Humidity Sensor using Polyvinylpyrrolidone-Coated Mach-Zehnder Interferometer in Planar Lightwave Circuit

Ju Ha Kim^{1,2}, Myoung Jin Kim¹, Eun Joo Jung¹, Sung Hwan Hwang¹, Woo Jin Lee¹, Eun Seo Choi²,
and Byung Sup Rho^{1†}

¹Nano-Photonics Research Center, Korea Photonics Technology Institute, 971-35 Wolchul-dong, Buk-gu, Gwangju 500-460, Korea

²Department of Physics, College of Natural Science, Chosun University, 309, Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 501-759, Korea

(Received July 10, 2013; Revised manuscript August 22, 2013; Accepted August 22 2013)

In this paper, the characteristics of a humidity sensor implemented by Mach Zehnder Interferometer (MZI) in a Planar Lightwave Circuit (PLC) have been designed and demonstrated. The humidity outside is detected with polyvinylpyrrolidone (PVP) coated on the etched arm of the MZI. The length of the etched arm is 10 mm and the PVP was coated by dip-coating into the etched region. As the refractive index of the PVP changes with the surrounding humidity, the PVP-coated humidity sensor presented changes in the interferogram depending on RH (Relative Humidity) around the PLC. The measured results show that the proposed humidity sensor works successfully in the range of 30% to 80% of RH.

Keywords: Polyvinylpyrrolidone(PVP), Planar Lightwave Circuit(PLC), Humidity sensor, Mach-Zehnder Interferometer(MZI)

OCIS codes: (060.2370) Fiber optics sensors; (280.4788) Optical sensing and sensors; (230.7390) Waveguides, Planar

폴리비닐피롤리돈이 코팅된 마하젠더 간섭계 기반의 평판형 광도파로 습도센서

김주하^{1,2} · 김명진¹ · 정은주¹ · 황성환¹ · 이우진¹ · 최은서² · 노병섭^{1†}

¹한국광기술원 나노광전연구센터

☎ 500-460 광주광역시 북구 월출동 971-35

²조선대학교 자연과학대학 물리학과

☎ 501-759 광주광역시 동구 필문대로 309 조선대학교

(2013년 7월 10일 받음, 2013년 8월 22일 수정본 받음, 2013년 8월 22일 게재 확정)

본 논문에서는 평판형 광도파로 상에 마하젠더 간섭계를 형성한 습도센서의 특성을 제시하고자 한다. 평판형 광도파로의 마하젠더 간섭계의 한쪽 팔에 PVP를 코팅함으로써 센서 주변의 외부 습도를 측정하였다. 습도를 계측할 간섭계의 한쪽 팔은 10 mm 폭으로 에칭하고, 에칭된 곳에 폴리비닐피롤리돈 (PVP)를 코팅하였다. PVP는 습도변화에 의해서 굴절률의 변화가 일어나므로, PVP로 코팅된 습도 센서는 평판형 광도파로 근처 상대습도의 차이에 따라 광간섭무늬의 변화를 나타내었다. 이에 대한 측정 결과를 통해 30%~80% 상대습도 범위에서 습도센서로써 작동함을 확인할 수 있었다.

Keywords: 폴리비닐피롤리돈, 평판형 광도파로, 습도센서, 마하젠더 간섭계

OCIS codes: (060.2370) Fiber optics sensors; (280.4788) Optical sensing and sensors; (230.7390) Waveguides, Planar

I. 서 론

다양한 자연환경 요소 중에서 습도의 변화를 관측하고 이를 피드백하여 활용하는 분야는 매우 다양화되고 있다. 최근 들어 음식물의 가공처리 조건 최적화를 위한 습도의 조절, 화학 공정에서 습도에 의한 혼합물의 순도 변화의 감지는 매

우 중요한 계측 분야이다. 또한, 건축물의 기초 공사 시 습도 조건에 따른 내구성의 변화요인을 분석하고, 농작물 재배에서 습도 변화에 따른 작물의 성장 차이 등을 연구하는 데 있어서도 습도 계측의 중요성은 날로 증가되고 있다. 이러한 습도 계측의 응용분야 확산에 따라서 응용 분야별로 상대습

[†]E-mail: kalparho@hanmail.net

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

도의 정확한 모니터링이 요구되고 있다. 응용 분야별 습도를 계측하기 위해서는 여러 요소들 중에서 습도 변화에 대한 응답성, 반응 감도, 선형성 등이 가장 중요한 특성으로 언급되고 있으며, 이러한 특성을 향상시키기 위해서 지속적으로 연구가 수행되고 있다.

전기적 신호를 이용한 전자식 습도센서와는 달리 광기반 습도센서는 전자기적 간섭에 강하고, 소형이며 높은 감도와 원거리 측정 그리고 다채널화 등의 장점을 가질 뿐만 아니라 낮은 삽입 손실 그리고 높은 기계적인 신뢰성 등의 장점을 가지고 있어, 다양한 계측 분야에서 전자식 습도센서의 대안으로 제시되고 있다. 이러한 광기반 습도센서의 연구는 주로 광섬유의 형태나 센싱 구조 등을 변화시켜 습도센서의 특성을 향상시키는데 집중되어 있었다.^[1-10] 그러나, 광섬유로 제작된 습도센서는 보통 2차 코팅이 이루어지지 않아 취급상의 불편함과 외부 충격에 약한 단점이 있고, 2차 코팅을 수행할 경우 개발 공정이 추가적으로 필요한 문제점을 가지게 된다. 또한 개별적인 센서를 하나의 광섬유에 각각 만들어야 하기 때문에, 대량으로 생산하는데 적합하지 않은 방법이다.

이에 비해서 평판형 광도파로(planar lightwave circuit, PLC) 기반 광센서는 잘 정립된 반도체 공정으로 제조되므로, 대량생산이 가능하고 취급하기 쉬운 장점을 가진다. 또한, PLC 센서 헤드 부분(광도파로 코어)이 외부에 직접 노출되기 때문에 높은 측정 감도를 가질 수 있다. 다만, PLC 식각에 의해 노출된 조건에 따라 광도파로 손실이 크게 발생할 수 있기 때문에, 이에 따른 손실을 최소화하기 위해 식각 조건을 최적으로 설계하여야 한다.

본 논문에서는 PLC 상에 코팅된 폴리비닐피롤리돈(polyvinylpyrrolidone, PVP) 기반 간섭계를 이용한 습도센서로 센서 주위의 상대습도를 측정하는 방법을 제시하고자 한다. 습도센서로 사용하기 위해서 PLC에 마하젠더 간섭계를 형성하고 이 간섭계의 한쪽 팔에 에칭 공정을 통해 식각을 수행하였다. 그리고 나서, PVP를 사용하여 식각된 부분에 코팅하였다. PVP 코팅막을 저습환경에서 경화하여 습도센서를 제작하였으며, 제작된 센서를 항온 항습기 내부에 고정한 후, 상대습도 변화에 따른 투과 광스펙트럼 변화를 측정 및 분석하였다.

II. PVP-coated PLC 센서의 제작

습도를 측정하는 방법은 물 분자나 수증기가 가지고 있는 고유한 물리적인 특성을 계측하는 방법과 흡습성 물질에 물

FIG. 1. Chemical structure of PVP(N-vinyl-2-pyrrolidone polymer).

분자가 흡착되어 나타나는 물리적, 화학적 성질 변화를 측정하는 방법이 있다. 본 논문에서는 물분자 흡착을 이용하기 위해서 흡습성 물질인 PVP를 이용하였다. 그림 1은 PVP 분자 구조를 보여준다. PVP는 N-비닐-2-피롤리돈으로 구성된 흡습성을 가진 수용성 중합체(폴리머)로써 상온에서의 굴절률이 1.42 정도이며, 대기 중 물분자를 흡수하여 팽윤(swell) 현상으로 굴절률의 변화가 일어난다.

그림 2는 PLC 상에 만들어진 마하젠더 간섭계의 개략도, 수직 단면도 및 제작된 PLC 모듈 사진이다. 광도파로의 코어 크기는 $6\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$ 이며, 클래드와의 굴절률 차이는 0.75%, 간섭계의 물리적 경로차는 $100\ \mu\text{m}$ 가 되도록 간섭계를 설계하였다. 오버클래드 두께는 센싱부 식각 공정의 정확도를 위해 $20\ \mu\text{m}$ 로 증착하였다. 그림 2(b)에서 보듯이, 제작된 PLC 기반 센서의 단면은 한쪽 팔의 코어가 드러날 정도로 오버클래드가 식각된 구조로써, 식각된 깊이는 클래드의 두께인 $20\ \mu\text{m}$ 정도이며, 식각폭은 $200\ \mu\text{m}$ 정도이다. 여기서, 식각에 의한 코어 손상 또는 광전송 손실을 최소화하여 식각 깊이는 오버클래드 두께와 동일한 $20\ \mu\text{m}$ 정도를 유지하였다. 습도센서의 기반인 PLC는 6인치 웨이퍼를 이용하여 반도체 공정을 통해 제작되었으며, 한번의 공정으로 최대 50개 이상의 PLC 제작이 가능하였다. PLC의 식각 부분에 센서막인 PVP 코팅막을 형성하기 위해 이소프로필 알코올을 솔벤트로 사용하여 PVP를 솔루션 상태로 만든 후, 광도파로

FIG. 2. (a) Schematics of MZI on PLC, (b) cross-section of PLC sensor module, and (c) photograph of fabricated PLC sensor module.

의 식각된 부분에 소량 코팅하였으며, 남아있는 솔벤트를 제거하기 위한 경화 과정을 거쳐 습도센서를 제작하였다. 경화가 완료된 후, PVP 코팅막의 두께는 표면 조도 측정을 통해 $1\ \mu\text{m}$ 정도로 측정되었다. 이렇게 제작된 습도센서는 주위의 습도에 따라 PVP 센서막의 광학적 특성 변화를 야기시킨다. 간섭계 형태로 구현된 습도센서는 PVP가 코팅된 한쪽 팔이 습도의 변화에 민감하게 반응하여 광손실 및 굴절률 변화를 나타내고, 이로 인해 두 팔을 지나 중첩되는 광간섭 무늬의 변화를 유도하게 된다. 그림 2(c)는 제작된 PLC 기반 습도센서 모듈의 사진이다.

III. PVP-coated PLC 센서를 이용한 상대 습도 측정

제작된 센서모듈을 항온항습기 안에 고정하고, 상대습도를 변화시키면서 투과 광스펙트럼 변화를 측정하였다. 실험에서 사용된 광원의 중심파장은 $1550\ \text{nm}$ 이고, 광원의 선폭은 $150\ \text{nm}$ 이고, 중심 파장에서의 출력은 $-30\ \text{dBm}$ 정도이다. 광스펙트럼 분석기를 이용하여 광원에서 출사된 빛이 가습 분위기를 거쳐 간섭계의 출력단에서의 스펙트럼 변화를 측정하였다.

그림 3은 PVP코팅을 각각 다른 환경에서 경화시킨 후, 상

대습도 환경에 따른 스펙트럼을 측정한 결과이다. 그림 3(a)는 실내 자연경화 조건에서 제작된 센서를 습도 변화에 노출하여 측정한 스펙트럼 결과이고, 그림 3(b)은 상대습도 20%, 온도 30°C 로 유지된 항온항습 조건 하에서 경화시킨 센서를 습도 변화에 노출시킨 실험 결과이다. 실험에서는 두 센서 모두 온도는 동일하게 고정시킨 후, 상대습도를 20%부터 70%, 20%부터 80%까지 10%간격으로 변화시키면서 간섭무늬 변화를 측정하였다. 그림 3(a)와는 달리 그림 3(b)에서 보듯이 상대습도 변화에 따라 간섭무늬의 변화를 관찰할 수 있었다. 이것은 PVP가 코팅된 습도센서 모듈은 온도와 습도 변화가 발생하는 자연경화 조건보다 항온항습 환경에서 PVP를 경화시킨 조건에서, 습도에 더 민감하게 반응함을 확인한 결과이다. 이는 자연경화된 조건에서는 PVP가 이미 공기 중에 포함된 수증기와 충분히 반응하였기 때문에 습도 변화에 따라서 민감성이 감소한 결과를 보이는 것으로 판단된다. 이 결과를 통해서 PVP의 경화조건이 센서 제작에 있어서 매우 중요한 요소임을 확인할 수 있었다.

그림 4(a)와 (b)는 각각 20%부터 80%사이의 상대습도 변화와 80%에서 90%까지 상대습도 변화에 따른 스펙트럼 변

(a)

(b)

FIG. 3. Spectra of the PVP-Coated PLC sensor with curing conditions. (a) under natural curing and (b) under curing of RH 20% and 30°C .

(a)

(b)

FIG. 4. Spectra of the PVP-Coated PLC sensor under relative humidity conditions. (a) from RH 20% to 80% and (b) from RH 80% to 90%.

화를 보여준다. 상대습도 변화에 따라 각 파장영역에서 간섭 무늬의 변화를 관찰할 수 있었다. 이것은 습도 변화에 따라 PVP의 굴절률이 바뀌고, 굴절률의 변화로 인해 광경로의 변화가 유도되어, 간섭계의 위상차가 및 간섭무늬의 변화가 발생하는 것으로 이해할 수 있다. 이 결과를 통하여 제안된 PLC 기반 광센서가 습도 측정에 적절하게 이용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 제안된 센서를 통해 80% 상대습도 범위까지는 간섭무늬 변화를 측정함으로써 상대습도를 계측할 수 있었다. 그림 4(b)에서는 간섭무늬의 급격한 변화가 관측되었는데 이는 80%가 넘는 상대 습도에 이르러서는 PVP가 높은 습도에 의해서 용해되기 시작하여 굴절률 변화가 증가하지 않고 감소하게 되어 원래의 간섭무늬 형태로 돌아가기 시작하면서 나타난 것으로 판단된다. 이를 해결하기 위해서는 높은 상대습도에서도 용해되는 것을 방지할 수 있는 PVP와 잘 반응하는 다른 폴리머 재료를 함께 사용하는 방법이 있다. 다만, 다른 폴리머 재료와 함께 사용하는 경우에 습도에 대한 반응성이 낮아질 것으로 예상됨에 따라 추가적 실험을 통해 최적의 비율을 선정해야 할 것이다.

습도센서로 이용하는데 있어서 파장 특성의 변화를 측정하는 것도 유용하지만 간단히 광세기만을 측정함으로써 상대습도를 계측할 수 있다면 습도센서로서의 활용도가 크게 향상될 것으로 기대된다. 그림 5는 20%부터 80%사이의 상대습도에 따라 측정된 광세기값을 보여주고 있다. 앞서 언급한 대로 PVP는 높은 상대습도 환경(약 80% 이상)에서는 공기 중의 수분에 의해 용해되어 습도 변화의 계측이 어려우나, 이 값보다 낮은 상대습도 환경에서는 제안된 센서가 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 그림 5에서 볼 때, 제안된 센서는 상대습도 30%부터 80% 구간에서는 광세기가 선형에 가깝게 변화되는 것을 알 수 있다. 특히 30% 이하 습도 구간에서는 광세기 변화가 매우 급격하게 일어나므로 광세기 측정만으로도 매우 높은 분해능으로 상대습도 변화의 측정이 가능할 것으로 판단된다. 다시 말해, 본 실험에서 구현된 PVP를 이용한 PLC 기반 습도센서는 80% RH 구간 안에서

습도를 계측하는데 더 효과적이며, PVP이외에 다른 흡습성 폴리머를 함께 사용한다면 습도에 대한 센서 특성을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결 론

흡습성을 가지는 PVP를 습도 감지물질로써 사용하여 PLC 상에 형성된 마하젠더 간섭계의 한쪽 팔에 PVP 코팅을 하여 습도의 변화에 민감한 습도센서를 제작하였다. PVP의 상대습도에 따른 굴절률 변화에 의해서 간섭계로 구현된 센서의 투과 스펙트럼이 변화를 나타내었고, 이 결과를 통해서 습도 변화 정도를 계측할 수 있었다.

본 실험에서는 PVP 단일 물질만을 코팅하여 사용하였지만, 다른 습도 민감성 물질과 혼합하여 사용하게 된다면 실험결과에서 제시된 단점들을 극복할 수 있을 것으로 예상되며 보다 넓은 범위에 걸쳐 주변 습도상태를 민감하게 감지할 것으로 기대된다.

PLC 기반 습도센서는 기존 광섬유 기반 습도센서에 비해 대량 생산이 가능하여 저가의 습도센서를 구현할 수 있는 장점을 가지며, 취급상의 안전성과 편리함의 장점을 가질 수 있다. 또한 높은 감도 특성을 가질 수 있으므로 습도 모니터링이 필요한 다양한 응용분야에서 활용도가 클 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 산업통상자원부에서 시행한 광역경제권 선도산업 육성사업의 일부 지원으로 수행되었습니다.

References

1. K. R. Sohn, K. T. Kim, and J. W. Song, "Optical fiber sensor for water detection using a side-polished fiber coupler with a planar glass overlay-waveguide," *Sens. Actuators A: Physical* **101**, 137-142 (2002).
2. J. M. Corres, F. J. Arregui, and I. R. Matias, "Design of humidity sensors based on tapered optical fibers," *J. Lightwave Technol.* **24**, 4329-4336 (2006).
3. Q. Wu, Y. Semenova, J. Mathew, P. Wang, and G. Farrell, "Humidity sensor based on a single-mode hetero-core fiber structure," *Opt. Lett.* **36**, 1754-1754 (2011).
4. S. Muto, O. Suzuki, T. Amano, and M. Morisawa, "A plastic optical fiber sensor for real-time humidity monitoring," *Meas. Sci. Technol.* **14**, 746-750 (2003).
5. P. Kronenberg, P. K. Rastogi, P. Giaccari, and H. G. Limberger, "Relative humidity sensor with optical fiber Bragg grating," *Opt. Lett.* **27**, 1385-1387 (2002).
6. T. L. Yeo, T. Suna, K. T. V. Grattan, D. Parry, R. Lade, and B. D. Powell, "Characterization of a polymer-coated fiber Bragg grating sensor for relative humidity sensing," *Sens. Actuators B: Chemical* **110**, 148-155 (2005).

FIG. 5. Normalized output power variations depending on relative humidity.

7. H. Wang, H. Guo, G. Xiao, N. Mrad, A. Kazemi, and D. Ban, "Phase-shifted fiber-Bragg- grating- based humidity sensor," Proc. Photonic Applications for Aerospace, Commercial, and Harsh Environments IV 8720, 872019 (2013).
8. M. Konstantaki, S. Pissadakis, S. Pispas, N. Madanopoulos, and N. A. Vainos, "Optical fiber long- period grating humidity sensor with poly(ethylene oxide)/cobalt chloride coating," Appl. Opt. **45**, 4567-4571 (2006).
9. L. M. Hu, C. C. Chan, X. Y. Dong, Y. P. Wang, P. Zu, W. C. Wong, W. W. Qian, and T. Li, "Photonic crystal fiber strain sensor based on modified Mach-Zehnder interferometer," IEEE Photon. J. **4**, 114-118 (2012).
10. T. Li, X. Dong, C. C. Chan, K. Ni, S. Zhang, and P. P. Shum, "Humidity sensor with a PVA-coated photonic crystal fiber interferometer," IEEE Sensors J. **13**, 2214-2216 (2013).