

## 식각된 열확산 코어 광섬유를 이용한 고감도 온도 센서

김광택<sup>†</sup> · 송현석 · 신은수 · 홍기범

### Highly sensitive temperature sensor based on etched fiber with thermally expanded core

Kwang Taek Kim<sup>†</sup>, Hyun Suk Song, Eun Soo Shin, and Ki Bum Hong

#### Abstract

We have demonstrated a highly sensitive temperature sensor using an etched single mode fiber with a thermally expanded core region. Large core size of thermally expanded core facilitates access to evanescent wave by the wet etching. The etched region was surrounded by a low dispersive external medium with high thermo-optic coefficient. Due to the large difference between the dispersion property of the fiber and that of the external medium, the device reveals a cut-off properties at spectral region. The cut-off wavelength was shifted by the variations of the environmental temperatures because of thermo-optic effect of the external medium. The sensitivity of the fabricated device was found to be 45 nm/°C.

**Key Words :** temperature sensor, etched fiber, thermally expanded core fiber, dispersion, thermo-optic effect

## 1. 서 론

코어 가까이까지 클래딩을 식각한 단일 모드 광섬유의 소산장(evanescent field) 결합 특성을 이용한 다양한 광섬유 소자들이 발표되었다<sup>[1-3]</sup>. 식각된 광섬유의 광전달 특성은 식각된 부위를 둘러싸고 있는 물질의 광학적 특성에 민감하다. 여기서 식각된 광섬유를 둘러싸고 있는 물질을 외부 물질로 정의하기로 한다. 외부 물질의 굴절률이 광섬유의 유효 굴절률보다 더 클 경우 소산장 결합에 의해 광 파워가 외부 물질로 누설된다. 결과적으로 광신호가 식각된 광섬유 부위를 통과하는 동안 손실이 발생하며, 이 손실은 외부 물질의 굴절률에 의존한다. 외부 물질이 큰 복굴절 특성을 나타낼 경우, 이 소자는 편광 선택적 전달 특성을 나타내며, 편광기로 동작하게 된다<sup>[4,5]</sup>. 한편, 단일모드 광섬유 재료인 실리카(SiO<sub>2</sub>)와 비교하여 분산 특성 즉, 파장에 따른 굴절률의 변화의 차이가 큰 다른 물질이 광섬유 모드와 소산장 결합되었을 경우, 광섬유 모드는 특정한

파장을 경계로 매우 예리한 차단 특성을 나타내는 것으로 최근에 보고되었다<sup>[6,7]</sup>.

본 논문에서는 클래딩이 식각된 광섬유와 분산특성이 광섬유 보다 작은 외부 물질을 소산장 결합한 구조를 가진 온도센서를 제안한다. 이 소자는 기본적으로 단파장 통과 필터 특성을 가진다. 주위 온도 변화에 따라 외부 물질의 굴절률이 변하면, 결과적으로 차단 파장이 이동한다. 본 논문에서 제안하는 센서는 온도에 따른 차단 파장의 이동현상을 이용하며, 감도(sensitivity)는 외부 물질의 열광학 계수(thermo-optic coefficient)에 의존한다.

통신용 단일모드 실리카 광섬유의 코어 지름은 8 μm 정도로서, 습식식각으로 원하는 깊이만큼 클래딩을 제거하기가 쉽지 않다. 또한 식각된 광섬유 외경이 너무 작아 다루기가 매우 힘들다. 본 논문에서는 열확산 코어 광섬유를 사용함으로써, 이러한 기술적인 어려움을 해결할 수 있음을 제안한다. 광섬유에 1300 °C 이상의 고열을 가해 코어속의 불순물을 확산시키는 방법이 잘 알려져 있다<sup>[8-10]</sup>. 열확산으로 인해 코어의 불순물 농도는 감소하지만 불순물이 넓게 퍼져 코어의 지름이 확장된다. 일반 실리카 광섬유에서 코어와 클래딩의 굴절률 차이는 코어 불순물 농도에 비례한다. 열확산 후 코어와

호남대학교 전자·광공학부 (Department of Electronics and Optoelectronics, Honam University)

<sup>†</sup>Corresponding author: ktkim@honam.ac.kr  
(Received : April 19, 2006, Accepted : June 20, 2006)

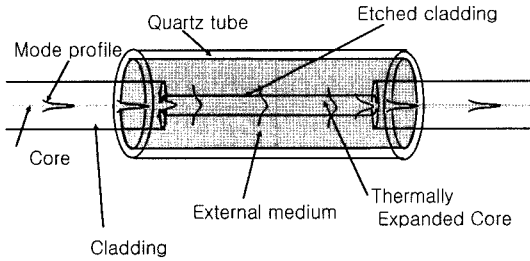


그림 1. 광섬유 온도 센서의 구조 및 모드 진행 과정  
Fig. 1. Structure of fiber temperature sensor and mode propagation process.

클래딩의 굴절률 차이가 줄어들기 때문에 광섬유의 모드 생김새가 넓게 확장된다. 이러한 열확산 코어 광섬유를 이용하면 소산장을 이용하기 위한 클래딩 식각공정이 용이하게 된다. 즉, 모드가 넓게 퍼지기 때문에 약간의 식각공정으로 소산장 결합이 가능하기 때문이다.

본 논문의 내용은 다음과 같다. 2장에서는 제안된 소자의 구조와 동작 원리를 설명한다. 3장에서는 소자 제작 과정을 기술하고, 실험 결과를 분석한다. 4장에서는 제안된 온도센서의 특징과 응용 가능성에 대하여 언급한다.

### 2. 소자 구조 및 동작 원리

클래딩이 식각된 열확산 광섬유와 이를 둘러싼 저분산(low dispersive) 매질 사이의 소산장 결합을 이용한 온도센서의 기본구조는 그림 1과 같다. 감지부(sensing part)는 고열에 노출되어 코어가 확장된 영역이다. 코어 영역에 도핑된 불순물인  $GeO_2$ 가 열확산으로 인해 넓게 퍼짐으로써, 불순물인  $GeO_2$  농도가 낮아지고 코어 지름은 증가하지만, 정규화 주파수(normalized frequency)는 변하지 않는다. 광섬유 코어의 굴절률은  $GeO_2$ 의 농도에 비례하기 때문에<sup>[11]</sup>, 열확산에 의해 코어 굴절률이 감소하며, 따라서 모드의 생김새는 넓게 확장 되지만 단일모드로 유지된다. 불순물의 열확산 후 광섬유 단면의 굴절률 분포는 가우시안(Gaussian) 함수 형태가 된다<sup>[8-10]</sup>.

그림 1에 나타나 있듯 단일모드 광섬유 모드의 생김새는 천이 영역(tapering region) 즉, 광신호 진행 방향을 따라 코어가 서서히 커지는 영역에서 서서히 확장된다. 이때 양쪽 천이 영역의 길이는 1 mm 내외로서 모드진화 현상에 의하여 큰 손실 없이 모드 생김새가 변하는 것으로 알려져 있다<sup>[10]</sup>. 소자의 전달 특성 변화는 외부 물질의 굴절률에 민감하다. 외부 물질의 굴절

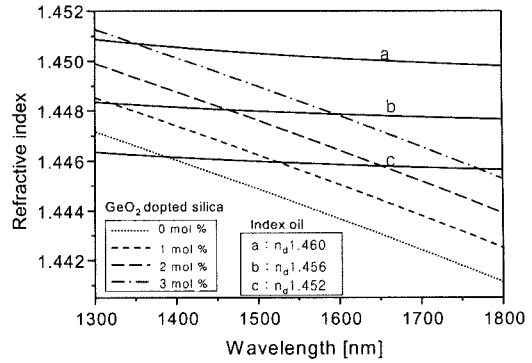


그림 2. 실리카 광섬유와 정합유(Cargille index oil)의 분산 곡선(온도; 25 °C)  
Fig. 2. Dispersion curves of silica fiber and Cargille index oil at 25 °C.

률이 광섬유 클래딩보다 작은 경우 식각된 부위에서 손실은 거의 발생하지 않지만, 외부 물질의 굴절률이 광섬유 코어보다 더 큰 경우 소산장 결합에 의해 광섬유 모드는 외부로 누설된다. 그림 2에  $GeO_2$ 가 도핑된 광섬유와 외부 물질로 실험에 사용될 정합유(Cargille index oil)의 분산곡선이 나타나 있다. 매질의 분산곡선은 제작사에서 제공한 Sellmeier 계수를 이용하여 구하였다. 파장에 따라 새로운 클래딩 물질로 작용하는 정합유와 광섬유 코어 물질의 굴절률 차이가 달라진다. 외부 물질의 굴절률이 광섬유 코어의 굴절률 보다 더 작아지는 파장 영역에서 광신호는 손실 없이 식각된 부분을 통과하지만 그 반대 영역은 외부 물질로 광섬유 모드가 소산장 결합에 의해 누설된다. 따라서 제안된 소자는 단파장 통과 필터로 동작한다.

주위 온도가 올라가면, 실험에 사용될 외부물질(정합유)의 굴절률은 열광학 효과에 의해 감소한다. 반면 광섬유 코어의 굴절률은 증가한다<sup>[11]</sup>. 외부물질로 사용될 정합유의 열 광학계수가 상대적으로 광섬유에 비해 한 차수 이상 크다. 결과적으로 온도가 올라가면, 소자의 차단 파장이 증가하리라는 것을 예상 할 수 있다. 여기서 차단 파장이란 광섬유 코어와 외부물질, 즉 정합유의 굴절률이 일치하는 파장으로 정의한다. 이 소자의 온도에 대한 감도는 외부 물질의 열 광학 효과에 달려 있다. 열 광학 효과란 굴절률이 열에 의해 변하는 특성을 의미한다.

### 3. 제작 및 특성 측정

산소 불꽃에 의해 열 확산된 광섬유 코어의 지름은 약 40  $\mu m$  정도였다. 일반 단일모드 광섬유와 실험에

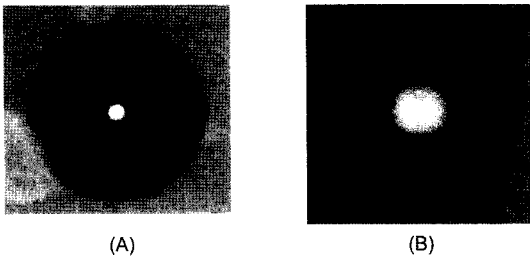


그림 3. 일반 단일모드 광섬유(A)와 열확산 코어 광섬유 (B)의 근거리 필드 패턴  
 Fig. 3. Near field pattern of conventional fiber(A) and thermally expanded core fiber(B).

사용한 열확산 코어 광섬유의 근거리 모드 필드 분포 (near field pattern)가 그림 3에 나타나 있다.

열 확산된 부위의 광섬유 클래딩은 49% 불산(HF)에 의해 식각 되어졌다. 식각에 필요한 시간은 주위 온도, 불산과 물의 혼합비율에 주로 의존하며, 대략 25°C에서 20~25분 정도 소요되었다. 열 확산된 부위는 폴리머 코팅이 이미 제거된 상태이며, 열 확산 영역을 제외한 광섬유 부위는 0.9 mm 루즈 튜브에 끼우고 자외선 경화 에폭시로 광섬유와 루즈 튜브가 만나는 시작점을 고정시킨다. 루즈 튜브는 식각 과정에서 광섬유를 보호하는 기능을 가진다. 파장이 635 nm인 레이저 다이오드로 광섬유에 빛을 인가한 상태에서 식각을 하다가, 식각 부위에서 산란광이 검출되면 식각을 중단하는 방법으로 식각을 행하였다. 식각 후에는 광섬유를 메탄올로 세척하였다. 식각된 표면에서 약간의 산란광이 관측된다는 의미는 식각이 광섬유 코어 가까이 진행되었음을 의미한다. 이때 식각을 멈추고 남은 광섬유 클래딩의 지름을 마이크로미터로 측정할 결과 약 60 μm 부근이었다. 지름이 8 μm인 일반적인 코어를 가진 단일 모드 광섬유의 소산장 결합을 이용하기 위해서는 광섬유 외경이 10 μm 정도 될 때까지 클래딩을 식각해야 한다. 열 확산 광섬유를 이용할 경우 소산장 접근을 위한 식각과정이 매우 용이하다는 사실을 알 수 있었다. 열 확산된 코어영역의 길이는 12 mm 정도이다.

식각된 열확산 광섬유를 그림 1과 같이 quartz 튜브에 삽입하고 그 속에 정합유를 채웠다. 식각된 열 확산 코어 광섬유 주위를 둘러싸는 외부 매질로 Cargille사의 정합유(index oil)인, 모델명 nD 1.458과 nD 1.460을 이용하였다. 여기서 nD는 Sodium D-line 즉 589 nm 파장에서의 굴절률을 의미한다. 이 물질들의 열광학 계수는  $-3.7 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 이고 광섬유의 열광학 계수는  $1.1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 이다<sup>11)</sup>. 제작된 온도센서의 특성을 측정하기 위

한 실험 장치도는 그림 4와 같다. 식각된 광섬유를 감싸고 있는 매질의 온도를 가변 시키기 위해 센서를 hot plate위에 올려 놓고 온도를 2°C 단위로 가변시키면서 광 스펙트럼 분석기로 소자의 파장응답의 변화를 관측하였다.

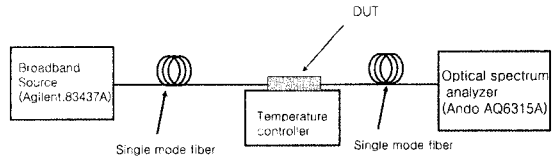


그림 4. 소자의 특성 측정을 위한 실험 장치도  
 Fig. 4. Experimental set-up to measure the characteristics of the device.

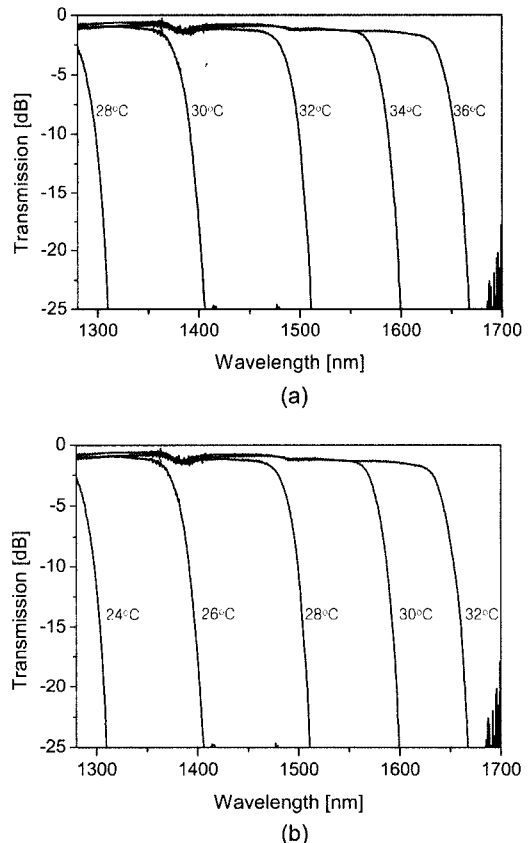


그림 5. 온도 변화에 따른 소자의 파장 응답: (a) 정합유 nD 1.460일 외부 물질로 이용되었을 때, (b) nD 1.458이 외부 물질로 이용되었을 때  
 Fig. 5. Wavelength responses of the device for various temperature: (a) index oil nd 1.460 was used as an external medium, (b) index oil nd 1.458 was used as an external medium.

실험 결과는 그림 5(a)와 5(b)에 나타나 있다. 이론적 예상과 마찬가지로 소자는 단파장 통과 특성을 보였다. Hot plate 표면의 열이 정합유의 온도를 증가시키며, 그 결과 차단 파장이 장파장으로 이동함을 알 수 있다. 온도가 올라감에 따라 그림 2에 나타나 있는 정합유의 분산 곡선이 아래로 이동한다. 반면 광섬유의 분산 곡선은 큰 변화는 없지만 위로 약간 이동한다. 실험 결과 약 8°C의 온도변화에 대하여 차단 파장이 350 nm 이상 변화할 수 있음을 알 수 있었다. 8°C 온도 증가는 정합유의 굴절률이 0.003정도 감소했음을 의미한다. 그림 2에서 나타난 nD 1.456 분산곡선을 아래 방향으로 0.003 만큼 이동 시키면 1 mol% 토핑된 광섬유 코어의 분산 곡선과 만나는 파장이 약 350 nm 정도 이동됨을 알 수 있다. 따라서 소자의 동작 특성은 그림 2의 분산 곡선을 이용하여 설명할 수 있음을 알 수 있다.

그림 5(a)와 5(b)를 비교해 보면, 동일한 온도에서 굴절률이 더 큰 매질을 사용한 소자의 차단 파장이 더 짧다는 것을 알 수 있다. 매질 nD 1.460은 nD 1.458 보다 전 파장에서 굴절률이 0.002 만큼 더 크기 때문이다. 외부 매질의 특성에 따라 소자의 동작 온도 범위가 결정되며 온도 변화에 따른 차단 파장의 이동 거리, 즉 감도가 결정됨을 알 수 있다. 물론 외부 물질로 정합유와 폴리머나, 크리스탈, 세라믹 등과 같은 매질도 사용될 수 있을 것으로 생각 된다.

#### 4. 고 찰

제작된 소자는 매우 높은 감도를 나타내었다. 단위 온도 변화에 대한 차단 파장의 변화는 45 nm/°C이다. 기존의 측면 연마 광섬유와 열광학 폴리머 평면도파로 사이의 광 결합을 이용한 온도 센서<sup>[12,13]</sup>의 경우 감도가 1 nm/°C 이하인 것을 감안하면 제안된 소자의 감도는 매우 높은 감도를 가진 것으로 볼 수 있다. 이러한 매우 높은 감도는 광섬유 모드의 차단(cut-off) 특성을 이용했기 때문이다. 즉 식각된 광섬유를 둘러싸고 있는 용액의 굴절률이 유효굴절률 부근에서 변할 때 광섬유 모드는 도파 조건에서 차단 조건으로 변하게 된다. 여기서 차단 조건이란 광섬유 모드가 더 이상 코어에 도파(guiding)될 수 없는 상태를 말한다. 제안된 소자의 또 다른 장점은 구조가 매우 간단하다는 것이다. 습식 식각으로 코어 가까이까지 클래딩의 제거가 가능하며 한꺼번에 다수의 광섬유 클래딩을 식각할 수 있다. 소자 특성이 광섬유 자체의 특성과 외부 물질의 광학적 특성에 의존하기 때문에 재현성

있는 특성을 얻기가 용이하다. 측면 연마 광섬유를 이용한 소자의 경우 연마된 광섬유 위에 설치되는 평면도파로 막의 두께도 중요한 변수이며 정확한 도파로 막의 두께를 정확하게 재현하기가 용이하지 않다. 열 확산에 의해 코어가 수십  $\mu\text{m}$ 까지 확장된 상태이기 때문에, 식각할 때 식각 깊이(제거된 클래딩 두께)에 대한 허용 오차가 넓다고 할 수 있다. 일반 단일 모드 광섬유를 식각할 때 코어가 매우 작기 때문에 약간의 지나친 식각이나 부족한 식각은 소자의 특성을 완전히 다르게 만들 수 있다.

제안된 소자의 단점으로는, 온도 변화를 관측하기 위해서는 스펙트럼 폭이 매우 넓은 입력 광원이 필요하며 파장 응답을 얻기 위해서 고가의 스펙트로메타가 필요하다는 것이다. 제안된 소자는 온도의 측정 범위가 넓지 않지만 온도 변화를 정밀하게 측정할 필요가 있을 때 유용하게 이용할 수 있을 것으로 사료된다. 만일 더 넓은 측정 온도 범위가 필요한 경우, 열광학 계수 크기가 다소 작은 물질을 외부 매질로 사용하는 방법이 유용할 것으로 사료된다. 이 소자의 입력 광원으로 레이저와 같은 단파장 광을 사용하면 특정 온도를 경계로 출력 광이 ON/OFF 되는 특성을 가지게 된다. 예를 들어 앞서 그림 5(a)에서 보이듯 29°C 부근에서 온도가 변하면 1550 nm 파장 광원을 사용할 경우 출력 광이 ON/OFF 되는 특성을 가지게 되며 이러한 특성은 화재경보 및 과열센서 등으로 이용할 수 있다. 이때 소자의 소광비는 40 dB 이상이 됨을 실험으로 확인하였다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 식각된 광섬유를 이용, 외부 물질과 소산장 결합을 이용한 고감도 온도 센서를 제안하였다. 열 확산 코어 광섬유를 이용함으로써 소산장 결합을 위한 클래딩 식각이 용이함을 실험으로 확인하였다. 코어 가까이까지 클래딩이 식각된 광섬유와 이를 둘러싼 외부 매질의 분산 특성의 차이에 의해 소자는 매우 예리한 차단 특성을 가지는 파장 응답을 보였다. 소자의 차단 파장이 외부 매질의 열 광학 효과에 의해 민감하게 변화하는 현상을 이용하여 45 nm/°C의 감도를 가지는 온도 센서를 구현하였다. 제안된 소자는 입력광이 레이저 같이 단일 파장 광원일 때, 특정 온도를 경계로 하여 광신호를 차단시키거나 통과시킬 수 있는 디지털 동작을 할 수 있는 기능도 가진 것으로 확인되었다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-03-03) 지원으로 수행되었음.

### 참고 문헌

- [1] T. Jin, Q. Li, J. Zhao, K. Cheng, and X. Li, "Ultra-broad-band AOTF based on cladding etched single mode fiber", *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 14, no. 8, pp. 1133-1135, 2002.
- [2] Q. Li, A. A. Au, C. H. Lin, E. R. Lyons, and H. P. Lee, "An efficient all-fiber variable optical attenuators via acousto-optic mode coupling", *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 14, no. 11, pp. 1563-1565, 2002.
- [3] E. R. Lyons and H. P. Lee, "An efficient electrically tunable etched cladding fiber bragg grating filter tested under vacuum", *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 13, no. 5, pp. 484-486, 2001.
- [4] W. Daogang, Q. Guanhua, C. Hua, and Y. Zhen, "Birefringent enclose fiber-optic polarizer", *Electronic Components and Technology Conference, Proceedings*, 1st pp. 493-496, 1991.
- [5] M. Wakaki, Y. Komachi, H. Machida, and H. Kobayashi, "Fiber-optic polarizer using birefringent crystal as a cladding", *Applied Optics*, vol. 35, no. 15, pp. 2591-2594, 1996.
- [6] J. Villatoro, D. Monzon-Hernandez, and D. L. Moreno, "In-line tunable band-edge filter based on a single-mode tapered fiber coated with a dispersive material", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 8, pp. 1665-1667, 2005.
- [7] N. K. Chen, S. Chi, and S. M. Tseng, "Wide band tunable filter short-pass filter based on side-polished fiber with dispersive polymer overlay", *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 19, pp. 2219-2221, 2004.
- [8] K. Shiraishi, T. Yanagi, and S. Kawakami, "Light propagation characteristics in thermally diffused expanded core fibers", *J. Lightwave Technol.*, vol. 11, no. 10, pp. 1584-1591, 1993.
- [9] K. Shiraishi, Yoshizo, and S. Kawakami, "Beam expanding fiber using thermal diffusion of the dopant", *J. Lightwave Technol.*, vol. 8, no. 8, pp. 1151-1161, 1990.
- [10] O. Hanaizumi, Y. Aizawa, H. Minamide, and S. Kawakami, "Fabrication of an expanded core fiber having MFD of 40  $\mu\text{m}$  preserving outer diameter", *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 6, no. 7, pp. 842-844, 1994.
- [11] T. Izawa and S. Sudo, "Optical fibers : Materials and fabrication", *KTK Scientific Publishers*, Tokyo, 1987.
- [12] 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 Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, no. 11 pp. 1209-1211, 2001.
- [13] 김시홍, 정용규, 김광택, 송재원, 강신원, "열광학 폴리머 평면도파로의 소산장 결합을 이용한 광섬유형 온도센서", *센서학회지*, 제9권, 제1호, pp. 15-21, 2000.

### 김 광 택

• 『센서학회지 제14권 제4호』 p. 286 참조



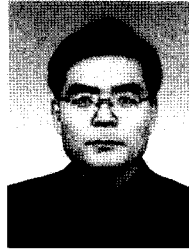
### 송 현 석

• 2004년 2월 전주대학교 산업공학과 졸업  
 • 2005년 3월~현재 호남대학교 대학원 전기전자공학과 석사과정  
 • 주관심분야 : 광섬유 센서, 광섬유 소자



신은수

- 2002년 2월 호남대학교 전자공학과 졸업
- 2005년 3월~현재 호남대학교 대학원 전기전자공학과 석사과정
- 주관심분야 : 광섬유 센서, 광섬유 소자



홍기범

- 1971년 3월~1975년 2월 한양대학교 전자공학과(공학사)
- 1984년 8월~1986년 5월 University of Florida Electrical Engineering Master of Eng.
- 1986년 9월~1992년 12월 Auburn University Electrical Engineering Ph.D.
- 1975년 3월~1981년 12월 국방과학연구소 연구원
- 1982년 1월~1984년 1월 국방과학연구소 선임연구원
- 1994년 3월~현재 호남대학교 교수
- 주관심분야 : 반도체소자물리, 센서