

측면 연마 단일모드 광섬유를 이용한 용액용 굴절계

김광택[†] · 이규효

Refractometer for liquids based on a side-polished single-mode fiber

Kwang-Taek Kim[†] and Kyu Hyo Lee

Abstract

We have demonstrated a refractometer for liquid based on a side-polished fiber. The device consists of a side-polished single mode fiber and a rectangular space which plays a role of the multimode planar waveguide when it is infused with a liquid. We presented a simple method to acquire the refractive index of a liquid by use of the spacings of periodic resonance wavelengths of the device. The resolution of the fabricated refractometer was order of 10^{-5}

Key Words : refractometer, side-polished fiber, directional coupling, planar waveguide

1. 서 론

광섬유를 이용한 센서는 작은 구조, 적은 무게, 높은 해상도, 전자파에 대한 면역성 다중화 및 분산 측정에 대한 용이성 등 다양한 장점 때문에 지금까지 많은 연구가 진행 되어 왔다. 광섬유 센서의 정보 획득 방법으로 광섬유로부터 출력되는 광의 강도변화를 이용하는 방법과 파장응답의 변화를 이용하는 방법이 잘 알려져 있다. 전자의 방법은 소자 구조가 간단하고, 빠른 응답을 얻을 수 있고 신호를 검출하기 위한 기기가 저렴하지만, 해상도가 낮고 외부 요인에 의해 쉽게 출력이 바뀌는 단점이 있다. 강도 변조를 이용한 광섬유 센서 구조로는 테이퍼링 광섬유^[1,2], D형 광섬유^[3] 및 측면 연마 광섬유^[4,5] 등이 알려져 있다. 반면 파장응답을 이용한 센서소자는 신호의 세기에 관계없이 피크 파장만 읽기 때문에 환경적 면역성이 강하고 높은 해상도를 가지고 있다. 장주기 광섬유 격자^[6-8]나 광섬유-평면도파로 결합기^[9-11]의 파장 응답을 이용하여 다양한 물리 센서가 보고 되었다. 특히 광섬유-평면도파로 결합기는 최상부층에 놓인 용액의 굴절률과 공진 파장과의 관계를 이용하여 10^{-4} ~ 10^{-5} 정도의 해상도를 가지는 굴절계가 보고 되었다^[12-14]. 그러나 이들 소자는 측정하고자

하는 용액의 굴절률이 광섬유 코어 굴절률 보다 더 큰 경우 공진현상이 약해지기 때문에, 높은 굴절률을 가지는 용액의 정확한 굴절률을 측정하기 힘들다.

본 논문에는 측면 연마된 단일 모드 광섬유 위에 사각형 공간이 만들어진 소자 구조를 이용하여 광섬유 코어 보다 더 높은 굴절률을 가지는 용액의 굴절률을 측정하기 위한 굴절계를 제안하고 구현하였다. 사각형 구조의 공간에 높은 굴절률을 가진 용액이 채워지면 이는 평면도파로 역할을 한다. 이 경우 제안된 구조는 광섬유-다중모드 평면도파로 결합기로 동작한다. 광섬유 모드는 평면도파로의 최외곽 모드와 결합하여 특정한 파장에서 공진을 발생시킨다. 공진 파장간의 간격은 용액의 굴절률에 민감하게 변하게 된다. 기존의 광섬유-평면도파로 결합기에서^[12-14] 용액은 평면도파로의 클래딩 역할을 하기 때문에 광섬유의 유효 굴절률 보다 낮은 쪽 굴절률을 측정하는 용도로 사용되는 반면, 제안된 소자에서는 용액이 평면도파로의 도파층 역할을 하므로, 결과적으로 광섬유의 유효 굴절률 보다 높은 쪽 굴절률 측정이 가능하다.

2. 소자 구조 및 측정원리

제안된 소자 구조는 그림 1과 그림 2에 제시되어 있다. 측면 연마된 단일 모드 광섬유 위에 단면 모양이 직사각형인 빈 공간이 형성되고 이 빈 공간은 높은 굴절률을 가진 용액이 채워진다. 용액의 굴절률이 광섬유

호남대학교 광전자공학과(Honam University, Department of Optoelectronics)

[†]Corresponding author: ktkim@honam.ac.kr
(Received : March 22, 2005, Accepted : April 19, 2005)

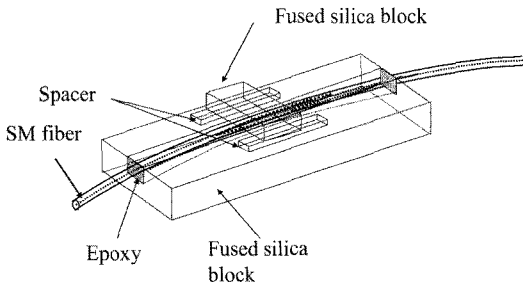


그림 1. 제안된 측면 면마 광섬유를 이용한 굴절계의 구조
Fig. 1. Structure of proposed refractometer using a side-polished fiber.

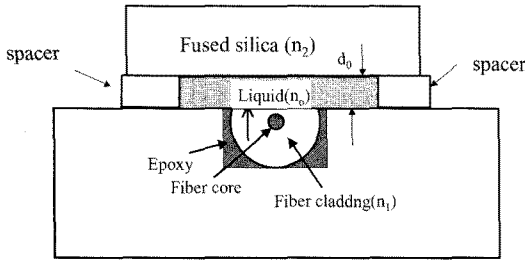


그림 2. 소자의 횡 방향 중심에서 단면 모양
Fig. 2. Cross sectional view at center of device.

클래딩보다 작을 때, 소자의 특성은 용액의 존재에 영향을 거의 받지 않는다. 용액의 굴절률이 광섬유의 유효 굴절률에 비해 충분히 클 경우 이 소자는 비대칭 광 결합기로 동작한다. 사각형 공간을 만들기 위한 지지대의 높이는 채워진 용액이 다중 모드 평면도파로로 동작할 수 있도록 충분히 높게 하고, 그 폭은 광학적으로 무한대로 간주한다. 지지대(spacer)로 150 μm 두께를 가지는 현미경용 덮개 유리를 활용한다. 최상부층의 굴절률은 광섬유 클래딩과 굴절률이 거의 동일한 용착 실리카(fused silica) 블록을 활용하여 물리적인 압력으로 지지대와 결합되며 용액을 바꿀 때는 이를 떼어내고 메탄올로 용액을 세척하고 다시 덮는다.

비대칭 결합기는 특정한 파장에서 에너지 교환을 위한 위상 정합조건을 만족하며, 이를 공진 파장으로 정의한다. 소자의 구조가 주어지면 광섬유와 평면도파로의 분산곡선을 이용하여 공진 파장 예측이 가능하다.

평면 도파로의 고유치 방정식은 다음과 같다^[12].

$$\frac{2\pi d_0}{\lambda} (n_0^2 - n_{em}^2)^{1/2} = m\pi + \phi_1 + \phi_2 \quad (1)$$

여기서 m 은 모드의 차수를 나타내는 정수, λ 는 광의 파장, d_0 는 평면도파로의 코어층 두께, n_0 는 평면도파

로의 코어 굴절률, 즉 용액의 굴절률 n_{em} 은 m 번째 고차 모드의 유효 굴절률이다. ψ_1 과 ψ_2 는 평면도파로의 코어층과 클래딩층의 경계에서 발생하는 모드의 위상차이로서 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_i (i=1 \text{ or } 2) = \tan^{-1} \xi \frac{(n_{em}^2 - n_i^2)^{1/2}}{(n_0^2 - n_{em}^2)^{1/2}} \quad (2)$$

여기서 ξ 는 편광상태에 의존하는 상수로서 TE편광에 대해서는 $\xi=1$, TM편광에 대해서는 $\xi = n_0^2/n_i^2$ 을 대입하면 된다. n_i 는 평면도파로 하부 및 상부 클래딩의 굴절률이다. 광섬유 모드와 평면도파로 모드 사이에 위상 정합 조건($n_{em} = n_{ef}$)을 대입하면 공진 파장을 구할 수 있다. 여기서 n_{ef} 는 광섬유의 유효굴절률을 의미한다.

$$\lambda_m = \frac{2\pi d_0 (n_0^2 - n_{ef}^2)^{1/2}}{m\pi + \phi_1 + \phi_2} \quad (3)$$

기존의 광섬유-평면도파로 결합기를 활용한 굴절계에서는 얇은 유전체가 평면도파로의 도파층 역할을 하며 용액은 평면도파로의 상부 클래딩 역할을 한다. 이때 용액의 굴절률이 광섬유의 유효 굴절률 보다 더 클 경우 위상 정합 조건이 존재하지 않으며 공진현상이 약해진다^[7].

또한 용액의 굴절률에 따라 ϕ_2 값이 바뀌기 때문에 공진 파장이 가변된다. 평면 도파로의 두께가 두꺼워질수록 모드 차수는 증가하고 공진 파장간 간격이 좁아진다. 따라서 기존의 광섬유-평면도파로 구조에서는 평면도파로의 간격이 두꺼워질수록 민감도는 감소한다.

제안된 소자 구조는 공진 파장의 위치로부터 용액의 굴절률을 획득하는 것이 아니라 공진 파장의 간격으로부터 굴절률을 얻는 방식이다. 평면 도파로의 두께는 지지대에 의해 미리 정해져 있기 때문에 용액의 굴절률이 증가하면 모드 사이의 간격이 감소한다. 임의의 평면도파로의 $m+1$ 차 모드와 결합하는 공진 파장을 λ_{m+1} 로 정의한다. 인접한 두 공진 파장의 차이가 매우 작다면, 두 공진 파장 사이에서 색 분산과 도파로 분산의 영향은 무시할 수 있다. 식(3)에서 m 차 및 $m+1$ 차 공진 파장에서 n_0 와 n_{ef} 가 일정하다고 가정하면 다음과 같은 식이 유도 된다.

$$\frac{\lambda_m \lambda_{m+1}}{\Delta \lambda_m} = 2d_0 (n_0^2 - n_{ef}^2)^{1/2} \quad (4)$$

이를 다시 정리하면

$$n_0 = \sqrt{\frac{(\lambda_m \lambda_{m+1})^2}{(2d_0 \Delta \lambda_m)^2} + n_{ef}^2} \quad (5)$$

여기서 $\Delta\lambda_m = \lambda_m - \lambda_{m+1}$ 이다. 광섬유의 유효굴절률은 그 구조가 주어지면 쉽게 구할 수 있고 평면도파로의 두께를 알고 있기 때문에 소자의 인접한 두개의 공진 파장을 구하면 쉽게 용액의 굴절률을 구할 수 있다. 만일 계산하고자 하는 공진의 차수 차이를 더 크게 할 때 즉 $\Delta\lambda_m = \lambda_m - \lambda_{m+K}$ 일 때 식 (5)는 다음과 같이 바뀌어야 한다.

$$n_o = \sqrt{\frac{(K\lambda_m\lambda_{m+1})^2}{(2d_0\Delta\lambda_m)^2} + n_{ef}^2} \quad (6)$$

여기서 K 는 1이상의 정수이다.

3. 실험 및 분석

단일 모드 광섬유를 연마하기 위해 지지대로 실리카 블록(길이:35 mm 폭:10 mm, 높이:5 mm)을 이용하였다. 우선 다이아몬드 휠을 이용하여 실리카 블록 상에 곡률반경 50 cm, 폭은 140 μm , 중앙부에서 깊이는 130 μm 인 홈을 새기고, 에폭시를 이용하여 단일모드 광섬유(SMF-28, 코닝사)를 새겨진 홈에 고정한다. 광섬유의 측면을 연마하기 위하여 알루미늄 연마가루(#3000)를 이용하여 황동 연마기판에서 1차 연마 후 세륨옥사이드(CeO_2)로 마무리 연마한다. 마무리 연마 기판으로 폴리우레탄이나 피치를 사용한다. 지나친 연마를 막기 위해 남은 클래딩 두께를 리퀴드 드롭(liquid drop) 방법^[15]으로 측정한다. 통상적으로 1550 nm 파장에서 광섬유 코어와 굴절률이 같은 용액을 연마된 클래딩 표면위에 놓았을 때 누설 손실이 17 dB되도록 연마 상태를 조절한다. 이때 최소 남은 클래딩 두께는 약 1 μm 로 추정된다. 연마된 표면 위에 원기를 올려놓고 그 사이에서 발생하는 간섭 패턴(Newton ring)으로 측면 연마 후 표면 상태를 확인한다. 간섭 패턴이 없거나 한개 정도 나타나면 연마표면의 거칠기와 평탄도가 양호한 상태로 판정할 수 있다.

두께가 150 μm 인 현미경용 덮개 유리를 적당히 절단하여 연마된 표면위에 에폭시로 붙인다. 최상부층으로 광섬유 클래딩과 거의 동일한 굴절률을 가지는 용착 실리카(fused silica) 블록에 적당한 압력을 인가한다. 실험에 Cargille사에서 제공한 nD(파장 588 nm에서의 굴절률)가 1.5, 1.6, 1.7인 세 가지 기름용액을 실험에 사용하였다.

소자의 특성을 측정하기 위해 4개의 다른 파장역을 가지는 고휘도 LED를 광원으로 사용하였고 광스펙트럼 분석기로 소자의 파장응답을 측정하였다. 측정 결과가 그림 3(a), (b) (c)에 제시되어 있다.

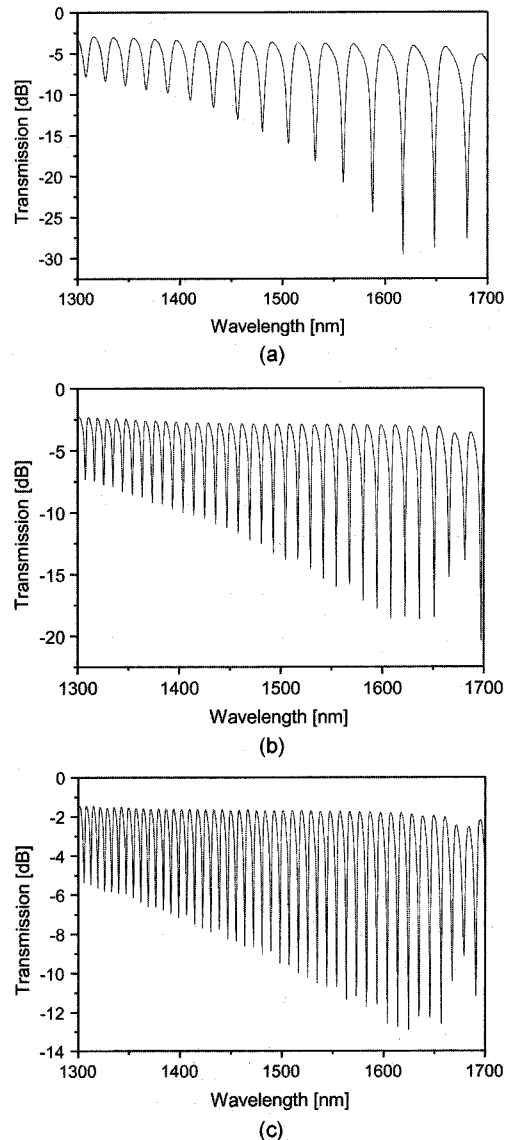


그림 3. 서로 다른 용액의 굴절률에 대한 소자의 파장응답; (a) $n_D=1.5$, (b) $n_D=1.6$, (c) $n_D=1.7$.

Fig. 3. Wavelength responses of device for different refractive indices of liquids; (a) $n_D=1.5$, (b) $n_D=1.6$, (c) $n_D=1.7$.

측정은 18 $^{\circ}\text{C}$ 에서 진행되었다. 제작된 소자는 빛살 필터로 동작함을 보이고 있다. 공진 파장간의 간격은 장파장으로 갈수록 길어진다. 이러한 현상은 식 (5)로부터 예측된 사실이다. 굴절률이 높을수록 1300 nm~1600 nm 사이에 발생하는 공진의 개수가 증가함을 알 수 있다. 1550 nm 파장 부근에서 식 (5)을 이용하여 계산한 용액의 굴절률은 각각, 1.4757, 1.5722 및 1.6705

로 나타났다. 여기서 광섬유의 코어의 굴절률은 1.4485, 클래딩의 굴절률은 1.4440, 코어의 반지름은 4.1 μm 가정했을 때 유효굴절률(n_{ef})는 1.4457 이다. 제작된 굴절계의 해상도는 스펙트럼 분석기의 해상도에 비례한다. 통상 적으로 광스펙트럼 분석기의 해상도는 0.05 nm 까지 가능 하다. $n_D=1.5$ 인 매질과 $n_D=1.6$ 인 매질의 1550 nm 파장 부근에서 인접한 공진 파장 차이가 각각 27.2 nm 및 12.8 nm이다. 즉 굴절률 0.1의 변화가 공진 파장 간격 변화 14.4 nm를 유발한 것이다. 이는 광스펙트럼 분석기로 파장응답을 구할 때 0.1 nm 혹은 0.05 nm의 해상도로 측정하면 10^{-4} 이하의 굴절률의 변화도 읽어 낼 수 있음을 의미한다. 굴절률 측정시 좀더 해상도를 높이려면 공진 파장간의 간격을 넓히면 된다. 즉 예를 들면 식(6)에서 처럼 $\Delta\lambda_m = \lambda_m - \lambda_K$ 으로 설정하여 용액의 굴절률을 구한다. 이러한 방식으로 10^{-5} 이하의 해상도는 쉽게 달성 할 수 있다. 하지만, 공진 파장 간격이 커지기 때문에 계산에서 무시했던 분산에 의한 오차가 증가 할 수 있다.

제작된 소자를 활용하여 주위 온도 변화에 따른 용액의 굴절률 변화를 측정 할 수 있다. 온도 변화는 지 지대로 사용된 덮개 유리의 두께를 가변 시킬 수 있지만 실제 유리의 두께 변화가 거의 없음을 마이크로 메타로 확인 하였다. 핫 플레이트(Hot plate) 위에 소자를 설치하고 주위 온도가 40 °C, 60 °C 80 °C 및 100 °C일 때 소자의 파장응답을 측정하였다. 대표적으로 40 °C, 100 °C에서의 파장응답을 그림 4 제시하였다. 1550 nm 파장 부근에서 측정된 두 인접한 공진 파장과 이를 바탕으로 계산된 용액의 굴절률의 변화를 표 1에 나타내었다.

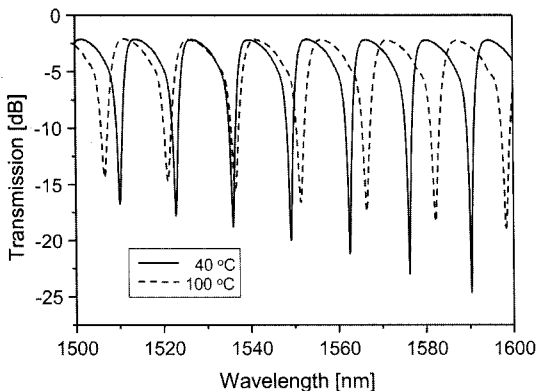


그림 4. 온도에 변화에 따른 소자의 파장 응답 변화, $n_D=1.6$.
Fig. 4. Wavelength response of device in accordance with temperature variation, $n_D=1.6$.

표 1. 온도변화에 따른 공진 파장 및 용액의 굴절률
Table 1. Resonance wavelength and refractive index of liquid in accordance with temperature variation

온도(°C)	n_o	λ_m (nm)	λ_{m+1} (nm)
40	1.5661	1562.6	1549.2
60	1.5556	1560.3	1546.3
80	1.5537	1558.8	1544.7
100	1.5433	1566.5	1551.5

온도가 증가함에 따라 공진 파장 간의 간격은 점점 늘어났다. 이는 용액의 굴절률이 온도가 증가함에 따라 감소한 결과이다. 산출된 용액의 단위 온도 변화에 따른 굴절률 변화, 즉 열광학 계수는 대략 $-3.6 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$ 로 계산되었다.

제안된 소자 구조는 다양한 파장영역에서 용액의 굴절률을 측정할 하고자 할 때 활용 가능할 것으로 기대 된다. 예를 들어 1310 nm 파장 부근에서 소자의 굴절률을 측정하고자 할 때, 광섬유의 유효 굴절률을 1310 nm 에서 다시 계산하고 그 파장 부근에서 발생하는 인접한 두 공진 파장을 측정하면 쉽게 용액의 굴절률을 얻을 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는, 측면 연마된 광섬유위에 사각 공간을 만들어 높은 굴절률을 가지는 용액용 굴절계를 구현하였다. 두 개의 공진 파장만 구하면 굴절률을 쉽게 계산할 수 있는 방정식을 유도하였다. 소자의 해상도는 10^{-5} 정도로 나타났다. 제안된 센서는 구조가 간단하여 제작이 용이하고, 다양한 파장에서 굴절률 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 향후 제안된 소자와 기존의 광섬유-유전체 평면도파로 결합기를 직렬 혹은 병렬로 연결하여 넓은 굴절률 측정 범위를 가진 센서 소자를 구현하고자 한다.

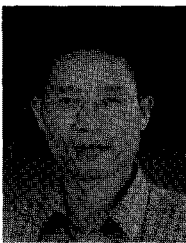
감사의 글

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

참고 문헌

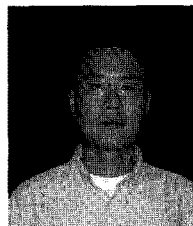
[1] J. Villaroro, D. M.-Hernandez, and D. Talavera, "High resolution refractive index sensing with cladded multimode tapered optical fibre", *Electron. Lett.*,

- vol. 40, pp. 106-107, 2004.
- [2] D. M. Hernandez, J. Villatoro, and D. L. Morenom "Miniature optical fiber refractometer using cladded multimode tapered fiber tips", *Sensors and Actuators B* to be published.
- [3] M. H. Chiu, S. N. Hus, and H. Yang "D-type fiber sensor used as a refractometer based on total-internal reflection heterodyne interferometry", *Sensors and Actuators B*, vol. 101, pp. 985-986, 2004.
- [4] A. T. Andree, B. S. Zafirova, and E. I. Karakoleva, "single-mode fiber polished into core as a sensor element", *Sensors and Actuators A*, vol. 64, pp. 209-212, 1998.
- [5] S. P. Ma and S. M. Tseng, "High-performance side-polished fiber and application as liquid crystal clad fiber polarizers", *IEEE J. of Lightwave Tech.*, vol. 15, no. 4, pp. 864-867, 1997.
- [6] B. H. Lee, Y. Liu, S. B. Lee, S. S. Choi, and J. N. Hang, "Displacements of the resonant peaks of along period fiber grating induced by a change of ambient refractive index", *Opt. Lett.* vol. 22, pp. 1769-1771, 1997.
- [7] J. H. Chong, P. Shun, H. Haryono, A. Yohana, M. K. Rao, C. Lu, and Zhu, "Measurements of refractive index sensitivity using long-period grating refractometer", *Opt. Comm.* vol. 229, pp. 65-69, 2004.
- [8] R. Falciai, A. G. Mignani, and A. Vannini, "Long Period gratings as solution concentration sensors", *Sensors and Actuators B*, vol. 74, pp. 74-77, 2001.
- [9] 김시홍, 정용규, 김광택, 송재원, 강신원, "열광학 폴리머 평면도파로의 소산장 결합을 이용한 광섬유형 온도센서", *센서학회지*, 제9권, 제1호, pp. 15-21, 2000.
- [10] 김광택, 황보승, 강용철, "측면 연마 편광유지 광섬유와 평면도파로 사이의 소산장 결합을 이용한 광센서", *센서학회지*, 제13권, 제3호, pp. 207-212, 2004.
- [11] 윤종국, 정용규, 김상우, 이승하, 강신원, "측면 연마된 단일모드 광섬유와 폴리머 평면도파로 결합기를 이용한 압력 센서", *센서학회지*, 제10권, 제3호, pp. 9-14, 2001.
- [12] W. Johnstone, G. Fawcett, and L. W. K. Yim, "In-line fiber-optic refractometry using index-sensitive resonance positions in single-mode fiber-to-planar polymer waveguide couplers", *IEE Proc.-Optoelectron.*, vol. 141, no. 5, pp. 229-302, 1994.
- [13] K. T. Kim, D. S. Yoon, and G. I. Kweon, "Optical properties of side-polished polarization maintaining fiber coupled with a high index planar waveguide", *Opt. Comm.* vol. 230, pp. 137-144, 2004.
- [14] 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", *Sensors and Actuators A*, vol. 101, pp. 137-142, 2002.
- [15] S. M. Tseng and C. L. Chen, "Side-polished fibers", *Appl. Optics* vol. 31, no. 18, pp. 3438-3447, 1992.



김 광 택

- 1989년 경북대학교 전자공학과 학사졸업
- 1991년 경북대학교 전자공학과 석사졸업
- 2000년 경북대학교 전자공학과 박사졸업
- 현재 호남대학교 전자·광공학부 조교수



이 규 호

- 2004년 호남대학교 전자공학과 학사 졸업
- 현재 호남대학교 전기·전자대학원 제 학생