논문 2010-47SD-4-4

Rib 도파로 기반 집적 마흐젠더 간섭계 센서

(An Integrated Mach-Zehnder Interferometric Sensor based on Rib Waveguides)

추 성 중*, 박 정 호**, 신 현 준***

(Sung Joong Choo, Jung Ho Park, and Hyun-Joon Shin)

요 약

평판형 rib 도파로의 설계 및 공정기술을 바탕으로 632.8 nm에서 동작하는 집적 마흐젠더 간섭계 센서(Mach-Zehnder interferometric sensor)를 제작하였다. 단일모드와 높은 감도의 두 가지 조건을 고려하여 실리카 계열(SiO_2-SiO_xN_y-SiO_2) rib 도파로를 설계하였고 박막증착, 사진제판, RIE (Reactive Ion Etching)와 같은 반도체 공정들을 이용해 그 기하학적 구조를 구현하였다. 제작된 rib 도파로의 광출력을 cut-back방법으로 분석한 결과, 약 4.82 dB/cm의 전파손실을 측정하였다. 동시에 크롬 식각방지 층 공정을 도입하여 마흐젠더 간섭계 칩 위에 감지영역(sensing zone)을 형상화할 때 발생하는 코어 층 손상을 방지하였다. 제작된 마흐젠더 간섭계 센서를 이용한 증류수/에탄올 혼합물 굴절률 측정실험을 통해 약 $\pi/(4.04\times10^{-3})$의 소자 감도(sensitivity)를 최종 확인하였다.

Abstract

An integrated Mach-Zehnder interferometric sensor operating at 632.8 nm was designed and fabricated by the technology of planar rib waveguides. Rib waveguide based on silica system (SiO_2-SiO_xN_y-SiO_2) was geometrically designed to have single mode operation and high sensitivity. It was structured by semiconductor fabrication processes such as thin film deposition, photolithography, and RIE (Reactive Ion Etching). With the power observation, propagation loss measurement by cut-back method showed about 4.82 dB/cm for rib waveguides. Additionally the chromium mask process for an etch stop was employed to solve the core damaging problem in patterning the sensing zone on the chip. Refractive index measurement of water/ethanol mixture with this device finally showed a sensitivity of about $\pi/(4.04\times10^{-3})$.

Keywords: Rib waveguides, Propagation loss, Chromium mask, Mach-Zehnder interferometric sensor

I. 서 론

최근 전염병의 유행과 환경 및 식품에 대한 불신으로 인해 생화학적 물질에 대한 감지기술의 개발 필요성이 점점 증대되고 있다. 현재 감지기술로는 표지한 감지분자가 검출분자와 친화 반응할 때 발생하는 형광을 이용하는 형광표지법이 가장 널리 쓰이고 있다. 이런 형광표지식 감지는 높은 감도를 갖지만 표지물질 자체가 검출분자 대신 중요한 결합 면을 차지하거나 분자 내 원자의 공간적 배치를 방해하여 상호반응에 대한 잘못된 정보를 조장할 가능성이 높다. 뿐만 아니라 감지를 위해서 사전 표지단계가 반드시 필요한 단점이 있다. 따라서 이런 형광표지방식은 저분자 생화학 물질의 실시간 감지에는 부적합하다고 할 수 있다.

이런 상황에서 광센서를 이용한 무표지 감지법은 높은 감도를 보이면서도 사전 표지단계가 필요없기 때문에 차세대 감지 기술로서 주목받고 있다. 이에 쓰이는 광센서들로는 격자결합기(grating coupler)[1], 간섭계(interferometer)[2~4], 표면 플라즈몬 공명(surface

* 학생회원, ** 평생회원, 고려대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics Engineering, Korea University)
*** 정회원, 한국과학기술연구원 의과학센터
(Biomedical research center, Korea Institute of Science and Technology)
※ 본 연구는 KIST 기관고유연구사업의 지원을 받아 수행되었습니다.
접수일자: 2009년11월3일, 수정완료일: 2010년3월11일

plasmon resonance)[5] 등이 있으며 이들 중 특히 간섭계형 센서는 다른 광센서보다 좋은 두 가지 특성을 갖고 있다. 첫째, 1991년 Lukosz가 쓴 논문[6]에 의하면 간섭계형 센서가 여타 센서들에 비해 더 높은 감도를 갖고 있으며 둘째, 상호반응 길이 측면에서도 간섭계형 센서는 통상적으로 약 1 cm를 갖는데 이는 SPR (surface plasmon resonance)의 10-100 μm나 격자결합기의 1 mm의 상호반응 길이보다 월등히 뛰어나다[7]. 이런 점들은 센서로서 굉장히 유리하다고 할 수 있다.

한편 고감도 광센서는 주로 집적 광소자 형태로 제조되는데 이는 미세한 조정이 필요한 광학시스템을 하나의 칩에 축약해 놓을 수 있기 때문이다. 이런 집적 광소자 형태는 실리카 도파로의 사용이 필수적이며 도파로 물질은 주로 FHD (Flame Hydrolysis Deposition)[8]나 CVD (Chemical Vapor Deposition)[9] 방법으로 형성된다. 전자는 수십 μm 두께의 후막에, 후자는 수 μm 두께 이하의 박막에 주로 이용되는 성장법이다. 본 연구는 수 μm 두께의 실리카 도파로를 이용해 집적 마흐젠더 간섭계 소자를 센서로 구현할 것이기 때문에 CVD 법을 사용하였다. 특히 광도파로의 굴절률 제어에 용이하고 공정이 간편한 PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 법으로 SiO_2, SiO_xN_y박막을 상부 클래딩과 코어 층을 성장하였다. 본 논문은 크게 세 부분으로 나누어 마흐젠더 간섭계 센서를 연구하였다. 첫 부분에서 센서용 실리카 rib 도파로를 설계하고 제작해 그 손실계수를 측정하였고 두 번째 부분에서 크롬(Cr) 마스크를 도입한 마흐젠더 간섭계 센서 공정을 확립하였다. 마지막으로 제작된 소자를 이용해 에탄올과 증류수의 혼합에 따른 유효굴절률 변화를 감지함으로써 그 감도를 파악하였다.

Ⅱ. 마흐젠더 간섭계 센서의 설계 및 공정

1. 마흐젠더 간섭계 센서의 구조 및 원리

광도파로를 이용하면 광분배기(beam splitter)와 광결합기(beam coupler)를 각각 Y형 분배기(Y branch divider)와 Y형 결합기(Y branch coupler)의 형태로 칩 위에 집적할 수 있다. 이를 이용하면 마흐젠더 간섭계 칩을 만들 수 있으며 더불어 감지영역(sensing zone)을 형상화하면 그림 1과 같은 센서가 완성된다. Y형 분배기에 의해 50 대 50으로 나누어진 광은 각각 참조 분기선(reference arm)과 감지 분기선(sensing arm)으로 흘러 들어가게 된다. 이때 감지영역의 생화학적 변화에 의해 도파로의 유휴굴절률이 변하므로 감지분기선 광의 위상천이(phase shift)가 일어나고 Y형 결합기 통과 후, 참조 분기선 광과 감지 분기선 광의 위상차에 따라 상쇄간섭(相殺干涉)과 보강간섭(補强干涉)이 일어난다. 즉 위상차가 π의 홀수배일 때 상쇄간섭을 짝수배일 때 보강간섭을 유발함으로써 출력 광강도의 크기를 최소·최대로 동기화시킨다. 이런 일련의 과정을 통해 생화학적 신호가 광신호로 전환되며 이것이 마흐젠더 간섭계 센서의 동작 원리이다.

정량적으로 감지영역 내 위상천이량(位相遷移量, ΔΦ)은 아래식과 같이 나타낼 수 있다[3].

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} L \Delta N \tag{1}$$

위상천이량(ΔΦ)은 공기 중 광파장의 길이(λ)에 반비례하고 도파로 상 감지영역 길이(L)와 유효굴절률 변화량(ΔN)에는 정비례하게 된다. 위상천이량은 마흐젠더 간섭계 센서의 감도에 정비례하므로 감지영역 내 도파로 길이와 유효굴절률 변화량이 클수록 감도를 향상시키는 효과가 있다.

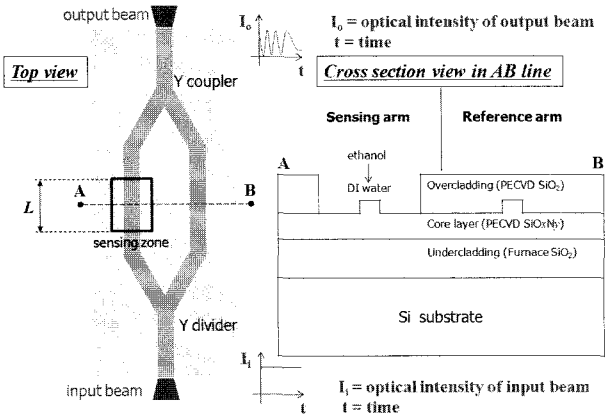


그림 1. 마흐젠더 간섭계 센서의 평면도 및 그 단면도
Fig. 1. Top and cross section view of a MZI sensor.

2. Rib 도파로의 설계 및 특성평가

마흐젠더 간섭계 센서에 적합한 rib 도파로는 단일모드와 높은 감도를 갖도록 설계되어야 한다. 도파로의 코어와 클래딩 층들을 구성할 물질은 SiO_xN_y, SiO_2로서 이미 선행연구를 통해 박막의 증착 조건 및 굴절률을 최적화하였다[10](표 1). 표 1을 참고해 각 층의 면면을 살펴보면, 하부 클래딩 층은 노광기(furnace)로 굴절률

표 1. Rib 도파로를 위해 최적화한 박막의 공정조건 및 그 굴절률

Table 1. Fabrication conditions and refractive index of the optimized thin film for a rib waveguide.

층(layer)	증착 박막 (공정조건)	굴절률
하부 클래딩 (undercladding)	노광기 SiO_2 (습식 산화)	1.458
코어 (core)	PECVD SiO_xN_y (250 °C, 15 W, N_2O/SiH_4 = 25/150 sccm)	1.53
상부 클래딩 (overcladding)	PECVD SiO_2 (250 °C, 20 W, N_2O/SiH_4 = 400/150 sccm)	1.461

이 1.458인 SiO_2박막을 습식 산화 성장하였고 코어 층은 PECVD의 공정조건을 250 °C, 15 W, N_2O/SiH_4 = 25/150 sccm로 하여 굴절률이 1.53인 SiO_xN_y박막을 성장하였으며 마지막으로 상부 클래딩 층은 PECVD의 공정조건을 250 °C, 20 W, N_2O/SiH_4 = 400/150 sccm로 하여 굴절률이 1.461인 SiO_2박막을 성장하였다. 이상의 박막성장 조건들이 rib 도파로 제작을 위해 쓰였다.

가. 단일모드 및 최대감도를 위한 rib 도파로의 조건

센서용 rib 도파로는 검출 결과분석이 용이하고 감도(感度)가 높아야 하기 때문에 단일모드인 동시에 표면에 높은 꼬리전계(evanescent field)량을 갖도록 설계되어야 한다. 코어와 클래딩 층을 구성하는 박막의 굴절률을 파악하면 rib 도파로의 기하학적 형상에 따른 모드 및 감도 조건을 유도할 수 있다. 단일모드에서 동작하는 rib 도파로의 형상을 알기 위해서 S. P. Pogossian 등이 제시한 방법을 이용하였다[11]. 이 때 파장이 632.8 nm인 TM (Transverse Magnetic) 편광 레이저를 도파로 폭은 2 μm, 코어 층(SiO_xN_y) 굴절률은 1.53, 하부 클래딩 층(SiO_2) 굴절률은 1.458, 상부 클래딩 층(H_2O) 굴절률은 1.33인 rib 도파로에 입사시킨다고 가정한다. 이런 가정 하에 x축이 rib 코어 층 높이(rib Height), y축이 rib 코어 층 식각 깊이(rib depth)일 때 모드 경계를 그래프로 그림 2와 같이 표시할 수 있다. 즉 그래프의 윗부분은 다 모드, 아랫부분은 단일모드를 만족하는 도파로 구조인 것이다.

이와 동시에 구조에 따른 rib 도파로의 감도를 유효굴절률법(effective index method)에 기초해 F. Dell'Olio 등이 제안한 식을 이용해 도출하였다[12]. 모드 그래프를 유도할 때와 동일한 rib 도파로 입사조건과

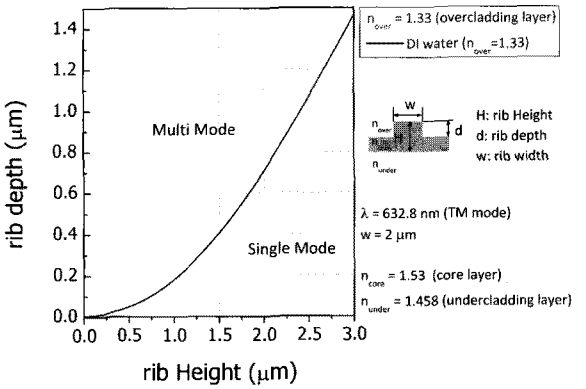


그림 2. 파장(λ)이 632.8 nm이고 TM 편광한 광을 폭(w)이 2 μm인 rib 도파로에 입사한다고 가정할 때 코어 층의 높이(H)와 식각 깊이(d)에 따른 모드 조건

Fig. 2. Modal behavior as a function of the rib height (H) and rib depth (d) of a rib waveguide with 2 μm width for a wavelength = 632.8 nm and TM polarization.

굴절률을 가정하였다. 계산 결과 rib 식각 깊이와 도파로 폭 길이의 감도 영향력은 미미한 반면 rib 도파로 높이의 감도 영향력은 상당하다는 것을 알 수 있었다. Rib 도파로 높이가 약 350 nm일 때 최대감도를 보이지만 그 입사손실이 너무 클 것으로 예상되었다. 게다가 단일모드를 만족시키기 위해 25 nm 이하의 식각 깊이를 가져야 하기 때문에 공정 오차나 표면 거칠기(surface roughness)에 굉장히 민감한 단점이 있다. 반면 rib 도파로 높이를 1.3 μm로 두껍게 할 경우, 입사손실이 줄어들고 단일모드를 위한 식각 깊이가 300 nm로 늘어나기 때문에 이러한 문제점들을 해결할 수 있게 된다. 따라서 본 논문에서 우리는 입사손실을 줄이고 단일모드 도파 가능성을 높이기 위해 rib 도파로 단면을 도파로 폭 2 μm, rib 도파로 높이 1.3 μm, 식각 깊이 110 nm로 설계하였다.

나. 제작된 rib 도파로의 광특성 평가

앞 절의 설계에 따라 rib 도파로 높이가 1.3 μm, 식각 깊이가 110 nm, 폭이 2 μm인 rib 도파로를 제작하였다. 제작된 rib 도파로의 출력광을 관찰한 결과 그림 3과 같은 단일모드 영상을 확인하였다.

광 도파특성 파악을 위해서 입사손실(insertion loss)과 전파손실(propagation loss)을 측정하였다. 이때 손실은 단일 도파로 소자를 서로 다른 길이로 cleaving하고 그 출력 광강도를 각각 측정하는 cut-back 방법을

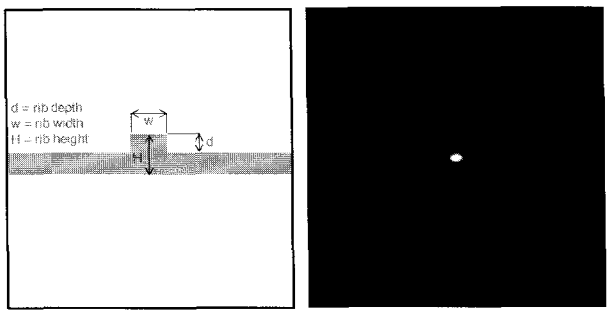


그림 3. 제작된 rib 도파로의 단일모드 출력광 CCD (Charge Coupled Device) 영상

Fig. 3. CCD (Charge Coupled Device) image of single mode output beam.

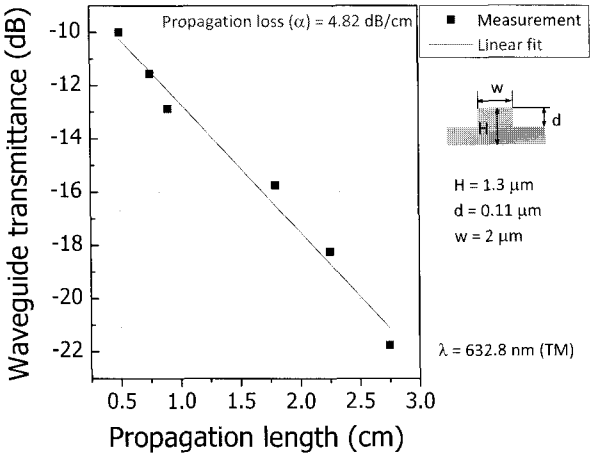


그림 4. 전송길이에 따라 측정한 rib 도파로의 투과율(dB)과 선형 근사로 본 전파손실 계수(4.82 dB/cm)

Fig. 4. The measured transmittances of rib waveguides with different propagation length and the propagation loss induced by linear fitting.

통해 도출되었다. 서로 다른 길이에 대한 측정치들을 입력 대비 출력 광강도의 dB값으로 환산하여 그림 4에 표시하였다. 그림 4와 같이 측정 dB값들을 선형 근사함으로써 전파손실은 약 4.82 dB/cm임을 유도할 수 있었다. 또한 이런 선형 근사법으로 y축 절편을 구하면 이를 통해 입사손실이 약 6.82 dB가 됨을 알 수 있다. 이상의 측정결과 제작된 rib 도파로에서 광이 비교적 적은 입사 및 전파손실로 단일모드 도파하는 것을 확인하였다. 이는 제작된 rib 도파로의 높은 센서 응용 가능성을 증명한다.

3. 마흐젠더 간섭계 센서의 공정 최적화

앞 절들의 rib 도파로 설계와 제작 기술을 바탕으로 크롬 식각방지 층 공정을 도입하면 마흐젠더 간섭계 센서의 제작 공정을 최적화할 수 있다. 그림 5와 같이 집적 마흐젠더 간섭계 센서 공정은 총 6가지 단계로 나눌 수 있다. 이를 공정순서대로 살펴보겠다. 첫 번째 하부 클래딩 층을 형성하는 단계로서 노광기로 습식산화(wet oxidation)함으로써 Si 기판에 굴절률이 1.458이고 두께가 2 μm인 SiO_2를 증착한다. 두 번째 코어 층을 형성하는 단계로서 PECVD로 굴절률이 1.53이고 두께가 1.3 μm인 SiO_xN_y를 증착한다. 세 번째 코어 층에 마흐젠더 간섭계를 형상화하는 단계로서 마흐젠더 간섭계 형상용 마스크를 이용하여 AZ 6612KE 포토레지스트(photoresist)를 사진제판(photolithography)한 다음 RIE (Reactive Ion Etching)로 110 nm를 식각한다. 네 번째 감지영역용 식각방지 층을 형상화하는 단계이다. 이 단계에서는 우선 50 nm 두께의 크롬(Cr)을 전자빔 증착기(e-beam evaporator)로 기판 위에 증착한 다음 감지영역용 마스크로 AZ 5214E 포토레지스트를 이미지 반전 사진제판한 후 크롬 식각액(Cr etchant)에 담금으로써 감지영역용 크롬 식각방지 층을 완성한다. 다섯 번째 상부 클래딩 층을 증착하는 단계로서 PECVD로 굴절률이 1.461이고 두께가 2.5 μm인 SiO_2를 증착한다. 여섯 번째 감지영역을 형상화하는 단계로서 감지영역용 마스크를 이용해 AZ 4620 포토레지스트를 사진제판한 후 RIE와 크롬 식각액으로 감지영역 상부의 클래딩 층과 크롬 식각방지 층을 각각 제거한다. 이 때 실리카 계열 물질인 클래딩과 코어 층 사이의 식각 선택성이 거의 없기 때문에 만약 크롬 식각방지 층이 없다면 감지영역 내 코어 층이 손상될 것이다.

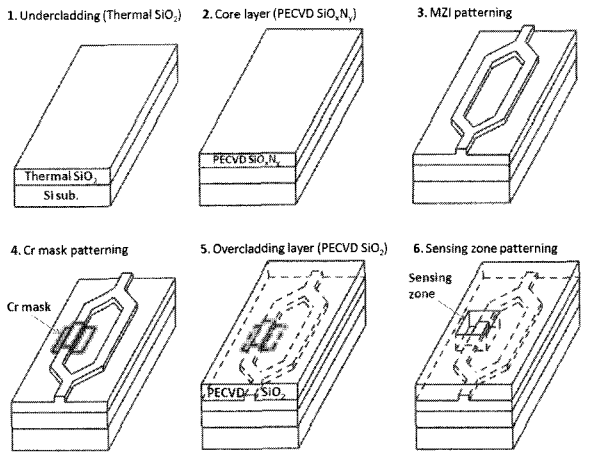
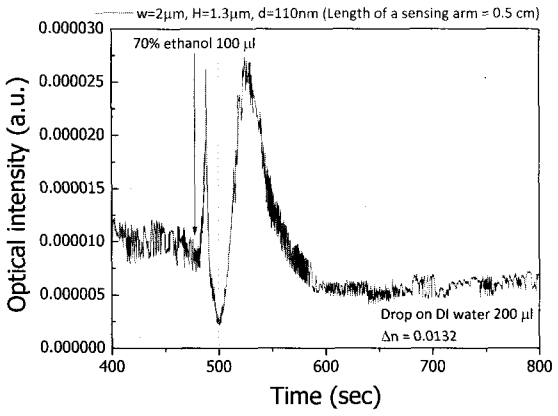


그림 5. 집적 마흐젠더 간섭계형 바이오센서의 공정 절차

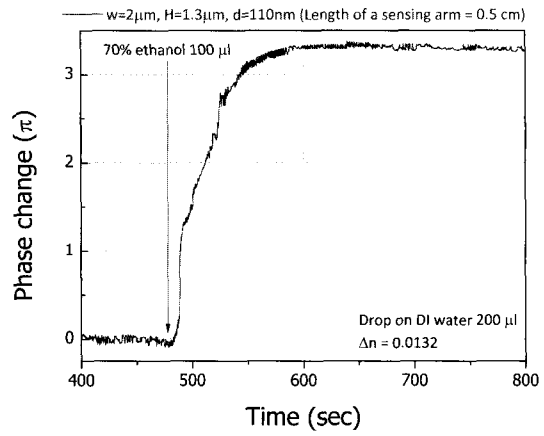
Fig. 5. Fabrication procedures of an integrated Mach-Zehnder interferometric biosensor.

III. 마흐젠더 간섭계 센서의 특성평가

마흐젠더 간섭계 센서의 특성평가를 위해 에탄올(70 % ethanol, C_2H_5OH)과 증류수(De-Ionized water, H_2O)를 혼합했을 때 일어나는 광강도(optical intensity) 변화를 실시간으로 측정하였다. 우선 아베굴절계(DR-M2, Atago사, 일본)로 순수한 증류수의 굴절률과 증류수와 에탄올을 2:1 비율로 혼합한 용액의 굴절률을 각각 측정하였다. 이를 통해 증류수와 에탄올을 2:1비율로 혼합하면 약 0.0132 굴절률이 증가됨을 확인하였다. 실시간 광측정 시스템을 구비하기 위해 제작된 마흐젠더 간섭계 소자 위에 PDMS 저장소(Poly DiMethyl Siloxane reservoir)를 붙이고 TM 편광된 632.8 nm He-Ne 레이저 광을 센서의 도파로에 입사할 수 있도록 정렬하였다. 그 다음 피펫을 이용하여 PDMS 저장소 안에 증류수 200 μl를 떨어뜨린 후 안정화되기 기다렸다가 에탄올 100 μl를 떨어뜨려 광강도가 변하는 것을 광 파워미터(1830C Newport사, 미국)와 GPIB USB(National Instrument사, 미국)케이블을 통해 실시간으로 측정하였다. 그림 6 (a)를 보면 알 수 있듯이 감지분기선과 참조분기선에서 나온 두 광이 보강간섭하면 광강도가 최고값이 되고, 상쇄간섭하면 최저값이 된다. 이렇게 측정된 광강도는 그림 6 (b)와 같이 약 3.269π 정도 위상천이량을 보였다. 이 위상천이량과 굴절률 증가량을 분석해보면 제작한 마흐젠더 간섭계 센서가 약 $\pi/(4.04\times10^{-3})$ 감도($\Delta\Phi/\Delta n_c$)를 보임을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 6. (a) 마흐젠더 간섭계 센서로 측정한 에탄올/증류수 혼합에 따른 광강도 변화
(b) 마흐젠더 간섭계 센서로 측정한 에탄올/증류수 혼합에 따른 위상변화

Fig. 6. (a) Measured optical intensity with an integrated Mach-Zehnder interferometric sensor due to ethanol/water mixture.
(b) Measured phase change with an integrated Mach-Zehnder interferometric sensor due to ethanol/water mixture.

IV. 결 론

이 논문에서 우리는 실리카 계열의 SiO_2, SiO_xN_y 박막을 이용해 마흐젠더 간섭계 센서를 설계 및 제작하였고 그 감도를 실험적으로 증명하였다. 이를 위한 선행연구로서 입사손실이 6.82 dB, 전파손실이 4.82 dB/cm 정도되는 단일모드 rib 도파로를 설계 및 제작하였다. 또한 크롬 식각방지 층 공정을 도입하여 마흐젠더 간섭계 센서 공정을 최적화하였다. 마지막으로 제작된 마흐젠더 간섭계 센서의 감도가 약 $\pi/(4.04\times10^{-3})$ 정도임을 증류수/에탄올 혼합액 굴절률 측정 실험을 통해 증명하였다.

이러한 마흐젠더 간섭계 센서를 이용한 액체 굴절률 탐지기술 확보는 향후 항원·항체 면역반응과 같은 흡착반응 탐지실험의 밑거름이 될 것이다. 또한 이에 사용된 센서용 rib 도파로는 PECVD로 성장되었기 때문에 그 기하학적 구조를 쉽게 변환할 수 있는 장점이 있다. 이를 통해 rib 도파로 구조를 최적화한다면 더 높은 감도의 마흐젠더 간섭계 센서를 개발할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] J. Pieher, A. Brandenburg, A. Brecht, E. Wagner and G. Gauglitz, "Characterization of grating couplers for affinity-based pesticide sensing,"

Appl. Optics, vol. 36, pp. 6554-6562, September 1997.

[2] A. Ymeti, J. Greve, P. V. Lambeck, T. Wink, S. W. F. M. van Hovell, T. A. M. Beumer, R. R. Wijn, R. G. Heideman, V. Subramaniam and J. S. Kanger, "Fast, ultrasensitive virus detection using a Young interferometer sensor," *Nano. Lett.*, vol. 7, no. 2, pp. 394-397, 2007.

[3] F. Prieto, B. Sepulveda, A. Calle, A. Llobera, C. Dominguez, A. Abad, A. Montaya and L. M. Lechuga, "An integrated optical interferometric nanodevice based on silicon technology for biosensor applications," *Nanotechnol.*, vol. 14, pp. 907-912, July 2003.

[4] K. Schmitt, B. Schirmer, C. Hoffmann, A. Brandenburg and P. Meyrueis, "Interferometric biosensor based on planar optical waveguide sensor chips for label-free detection of surface bound bioreactions," *Biosens. Bioelectron.*, vol 22, no. 11, pp. 2591-2597, May 2007.

[5] J. Homola, "Present and future of surface plasmon resonance biosensors," *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 377, no. 3, pp. 528-539, October 2003.

[6] W. Lukosz, "Principles and sensitivities of integrated optical and surface plasmon sensors for direct affinity sensing and immunosensing," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 6, no. 3, pp. 215-225, 1991.

[7] R. G. Heideman and P. V. Lambeck, "Remote opto-chemical sensing with extreme sensitivity: design, fabrication and performance of a pigtailed integrated optical phase-modulated Mach-Zehnder interferometer system," *Sens. Actuat. B*, vol. 61, no. 1-3, pp. 100-127, December 1999.

[8] M. Kawachi, "Recent progress in silica-based planar lightwave circuits on silicon," *IEE Proc. Optoelectron.*, vol. 143, no. 5, pp. 257-262, October 1996.

[9] Y. P. Li and C. H. Henry, "Silica-based optical integrated circuits," *IEE Proc. Optoelectron.*, vol. 143, no. 5, pp. 263-280, October 1996.

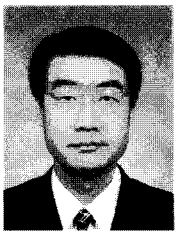
[10] S. J. Choo, B.-C. Lee, S.-M. Lee, J. H. Park and H.-J. Shin, "Optimization of silicon oxynitrides by plasma-enhanced chemical vapor deposition for an interferometric biosensor," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 19, no. 9, pp. 095007:1-9, September 2009.

[11] S. P. Pogossian, L. Vescan and A. Vonsovici, "The Single-Mode Condition for Semiconductor Rib Waveguides with Large Cross Section," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 10, pp. 1851-1853, October 1988.

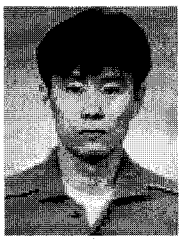
[12] F. Dell'Olio, V. M. N. Passaro and F. D. Leonardis, "Sensitivity Analytic Calculation of Rib Waveguides for Sensing Applications," *Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter*, pp. 201-204, Eindhoven, Netherlands, 2006.

저 자 소 개

추 성 중(학생회원)
2002년 인하대학교 전자공학과 학사 졸업.
2005년 고려대학교 전자공학과 석사 졸업.
2005년～현재 고려대학교 전자공학과 박사과정.
<주관심분야 : 나노바이오센서, 광소자>



박 정 호(평생회원)
1981년 고려대학교 전자공학과 학사 졸업.
1987년 University of Delaware 전자공학과 박사 졸업.
1990년～현재 고려대학교 전기전자전파공학부 교수.
<주관심분야 : 광소자, 전자소자>



신 현 준(정회원)
1995년 KAIST 물리학과 석사 졸업.
2000년 KAIST 물리학과 박사 졸업.
2002년～현재 KIST 책임연구원.
<주관심분야 : 나노포토닉스, 나노바이오센서>