변환기

(Passive Polarization Converter Fabricated by Controlling Optic Axis of Poled Polymer Waveguides)

吳敏鐵*, 申相永*

(Min-Cheol Oh and Sang-Yung Shin)

요 약

전기광학 폴리머 광도파로를 이용한 새로운 형태의 수동형 편광 변환기를 제안하고 제작하였다. 광파의 진행방향을 따라 서서히 변화하는 전극구조를 고안하여 폴링된 광도파로의 광축이 전극구조의 변화에 따라 천천히 회전하도록 만들었다. 그리하여 입력된 광파가 광도파로를 따라 진행해 갈때 광축의 방향을 따라 도파광의 편광이 서서히 회전하게 된다. 제안된 소자의 동작특성을 살펴보기 위해 비등방성 매질에 적용가능한 벡터 빔전파 방법을 개발하여 시뮬레이션 하였으며, 그 결과 광축이 회전하는 부분의 길이가 1 mm 일때 출력광의 편광비가 30 dB 로서 효율 높은 편광 변환이 가능함을 확인하였다. 시뮬레이션 결과에 근거하여 편광변환기를 제작하였으며 1.3 μm 파장의 레이저 다이오드 광원을 이용하여 동작 특성을 측정하였다. 입력 광을 TE 편광으로 만들어 입력시켰을때 출력부에서 TM 편광으로 완전히 바뀌는 것을 볼수 있었으며 이때 출력광의 TM 대 TE 편광의 비는 30 dB 이상이 되었으며 이는 편광변환 효율이 99.9 % 이상임을 의미한다. 제작된 편광 변환기는 주기적인 구조를 갖지 않으므로 광파장에 관계 없이 동작하는 특성을 가지며 제작이 용이하다.

Abstract

A novel passive TE/TM polarization mode converter is fabricated by using poled polymer waveguides. The optic axis of the poling induced waveguide is slowly rotated by using a slowly varying structure of poling electrodes. Thus the polarization conversion is achieved as the guided mode propagates through the waveguide. The proposed device is simulated by a full vectorial beam propagation method (VBPM) for anisotropic medium. For the rotation length of 1 mm, the TE polarization of the guided mode is successfully converted to the TM polarization with negligible loss. Based on the simulation results, we fabricated the polarization converter which is tested by using 1.3 μm laser diode. TE to TM mode conversion is observed with a polarization extinction ratio higher than 30 dB, and the excess loss is less than 1 dB. The polarization conversion is relatively insensitive to wavelength since the device contains no periodic structures. These devices are easier to fabricate than others containing periodic structures.

I. 서 론

* 正會員, 韓國科學技術院 (KAIST), 電氣 및 電子科
(Dept. of Elec. Eng., Korea Advanced Institute of Science and Engineering)
接受日字: 1995年6月3日, 수정완료일: 1995年12月1日

도파광의 편광을 원하는 상태로 변화시켜 주기 위한 광도파로형 편광 변환기는 다양한 집적광학 소자에 응용 가능한 기본 소자이다. LiNbO₃ 나 InP 를 이용하

여 제작된 TE/TM 편광 변환기들이 이미 발표 되었으며^{[1], [2]} 이를 이용하여 편광을 조절하여, 편광에 무관하게 효율적으로 동작하는 광교환 시스템을 제작한 결과도 최근에 발표 되었다.^[3] 한편, 외부에서 전압을 인가하여 조절하지 않고 수동적으로 동작하는 편광 변환기도 발표되었는데^{[4], [5]} 광도파로의 클래딩이나 코어의 구조를 주기적으로 변화시켜서 편광간에 결합 (polarization coupling) 이 일어나도록 만든 소자들이다. 그러나 이러한 소자들은 주기적인 구조를 이용하므로 광파장에 민감하게 반응하게 되며, 원하는 광파장에 대하여 편광변환이 일어 나도록 정확하게 디자인 하기가 어렵다. 또한 주기적인 섭동 구조로 인하여 도파관의 산란이 일어나게 되며 이는 소자의 도파손실을 증가시키는 요인이 된다.

본 논문에서는 전기광학 폴리머를 이용한 새로운 구조의 TE/TM 편광 변환기를 제안하고 벡터 빔 전파 방법을 이용한 시뮬레이션 결과와 제작된 소자의 동작 특성에 관하여 언급한다. 전기광학 폴리머는 전계를 이용하여 폴링을 시켜주면 빛에 대한 굴절률이 증가하고 광학적 단축매질로 변하는 특성을 가지고 있다.^[6] 그러므로 폴링 공정을 이용하면 한가지 편광성분만을 도파시키는 광도파로를 손쉽게 제작할 수 있다.^[7] 더우기 폴링용 전극을 적절히 디자인하면 폴링된 광도파로의 광축이 진행방향을 따라가며 서서히 회전하는 구조를 만들 수 있으며 이러한 단축 광도파로를 지나는 도파관의 편광은 광도파로의 광축 방향을 따라서 변화하게 된다.^[8] 폴링에 의해 형성된 광도파로의 광축방향을 기판에 대하여 수평방향에서 시작하여 수직방향으로 변화하게 만들어 주면 도파관의 편광을 TE 모드에서 TM 모드로 바꿀 수 있는 편광 변환기가 된다.

II. 소자 구조 및 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안된 편광 변환기는 기본적으로 편광기 (polarizer), 편광회전기 (polarization rotator) 그리고 분석기 (analyzer) 로 구성되어 진다. 소자의 개념도는 그림 1 에 보여져 있다.

세층의 폴리머로 이루어진 평면 광도파로의 아래 위에 폴링 (poling) 전극이 존재하는 형태이다. 가장 앞 부분에 위치한 편광기 (polarizer) 는 평행한 네개의 폴링전극으로 구성되어 있는데 이들은 광도파로의 코어 부분을 수평방향으로 폴링 시키는 역할을 한다.

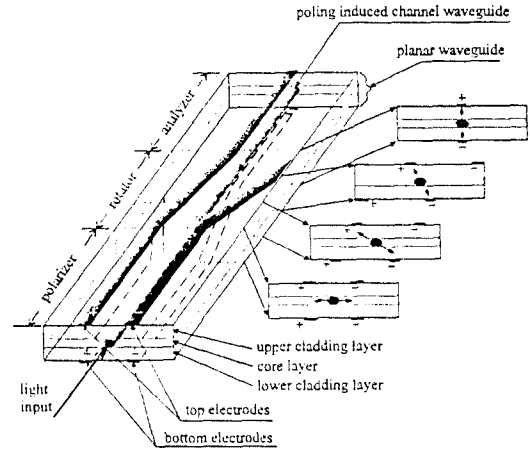


그림 1. 제안된 편광변환기의 개략도; 각각의 단면도들은 주어진 전극구조에 의해 형성되는 폴링 전계 또는 광축의 주된 방향을 보여주고 있다.

Fig. 1. Schematic diagram of the proposed polarization converter; cut-views show the major direction of the poling field or the optic axis of the poling induced waveguide for given electrode structure.

그림에서 표시된 바와 같은 극성 (polarity) 으로 전계를 인가하게 되면 코어층에서의 전계 분포는 대부분 수평방향 성분을 갖게 된다. 이와같이 전기광학 폴리머를 수평방향으로 폴링하여 복굴절성 (birefringence) 을 갖게 만들면 광도파로의 코어부분의 굴절률이 TE 편광에 대해서는 증가하고 TM 편광에 대해서는 감소하게 된다. 그리하여 편광기 부분은 TE 편광만을 통과시키는 일종의 편광 필터로서 작용하게 된다. 다음으로 편광기뒤에 존재하는 편광회전기 (polarization rotator) 부분은 광파의 진행방향 (propagation direction) 으로 서서히 변화하는 전극 구조를 가지고 있으며 이들은 폴링으로 형성되는 광도파로의 광축 (optic axis) 방향을 수평방향에서부터 수직방향으로 서서히 회전시키는 역할을 한다. 이때 편광 회전기 부분의 광축 분포를 특정한 방향으로 정확하게 조절해야 할 필요는 없으며 단지 광축의 회전속도가 산란 손실을 일으키지 않을 정도로 서서히 변화하기만 하면 소자의 동작에는 아무런 문제가 없다. 마지막 부분에 위치한 분석기 (analyzer) 는 두개의 폴링 전극이 아래 위로 정렬되어 있는데 이들은 편광기

와는 반대로 광도파로를 수직 방향으로 폴링시켜서 TM 편광에 대한 굴절률을 증가 시키며 TM 통과 필터를 형성하게 된다. 그러므로 빛이 편광 변환기 소자에 입사 하게 되면 우선 편광기 부분에서 TE 편광을 갖는 도파 모드를 형성하게 된다. 그 후 편광 회전기 부분에서 도파광이 진행해감에 따라 TE 편광은 TM 편광으로 서서히 변화하게 된다. 마지막으로 TM 편광으로 변화된 도파광은 분석기 부분을 통하여 출력 되어진다. 제안된 소자의 동작 특성을 살펴보고 디자인을 하기 위하여 비등방성 매질에 적용가능한 벡터 빔 전파 방법을 이용하였다.^[8]

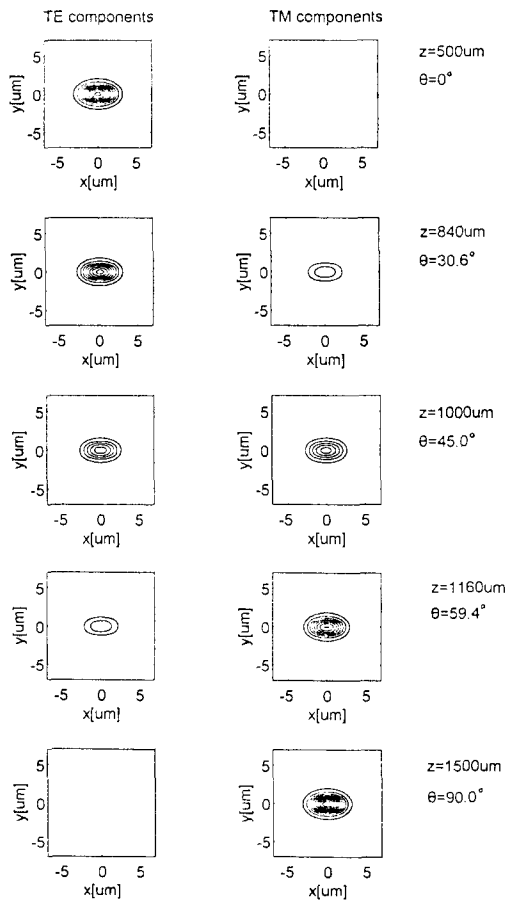


그림 2. 편광 변환기에 대한 삼차원 벡터 빔전파 시뮬레이션 결과

Fig. 2. A simulation results of the three-dimensional vector beam propagation method for the polarization converter.

구체적인 시뮬레이션 결과는 다른 논문^{[9], [10]} 을

참조하기 바람에 본 논문에서는 그 결과에 대해서만 간략하게 언급하겠다. 편광 변환을 나타내는 벡터 빔전파 방법의 결과는 그림 2 에 나타내었다. 삼차원 빔전파 방법의 결과를 나타내기 위해 몇가지 전파거리 z 에 대하여 도파광의 Ex 성분과 Ey 성분을 각각 등고선 그림으로 나타내었다.

입의의 가우시안 빔을 초기에 입력 결합시켰으며 500 μm 길이의 편광기 영역을 전파한 후에 도파모드가 형성되었다. 그 후 광도파로의 광축이 서서히 회전하는 것에 따라 도파광의 편광도 회전하게 되며 1000 μm 의 회전영역을 지난뒤 $z = 1500 \mu\text{m}$ 인 지점에서 TM 편광으로 완전히 변화됨을 볼 수 있다. 진행 방향에 따른 편광간의 광과위 변화를 계산한 결과는 그림 3 에 나타나 있다. 편광 변환이 완전히 일어났음을 보여주고 있으며 출력부에서의 편광간의 광과위 비는 30 dB 정도이며 편광 변환에 따른 손실은 0.15 dB 로서 매우 작은 값이었다. 그러므로 편광회전기 부분의 길이가 1 mm 이상일때 효율적인 편광 변환이 이루어짐을 벡터 빔전파 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

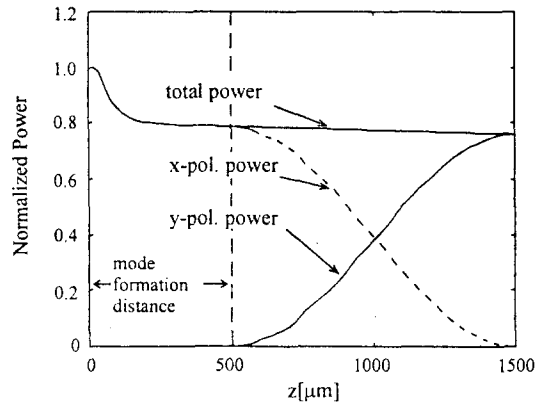


그림 3. 진행 방향에 따른 도파광의 파워 변화

Fig. 3. The variations of power in E_x and E_y and the total power in the polarization converter as the function of propagation distance.

III. 소자 제작 및 측정 결과

전기광학 폴리머에서 폴링으로 형성되는 광도파로를 이용하여 편광 변환기를 만드는 과정은 비교적 간단하다. 제작 과정에 대한 개략도는 그림 4 에서 보여주고

있다.

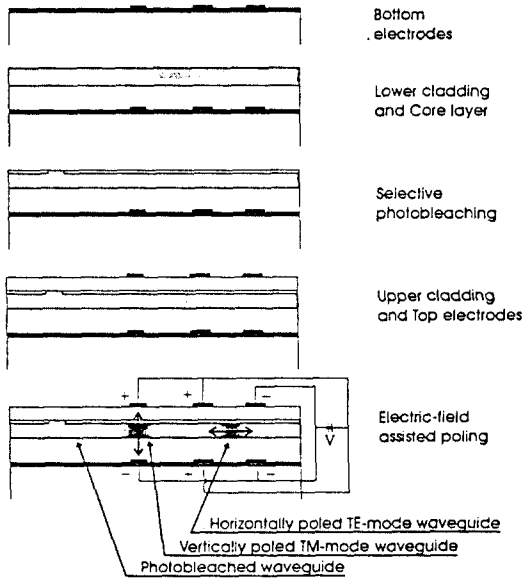


그림 4. 제작 공정에 대한 개략도
Fig. 4. Illustrations of the fabrication procedures.

먼저 실리콘 기판에 절연층으로서 SiO_2 를 $1.2 \mu\text{m}$ 가량 되도록 열산화 방식을 이용하여 성장시킨다. 그 위에 AZ5214 포토레지스트 (photoresist) 를 이용하여 하부 전극 형태를 만들고 Au/Ti 금속을 진공증착시킨후 리프트오프 (lift-off) 공정으로 하부전극을 완성한다. 광도파로의 하부 클래딩 층으로는 EO 폴리머의 일종인 P2ANS(35:65) 를 $3.5 \mu\text{m}$ 정도의 두께가 되도록 스핀 코팅한다. 하부 클래딩 위에 코어층으로서 또 다른 EO 폴리머인 P2ANS(50:50) 을 $4.0 \mu\text{m}$ 정도의 두께가, 되도록 스핀 코팅한다. P2ANS(35:65) 와 P2ANS(50:50) 은 PMMA 주축에 DANS 염료 분자가 각각 35 % 와 50 % 의 비율로 측쇄결합되어있는 형태의 비선형 폴리머이다. 이러한 비선형 폴리머들은 미국의 Hoechst Celanese 회사로부터 공급 받았다. 상부 클래딩층으로는 자외선 경화 에폭시의 일종인 NOA61 (Norland optical adhesive 61) 을 $2 \mu\text{m}$ 두께가 되도록 스핀코팅하고 강한 자외선에 노출시켜 경화시킨다. 각각의 폴리머층을 스핀코팅한후 용매를 제거하기 위해 충분히 베이킹을 시킨다. 상부 전극은 Au 를 열증발법 (thermal evaporation method) 으로 증착시킨 후 AZ5214 포토레지스트와 준비된 포토마스크를 이용하여 전극 형

태를 만들고 Au 을 식각하여 만든다. 상부 전극의 위에 AZ4562 포토레지스트를 전면 코팅하여 전기적인 절연층으로 사용하는데 이는 폴링시에 다른 극성을 갖는 상부 전극간에 공기층을 통한 절연 파괴 현상이 일어난 것을 막는 구실을 한다. 제작된 소자의 위에서 바라본 구조와 제작상에 중요한 변수들을 그림 5 에서 보여준다. 그리고 현미경을 통하여 찍은 소자의 일부분을 나타내는 사진도 함께 나타내었다. 제작의 최종 단계로서 소자를 전열판위에서 135 C 까지 가열한뒤 전극간에 400 V 의 전압을 걸어서 폴링을 시킨다. 폴링된 소자는 입출력 결합을 위해서 Si 기판을 클리빙 (cleaving) 시켜서 단면을 형성시킨다.

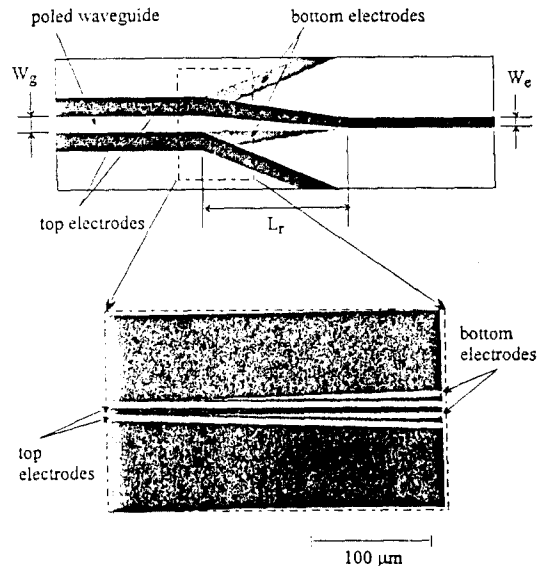


그림 5. 소자를 위에서 바라본 구조와 소자의 일부분을 광학 현미경으로 찍은 사진
Fig. 5. A top view of the polarization rotator and a microphotograph of the fabricated device at the interface between the polarizer and the rotator section.

제작된 소자의 특성 측정을 위해서 $1.3 \mu\text{m}$ 파장을 갖는 다이오드 레이저 (LD) 가 사용되었다. 개략적인 측정 장치는 그림 6 에 나타내었다. LD 에서 나온 빛은 Glan-Thompson 편광기를 거쳐서 TE 편광 상태로 만들어진후 렌즈 (microscope objective) 를 통하여 편광 변환기에 입력 결합 된다. 그후 편광 변환기를 통해서 나온 출력광은 렌즈를 통과하고 또다른 Glan-Thompson 편광기를 거쳐서 CCD 나 광검출기

(photo detector) 에 모여진다. 편광 변환기의 가장 중요한 동작 특성은 출력된 광의 편광상태이며 이는 출력부의 Glan-Thompson 편광기를 소자의 기판에 대해 수평방향 또는 수직방향으로 맞추어서 TE 모드와 TM 모드에 대한 각각의 광파위를 측정하여 알 수 있다.

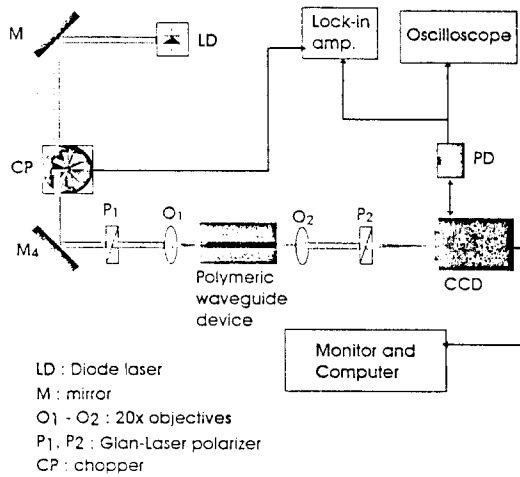
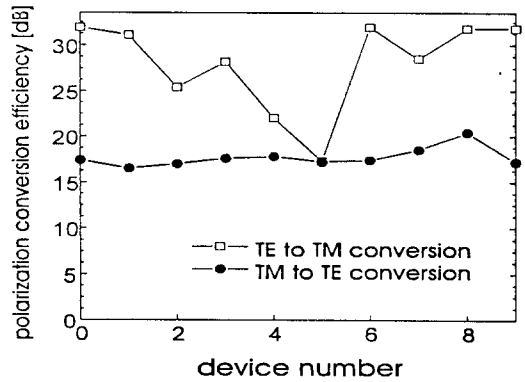


그림 6. 개략적인 측정 장치의 구성도
Fig. 6. Measurement setup.

TE 입력광이 파장 변환기를 지나서 TM 편광으로 출력되는 경우의 출력편광비를 측정하였으며 그 결과를 그림 7 에서 보이고 있다. 그림에 포함된 표에서 나타낸것과 같이 서로 다른 제작 변수를 갖는 10 개의 소자를 하나의 기판위에 만들어서 측정하였다. TE 편광에서 TM 편광으로 완전히 변화하는 것을 볼 수 있었으며 이때 출력 편광비는 30 dB 이상으로 매우 높았다. 제작된 소자의 추가 손실 (excess loss) 을 측정하기 위하여 동일한 제작조건으로 만들어진 수직방향 폴링된 광도파로의 삽입손실 (insertion loss) 을 측정하여 편광변환기의 삽입손실과 비교하였다. 제작된 각각의 소자에 대하여 추가손실은 1 dB 미만의 작은 값이었다. 한편, 편광 변환기의 입출력 방향을 반대 방향으로 하여 빛을 입사 시키면 TM 편광에서 TE 편광으로 편광 변환을 시킬 수 있다. 입력 광의 편광을 TM 편광으로 맞추고 편광변환기의 방향을 거꾸로 뒤집어서 빛을 입사시킨후 TM 편광에서 TE 편광으로 변화하는 효율을 측정하였으며 그 결과는 그림 7 에 나타내었다. 출력 편광비가 20 dB 이상의 결과를 얻을 수 있었으나 TE 에서 TM 편광으로 변환시킬때에 비

하여 낮은 값이었다. 이는 수평방향으로 폴링시키기 위한 전구구조에서 생성되는 전계의 분포가 이상적으로 수평방향 성분만을 갖는 것이 아니라 수직방향 성분도 포함하고 있기 때문이다. 이로 인해 폴링으로 형성된 광도파로의 광축 분포도 완전히 수평방향만 형성되지는 않게 되어 도파광의 편광이 TE 성분 뿐만 아니라 약간의 TM 성분도 가지게 된다. 이러한 효과는 출력 편광 소멸비를 감소시키는 요인이 된다. 그러나 수직방향 폴링의 경우에는 이러한 효과가 훨씬 미약하여 도파광은 거의 완전히 TM 성분만을 갖게 되며 출력 편광 소멸비가 높아진다.



device number	d0	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9
L_f (mm)	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
W_g (mm)	10	8	8	6	6	6	6	8	8	10
W_e (mm)	8	8	6	6	4	4	6	6	8	8

그림 7. 서로 다른 제작 변수를 갖는 10 개의 소자에 대한 출력편광비의 측정 결과. TE 에서 TM 으로 변환시킬때와 TM 에서 TE 로 변환시킬때의 효율을 모두 측정하였음.

Fig. 7. Measured polarization extinction ratio of the output light of the 10 polarization converters fabricated with different parameters. Output polarization extinction ratio was measured for both TE to TM conversion and TM to TE conversion.

IV. 결 론

본 논문에서는 전기광학 폴리머를 이용한 새로운 형

태의 편광변환 소자를 제안하고 벡터 빔 전파 방법을 통한 시뮬레이션 결과와 제작된 소자의 측정 결과에 대하여 언급하였다. 시뮬레이션 결과 1 mm 정도의 회전영역을 갖는 소자에 대해 TE/TM 편광 변환이 효율적으로 일어남을 확인하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 소자를 제작하였으며 특성 측정 결과 TE 모드에서 TM 모드로 변환 시켰을때의 출력광의 편광비가 30 dB 이상이 되었다. 즉 편광 변환 효율이 99.9 % 이상의 고효율의 집적 광학형 편광 변환기를 제작할 수 있었다. 제작된 편광변환기는 기존의 소자들과는 달리 주기적인 구조를 갖지 않기 때문에 광파장에 민감하게 반응하지 않으며 디자인이 단순하고 제작이 용이하다. 또한 폴링 전극의 디자인을 통하여 임의의 출력 편광을 갖는 편광 변환기 또한 제작이 가능하다.

감사의 글

※ 전기광학 폴리머를 제공해 주시고 여러 가지 실험 시설을 사용할 수 있게 해주신 전자통신 연구소 기초기술부의 김장주 박사님과 황월연 박사님께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] R. C. Alferness and L. L. Buhl, "Waveguide electro-optic polarization transformer," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 38, no. 9, pp. 655-657, 1981.
- [2] M. Schlak, H. P. Nolting, P. Albrecht, W. Doldissen, D. Franke, U. Niggebrugge, F. Schmitt, "Integrated-optic polarization converter on (001)-InP substrate," *Electron. Lett.*, vol. 22, no. 17, pp. 883-885, 1986.
- [3] F. Heismann, A. F. Ambrose, T. O. Murphy, and M. S. Whalen, "Polarization-independent photonic switching system using fast automatic polarization controllers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 11, pp. 1341-1343, 1993.
- [4] Y. Shani, R. Alferness, T. Koch, U. Koren, M. Oron, B. I. Miller, and M. G. Young, "Polarization rotation in asymmetric periodic loaded rib waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, no. 11, pp. 1278-1280, 1991.
- [5] H. Heidrich, P. Albrecht, M. Hamacher, H.-P. Nolting, H. Schroeter-Janben, and C. M. Weinert, "Passive mode converter with a periodically tilted InP/GaInAsP rib waveguide," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 1, pp. 34-36, 1992.
- [6] J. W. Wu, "Birefringent and electro-optic effects in poled polymer films: steady-state and transient properties," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 8, no. 1, pp. 142-151, 1991.
- [7] J. I. Thackara, G. F. Lipscomb, M. A. Stiller, A. J. Ticknor, and R. Lytel, "Poled electro-optic waveguide formation in thin film organic media," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 52, pp. 1031-1033, 1988.
- [8] C. L. Xu, W. P. Huang, J. Chrostowski, and S. K. Chaudhuri, "A full-vectorial beam propagation method for anisotropic waveguides," *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, no. 11, pp. 1926-1931, 1994.
- [9] Min-Cheol Oh, Sang-Yung Shin, and Wol-Yon Hwang, "Explicit vector beam propagation method for uniaxial poled polymer waveguide devices," *IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting*, paper IO1.1, 1994.
- [10] Min-Cheol Oh, Sang-Shin Lee, and Sang-Yung Shin, "Simulation of polarization converter formed by poling-induced polymer waveguides," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 31, no. 9, pp. 1698-1704, 1995.

저 자 소 개



吳 敏 鐵(正會員)

1967년 6월 25일생. 1990년 2월 한국과학기술대학 정보통신공학과 졸업(학사). 1992년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자과 석사 과정 졸업(석사). 1992년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자과 박사 과정 재학

중. 1992년~1993년 일본 오오사카 대학 폴리머 광도파로 소자 관련 연구원. 주관심분야는 전기광학 폴리머 광도파로 소자, LiNbO_3 집적광학 소자, 그리고 집적광학 센서 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(석사). 1975~1977년 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.