

폴리이미드가 코팅된 측면 연마 광섬유를 이용한 습도 센서

김광택^{1,+} · 양재창¹

Polyimide Film-coated Side-polished Optical Fiber Humidity Sensor

Kwang Taek Kim^{1,+} and Jae Chang Yang¹

Abstract

We investigated a humidity sensor based on a polyimide-coated side-polished optical fiber. The polyimide film absorbed moisture, causing the resonant wavelength of the sensor to shift to a longer wavelength owing to the changes in the optical properties of the film. The experimental results showed that the resonant wavelength of the device shifted by 17–18 nm when relative humidity changed from 30% to 90%.

Keywords: Humidity sensor, Side-polished optical fiber, Polyimide film

1. 서 론

상대 습도[relative humidity] 센서는 기상관측, 의료, 자동화, 음식가공, 반도체공정, 건설 등 생활과 산업에 걸쳐 다양한 분야에 적용되고 있다. 광섬유 센서는 높은 감도에 의한 정밀측정, 원거리 측정, 다중 분포 측정, 및 전자파 무간섭 특성으로 인하여 그 응용이 매우 다양하다. 광섬유를 이용한 습도 재료로 무기물로는 TiO₂, SiO₂, ZnO 등이 있고, 고분자로는 폴리이미드(Polyimide), PMMA, Gelatin, PVA 등이 알려져 있다[1]. 습도 센서의 구현 기법으로 광섬유 격자형[2], 장주기 격자형[3], 간섭형[4] 등이 보고된 바 있다. 측면 연마 광섬유를 이용한 센서는 구조가 간단하고 측면 연마된 표면 위에 다양한 센서 물질을 코팅하여 센서 구현이 가능하여 주목받아 왔다. 측면 연마 광섬유를 이용하여 온도센서[5], 용액의 굴절률 센서[6], 가스 센서[7] 등 여러 응용이 보고 되어 왔다.

본 논문에서는 측면 연마된 광섬유 위에 습기를 흡수하면 광학적 특성이 변하는 폴리이미드를 코팅하여 습도 센서로 활용하기 위한 연구를 수행하였다. 폴리이미드(polyimide)는 습기를 흡수하면 부피가 팽창한다. 이러한 특성을 이용하여 광섬유 격자를 이용한 습도센서가 제시된 연구 결과가 알려져 있다[8]. 본

논문에서 제안한 습도 센서는 폴리이미드 막의 부피 팽창 및 굴절률 변화 모두 센서의 특성에 관련된다.

본 논문에서는 상용화 되어 시판되고 있는 폴리이미드 막을 측면 연마된 단일 모드 광섬유에 투명 접착제로 붙이는 방법으로 소자를 간단하게 구현할 수 있었다. 소자의 습도 감지 특성과 온도 특성을 분석하고 응용가능성을 제시하고자 한다.

2. 습도 센서 구조 및 원리

제안된 센서 구조를 Fig. 1과 같이 광섬유의 한쪽 클래딩을 연마로 제거하며 연마된 표면 위에 폴리이미드필름을 코팅한 소자 구조이다. 폴리이미드 필름은 평판도파로 역할을 한다. 제안된 소자는 비대칭적 광결합기 역할을 하며 광섬유 모드와 평판도파로모드의 위상 정합 조건을 만족하는 조건에서 공진이 발생한다. 공진이 발생하는 파장, 즉 공진파장에서는 광에너지가 평판도파로 방향으로 누설된다. 측면 연마된 광섬유의 표면 위에 놓은 물질의 굴절률과 두께에 따라 다음과 같이 센서 소자의 공진 파장(λ_m)이 결정된다[9].

$$\lambda_m = \frac{2\pi d(n_o^2 - n_{ef}^2)^{1/2}}{m\pi + \phi_1 + \phi_2} \quad (1)$$

$$\phi_i (i = \text{lor } 2) = \tan^{-1} \zeta \frac{(n_{em}^2 - n_i^2)^{1/2}}{(n_o^2 - n_{em}^2)^{1/2}} \quad (2)$$

여기서 d는 폴리이미드 두께, n_o는 폴리이미드 굴절률, n_{ef}와 n_{em} 광섬유 모드의 유효굴절과 평판도파로의 m차 모드의 유효 굴절률을 나타낸다. 위상 정합 조건이란, n_{ef} = n_{em}이다

¹ 호남대학교 전자공학과 (Electronic Engineering, Honam University) 112, Honamdae-gil, Gwangsan-gu, Gwangju 62399, Republic of Korea

⁺Corresponding author: ktkim@honam.ac.kr

(Received: Nov. 11, 2022, Revised: Jan. 13, 2023, Accepted: Jan. 26, 2023)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

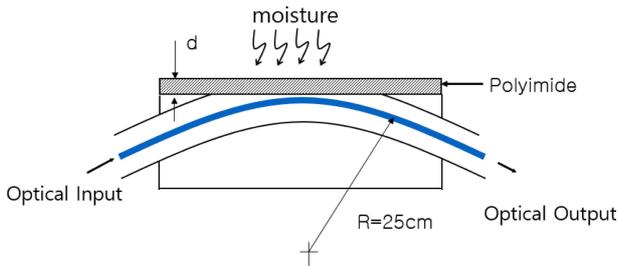


Fig. 1. Proposed humidity sensor structure using side-polished optical fiber coated with a polyimide film.

폴리이미드 필름의 두께와 굴절률이 외부 상대 습도에 민감하게 변하며 습도가 높아지면 두께(d)의 증가로 공진파장이 장파장으로 이동이 예상된다. 또한 굴절률이 증가하면 장파장으로 이동한다.

3. 소자 제작 및 특성 평가

길이 28 mm, 폭, 10 mm, 높이, 5 mm 퀴츠 블록에 홈을 형성하여 단일모드 광섬유를 홈속에 넣고 자외선 에폭시로 고정하고 광섬유 클래딩을 연마로 제거한다. 적절한 연마 정도는 연마된 표면에 정합액을 올렸을 때 발생하는 손실이 1550 nm 파장에서 10dB 정도가 되도록 연마 과정을 셋팅 하였다. 연마된 표면에 상용화된 두께 30 μm 폴리이미드 필름을 순간접착제로 붙인다. 폴리이미드의 굴절률은 1550 nm 파장에서 1.6정도 되며 광섬유 코어 굴절률(1.45) 보다 높다. 제작된 센서 사진은 Fig. 2와 같다.

소자의 특성은 항온항습기에 소자를 넣고 광원을 소자에 연결하고 습도를 바꾸어 가면서 출력광의 스펙트럼을 광스펙트럼 분석기로 측정하였다. 측정장치도는 Fig. 3에 제시되어 있다. 광원으로 SLED광대역 광원을 이용하였고 센서가 편광기(polarizer)

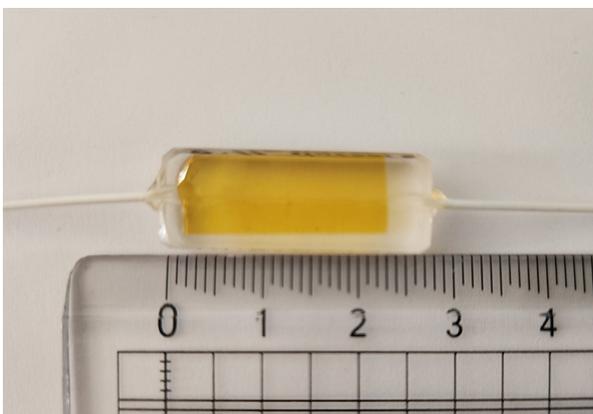


Fig. 2. Picture of fabricated humidity sensor using side-polished optical fiber coated with polyimide film.

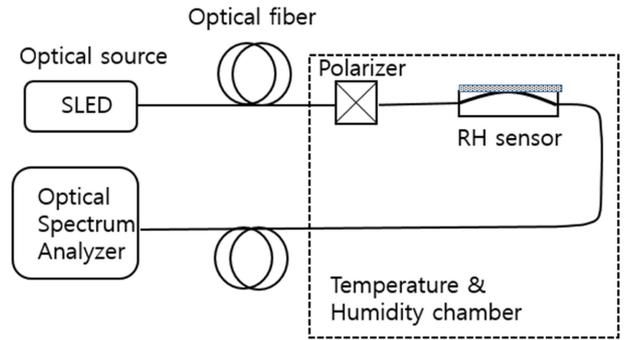


Fig. 3. Experimental set-up for humidity sensor.

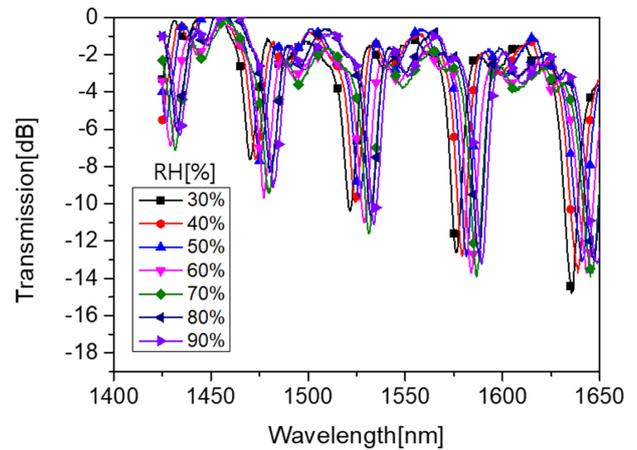


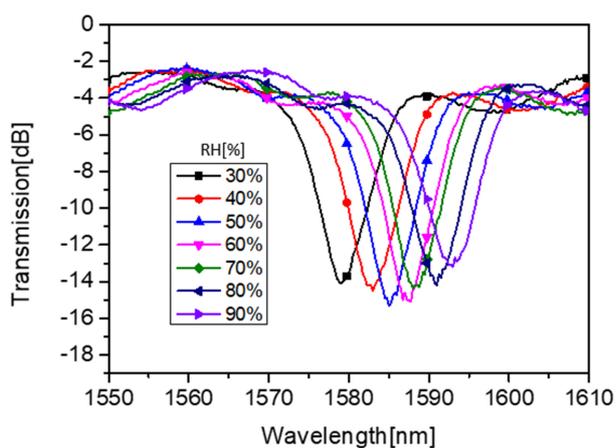
Fig. 4. Transmission spectrum of sensor in accordance with wavelength from 1400 nm to 1650 nm. Here RH implies relative humidity.

를 통해 입력 편광은 TM 편광으로 셋팅 하였다.

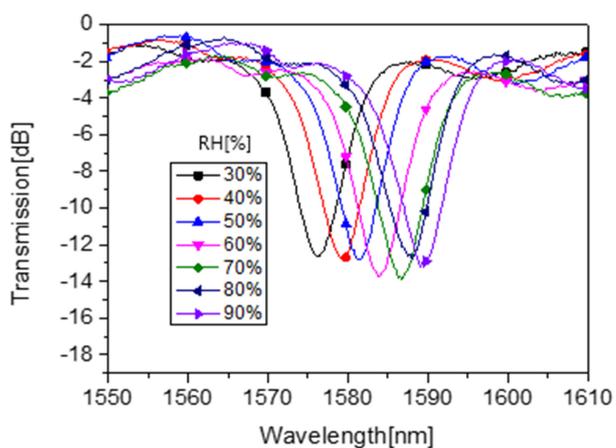
Fig. 4은 온도 40°C에서 광스펙트럼 분석기의 파장 범위를 1400 nm에서 1650 nm 까지 넓은 범위에서 투과 스펙트럼을 보여주고 있다. 파장이 변하면서 평판도파로의 모드 차수에 따라 주기적인 공진 파장 나타난다. 이는 폴리이미드가 두꺼워서 다중모드 구조이기 때문에 여러 모드와 공진이 발생하기 때문이다.

아래 Fig. 5는 항온 항습기 챔버내에서 온도 30°C, 40°C, 50°C로 고정하고 습도를 30%에서 90%까지 10% 간격으로 변화시키면서 좀더 파장 범위를 좁혀 정밀한 투과 스펙트럼의 변화를 관측한 결과이다.

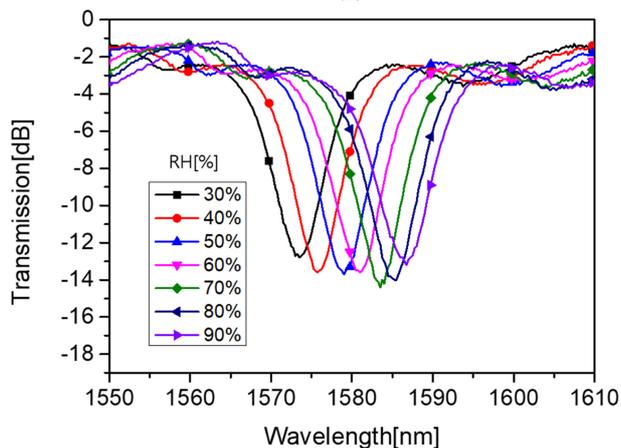
Fig. 6은 Fig. 5에 나타난 스펙트럼의 공진파장(Resoance wavelength) 즉 Transmission 값이 가장 낮은 값을 가지는 파장의 습도에 따른 변화를 보여 주고 있다. 습도가 올라가면 두께는 증가할 것으로 예상되며 굴절률 변화는 정확히 예측하기 어려운 측면이 있다. 또한 온도가 올라가면 같은 습도에서는 공진 파장이 단파장으로 이동함을 알 수 있다. 이는 항온 항습기내 온도가 올라 가면 폴리이미드 두께가 증가함에도 불구하고 굴절률이 감소하는 효과에 의해 단파장으로 이동하는 것으로 판단된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Measured transmission spectrum in accordance with relative humidity(RH) under three different temperature (a) 30°C, (b)40°C, (c)50°C.

Fig. 6을 통해 알 수 있듯이 상대습도 30%~90%사이에서 센서가 17~18nm 파장의 변화를 볼 수 있다. 감도는 약 0.3 nm/RH[%]나타 났다. 실험장비의 한계로 실제 20% 이하와 90% 이상의 습도에서 측정을 못하였지만 본 논문에서 측정한 범위 이상으로 매우 넓은 측정 범위를 가진 것으로 기대된다. 제안된

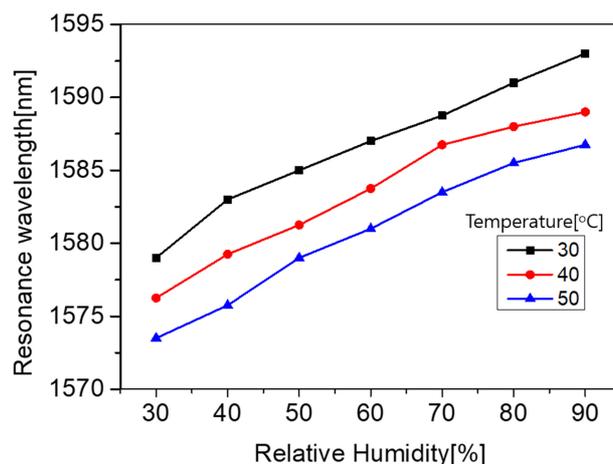


Fig. 6. Resonant wavelength of the sensor Vs. RH[%].

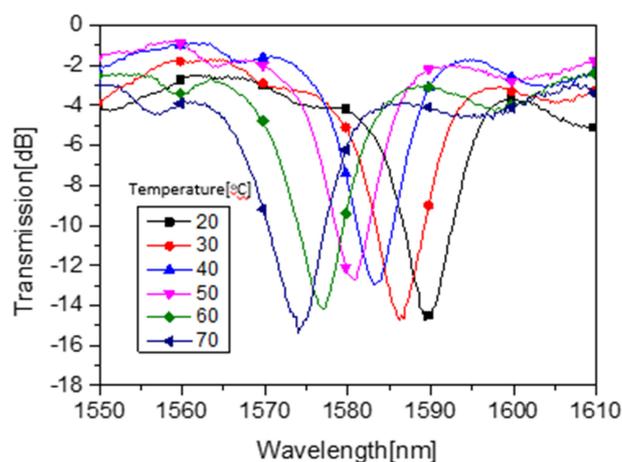


Fig. 7. Measured transmission spectrum of the sensor in accordance with environmental temperature of sensor under 60[RH%].

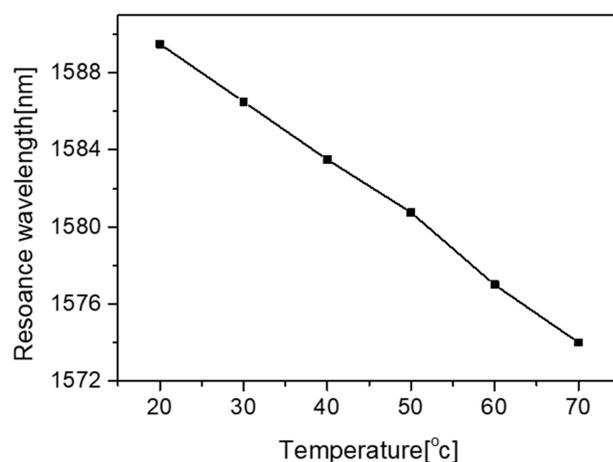


Fig. 8. The change of resonance wavelength in accordance with environmental temperature of sensor under 60[RH%].

센서는 온도에도 반응하기 때문에 온도 보상이 필요할 것으로 예상된다. Fig. 7과 Fig. 8는 상대 습도 60% 고정하고 온도를

가변 시켜 투과 스펙트럼과 공진파장의 변화를 보여 주고 있다.

온도에 따라 거의 선형적으로 공진 파장이 단파장으로 이동하며 단위 온도당 공진 파장의 변화는 $0.32 \text{ nm}^{\circ}\text{C}$ 로 측정 되었다. 즉 온도가 올라가면 폴리이미드는 부피가 팽창하여 박 두께가 증가하며 굴절률은 감소한다. 즉 두께만의 영향을 고려하면 장파장으로 이동해야하나 굴절률이 감소하는 효과가 더 크게 작용하여 온도 증가에 따라 공진파장이 단파장으로 이동하였다. 제안된 센서는 상호 보상을 통해 습도 센서 혹은 온도 센서 모드 사용가능 할 것으로 생각된다. 제안된 센서에서 폴리이미드 위에 습기가 침투 할 수 없도록 코팅하면 온도만의 영향을 받아 온도 센서로 활용할 수 있다. 온도 센서와 제안된 습도 센서를 동시에 이용하면 온도 보상이 가능할 수 있을 것으로 사료된다.

한편 소자의 응답속도는 센서 주위에 습도를 순식간에 변화시킬 수 있는 장치가 없어 정확하게 측정할 수 없었으나, 본 연구에서는 스프레이로 센서 주위로 물을 분사하여 주위 습도를 빠르게 변화시켜 센서의 반응을 측정한 결과 수 초내로 반응이 완료됨을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 측면 연마된 광섬유위에 폴리이미드를 코팅한 습도 센서를 제안하였다. 상대 습도 30%-90%에서 습도 측정이 가능함을 실험으로 확인하였다. 소자의 공진 파장의 습도에 대한 감도는 약 0.30 nm 로 측정되었고 온도에 대한 감도는 0.32 nm 로 나타났다. 매우 넓은 측정 범위와 높은 감도를 가져 습도 센서 응용이 가능할 것으로 기대된다. 제안된 광섬유형 습도센서는 우수한 내화학특성이 있어 높은 습도 환경이나 염분이 많은 환경에서 높은 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

[1] T. L. Yeo, T. Sun, and K. T. V. Grattan, "Fibre-optic sensor technologies for humidity and moisture measurement", *Sens. Actuators A: Phys.*, Vol. 144, No. 2, pp. 280-295, 2008.

[2] T. L. Yeo, T. Sun, K. T. V. Grattan, D. Parry, R. Lade, and B. D. Powell, "Characterisation of a polymer-coated fibre Bragg grating sensor for relative humidity sensing", *Sens. Actuators B: Chem.*, Vol. 110, No. 1, pp. 148-156, 2005.

[3] K. M. Tan, C. M. Tay, S. C. Tjin, C. C. Chan, and H. Rahardjo, "High relative humidity measurements using gelatin coated long-period grating sensors", *Sens. Actuators B: Chem.*, Vol. 110, No. 2, pp. 335-341, 2005.

[4] F. J. Arregui, Y. Liu, I. R. Matias, and R. O. Claus, "Optical fiber humidity sensor using a nano Fabry-Perot cavity formed by the ionic self-assembly method", *Sens. Actuators B: Chem.*, Vol. 59, No. 1, pp. 54-59, 1999.

[5] W. G. Jung, S. W. Kim, K. T. Kim, E. S. Kim, and S. W. Kang, "High-sensitivity temperature sensor using a side-polished single-mode fiber covered with the polymer planar waveguide", *IEEE Photonics Tech. Lett.*, Vol. 13, No. 11, pp. 1209-1211, 2001.

[6] K. T. Kim, K. Y. Lee, S. Hwangbo, and K. R. Sohn, "A refractometer based on fiber-to-liquid planar waveguide coupler", *Sens. Actuators: A. Phys.*, Vol. 126, No. 2, pp.335-339, 2006.

[7] K. T. Kim, H. S. Song, J. P. Mah, K. B. Hong, K. Im, S. J. Baik, and Y. I. Yoon, "Hydrogen Sensors based on palladium coated side-polished single mode fiber", *IEEE Sens. J.*, Vol. 7, No.12, pp. 1767-1771, 2007.

[8] J. Zhang, X. Shen, M. Qian, Z. Xiang, and X. Hu, "An optical fiber sensor based on polyimide coated fiber Bragg grating for measurement of relative humidity", *Opt. Fiber Technol.*, Vol. 61, pp. 102406(1)-102406(8), 2021.

[9] W. Johnstone, G. Fawcett, and L. W. K. Yim, "Inline fiber-optic refractometry using index-sensitive resonance positions in single-mode fibre-to-planar-polymer-waveguide couplers", *IEE Proc.-Optoelectron.*, Vol. 141, No. 5, pp. 299-302, 1994.