

## 반응성 메조겐을 이용한 폴리머 광도파로 편광 변환기

도현수 · 추우성 · 오민철<sup>†</sup>

부산대학교 전자전기공학과

☎ 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

(2011년 8월 3일 받음, 2011년 8월 18일 수정본 받음, 2011년 8월 23일 게재 확정)

광도파로에 일체형으로 제작 가능한 편광 변환기는 다양한 기능의 광집적회로를 구성하기 위한 필수적인 부품이다. 반응성 메조겐은 액정디스플레이의 파장판 제작을 위하여 널리 사용되는 재료이며, 본 연구에서는 반응성 메조겐과 폴리머 광도파로를 이용하여 집적형 편광 변환기를 제작하였다. 반응성 메조겐과 액정을 혼합한 용액을 광도파로에 직교하게 형성된 홈에 삽입하고 전계를 인가하여 액정 분자를 특정 방향으로 정렬 한 뒤 UV 를 조사하여 RM 분자를 경화시켜주면 광도파로를 가로지르는 파장판을 형성할 수 있다. 파장판의 특성은 두께를 결정짓는 홈의 폭과 액정 분자의 정렬 상태 및 복굴절 크기에 의해 결정된다. 폴리머 광도파로의 증상에 제작된 편광변환기는 1550 nm 파장에서 편광변환효율이 90 %에 이르게 됨을 확인하였다.

## Integrated Optical Wave Plates Fabricated by Incorporating Reactive Mesogen in Polymer Waveguide

Hyun-Soo Do, Woo-Sung Chu, and Min-Cheol Oh<sup>†</sup>

*Department of Electrical Engineering, Pusan National University, 30 JangJeon-dong, GeumJung-gu, Pusan 609-735, Korea*

(Received August 3, 2011; Revised manuscript August 18, 2011; Accepted August 23, 2011)

Integrated optical waveguide polarization converters are among the essential components for constructing various functional optical integrated circuits. The RM materials have been widely used in liquid crystal displays for fabricating waveplates. In this work, the polarization converters are fabricated by using a solution of Reactive Mesogen(RM) dissolved in liquid crystal(LC). In the middle of the polymer waveguide, a groove is defined by an oxygen plasma etching in a direction perpendicular to the optical waveguide. The solution of RM-LC is inserted to fill up the groove, and then liquid crystal is aligned in a certain direction by applying an electric field. After the alignment, RM material is crosslinked by UV light so as to form a permanent waveplate. The phase retardation of the waveplate is determined by the width of the groove, and by the birefringence and the degree of alignment of the LC. Polarization conversion efficiency of 90% is obtained for the wavelength of 1550 nm.

Keywords: Reactive Mesogen, Polymer networks, Polymer waveguide, Polarization converters

OCIS codes: (160.5470) Polymers; (160.3710) Liquid Crystals; (130.0130) Integrated optics; (130.5460) Polymer waveguide

### I. 서 론

배열형 도파로 격자(arrayed-waveguide grating)는 WDM 광통신 시스템에서 광신호를 다중화/역다중화 시키는 역할을 하는 중요한 소자이다. 그러나 배열형 도파로 격자는 제작 공정 중 필름에 인가되는 스트레스로 인한 복굴절성으로 인해 편광의존성이 생긴다<sup>[1-2]</sup>. 이러한 편광의존성을 줄이기 위하여 폴리이미드 필름으로 만들어진 반파장판(half waveplate)을 광도파로의 증상에 삽입하여 편광변환을 일으키는 방법이 이용되

고 있다<sup>[3]</sup>. 폴리이미드 필름에 복굴절성을 인가하여 반파장판을 제작하기 위해서는 편광변환 상태를 실시간으로 모니터링 하면서 필름에 스트레인을 인가하는 방법을 사용한다. 한편, 액정디스플레이 소자에서 파장판을 만들기 위하여 널리 이용되는 반응성 메조겐(Reactive Mesogen: RM, RMM141C) 재료를 이용하면 광축이 처음부터 형성된 편광판을 손쉽게 제작할 수 있다<sup>[4]</sup>. 그러나 광도파로를 완성한 후 도파로의 증상부위에 깊은 홈을 파고 파장판을 삽입하는 방법은 제작과정이 복잡하고 생산성이 떨어지는 단점을 가진다.

<sup>†</sup>E-mail: mincheoloh@pusan.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

본 연구에서는 반응성 메조겐 재료를 이용하여 폴리머 광도파로에 집적시킨 형태의 편광 변환기를 제작하였다. 반응성 메조겐과 액정(Liquid Crystal: LC, RDP80792)을 혼합한 용액에 특정 방향의 전계를 인가하여 액정의 방향을 정렬할 수 있으며, 그 상태를 유지한 채 외부에서 UV 를 조사하여 경화를 하면 RM 이 분자들이 화학적으로 결합하여 가교된 네트워크를 형성하게 된다<sup>[5-7]</sup>. 폴리머 광도파로 중간에 수직한 방향으로 홈을 형성하고 여기에 반응성 메조겐과 액정을 혼합한 재료를 채워 넣은 후 전계를 인가하여 45°방향으로 액정을 정렬시키고, 이후 UV 를 조사하여 반응성 메조겐을 경화 시키면 광축이 형성된 채 경화된 편광 변환기를 얻게 된다. 제작된 편광 변환기의 특성은 광도파로 중앙에 형성된 홈의 폭과 액정 재료의 정렬 상태 및 복굴절의 크기에 의해서 결정된다. 이러한 집적형 편광 변환기는 필름을 끼우는 방식에 비하여 다수의 소자를 하나의 기판상의 원하는 위치에 동시에 제작 가능한 장점을 가지며 생산성을 향상시킬 수 있다<sup>[8]</sup>.

## II. 반응성 메조겐 편광 변환기 일체형 폴리머 광도파로의 구조

본 연구에서 제안하는 반응성 메조겐을 이용한 편광 변환기 일체형 폴리머 광도파로의 구조는 그림 1과 같이 반전 립 형태의 폴리머 광도파로와 상하부 전극, 그리고 반응성 메조겐-액정 용액을 채워 넣기 위한 홈으로 구성된다. 반전 립 형태의 광도파로는 굴절률 차이가 큰 폴리머 재료를 이용하는 경우에 코어의 크기가 크면서도 단일모드 조건을 만족시키기 위하여 대형 립(oversized rib) 구조로 설계하였다. 폴리머 광도파로 상 하부에 위치한 전극은 반응성 메조겐-액정 혼합 용액을 전기장으로 폴링하여 액정의 방향을 기판에 대하여 45° 각도로 정렬하기 위하여 이용된다. 반응성 메조겐-액정 혼합 용액을 삽입하여 반파장판을 형성하기 위한 홈은 광도파로에 수직한 방향으로 형성 하였다. 이 때 홈의 너비는 반파장판 필름의 두께가 되며, 편광 변환 효율은 액정의 복굴절률과 폴링된 효율에 영향을 받게 된다.

제작된 파장판을 통과할때 광축방향 편광과 이에 수직한 편광간에 나타나는 위상차이는 아래 식으로 주어진다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n d$$

이때  $\lambda$ 는 광원의 파장을 나타내며,  $\Delta n$ 와  $d$ 는 각각 반응성 메조겐과 액정 혼합 용액의 복굴절률 크기와 홈의 너비이다. 반파장판을 만족시키는 위상 차  $\Delta\phi$ 는  $\pi$  이므로, 반응성 메조겐과 액정 혼합 용액의 복굴절 크기가 0.142 이고, 1550 nm 파장의 광원을 사용할 때 반파장판을 제작하기 위한 홈의 너비는 5.53  $\mu\text{m}$  가 된다. 그러나 본 연구에서는 반응성 메조겐-액정 혼합용액을 폴리머 광도파로에 쉽게 삽입하기 위해 홈의 폭을 38  $\mu\text{m}$  로 위상차는  $7\pi$  만큼 되도록 설계하였다.

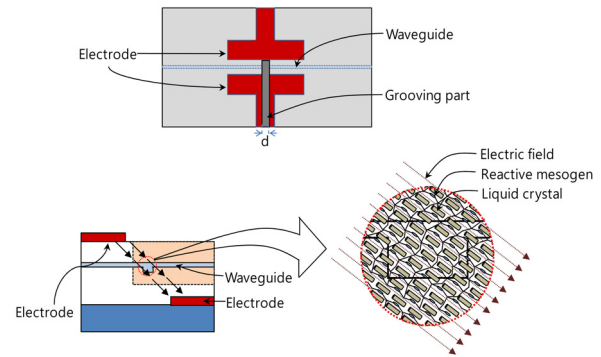


FIG. 1. Schematic diagram of polarization converter integrated on polymer waveguide, in which a groove is formed, to fill up a mixed solution of reactive mesogen and liquid crystal. The LC molecules are aligned in 45° angle in terms of the electric field applied across the electrodes, and then the RMs are crosslinked by UV exposure to form a network.

반응성 메조겐(Reactive Mesogen: RM) 은 복굴절 특징을 가지는 conjugated core 물질과 UV 를 흡수하여 네트워크를 형성할 수 있는 photo-polymerisable group 으로 이루어져 있다. 액정과 반응성 메조겐을 혼합한 용액에 그림 1에서 주어진 전극구조를 이용하여 45° 방향의 전계를 인가하면 액정분자가 전계 방향으로 정렬된다. 이때 반응성 메조겐 분자도 액정을 따라 대략적인 방향을 잡으면서 분포가 될 것이며, 이후 UV 를 조사하면 반응성 메조겐 분자가 서로간에 결합하여 네트워크를 형성하면서 액정 분자를 고정시키는 역할을 한다. 이렇게 고정된 액정분자들은 외부 전계를 제거하더라도 방향성을 유지한 채 편광 변환기로 작용하게 된다.

## III. 폴리머 광도파로 편광 변환기 소자의 제작

폴리머 광도파로 편광 변환기 소자를 제작하기 위한 공정은 그림 2와 같다. 실리콘 기판은 반도체적 특성을 지니므로 전극을 이용하여 명확한 방향의 전계 분포를 형성하기가 어려운 점이 있다. 그러므로 본 실험에서는 유리 기판상에 전극을 비롯한 광도파로 소자를 제작하였다. 본 연구에서는 전계를 이용하여 광도파로 상에 반파장판을 제작하여야 하기 때문에 상대적으로 전기 전도도가 낮은 유리 기판을 사용하였다. 준비된 유리 기판 상에 Cr, Au 를 각각 10 nm와 100 nm 두께로 증착하고, 사진 공정을 이용하여 하부 전극을 완성한다. 하부 클래딩으로 ZPU13-430 폴리머를 20  $\mu\text{m}$  두께로 코팅하였다. 폴리머 물질의 경화 과정에서 샘플 주변에 산소가 존재하면 광경화 현상을 방해하게 되어 충분한 UV 경화가 일어날 수 없게 되며 박막의 경도가 떨어지는 현상이 발생한다. 이러한 문제점을 방지하기 위하여 샘플을 질소상태에서 보존하면서 UV 를 조사할 수 있는 컨테이너를 이용하였다. UV 경화 전에 3분간 질소를 흘려 보내면서 폴리머 표면에 존재하던 산소를 제거하였으며, 이후 질소 환경을 유지한 채 UV 챔버에서 3분간 경화시킨다. 다음으로 제작된

하부 클래딩 층 위에 AZ5214 감광제를 이용하여 광도파로를 패터닝 하였으며, ICP 건식 식각으로 3.4  $\mu\text{m}$  를 식각한 후 코어 물질인 ZPU13-440 을 1.2  $\mu\text{m}$  두께로 코팅하여 코어 층을 완성하였다. 완성된 광도파로 코어의 전체 두께는 4.6  $\mu\text{m}$  이 되었으며, 그 위에 하부 클래딩과 같은 물질인 ZPU13-430 을 한번 더 코팅하여 상부 클래딩 층을 완성하였다.

제작된 광도파로 상에 Cr, Au 를 다시 한 번 증착하여 상부 전극을 그림 3(a)와 같이 제작한다. 하부 전극과 상부 전극이 광도파로에서 동일한 거리 차이를 두고 정렬하여 완성된 모습을 그림 3(a) 에서 보이고 있다. 마지막으로 반응성

메조젠-액정 혼합용액을 삽입하기 위한 홈을 그림 3(b)와 같이 제작 하였다. 광도파로와 수직인 방향으로 홈을 패터닝한 후 ICP 건식 식각으로 약 20  $\mu\text{m}$  깊이를 식각하여 반응성 메조젠-액정 혼합용액을 삽입할 준비를 한다. 식각 깊이는 편광 변환과는 상관이 없으며 빛이 진행되는 광도파로의 코어 층과 evanescent field 가 영향을 미치는 클래딩 깊이까지 충분히 식각하면 된다.

#### IV. 폴리머 광도파로 편광 변환기 소자의 특성 측정

제작된 폴리머 광도파로 편광변환기 소자의 입력단에 선편광을 입사하고, 반응성 메조젠-액정 혼합 용액의 폴링 정도에 따른 출력광의 편광변화를 CCD와 광파워 측정기로 관찰하였다. 1550 nm 파장의 FP-LD (Fabry Perot Laser Diode) 광원을 사용하였으며, 광섬유 편광기와 광섬유 회전기를 이용하여 TM 모드 선편광을 광도파로의 입력단에 입사하였다.

반응성 메조젠-액정 용액을 삽입하기 전에 광도파로에서 나타나는 초기 편광 소멸 비는 10.8 dB로 나타났으며, 폴리머 광도파로 파장판의 홈에 반응성 메조젠-액정 혼합용액을 삽입한 후 상하부 전극에 전압을 인가하여 그림 5와 같은 편광상태를 관측할 수 있었다. 이 때 인가되는 전계의 크기는 0 ~ 4.2  $\text{V}/\mu\text{m}$  정도가 되었으며 일반적인 액정 구동 전계에 비하여 조금 크게 나타났다. 그림 4(a)는 전압을 인가하기 전 입력 편광과 90° 방향으로 정렬된 출력 편광기를 지나고 빛을 CCD 로 관찰한 모습이며, 전계 크기를 4.2  $\text{V}/\mu\text{m}$  까지 상승 시켰을 때 편광 변환기에서 편광 상태가 변화되어 출력

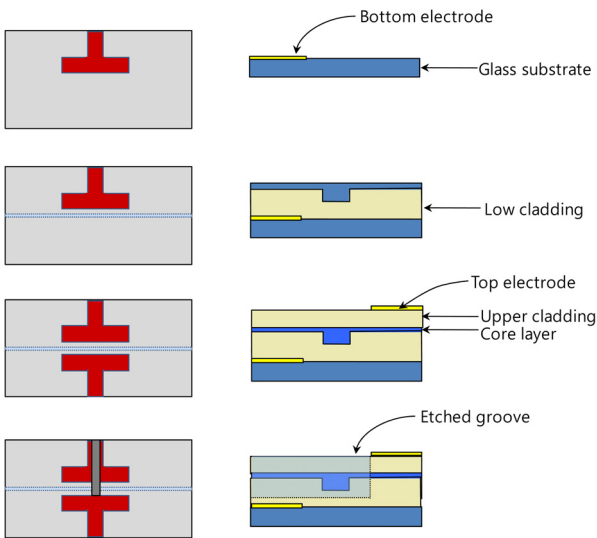


FIG. 2. Fabrication procedures of integrated optical wave plates.

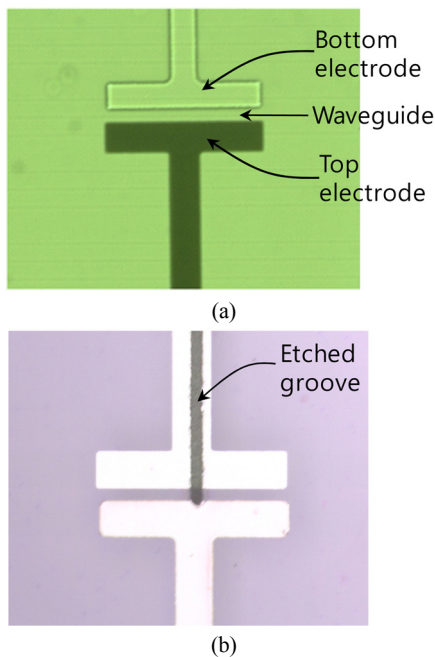


FIG. 3. Photographs of fabricated device exhibiting (a) the two electrode aligned adjacent to the polymer waveguide and (b) the groove pattern etched for LC-RM solution fill up.

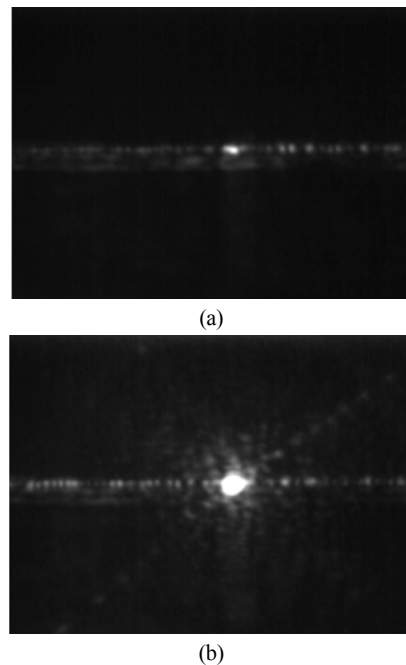


FIG. 4. CCD images of the output mode profile: (a) initial state after 90° rotated analyzing polarizer, and (b) polarization converted light when 4.2  $\text{V}/\mu\text{m}$  is applied.

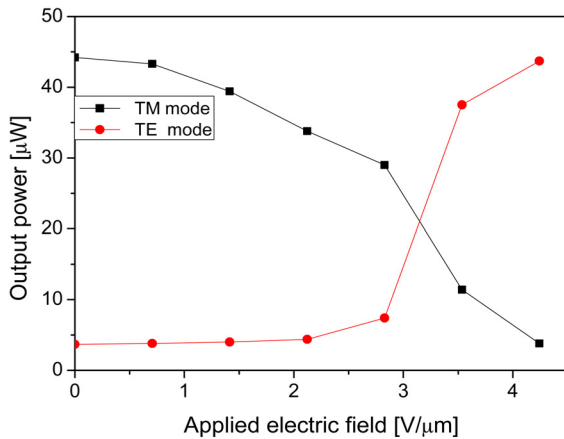


FIG. 5. Polarization components of the output light as a function of the applied electric field, in which initial TM polarization is converted to TE polarization when the electric field is increased to 4.2 V/μm.

광이 밝게 나타남을 그림 4(b)와 같이 볼 수 있었다. 반응성 메조겐-액정 혼합 용액 속의 액정 분자들이 전압을 인가함에 따라 전기장의 방향으로 폴링 되면서 초기 입사된 TM 모드 편광이 TE 모드 편광으로 변환 됨을 확인 하였다. 전계 크기를 4.2 V/μm로 고정 시키고 반응성 메조겐-액정 혼합용액을 UV 경화(20 mW, 5분) 시킨 후 전계 인가를 하지 않더라도 편광 변환기의 출력 편광상태가 유지되는 것을 확인 하였고 편광 변환기의 삽입 손실은 8.3 dB로 나타났다.

그림 5는 인가되는 전계의 크기에 따른 폴리머 광도파로 편광 변환기 출력광의 편광 성분을 측정 한 그래프이다. 편광 변환기, 검광기 그리고 광 파워 측정기를 자유공간 상에서 정렬시킨다. 편광 변환기 에서 출력되는 TE 모드와 TM 모드 편광들은 검광기를 통과 하면서 하나의 모드 편광만 출력 된다. 이렇게 출력된 빛을 광 파워 측정기를 통해 파워를 확인한 후 다시 검광기의 흡수축을 90°로 회전시켜 또 다른 모드 편광의 파워를 측정한다. 전계의 크기가 증가함에 따라 초기 입력 편광이 변환되기 시작하며 전계의 크기가 4.2 V/μm 일 때 편광 변환이 이루어 지는 것을 볼 수 있었으며, 실제 전극에 인가한 전압은 6 kV이다. 이 때 출력되는 빛의 편광 변환 효율(polarization conversion efficiency)을 계산하면 약 90% 로 나타난다. 편광 변환이 완전히 이뤄지지 않는 이유는 액정분자의 정렬 상태가 한쪽 방향으로 균일하게 형성 되지 않기 때문으로 추정된다. 일반적으로 액정은 넓은 기판 위에서 평면이나 수직 방향으로 정렬되도록 사용하고 있으나 본 실험에서와 같이 광도파로 내부에서 정확하게 45° 방향으로 액정을 정렬 시키기에는 어려움이 있었다.

## V. 결 론

본 논문에서는 반응성 메조겐과 액정의 혼합 용액을 이용

하여 폴리머 광도파로와 일체형으로 제작 가능한 편광 변환기를 구현하였다. 저손실 폴리머를 이용하여 단일모드 광도파로를 제작하였고 광도파로와 직교하게 형성된 홈에 반응성 메조겐과 액정 혼합용액을 삽입하고 전계를 걸어서 반파장판을 형성할 수 있도록 하였다. 제작된 편광 변환기는 1550 nm 파장에서 광도파로 상하부에 45도 각도로 정렬된 전극을 이용해 4.2 V/μm의 전기장을 인가하였을 때 TM 편광이 TE 편광으로 변환되는 것을 확인하였으며 전계 크기를 4.2 V/μm로 고정 시키고 반응성 메조겐-액정 혼합용액을 UV 경화시킨 후 전계 인가를 하지 않더라도 편광 변환기의 출력 편광상태가 유지되는 것 또한 확인 하였다. 최종 TE 편광으로의 변환 효율은 90% 정도가 되었다.

## 감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

## References

1. H. Takahashi, Y. Hibino, and I. Nishi, "Polarization-insensitive arrayed-waveguide grating wavelength multiplexer on silicon," *Opt. Lett.* **17**, 499-501 (1992).
2. H. Takahashi, Y. Hibino, Y. Ohmon, and M. Kawachi, "Polarization-insensitive arrayed-waveguide wavelength multiplexer with birefringence compensating film," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5**, 707-709 (1993).
3. Y. Inoue, Y. Ohmori, M. Kawachi, S. Ando, T. Sawada, and H. Takahashi, "Polarization mode converter with polyimide half waveplate in Silica-based planar lightwave circuits," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **6**, 626-628 (1994).
4. W.-S. Chu, S.-M. Kim, J.-W. Kim, K.-J. Kim, and M.-C. Oh, "Waveguide polarization converters incorporating UV-curable reactive mesogen," *IEEE Photon. Technol. Lett.* (This paper submitted March 28, 2011).
5. T.-J. Chen and K.-L. Chu, "Pretilt angle control for single-cell-gap transfective liquid crystal cells," *Appl. Phys. Lett.* **92**, 091102 (2008).
6. S.-G. Kim, S.-M. Kim, Y.-S. Kim, H.-K. Lee, S.-H. Lee, G.-D. Lee, J.-J. Lyu, and K.-H. Kim, "Stabilization of the liquid crystal director in the patterned vertical alignment mode through formation of pretilt angle by reactive mesogen," *Appl. Phys. Lett.* **90**, 261910 (2007).
7. Y. Kurioz, O. Buluy, Y. Reznikov, I. Gerus, and R. Harding, "Orientation of a reactive mesogen on photosensitive surface," *Technical Digest of SID 2007* **38**, 688-690 (2007).
8. S. P. Pogossian, L. Vescan, and A. Vonsovici, "To the single mode condition for semiconductor rib waveguides with large cross-section," *J. Lightwave Technol.* **16**, 1851-1853 (1998).