

다파장 광원을 이용한 폴리머 광도파로형 SPR 센서

박창섭 · 염세혁 · 김도억* · 강병호** · 김규진** · 김학린** · 강신원**†

The polymer waveguide type SPR sensor using a multi-wavelength light source

Chang-sub Park, Se-hyuk Yeom, Do-eok Kim*, Byoung-ho Kang**,
Kyu-jin Kim**, Hak-rin Kim**, and Shin-won Kang**†

Abstract

In this paper, we fabricated the polymer waveguide type surface plasmon resonance (SPR) sensor using a white light source and optical spectrum analyzer (OSA). Fabricated sensor uses the principle of phase matching between evanescent wave and surface plasmon wave. According to the measuring result, the shift of resonance wavelength conducts the change of the refractive index. The proposed SPR sensor is expected to apply the integrated multichannel SPR sensor and the realtime monitoring system.

Key Words : SPR, white light source, SU-8 polymer, evanescent field

1. 서 론

최근 생명공학의 발달과 더불어 바이오산업에 있어서 각종 바이오물질의 측정에 대한 관심이 증대되고 있다. 또한, 측정 기술에 대한 연구와 기존 측정 시스템의 한계를 극복하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 바이오 물질의 측정방법으로는 ISE (ion selective electrode)나^[1,2] ISFET (ion selective field effect transistor)^[3] 등의 전기 화학적인 방법과 고굴절을 프리즘을 이용한 전반사(ATR: attenuated total reflection)와^[4] 광섬유형 옵토드(optode)^[5,6] 및 박막 광도파로소자^[7] 등의 광학적 방법을 이용한 센서 시스템이 연구 개발 되고 있다. 이러한 방법들은 비교적 높은 정확성을 가지지만 측정 대상물질의 전처리 과정이 필요하며 분석시간이 길고 센서의 제작과 사용상의 까다로운 점 등의 문제점이 있다. 반면 광학적 방법 중 금속표면에 입사되는 광에 의해 여기된 표면 플라즈몬과 금속 표면에서 입사광이

전반사 될 때 발생하는 소산장(evanescent field)이 금속표면의 유전율변화에 따라 공명점이 바뀌는 광학적 현상을 이용한 SPR (surface plasmon resonance) 센서는 앞서 언급한 센서 시스템에 비해 측정대상물질에 대한 전처리 과정 없이 실시간으로 측정이 가능하고 고감도이며 경량화와 상용화가 쉬운 장점을 가지고 있어 많은 주목을 받고 있다. 현재 SPR을 이용한 센서는 항원·항체반응^[8,9], 단백질 및 DNA 검출 센서^[10-13] 등에 많이 사용되고 있으며, 대부분 단색광원을 이용한 입사각 가변형(Kretschmann type)^[14,15] SPR 센서를 응용하고 있다. 그러나 입사각 가변형 SPR 센서는 안정화 및 규격화 등의 장점이 있으나, 다채널화 및 집적화가 어려운 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 위의 단점을 개선하고자 다파장 광원을 이용한 폴리머 광도파로형 SPR 센서를 제작하였다. 광원은 백색광원(400 nm~1800 nm)을 사용하였으며 공명파장의 이동은 OSA (optical spectrum analyzer)를 이용하여 관찰하였다. 먼저 프리즘 결합을 통해 SU-8 폴리머 광도파로형 SPR 센서의 굴절률 변화에 대한 공명특성을 조사하였고, 이를 바탕으로 광섬유 결합을 통해 백색광원에서의 SU-8 폴리머 광도파로형 SPR 센서의 굴절률에 대한 공명 파장 이동에 대

Department of Sensor and Display Engineering, Kyungpook National University

*Department of Electronic Engineering, Kyungpook National University

**School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University

†Corresponding author: swkang@knu.ac.kr

(Received : August 29, 2007, Accepted : October 25, 2007)

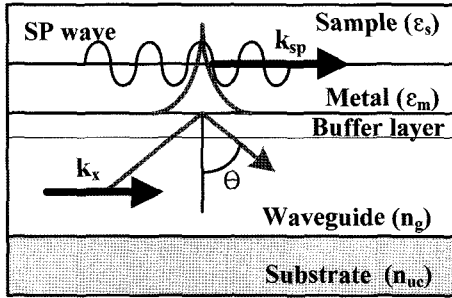


그림 1. 폴리머 광도파로형 SPR 센서의 개략도
Fig. 1. Configuration of the polymeric waveguide type SPR sensor.

한 기초적인 특성을 평가하였다.

2. 동작 원리

다파장 광원을 이용한 폴리머 광도파로형 SPR 센서는 TM 모드로 편광된 다양한 파장의 광원에 대해서, 각각의 감지하고자 하는 화학물질에 대한 광강도의 변화를 측정하는 원리로서 각 화학물질의 조성비에 따른 굴절률 변화에 기인하고 화학 물질이 특정 파장에서 공명을 발생시키는 현상을 이용한다. 폴리머 광도파로형 SPR 센서의 구조는 기관층, 폴리머 광도파층, 완충층, 금속박막층으로 구성되고 최상부층에 측정하고자 하는 시료가 위치하며 그 구조도는 그림 1에 나타내었다.

유전층, 완충층 도파층, 기관층에 대한 TM 모드에서의 분산 방정식은 식 (1)로 표현되며, 여기서 γ_m , γ_b 는 금속과 완충층의 도파 상수이며 δ_b 는 완충층의 두께이다. 그리고 $\epsilon_m = \epsilon_r + j\epsilon_i$, n_b , n_g , n_s 는 각각 금속의 유전율, 완충층, 도파층, 기관층 각각의 굴절률을 나타내고 있다.

$$K_x T = (m+1)\pi - \tan^{-1}\left(\frac{n_s}{n_g}\right)\left(\frac{k_x}{\gamma_r}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\epsilon_m}{n_g^2}\right)\left(\frac{k_x}{\gamma_m}\right) g_y \quad (1)$$

$$g_y = \frac{1 + \left(\frac{n_b^2}{\epsilon_m}\right)\left(\frac{\gamma_m}{\gamma_b}\right)\tanh(\gamma_b \delta_b)}{1 + \left(\frac{\epsilon_m}{n_b^2}\right)\left(\frac{\gamma_b}{\gamma_m}\right)\tanh(\gamma_b \delta_b)} \quad (2)$$

$$\gamma_m = k_0 \sqrt{N^2 - \epsilon_m}, \quad \gamma_b = k_0 \sqrt{N^2 - n_b^2} \quad (3)$$

광도파에서 금속의 직접적인 손실을 없애기 위해 도파층과 금속 사이에 굴절률이 낮은 완충층을 두고, 완충층은 TE 모드의 편광 보다 TM 모드에서 더욱 효과적으로 금속 표면에 반응한다. 완충층의 두께 또한 임계 두께를 가지는데, 이러한 임계 두께의 의미는 완충층인 유전체막에 최적의 조건을 나타낸다. 광도파로층

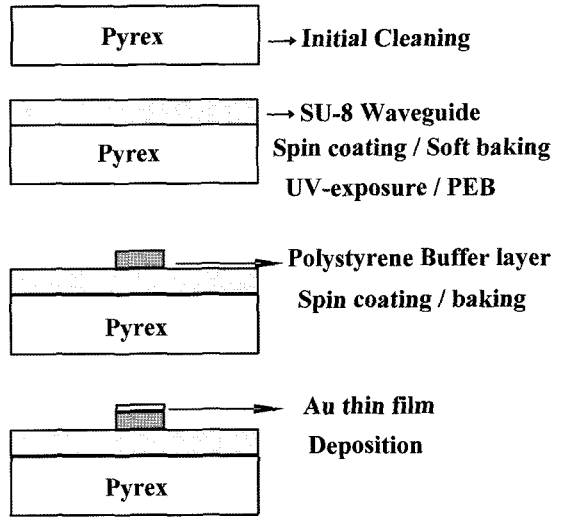
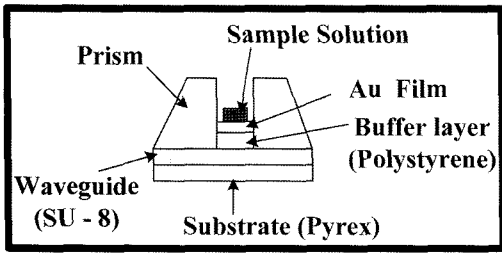


그림 2. 프리즘 결합 폴리머 광도파로형 SPR 센서 제작 순서도
Fig. 2. The fabrication flow chart of the prism coupled waveguide type SPR sensor.

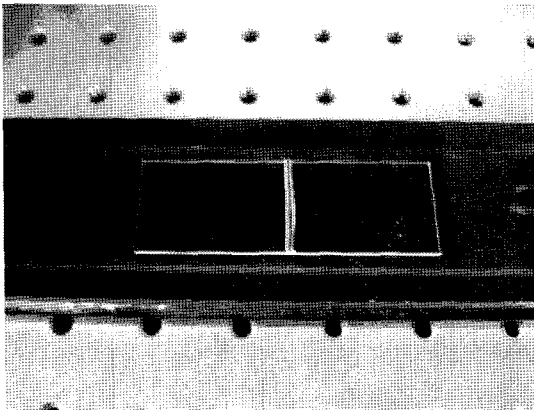
상부에 완충층을 형성하므로 하나의 유전체층의 형성을 의미하고, 그 형성된 막의 두께가 얇을수록 상부의 금속에 영향을 더욱 많이 주기 때문에 광손실이 크다. 또한 두께가 두꺼울수록 광손실이 적은 대신 금속과의 영향이 적어지므로 플라즈몬 모드가 발생하지 않아, 도파모드와의 위상 정합이 발생하지 않는다^[17].

3. 실험 및 결과

본 연구에서 제안된 폴리머 광도파로형 SPR 센서의 광도파로는 광학 투과도, 열적·화학적 안정성 및 물리적 안정도가 좋고 무기계열의 도파로 제작공정에 비해 간단하게 제작할 수 있는 SU-8 감광성 폴리머를 이용하였다. 먼저, SU-8 폴리머를 이용하여 광도파로형 SPR 센서로써의 가능성을 확인하기 위해 고굴절률의 단색광원에서의 프리즘 결합 폴리머 광도파로형 SPR 센서를 제작하였다. 소자의 제작순서는 그림 2에서와 같이 pyrex glass기판의 초기세척 과정을 거친 후 스펀 코팅법으로 1.2 μm 두께의 SU-8 #2 (Microchem 社, Su-8 2series, $n=1.595$)을 도포하여 광도파로를 제작하고^[18], 제작된 도파로 상에 금박막에 의한 도파손실을 감소시키기 위해 폴리스티렌(Polystyrene, $n=1.59$)을 스펀코팅법으로 약 0.5 μm 정도 두께로 폴리머 완충층을 형성하였다. 금박막은 열진공 증착기(FLC korea, fut-150)와 새도우 마스크를 이용하여 폭 1.5 mm, 두께 55 nm를 가지도록 증착하였다. 그림 3에 제작된 프리



(a)



(b)

그림 3. 프리즘 결합 광도파로형 SPR 센서의 구조 및 사진
(a) 센서의 구조 (b) 소자 사진

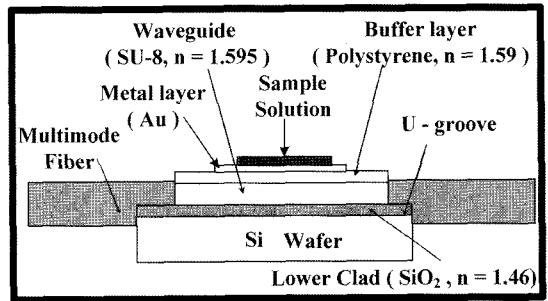
Fig. 3. The prism coupled waveguide type SPR sensor structure and photograph

(a) The structure of sensor (b) The photograph of fabricated.

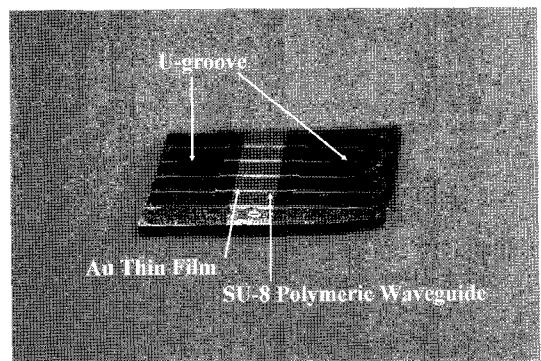
즘 결합 폴리머 광도파로형 SPR 센서의 구조와 소자 사진을 나타내었다.

제작된 센서의 공명 특성을 측정하기 위해 단일 파장 광원(532 [DPGL-3050], 632.8 [Omnichrome], 670 [Omnichrome])을 사용하였고, 각각의 광원의 파장에 대한 굴절률 변화에 따른 광 강도를 측정하였다. 그림 4는 앞에서 언급한 식 (1)~(3)을 이용하여 Matlab 프로그램으로 계산한 결과와 실험 결과이다. 단일 파장 프리즘 결합 폴리머 광도파로형 SPR 센서는 532 nm의 파장에서는 1.3978의 굴절률에서 공명이 발생했고, 632.8 nm, 670 nm 파장에서는 각각 1.49, 1.55의 굴절률에서 공명이 발생하였다.

위의 결과를 토대로 넓은 감지 영역을 가지는 SPR 센서 소자의 소형화 및 집적화를 위해 백색광원(AQ-6315A, Ando)에서의 폴리머 광도파로형 SPR 센서를 제작하였다. 하부 클래드 층으로 열산화법을 이용하여



(a)



(b)

그림 5. 광섬유 결합 광도파로형 SPR 센서의 구조 및 소자 사진
(a) 센서의 구조 (b) 소자 사진

Fig. 5. The optical fiber coupled waveguide type SPR sensor structure and photograph

(a) The structure of sensor (b) The photograph of fabricated.

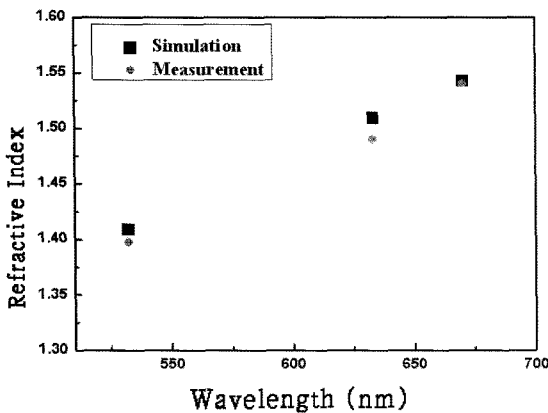
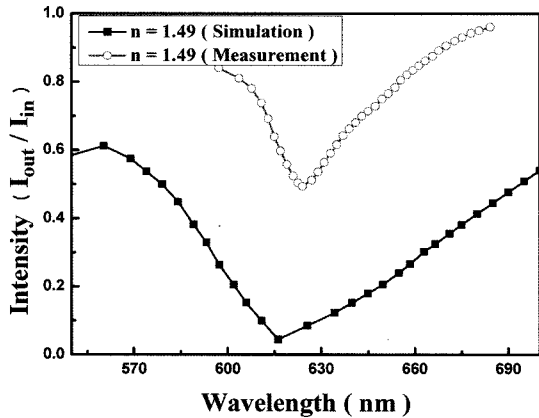
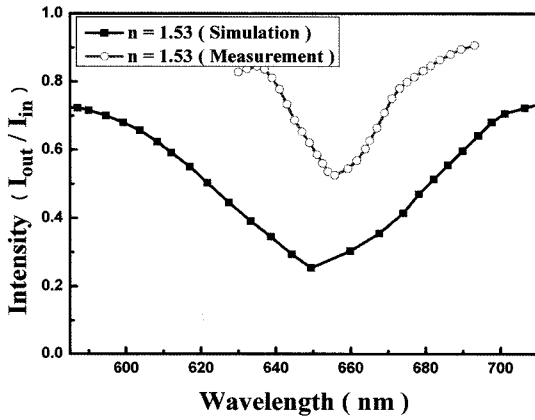


그림 4. 532 nm, 632.8 nm, 670 nm의 광원에 대한 굴절률의 변화에 따른 공명 특성

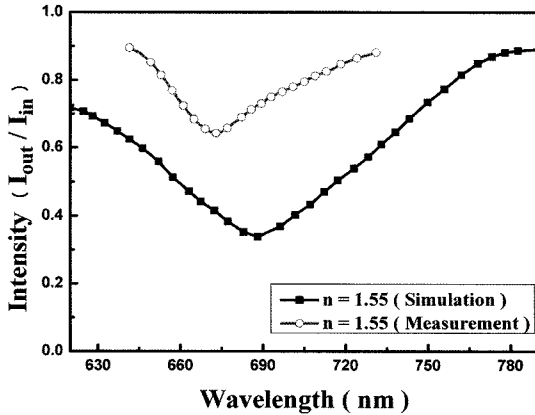
Fig. 4. The resonant characteristic for the refractive index change of 532 nm, 632.8 nm and 670 nm light source.



(a)



(b)



(c)

그림 6. 카즐리 용액의 굴절률에 대한 공명 파장의 공명 특성과 이론 특성의 비교

(a) $n=1.49$ (b) $n=1.53$ (c) $n=1.55$

Fig. 6. The comparison with experiment and simulation results of the resonance wavelength at refractive index of Cargille solution

(a) $n=1.49$ (b) $n=1.53$ (c) $n=1.55$.

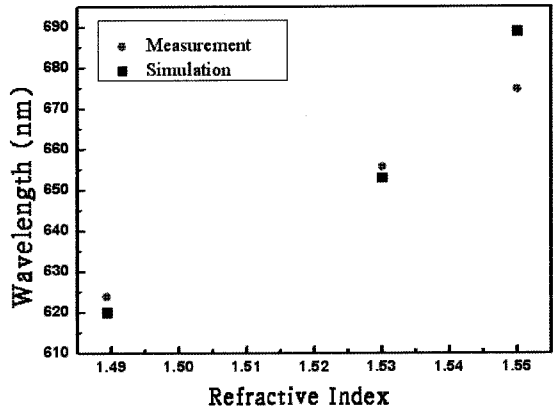


그림 7. 카즐리 용액의 굴절률에 따른 공명파장의 변화
Fig. 7. The resonance wavelength change for refractive index of Cargille solution.

1 μm 두께의 SiO_2 ($n=1.46$)박막을 형성하였고 도파로와 광섬유를 결합시키기 위해 광섬유를 고정할 V 홈을 deep-RIE 방법을 사용하여 넓이 128 μm , 깊이 58 μm 로 제작하였다. 두께 10 μm , 폭 15 μm 인 광도파로는 프리즘 결합 폴리머 광도파로형 SPR 센서와 같은 방법으로 제작하였으며, 광섬유 결합을 위해 X-Y-Z 스테이지로 광섬유를 정렬하여 U 홈에 정렬하고 자외선경화제(NOA 84, Norland, $n=1.56$)을 사용하여 광섬유를 고정시켰다. 그림 5에 제작된 다파장 광원을 이용한 광섬유 결합 폴리머 광도파로형 SPR 센서의 구조와 소자 사진을 나타내었다.

그림 6은 굴절률이 서로 다른 표준 시료인 카즐리 용액($n=1.49$, $n=1.53$, $n=1.55$)을 사용하여 굴절률 변화에 따른 공명파장이동을 측정 한 결과와 전산모사한 결과이다. 굴절률이 1.49인 표준 시료의 경우, 그림 6(a)에서와 같이 623.84 nm 지점에서 공명이 일어났으며, 굴절률이 1.53, 1.55인 그림 6 (b)와 (c)의 경우는 각각 655.72 nm, 674.64 nm의 파장에서 공명이 발생하였다. 따라서 그림 7과 같이 굴절률이 증가함에 따라 공명파장이 장파장으로 이동함을 알 수 있었다. 다파장 광원을 이용한 폴리머 광도파로형 SPR 센서의 경우는 단파장을 이용한 프리즘 결합 폴리머 광도파로형 SPR 센서와는 다르게 프리즘의 기계적인 움직임이 없어 측정 시 시간이 짧으며, 굴절률 변화에 따른 파장변화를 광섬유를 이용함으로써 실시간으로 측정이 가능하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 다파장 광원을 이용한 폴리머 광도파로형 SPR 센서를 제작하고 굴절률 표준 시료를 이용하

여 특성을 평가하였다. 다파장 광원을 이용한 광섬유 결합 폴리머 광도파로형 SPR 센서의 굴절률의 변화에 따른 공명 특성을 측정할 결과 굴절률이 1.49, 1.53, 1.55인 시료의 경우, 측정 시 각각 623.84 nm, 655.72 nm, 674.64 nm의 공명파장의 이동을 확인함으로써 프리즘 결합 폴리머 광도파로형 SPR 센서와 같이 굴절률 증가에 따라 공명파장이 장파장쪽으로 이동함을 확인하였다.

이러한 결과로부터 본 논문에서 제안된 다파장 광원을 이용한 폴리머 광도파로형 SPR 센서는 프리즘 결합형 SPR 센서와는 달리 프리즘의 기계적인 움직임이 없어 측정시 시간이 짧고 실시간 모니터링이 가능함을 알 수 있었다. 또한, 넓은 파장 대역에 대한 정보를 한 번에 얻을 수 있으므로 Y-branch 나 4-branch 등의 다채널화된 도파로를 제작한다면 동시에 여러 물질들을 측정할 수 있는 고집적 다채널화가 가능한 SPR 센서로서의 활용이 가능하리라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 대구시 차세대선도산업 지방기술혁신사업에 의하여 지원되었음. 또한 이 연구는 산업자원부 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

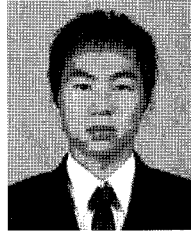
참고 문헌

- [1] N. Yoshikuni and S. Nishiumi, K., "Preparation of a tellurium ion-selective membrane electrode using an anion-exchange resin and its application to chemical analysis of industrial materials", *Anal. Chem.*, vol. 49, no. 10, pp. 791-794, 2000.
- [2] D. Zhou, H. Ju, and H. Chen, "A miniaturized glucose biosensor based on the coimmobilization of glucose oxidase and ferrocene perchlorate in nafion at a microdisk platinum electrode", *Sensors and Actuators B*, vol. 40, pp. 89-94, 1997.
- [3] J. C. Chou and Y. S. Li, "Study on temperature effect of α -Ta₂O₅ gate ISFET", *Proc. of the 4th East Asian Conference on Chem. Sensors*, pp. 420-423, 1999.
- [4] A. P. Soldatkin, J. Montoriol, W. Sant, C. Martelet, and N. Jaffrezic-Renault, "A novel urea sensitive biosensor with extended dynamic range based on recombinant urease and ISFETs", *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 19, Issue 2, pp. 131-135, 2003.
- [5] Z. Rosenzweig and R. Kopelman, "Analytical properties of miniaturized oxygen and glucose fiber optic sensors", *Sensors and Actuators B*, vol. 36, pp. 475-483, 1996.
- [6] d. W. E Molf, K. Seiler, B. Rusterholz, and W. Simon, "Design of a calcium-selective optode membrane based on neutral ionophore", *Anal. Chem.*, vol. 62, pp. 738-742, 1990.
- [7] 이수미, 고광락, 강신원, "소산장 흡수를 이용한 박막광도파로형 칼륨이온센서", *센서학회지*, 제6권, 제3호, pp. 214-220, 1997.
- [8] P. B. Lippa, L. J. Sokoll, and D. W. Chan, "Immunosensors-principles and applications to clinical chemistry", *Clinica Chimica Acta.*, vol. 314, pp. 1-26, 2001.
- [9] 엄년식, 고광락, 함성호, 김재호, 이승하, 강신원, "살모넬라와 면역글로블린의 항원-항체반응 감지를 위한 표면플라즈몬 공명형 센서시스템의 특성", *센서학회지*, 제7권, 제4호, pp. 39-45, 1998.
- [10] B. Liedberg and I. Lundstrom, "Principles of biosensing with an extended coupling matrix and surface plasmon resonance", *Sensors and Actuators B*, vol. 11, pp. 63-72, 1993.
- [11] E. Mariotti, M. Minunni, and M. Mascini, "Surface plasmon resonance biosensor for genetically modified organisms detection", *Analytica Chimica Acta*, vol. 453, pp. 165-172, 2002.
- [12] M.C. Millot, F. Martin, D. Bousquet, B. Sebillle, and Y. Levy, "A reactive macromolecular matrix for protein immobilization on a gold surface. Application in surface plasmon resonance", *Sensors and Actuators B*, vol. 29, pp. 268-273, 1995.
- [13] R. C. Jorgenson and S. S. Yee, "A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance", *Sensors and Actuator B*, vol. 12, pp. 213-220, 1993.
- [14] R.H. Ritchie, "Plasma losses by fast electrons in thin films", *Physical Review*, vol. 106, Issue 5, pp. 874-881, 1957.
- [15] N.-S. Eum, S.-H. Lee, D.-D. Lee, D.-H. Kwon, J.-K. Shin, J.-H. Kim, and S.-W. Kang, "K⁺-Ion sensing using surface plasmon resonance by NIR light source", *Sensors and Actuators B*, vol. 96, pp. 446-450, 2003.
- [16] J. Homola, I. Koudela, and S. S. Yee, "Surface Plasmon resonance sensors based on diffraction gratings and prism coupler: sensitivity comparison", *Sensors and Actuator B*, vol. 54, pp. 16-24, 1999.
- [17] G. Hanisch, R. P. Podgorsek, and H. Franke, "Origin of optical anisotropy in planar polymer waveguide", *Sensors and Actuator B*, vol. 51, pp. 348-354, 1998.
- [18] 김규진, 장수원, 강병호, 김도역, 권대혁, 김성훈, 이용현, 강신원, "광기능성 폴리머 도파로형 자외선 센서의 제작 및 특성", *센서학회지*, 제15권, 제4호, pp. 231-236, 2006.



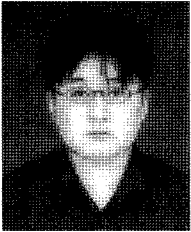
박 창 섭

- 1979년 9월 25일생
- 2005년 동의대학교 물리학과 졸업 (이학사)
- 2007년 경북대학교 대학원 물리학과 졸업 (이학석사)
- 2007년 경북대학교 대학원 센서및디스플레이공학과 박사과정
- 주관심분야 : 광학식 온도센서, 디스플레이 소자



염 세 혁

- 1978년 7월 12일생
- 2004년 계명대학교 물리학과 졸업 (이학사)
- 2006년 경북대학교 대학원 센서및디스플레이공학과 졸업(공학석사)
- 주관심분야 : 광학식 바이오센서, 디스플레이 소자



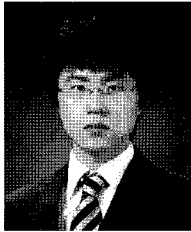
김 도 억

- 1977년 7월 14일생
- 2002년 경북대학교 전자전기공학부 졸업 (공학사)
- 2004년 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학석사)
- 2004년~현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정
- 주관심분야 : 광학식 가스센서, 디스플레이 소자, PLED



강 병 호

- 1980년 9월 14일생
- 2005년 대구가톨릭대학교 물리학과 졸업 (공학사)
- 2007년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 2007년~현재 경북대학교 대학원 전자전기컴퓨터학과 박사과정
- 주관심분야 : 광학식 가스센서, 디스플레이 소자, PLED



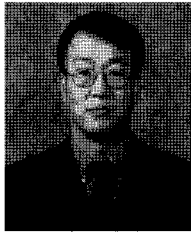
김 규 진

- 1982년 9월 3일생
- 2005년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 졸업(공학사)
- 2007년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 2007년~현재 경북대학교 대학원 전자전기컴퓨터학과 박사과정
- 주관심분야 : 광도파로, 디스플레이 소자, 나노소자, 태양전지



김 학 린

- 1998년 서울대학교 전기공학부 졸업 (공학사)
- 2000년 서울대학교 전기공학부 졸업 (공학석사)
- 2005년 서울대학교 전기공학부 졸업 (공학박사)
- 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 전임강사
- 주관심분야 : 액정디스플레이, 유연성 디스플레이, 유기 광전자 소자 및 센서



강 신 원

- 1978년 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1980년 영남대학교 전자공학과 졸업 (공학석사)
- 1993년 일본 게이오대학교 생체의공학과 졸업(공학박사)
- 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수
- 주관심분야 : 광전자기능성 소자, 바이오센서, 디스플레이, 나노소자