

광기능성 폴리머 도파로형 자외선 센서의 제작 및 특성

김규진 · 장수원 · 강병호 · 김도억 · 권대혁* · 김성훈** · 이용현*** · 강신원****†

Fabrication and characteristics of photofunctional polymer waveguide-type UV sensor

Kyu-jin Kim, Su-won Jang, Byoung-Ho Kang, Do-Eok Kim, Dae-Hyuk Kwon*,
Sung-Hoon Kim**, Yong-hyun Lee***, and Shin-won Kang****†

Abstract

Single-mode planar waveguide type UV sensor was fabricated using SU-8 and photochromic dye. Polymer waveguide was fabricated 10 μm width and 2 μm thickness for single-mode operation. The UV sensor had an absorbance with 0.0396-0.114 absorbance/mW respectively when the 5 mm sensing area was irradiated with UV for 3 sec. And sensor had a linear properties by sensing area variation. Proposed single-mode sensor had more excellent properties of UV sensitivity than other UV sensors.

Key Words : single-mode, waveguide, SU-8, spirooxazine

1. 서 론

정보통신기술(IT), 바이오기술(BT), 나노기술(NT)의 급격한 발달로 인하여 초고속, 대용량의 신호전송을 위한 소자 뿐 아니라 센서를 포함한 다기능의 소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1,2]. 특히 이러한 소자들 중 광신호를 제어할 수 있는 집적광소자는 고속성, 광대역성, 전자기적 무유도성 등의 장점을 가지고 있어 통신용 소자 뿐 아니라 물리화학, 바이오센서 등 다양한 광학적 기능을 가지는 소자를 구현하려는 연구가 꾸준히 진행되고 있다^[3,4]. 일반적으로 집적광소자는 광섬유^[5], LiNbO_3 ^[6], III-V 화합물 반도체^[7], 유리 기판^[8], 폴리머^[9] 등을 이용하여 많이 제작되고 있다. 이들 중 폴리머는 제작공정이 무기계열의 소자에 비해 비교적 간단하며, 전송대역이 매우 넓고(100 GHz), 굴절률 제

어가 용이하며, 광학계수가 큰 장점을 가지고 있다. 이러한 폴리머 광도파로는 주로 광스위치, 변조기, 광인터커백션을 위한 광전송자 및 마이크로 광학계 등 그 응용 범위가 높아지고 있다. 최근에는 PMMA, 폴리이미드와 같은 광학적인 특성이 좋은 폴리머에 전기광학, 열광학효과 등을 가지는 기능성 색소 분자를 첨가한 광기능성 소자로의 적용을 위한 연구가 진행되고 있으나 이들 소자는 주로 통신용 소자에 국한되어 있으며 센서소자 등 다양한 분야로의 응용은 아직 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 광기능성 소자 중 외부 광자극에 의해 변색현상을 가지는 spirooxazine과 폴리머 광도파로 소자를 이용하여 종래의 자외선 감응 소자가 가지는 제조공정의 복잡성, 고비용 등의 단점을 보완하고 원거리 측정이 가능한 새로운 개념의 광도파로형 자외선 센서를 제작하여 그 특성을 평가하였으며, 광에 의해 광신호 제어가 가능한 완전광학 소자(All-optical device)로의 응용 가능성을 조사하였다.

2. 동작 원리

본 연구에서 제작된 평면도파로형 자외선 센서는 그림 1에서와 같이 기본적으로 코어와 클래드 간의 소산

경북대학교 대학원 전자공학과 (Department of Electric Engineering, Kyungpook National University)

*경일대학교 전자정보통신공학부 (School of Electronic and Information Engineering, Kyungil University)

**경북대학교 섬유시스템공학과 (School of Dyeing and Finishing, Kyungpook National University)

***경북대학교 전자전기공학부 (School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University)

†Corresponding author: swkang@knu.ac.kr

(Received : January 27, 2006, Accepted : February 20, 2006)

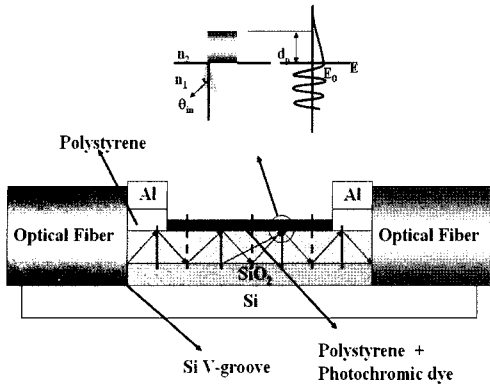


그림 1. 광도파로의 자외선 센서의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of waveguide type UV sensor.

파의 흡수 원리를 따른다.

광원이 도파로를 진행할 때 코어와 클래드의 경계면에 소산장이 형성되는데, 소산장의 침투깊이는 식 (1)에 의해 표현된다.

$$d_p = (\lambda/n_1) \sqrt{2\pi \{ \sin^2 \theta - (n_2/n_1)^2 \}^{1/2}} \quad (1)$$

침투깊이는 코어(n_1)와 클래드(n_2)의 굴절률, 입사각(θ), 입사광의 파장(λ)에 의해 결정된다.

그림 2의 (a)와 (b)는 각각 본 연구에 사용된 광변색성 색소인 spirooxazine의 분자구조와 분광 분석 특성을 나타내고 있으며 최대의 흡수 파장은 580 nm이다.

Spirooxazine은 잘 알려진 광변색성 색소로서 자외선 (365 nm)에 노출되면 그림 2(a)의 A 상태의 분자구조에서 spiro- 결합 구조가 깨어지면서 탄소 고리가 회전하게 되어 B 상태로 변화하게 되며 색상 및 굴절률이 변화하게 된다. 또한 외부 가시광 자극에 의해 원래의 분자구조로 되돌아오며, 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 I_A , I_B 는 자극의 강도를 의미하고, τ_0 는 시정수를 뜻한다.



광변색성 색소가 자외선에 의해 상태 B로 천이했을 때의 농도의 비율식은 다음과 같다^[10].

$$dN_2/dt = \beta_A I_A (N_0 - N_2) - \beta_B I_B N_2 - N_2/\tau_0 \quad (3)$$

N_0 는 전체 색소의 농도를 의미하고, N_2 는 상태 B로 천이한 색소의 농도를 의미한다. β 는 상태 A와 상태 B에서의 흡수계수를 의미한다. $\beta_A I_A N_0 \gg \beta_B I_B N_2$ 이고, $N_2(t=0) = 0$ 이라 가정하고 식 (3)을 정리하면 식 (4)와 같이 표현된다^[10].

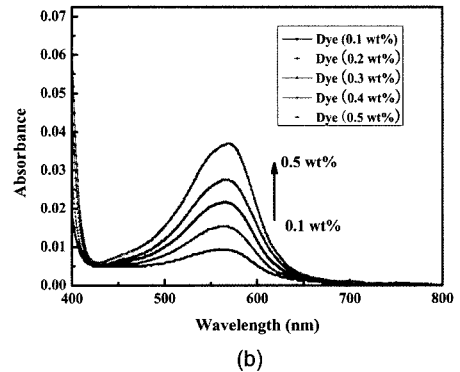
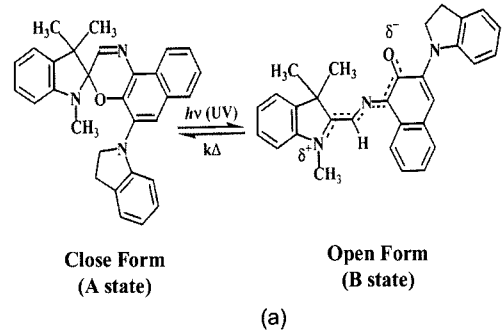


그림 2. Spirooxazine의 분자구조와 분광특성: (a) 분자구조 (b) 분광특성
Fig. 2. Molecular structure and absorbance of spirooxazine: (a) Molecular structure (b) Absorbance.

$$N_2 = N_{2s} [1 - \exp(-t/\tau_1)] \quad (4)$$

여기서 N_{2s} 와 τ_1 은 식 (5)와 식 (6)과 같이 표현되며 τ_1 은 상태 A와 상태 B의 평형 상태에 도달하는 데 걸리는 시간을 의미한다.

$$N_{2s} = \beta_A I_A \tau_1 N_0 \quad (5)$$

$$\tau_1 = 1 / (\beta_A I_A + \beta_B I_B + 1/\tau_0) \quad (6)$$

광변색성 색소가 도포된 폴리머가 도파로의 클래드로 사용되면 자외선 조사에 의해 색상이 변하게 되고, 색변화에 따른 흡수 계수 변화에 의해 특정 파장에서의 출력광 강도가 달라지게 된다. 출력광은 광변색성 색소의 색상 변화에 의해 선형적인 특성을 보이며 이는 Beer-Lambert 법칙을 따른다. 그러므로 제작된 자외선 센서 소자는 Beer-Lambert 법칙과 농도 비율방정식에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$dN_2/dI_A = t \beta_A \beta_B N_0 \exp(-t/\tau_1) \quad (7)$$

$$S = dA_A/dI_A = t L \beta_A \beta_B N_0 \exp(-t/\tau_1)$$

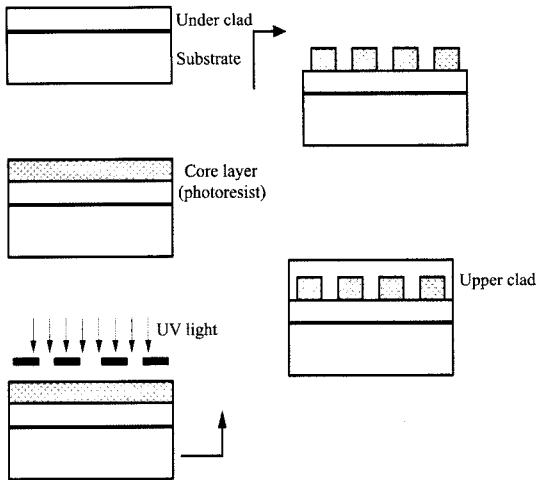


그림 3. SU-8을 이용한 도파로 제작과정
Fig. 3. Waveguide fabrication using SU-8.

여기서 $A_x = -\log(P_0/P)$ 로 표현되며 A_x 는 흡광도, P_0 는 출력광의 세기, P 는 입력광의 세기, t 는 자외선 조사시간, L 은 감지 길이, S 는 감도를 의미한다.

3. 실험 및 결과

본 연구에서 제안된 광도파로형 자외선 센서의 도파로는 광학 투과도, 열적·화학적 안정성 및 물리적 안정도가 좋으며 무기계열의 도파로 제작공정보다 간단한 장점을 가지는 SU-8 감광성 폴리머를 이용하였다. 소자의 제작순서는 그림 3에서와 같이 먼저, Si 기판에 도파로의 하부 클래드 층으로 열산화법을 이용하여 $1\ \mu\text{m}$ 두께의 SiO_2 ($n=1.46$)박막을 형성하였다. 그리고 도파로와 광섬유를 결합시키기 위해 광섬유를 고정할 V 홈을 deep-RIE 방법을 사용하여 넓이 $128\ \mu\text{m}$, 깊이 $58\ \mu\text{m}$ 로 제작하였다. 하부 클래드 위에 스피코팅법으로 $2.2\ \mu\text{m}$ 두께의 SU-8 (Microchem 社, Su-8 2series, $n=1.595$ ($\lambda=532\ \text{nm}$))을 도포하고, 노광공정을 이용하여 넓이 $10\ \mu\text{m}$ 의 도파로를 제작하였다. 도파로 위에 상부클래드를 형성하기 위해 스피코팅법을 이용하여 굴절률이 1.59인 폴리스티렌을 $3\ \mu\text{m}$ 두께로 도포하였다. 도파로는 단일 모드로 동작할 수 있도록 설계되었으며 Beam Propagation Method(BPM) 전산모사를 통해 단일모드로 동작함을 확인하였다. 또한 Al metal mask와 폴리머 건식식각법을 이용하여 감지영역을 정의하고 광변색성 색소(spirooxazine)가 분산된 폴리머를 도포하였다. 마지막으로 V 홈에 광섬유를 정렬하고 자외선경화제(NOA 84, Norland, $n=1.56$)을 사용하여

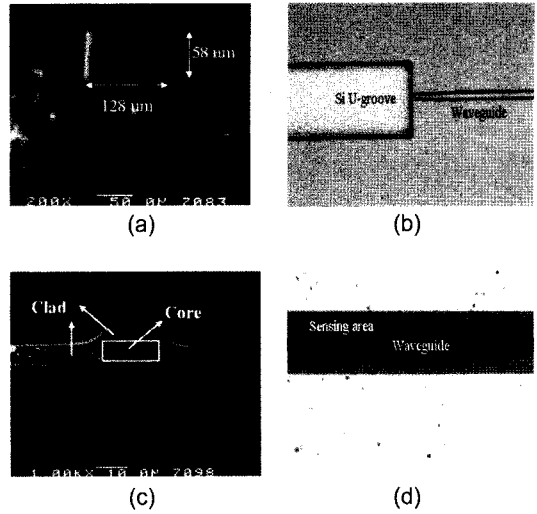


그림 4. 제작된 V-groove 및 폴리머 도파로 사진: (a) V-groove 단면 SEM 사진 (b) V-groove와 폴리머 도파로 사진 (c) 폴리머 광도파로 단면 SEM 사진 (d) 감지 영역의 사진
Fig. 4. Photograph of the fabricated V-groove and polymer optical waveguide: (a) Cross section view of V-groove (b) V-groove and polymer optical waveguide (c) Cross section view of polymer optical waveguide (d) Sensing area.

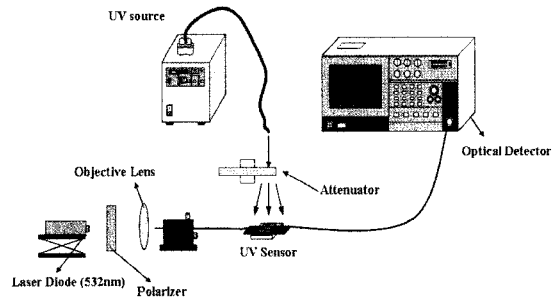


그림 5. 측정 시스템 개략도
Fig. 5. Schematic diagram of measuring system.

광섬유를 고정하였다. 그림 4에 제작된 도파로 소자의 V 홈의 단면과 폴리머 광도파로의 사진을 나타내었다.

센서의 측정시스템은 그림 5에서와 같이 광원으로는 레이저 다이오드(DPGL-3050, $\lambda=532\ \text{nm}$)를 사용하였으며, 레이저 다이오드로부터 출력된 광은 편광기와 대물렌즈 및 xyz stage를 거쳐 광섬유에 집광시켰다. 자외선 인가는 자외선 조사기(Ushio)와 광감쇄기를 이용하였으며, 출력된 광은 광검출기(8153A, HP)를 이용하였다.

그림 6의 (a)와 (b)는 spirooxazine의 감응 특성을 나

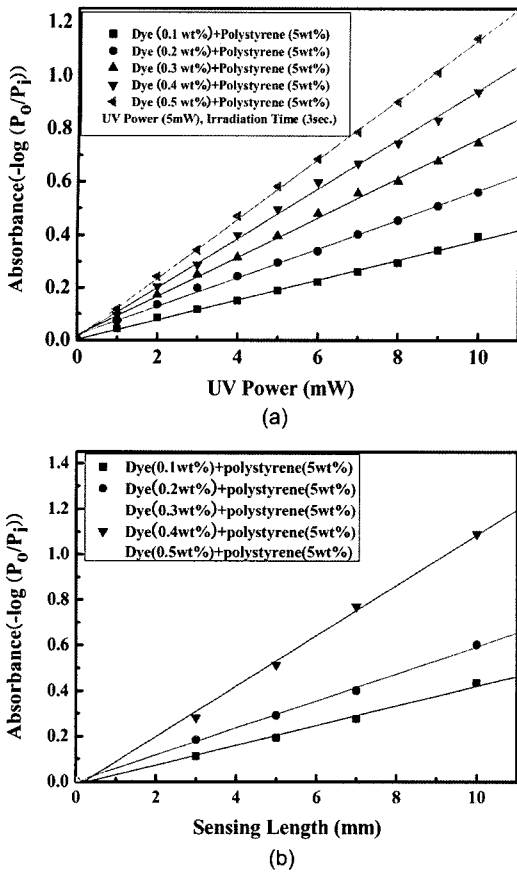


그림 6. 자외선의 강도 및 검출길이에 따른 응답 특성: (a) 자외선의 강도에 따른 응답 (b) 검출 길이에 따른 응답
 Fig. 6. Response properties of UV power and sensing length: (a) absorbance of UV power (b) absorbance of sensing length.

타내었다. 그림 6(a)에서와 같이 감응 길이가 5 mm이고, 색소의 농도가 0.1~0.5 wt%, 자외선 조사시간이 3 초 일 때 0.0395~0.114 absorbance/mW의 감도를 보였다. 그림 6(b)는 도파로의 감지막 길이와 색소의 농도변화에 따른 감응 특성을 나타낸 것으로 1 mW~10 mW의 자외선 강도 변화와 1 mm~9 mm의 감응 길이 변화에 대해 선형적인 특성을 보였으며 Beer-Lambert 법칙을 따르고 있음을 확인하였다. 그림 7은 본 연구에서 제작된 자외선 센서와 spectroscopy법과 광섬유법의 감도를 비교한 것으로 제작된 폴리머 도파로형 자외선 센서가 약 6배 정도의 높은 감응성을 보임을 알 수 있었다.

그림 8은 자외선 조사에 의한 광감쇄 특성을 나타낸 것으로 0.2 wt%의 색소농도에 대해 8 dB, 0.5 wt%일 때는 12 dB의 광감쇄를 보였으며 이러한 결과는 외부 광

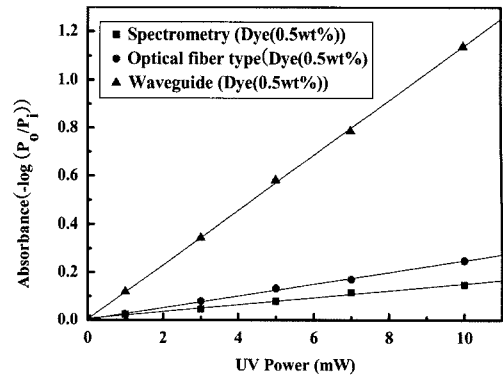


그림 7. 제작된 자외선 센서와 분광분석법의 감응 특성 비교
 Fig. 7. Sensing properties of UV sensor by variation of UV irradiation time.

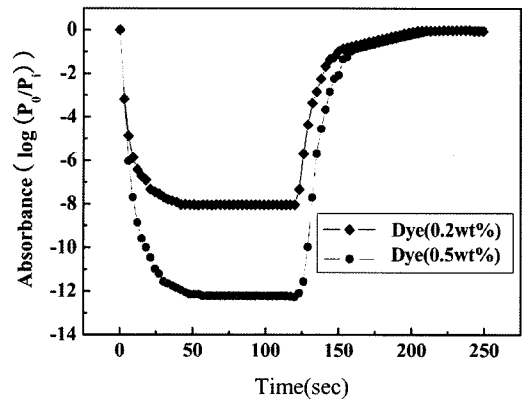


그림 8. 센서의 광감쇄 특성
 Fig. 8. Optical attenuation property of sensor.

자극(자외선)에 의해 도파되는 광의 제어 가능성이 보이는 것으로 광감쇄기 또는 광스위칭 소자로 응용이 가능할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 광기능성 유기분자와 폴리머 도파로 사이의 소산장 결합을 이용하여 자외선 감응 특성 및 통신용 소자로의 응용가능성을 조사하였다. 제작된 도파로형 자외선 센서에 자외선을 조사한 결과 자외선 강도변화에 선형적인 감응 특성을 보였으며, 감지길이가 5 mm이고, 색소의 농도가 0.1 wt%~0.5 wt%, 자외선 조사 시간이 3초일 때 감도는 0.0396~0.1140 absorbance/mW였다. 또한 종래 보고되고 있는 spectroscopy법, 광섬유법에 비해 우수한 감도를 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

광도파로에 광기능성 폴리머를 적용하면 색소농도, 감지막 길이 변화를 통해 대역폭의 감도조절이 용이하고, 원거리 감지가 가능한 장점을 가지는 고감도의 자외선 센서를 구현할 수 있음을 확인하였다. 또한 제안된 광기능성 소자의 광감쇄 특성 및 스위칭 소자의 기초 특성을 조사한 결과 광에 의해 제어가 가능한 완전 광스위칭 소자 등의 광통신소자 뿐 아니라, 광메모리 소자로도 충분히 응용이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성 사업의 연구결과로 수행되었음.

본 연구는 보건복지부 보건의료기술진흥사업의 지원에 의하여 이루어진 것임(과제고유번호 : 02-PJ1-PG1-CH08-0002).

참고 문헌

[1] I. S. Son, A. Lal, B. Hubbard, and T. Olsen, "A multifunctional silicon-based microscale surgical system", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 91, issue 3, pp. 351-356, 2001.

[2] A. Yamada, M. Sakuraba, and J. Murota, "Integration of Si p-i-n diodes for light emitter and detector with optical waveguides", *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 8, issues 1-3, pp. 435-438, 2005.

[3] B. Y. Shew, C. H. Kuo, Y. C. Huang, and Y. H. Tsai,

"UV-LIGA interferometer biosensor based on the SU-8 optical waveguide", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 120, issue 2, pp. 383-389, 2005.

[4] J. S. Xia, J. Z. Yu, Z. T. Wang, Z. C. Fan, and S. O. Chen, "Low power 2x2 thermo-optic SOI waveguide switch fabricated by anisotropy chemical etching", *Optics Communications*, vol. 232, issues 1-6, pp. 223-228, 2004.

[5] Eric UDD, *Fiber optic smart structures*, John Wiley & Sons, New York, pp. 537-562, 1995.

[6] C. Bulmer and W. Burns, "Polarization characteristics of LiNbO₃ channel waveguide directional couplers", *J. Lightwave Technol.*, vol. 1, pp. 227-236, 1983.

[7] C. Glingener, D. Schulz, and E. Voges, "Modeling of optical waveguide modulators on III-V semiconductors", *IEEE, J. Quantum Electronics*, vol. 31, no. 1, 1995.

[8] C. C. Lee and R. W. Chuang, "A dry electromigration process for fabricating deep optical channel waveguides on glass their characterization", *Materials Science and Engineering B*, vol. 111, pp. 40-48, 2004.

[9] K. Chen, P. L. Chu, and H. P. Chan, "A vertically coupled polymer optical waveguide switch", *Optics Communication*, vol. 244, pp. 153-158, 2005.

[10] W. C. Du and H. Y. Tam, "Photochromic effect and spatial light modulation in spirooxazine dye-doped polymeric films", *Optics Communications*, vol. 126, pp. 223-229, 1996.



김 규 진

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



장 수 원

- 1973년 1월 14일생
- 1994년 경일대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1996년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 2005년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
- 주관심분야 : 광도파로, 반도체 소자



강 병 호

- 1980년 9월 14일생
- 2005년 대구가톨릭대학교 물리학과 졸업 (공학사)
- 2005년~현재 경북대학교 대학원 전자공학과 석사과정
- 주관심분야 : 광학식 가스센서, 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



권 대 혁

- 1984년 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1986년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 1992년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
- 1996년~1997년 미국루이지애나주립대학 초빙교수
- 현재 경일대학교 전자정보통신공학부 교수
- 주관심분야 : 반도체제조공정, 반도체센서, 디스플레이(TFT-LCD)



김 성 훈

- 1982년 경북대학교 공업화학학과 졸업 (공학사)
- 1984년 경북대학교 대학원 공업화학학과 졸업(공학석사)
- 1987년 오사카대학교 대학원 응용화학/기능성색소화학(공학박사)
- 1987년~현재 경북대학교 공과대학 섬유시스템공학과 교수
- 주관심분야 : 기능성 색소



이 용 현

- 1975년 경북대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1977년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 1991년 충남대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
- 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수
- 주관심분야 : 박막 형성기술



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