

편광 간섭을 이용한 광도파로 기반의 표면 굴절률 센서

손근식

광운대학교 전자공학과

Ⓣ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

권순우

성균관대학교 신소재공학과

Ⓣ 440-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300

김우경[†] · 양우석 · 이형만 · 이한영

전자부품연구원 바이오 의료기기연구센터

Ⓣ 463-816 경기도 성남시 분당구 야탑동 68번지

이성동

인포피아

Ⓣ 431-716 경기도 안양시 동안구 관양2동 889-3 동양테크노타운 A동 1603호

이상신

광운대학교 전자공학과

Ⓣ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

(2008년 4월 8일 받음, 2008년 5월 27일 수정본 받음, 2008년 6월 2일 게재 확정)

본 논문에서는 폴리머 광도파로 상부에 TiO₂(Titanium dioxide)박막이 증착된 굴절률 센서를 구현하였다. 제작된 센서를 이용하여 글리세롤의 굴절률 변화에 따른 출력광의 편광 간섭 변화를 측정하였다. 또한 박막 두께에 따른 편광 간섭의 민감도 변화를 확인하고 수치해석 결과와 비교하였다. 특히 TiO₂가 20 nm 증착된 광도파로에서 2π의 위상차를 갖는 굴절률 변화는 1.8×10⁻³이다.

주제어: Integrated optics devices, Sensors, Polymers

I. 서 론

최근 들어 집적형 광학을 이용한 화학 센서, 바이오 센서 등이 보고되고 있다. 집적형 광학 방식의 센서는 높은 분해능을 갖고 있고, 소형화가 가능하다는 장점을 가지고 있으며, 표면 플라즈몬 공명(surface plasmon resonance)센서^[1], 브래그 격자(bragg grating)센서,^[2] 마흐젠더 간섭계(Mach-Zehnder interferometer)센서^[3] 등이 그 주를 이루고 있다. 이들 중에서 편광 간섭(polarimetric interference)을 이용한 센서는 광섬유, 광도파로 형태로 구성되어 있다.^[4,5] 특히 최근에는 유리기판에 칼륨을 도핑시킨 광도파로에 고굴절률 TiO₂ 박막을 증착하여 제작된 센서가 보고되었다.^[5,6] 이 센서는 TiO₂ 박막을 증착하여 소산파 분포(evanescent field)를 극대화시켜 단일 도파로의 경우보다 감도를 향상시켰다. 본 논문에서는 폴리머를 기반으로 하는 광도파로를 제작하고 그 상부에 TiO₂ 박막을 증착하여 굴절률 센서를 구성하였다. 표면 물질 변화에 따른 출력광의 편광 변화량을 감지함으로써 제작된 센서의

민감도를 산출하였다. 특히 박막 두께에 따른 센서의 감도 변화를 확인하였고, 수치해석 결과와 비교하였다. 또한 글리세롤, 글루코스 및 NaCl 수용액에 대한 응답을 측정함으로써, 제작된 센서로부터의 검출량이 물질의 종류와 관계없이 그 굴절률에 비례함을 확인하였다.

II. 동작원리

그림 1은 본 논문에서 제작된 광도파로 기반 표면 굴절률 센서의 개략도이다. 먼저 폴리머를 이용하여 폭 W, 높이 H를 갖는 채널형 단일 모드 광도파로가 구성된다. 광도파로의 민감도 향상을 위해 고굴절률 박막이 검출영역에 한해 증착되어지며, 이때 입출력부와의 원활한 광커플링을 위해 수직 테이퍼링(vertical tapering)형태로 증착이 수행된다.

2.1 편광변화에 의한 표면 물질 검출

그림 1과 같은 광도파로는 축에 따른 구조의 회전비대칭성으로 말이암아 광의 도파특성이 그 편극에 따라 상이하다. 이러한 복굴절 도파로에 입력되는 임의의 편각 θ_N를 갖는

[†]E-mail: wkkim@keti.re.kr

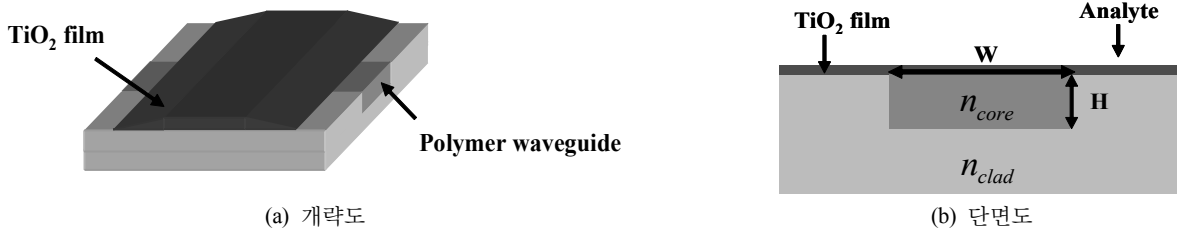


그림 1. 수직 테이퍼링 구조를 갖는 채널형 광도파로.

선편광은 다음과 같이 Jones vector^[7]로 표현할 수 있다.

$$V_{IN} = \begin{pmatrix} V_{TE} \\ V_{TM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{IN} \\ \sin \theta_{IN} \end{pmatrix} \quad (1)$$

길이 L 을 갖는 광도파로가 무손실이라 가정할 때, 파장 λ 에 대한 Jones matrix W_{wg} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W_{wg} = \begin{pmatrix} e^{-j\phi_{TE}} & 0 \\ 0 & e^{-j\phi_{TM}} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\phi_{TE} = n_{eff(TE)} \cdot \frac{L}{\lambda} \cdot 2\pi, \quad \phi_{TM} = n_{eff(TM)} \cdot \frac{L}{\lambda} \cdot 2\pi$$

여기서 $n_{eff(TE)}$ 와 $n_{eff(TM)}$ 는 각각 TE 및 TM 편광에 대한 도파로의 유효굴절률을 지칭한다. 식 (1)과 식 (2)로부터 도파로를 통해 출력되는 광의 Jones vector V' 는 다음과 같이 연산될 수 있다.

$$V' = W_{wg} \cdot V_{IN} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{IN} \cdot e^{-j\phi_{TE}} \\ \sin \theta_{IN} \cdot e^{-j\phi_{TM}} \end{pmatrix} \quad (3)$$

식 (3)은 광도파로의 복굴절 정도에 따라 출력되는 편광이 변함을 의미하며, 이러한 편광변화는 임의의 투과각 θ_{pol} 을 갖는 편광자를 통해 출력되는 광의 크기 V_{OUT} 의 변화를 통해 간단히 분석될 수 있다.

$$V_{OUT} = \left(\cos \theta_{pol} \cdot \cos \theta_{IN} \cdot e^{-j\phi_{TE}} + \sin \theta_{pol} \cdot \sin \theta_{IN} \cdot e^{-j\phi_{TM}} \right) \quad (4)$$

식 (4)에서 출력광의 크기변화 진폭은 θ_{IN} , θ_{pol} 가 45° 혹은 -45° 일 때 가장 크며, $\theta_{IN} = \theta_{pol} = 45^\circ$ 의 조건을 식 (4)에 대입하여 정리하면 입력광의 세기 I_{IN} 에 대한 출력광의 세기 I_{OUT} 를 다음과 같다.

$$I_{OUT} = \frac{1}{2} \cdot I_{IN} \cdot [1 + \cos \phi], \quad (5)$$

$$\phi = \phi_{TE} - \phi_{TM} \quad (6)$$

도파로 센싱영역의 표면 굴절률 변화 Δn_s 에 따른 도파로의 유효굴절률 변화 Δn_{eff} 를 편광에 따라 각각 민감도 S_{TE} 와 S_{TM}

으로 정의하면,

$$S_{TE} = \frac{\Delta n_{eff(TE)}}{\Delta n_s}, \quad S_{TM} = \frac{\Delta n_{eff(TM)}}{\Delta n_s} \quad (7)$$

식 (6)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\phi = \phi_0 + 2\pi N_{INT} \quad (8)$$

여기서 $N_{INT} = S \cdot \frac{L}{\lambda} \cdot \Delta n_s$, $S = S_{TE} - S_{TM}$

여기서 ϕ_0 는 초기 복굴절 위상차를, N_{INT} 는 도파로 표면 굴절률 변화에 의한 간섭 횟수를 의미한다. 식 (8)부터, 도파로 표면의 물질 변화가 복굴절 변화를 유발할 수 있다면 출력되는 광의 세기 변화 감지를 통해 표면의 변화정도를 검출할 수 있음을 알 수 있다.

2.2 TiO₂ 두께 변화에 따른 검출도 모의전산

표면 물질의 변화에 따른 편광의 변화량을 극대화하기 위해서는 도파로의 민감도가 편광에 따라 매우 상이해야 하므로, 본 논문에서는 채널형 광도파로 상부에 고굴절률 물질인 TiO₂ 박막이 증착된 구조를 채택하였다.

제안된 도파로 구조의 표면 민감도를 method of line^[8]을 활용하여 모의전산하였으며, 표 1은 모의전산에 사용된 광도파로의 설계 파라미터이다. 표 1에 명시된 TiO₂의 굴절률은 증착된 비정질(amorphous) 박막의 특성으로, 엘립소미터(ellipsometer)장비를 이용하여 측정된 값이다.

그림 2는 TiO₂ 두께 변화에 따른 민감도 파라미터 S_{TE} 와 S_{TM} 을 모의전산한 결과이다. TiO₂가 없는 폴리머 광도파로에서는 편광 TE와 편광 TM의 민감도가 유사하나, TiO₂ 박막의 두께가 증가할수록 두 편광의 민감도차가 증가됨을 확인

표 1. 광도파로의 설계 파라미터

파장(λ)	1064 nm
폭(W)	7 μ m
높이(H)	2 μ m
Core 굴절률(n_{core})	1.462
Lower Clad 굴절률(n_{clad})	1.452
TiO ₂ 굴절률	2.4

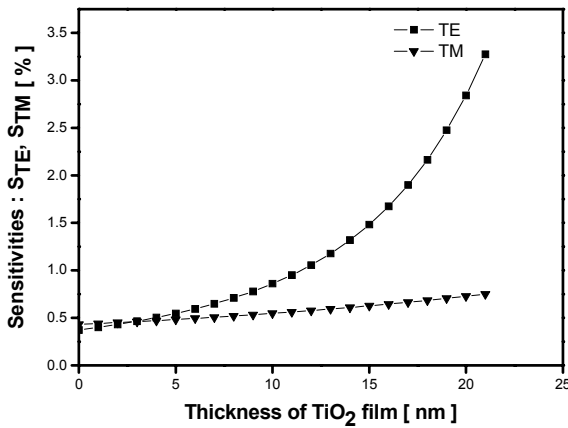


그림 2. TiO₂ 박막 두께 변화에 따른 편광 TE와 TM의 민감도.

할 수 있다. 이러한 두 편광의 민감도차는 편광 TE가 편광 TM에 비해 고굴절률 TiO₂ 박막 표면에 더 많이 분포함에 기인한다. 그림 2와 식 (8)로부터 고굴절률 박막이 증착된 본 논문의 도파로 구조가 고감도 표면 물질 검출이 유용함을 확인할 수 있다.

III. 소자제작 및 특성 측정

3.1 광도파로 제작 과정

제안된 소자의 제작공정은 그림 3에 도시되어 있으며, 그 제작과정은 다음과 같다. 먼저 실리콘 웨이퍼 위에 Chemoptics사의 ZPU12-450 폴리머를 스핀코팅하여 하부 클래딩을 형성하였다. 이후 포토리소그래피 공정을 이용하여 클래딩 ZPU12-450 폴리머를 폭 $W = 7 \mu\text{m}$, 높이 $H = 2.5 \mu\text{m}$ 가 되도록 건식식각하였다. 코어용 ZPU13-460 폴리머를 스핀코팅한 후, 전면식각을 통해 높이 $H = 2 \mu\text{m}$ 의 도파로를 완성하였다. 이때 건식식각은 NLD(neutral loop discharge)장비를 이용하였으며, 이때 가스 유입량은 O₂ 100 sccm, 공정 중 챔버 내부 압력은 0.33 Pa, RF 파워는 600 W, Bias 파워는 300 W이다. 이후 제작된 광도파로 표면 위에 TiO₂ 박막이 증착되었다. 이때 가스 유입량은 Ar 50 sccm, O₂ 1 sccm이며, 250 W의 RF sputtering을 통해 TiO₂ 타겟의 증착이 수행되었다. TiO₂ 박막의 수직 테이퍼링을 위해서 도파로부터 2.5 mm 떨어진 높이에 새도우 마스크(shadow mask)를 위치시켰으며, 증착을 통해 20 mm의 균일한 검출영역과 2 mm의 테이퍼링 영역을 갖는 박막을 형성하였다.

3.2 PDMS 채널 제작과정

검출영역인 TiO₂ 박막 표면에 검출 대상 물질의 유입을 원활하게 하기 위해 PDMS(polydimethylsiloxane)물질을 이용하여 채널 구조를 갖는 챔버를 제작하였다.^[9] PDMS와 경화제를 10:1의 비율로 섞어 27×5×3 mm³의 크기의 채널을 형성하고, 경화한 후, 제작된 광도파로에 부착하였다.

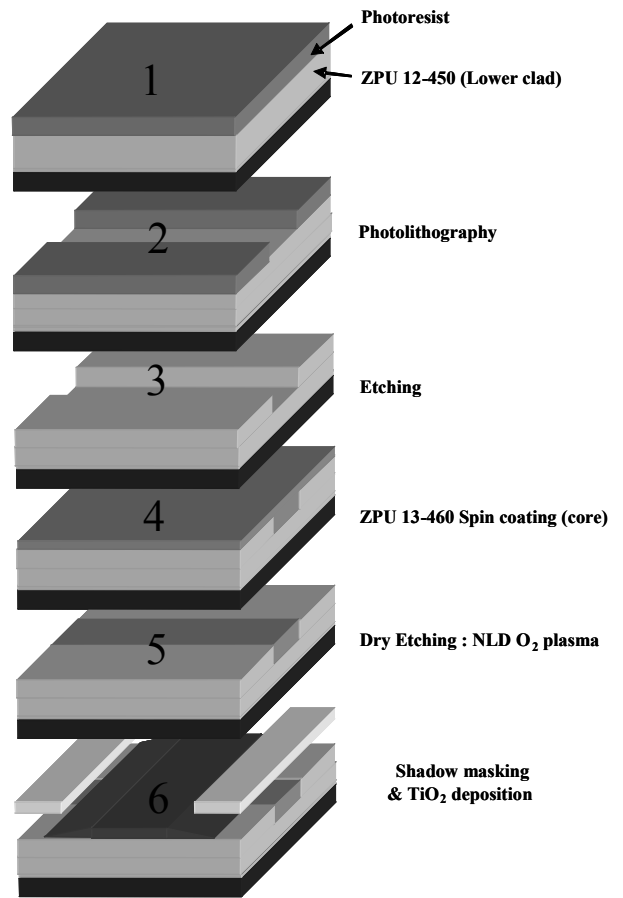


그림 3. 표면 굴절률 센서 제작 과정.

3.3 광도파로 특성 측정 실험

제작된 센서 소자의 검출 특성을 평가하기 위한 시스템이 구축되었으며, 그림 4는 그 개략도를 보여주고 있다. $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 의 광원이 렌즈를 통해 제작된 도파로에 입사되었으며, 이때 HWP(half wave plate)와 편광자(polarizer)를 이용하여 입사광이 45°의 선형 편광을 유지하도록 하였다. 도파로를 통해 출력된 광은 렌즈와 45°의 편광자를 통해 검출기(photodetector)에 집광되도록 하였다.

다음으로, 센서의 표면으로 검출 물질을 유입시키기 위한 시스템이 구축되었으며, 그림 4에 도시되어 있다. 초기에 컨테이너 2는 80 mL의 물로 채워져 있다. 컨테이너 2 내 용액의 순환이 펌프를 통해 0.6 mL/min의 속도로 이루어졌으며, 이때 용액은 도파로 검출영역을 경유하였다. 측정의 시작과 동시에 컨테이너 1의 글리세롤이 컨테이너 2로 주입되었다. 이러한 과정을 통해 컨테이너 2 내 글리세롤의 농도 변화가 일어나며, 결국 도파로 검출영역의 굴절률이 시간에 따라 증가하는 결과가 나타난다. 그림 5는 유입되는 글리세롤 양의 증가에 따른 컨테이너 2 내 용액의 굴절률을 산출하여 도시한 것이며, 계산에 사용된 물과 글리세롤의 굴절률은 $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 에서 각각 1.325, 1.463이다.^[10,11]

그림 6은 그림 4의 시스템을 통해 글리세롤 10 mL를 주입

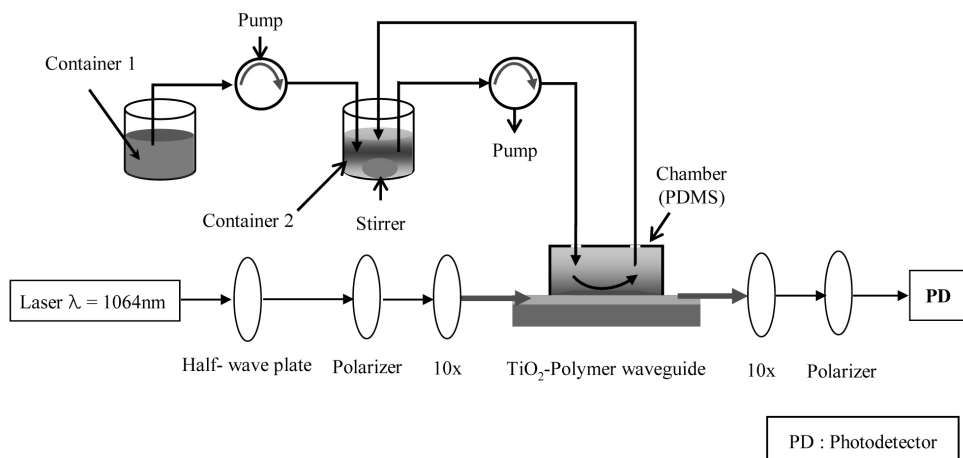


그림 4. 측정 시스템.

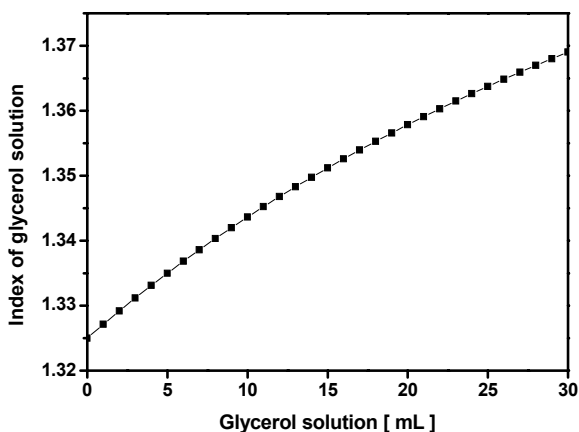


그림 5. 글리세롤 주입량에 따른 컨테이너 2 내 수용액의 굴절률 변화.

하는 동안 시간변화에 따른 출력 광 세기를 나타낸 것이다. 그림 6(a)는 폴리머 도파로로부터 출력되는 응답이며, 그림 6(b)와 그림 6(c)는 각각 TiO₂ 박막 16 nm, 20 nm를 증착한 도파로에서의 결과를 보여주고 있다. 표면 굴절률의 변화에도 폴리머 도파로에서는 두드러진 변화가 없는 반면, 16 nm, 20 nm의 TiO₂가 증착된 도파로에서는 각각 2회, 6.8회의 간섭이 일어나는 것을 확인 할 수 있었다.

TiO₂ 박막 두께 변화에 따른 편광 간섭 횟수가 그림 7에 도시되었으며, 모의 전산한 결과 또한 실선으로 삽입하였다. 이를 통해 TiO₂ 박막 두께가 증가함에 따라 지수적으로 간섭 횟수가 증가함을 알 수 있었고, 이는 이론적으로 예측한 결과와 유사함을 확인하였다.

그림 8은 TiO₂ 박막 두께가 20 nm인 샘플에서 글리세롤 주입량 변화에 따른 출력 광 세기를 나타낸 것이다. 그림 8(b)와 그림 8(c)는 글리세롤 주입량을 각각 20 mL, 30 mL로 하였을 때 출력된 결과이다. 글리세롤의 주입량 증가에 따라 간섭 횟수 또한 증가하는 경향을 보였으며, 그 횟수는 각각 6.8회, 15회, 24.5회이었다. 컨테이너 1내의 용액을 각각 7.4

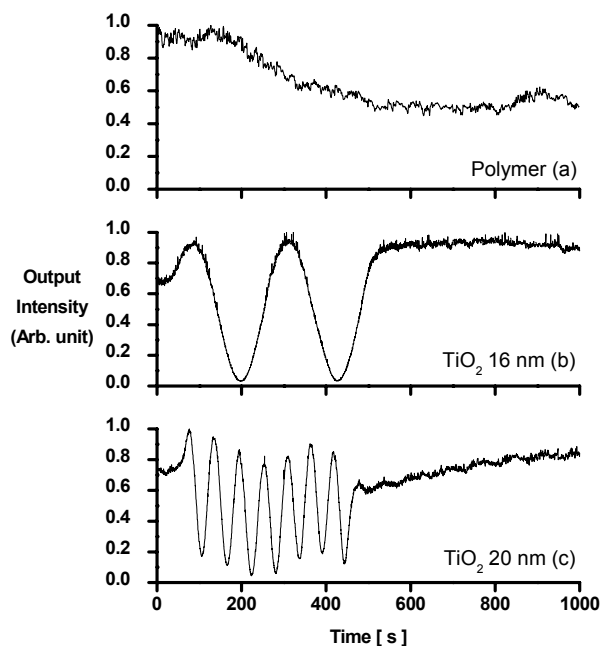


그림 6. 글리세롤 10 mL 주입에 따른 편광 간섭 횟수.

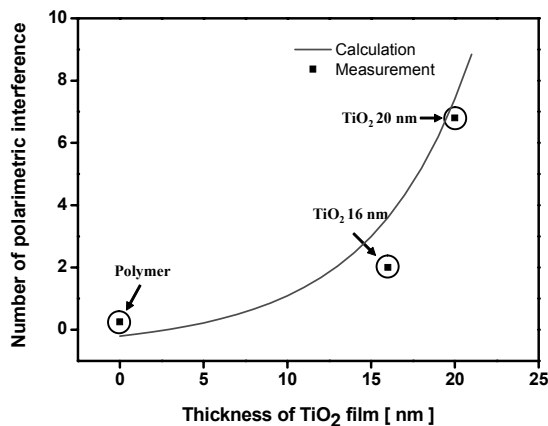


그림 7. TiO₂ 박막 두께 변화에 따른 편광 간섭 횟수.

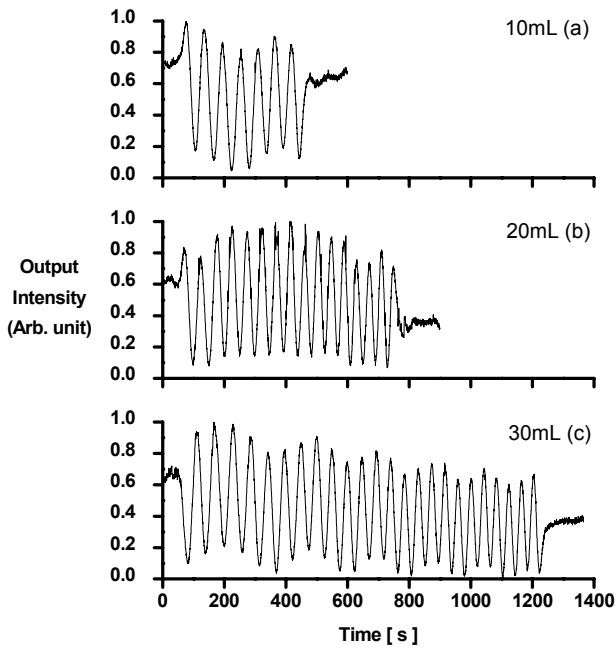


그림 8. 글리세롤 농도 주입량에 따른 편광 간섭 횟수(20 nm TiO₂ 증착).

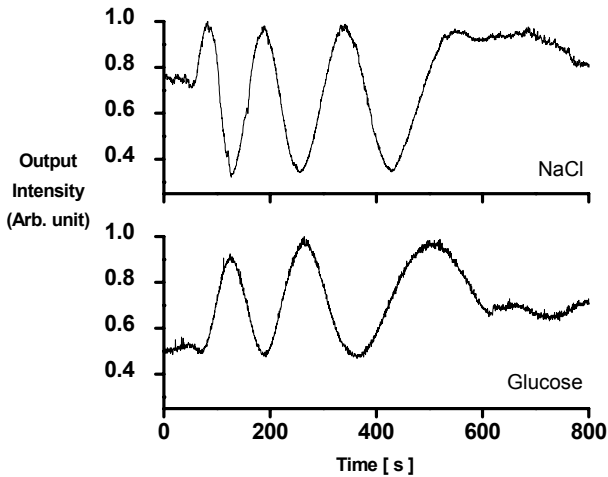


그림 9. NaCl과 글루코스 주입에 따른 편광 간섭 횟수(20 nm TiO₂ 증착).

wt% 글루코스 수용액과 7.4 wt% NaCl 수용액으로 교체한 후 실험이 반복되었으며, 그림 9는 각각 80 mL의 수용액 주입에 따른 간섭패턴의 변화를 보여주고 있다. 글루코스 수용액과 NaCl 수용액 주입에 따른 간섭 횟수는 각각 2.8회, 3.25회이었으며, 수용액 주입에 총 굴절률 증가량은 각각 0.0065, 0.0075이다. 그림 10은 그림 8과 그림 9의 결과를 요약한 것이다. 제작된 센서가 표면 물질의 종류에 상관없이 굴절률 변화에 비례함을 확인할 수 있으며, 간섭 수 1회, 즉 2π 의 편광간 위상차 변화를 유발하는 표면 굴절률 변화는 대략 1.8×10^{-3} 으로 계산되었다.

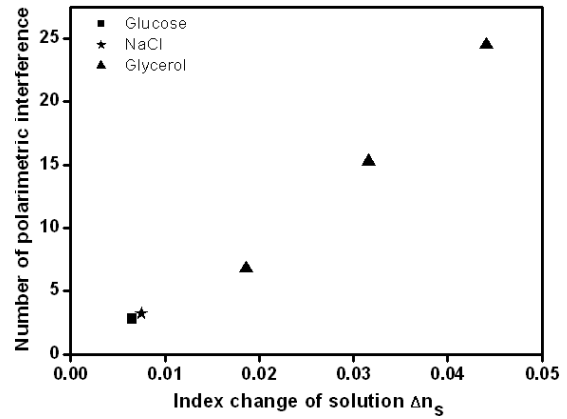


그림 10. 굴절률 변화에 따른 편광 간섭 횟수.

IV. 결 론

본 논문에서는 폴리머 광도파로에 TiO₂ 박막을 증착하여 표면 물질의 굴절률 변화를 감지하는 소자를 구현하였다. Method of line법을 이용한 모의전산을 통해 제작되는 광도파로의 민감도를 예측하였고, 실험을 통해 이를 검증하였다. 편광간의 간섭을 이용한 굴절률 변화 감지 시스템을 구축하고, 이로부터 도파로 표면에 유입되는 용액의 농도를 검출하였다. 또한 TiO₂ 박막 두께 증가에 따라 민감도가 향상됨을 알 수 있었다. TiO₂가 20 nm 증착된 광도파로에서는 1.8×10^{-3} 의 표면 굴절률 변화에 대해 2π 만큼의 편광간 위상차가 유발됨을 확인하였다.

제안한 센서는 궁극적으로 항체, 항원을 이용한 표면 감지 방식에 적용될 예정으로, 그 높은 표면 감도로 인해 분석 물질에 대한 정보 분석에 효과적인 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] R. D. Harris, B. J. Luff, J. S. Wilkinson, J. Piehler, A. Brecht, G. Gauglitz, and R. A. Abuknesha, "Integrated optical surface plasmon resonance immunoprobe for simazine detection," *Biosens. Bioelec.*, vol. 14, pp. 377-386, 1999.
- [2] A. N. Chryssis, S. M. Lee, S. B. Lee, S. S. Saini, and M. Dagenais, "High Sensitivity Evanescent Field Fiber Bragg Grating Sensor," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 6, pp. 1253-1255, 2005.
- [3] E. F. Schipper, A. M. Brugman, C. Dominguez, L. M. Lechuga, R. P. H. Kooyman, and J. Greve, "The realization of an integrated Mach-Zehnder waveguide immunosensor in silicon technology," *Sens. Actuat. B*, vol. 40, pp. 147-153, 1997.
- [4] M. Corke, J. D. C. Jones, A. D. Kersey, and D. A. Jackson, "Combined michelson and polarimetric fibre-optic interferometric sensor," *Electron. Lett.*, vol. 21, no. 4, pp. 148-149, 1985.

- [5] Z. M. Qi, K. Itoh, M. Murabayashi, and C. R. Lavers, "Characterization and application of a channel-planar composite waveguide," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 19, pp. 1427-1429, 2000.
- [6] Z. M. Qi, I. Honma, and H. Zhou, "Tin-diffused glass slab waveguides locally covered with tapered thin TiO₂ films for application as a polarimetric interference sensor with an improved performance," *Anal. Chem.*, vol. 77, pp. 1163-1166, 2005.
- [7] Optical Electronics (Yariv, USA, 1991).
- [8] T. Itoh, Numerical Techniques For Microwave And Millimeter-Wave Passive Structures (Wiley-interscience, Canada, 1989).
- [9] S. Y. Lee, L. X. Chen, J. B. Choo, E. K. Lee, and S. H. Lee, "Highly sensitive biological analysis using optical microfluidic sensor," *J. Opt. Soc. Kor.*, vol. 10, no. 3, pp. 130-142, 2006.
- [10] M. Daimon and A. Masumura, "Measurement of the refractive index of distilled water from the near-infrared region to the ultraviolet region," *Appl. Opt.*, vol. 46, no. 18, pp. 3811-3820, 2007.
- [11] P. R. Cooper, "Refractive-Index measurements of liquids used in conjunction with optical fibers," *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 19, pp. 3070-3072, 1983.

Polymer Waveguide Based Refractive Index Sensor Using Polarimetric Interference

Geun-Sik Son

Department of Electronic Engineering, Kwangwoon University, 447-1 Wolgye-Dong, Nowon-Gu, Seoul 139-701, Korea

Soon-Woo Kwon

School of Advanced Materials science & Engineering, Sungkyunkwan University, 300 Chunchun-Dong, Jang An-Gu, Suwon, Geonggi-Do 440-746, Korea

Woo-Kyung Kim[†], Woo-Seok Yang, Hyung-Man Lee, and Han-Young Lee

Nano Bio Research center, Korea Electronics Technology Institute, 68 Yatap-Dong, Bundang-Gu, Seongnam, Geonggi-Do 463-816, Korea

[†]*E-mail: wkkim@keti.re.kr*

Sung-Dong Lee

Infopia, 1603 Dongyang-Technotown A-Dong, 889-3 Kwanyang 2-Dong, Dongan-Gu, Anyang, Geonggi-Do 431-716, Korea

Sang-Shin Lee

Department of Electronic Engineering, Kwangwoon University, 447-1 Wolgye-Dong, Nowon-Gu, Seoul 139-701, Korea

(Received April 8, 2008; Revised manuscript May 27, 2008; Accepted June 2, 2008)

A novel refractive index sensor, which consists of polymer channel waveguide overlaid with TiO₂ thin film, is demonstrated. To evaluate the fabricated sensor, we measured the polarimetric interference induced by concentration change of injected glycerol solution. Our experimental results show that thicker TiO₂ film improves the sensitivity of the polarimetric interferometer. For the fabricated waveguide with a 20 nm thick TiO₂ film, the measured index change to lead phase variation of 2π is 1.8×10^{-3} .

OCIS codes: (130.3120) Integrated optics devices; (130.6010) Sensors; (160.5470) Polymers.