

논문 2002-11-6-03

광기능성 폴리머의 소산장 결합을 이용한 측면연마 광섬유형 자외선 센서

김상우*, 서규원*, 윤종국*, 장수원**, 유윤식***, 이승하****, 강신원****

Side Polished Fiber Optic UV Sensor Using Evanescent Coupling of Photo-Functional Polymer

Sang-Woo Kim*, Gyoo-Won Seo*, Jong-Kuk Yoon*, Su-Won Jang**,
Yun-Sik Yu***, Seung-Ha Lee****, and Shin-Won Kang****

요 약

측면연마된 광섬유와 광기능성 색소가 분산된 평면도파로 결합기를 이용한 새로운 형태의 자외선 센서를 제작하여 그 특성을 측정하였다. 자외선 조사에 의해 유효굴절률이 변화하는 광변색성 색소가 분산된 폴리머를 평면 도파로 재료로 사용하였다. 박막 광도파로는 광변색성 색소인 스파이록사진을 사용하였다. 자외선 조사시간을 20초, 30초, 40초로 증가시켰을 경우 센서의 파장응답은 1.44nm/mW, 1.64nm/mW, 1.78nm/mW였고 1550nm 파장에서 센서의 90% 복귀시간은 100초로 나타났다.

Abstract

In this paper, we investigated a novel UV sensor using evanescent field coupling between the side polished fiber and photo-functional polymer waveguide. It was found that resonant wavelength shifts occur due to variation in the refractive index of polymer planar waveguide for its photo-functional properties on exposed UV. Spiroxazine (photochromic dye) was used as the planar waveguide. The resonant wavelength responses were exhibited at 1.44 nm/mW, 1.64 nm/mW, and 1.78 nm/mW when UV irradiations were exposed for 20 seconds, 30 seconds, and 40 seconds, respectively. The recovery time of sensor was independent of UV exposure power and 90% recovery time was 100 seconds.

1. 서 론

자외선은 우수한 살균효과를 가지고 있고, 자외선에 의한 광화학 작용을 여러 분야에 적용할 수 있는 유용성도 있는 반면에, 인체나 각종 생체조직에 조사될 경우에 피부암, 백내장, 면역체계의 약화 등을 촉진시키는 원인이 되기도 한다. 자외선 감지를 필요로 하는 분야는 천체관측⁽¹⁾, 대기관측⁽²⁾을 목적으로 하는 우주항공분야, 화재감시나 핵발전소 등과 같은 고온 환경에서의 물체감지를 필요로 하는 산업과 같이 열적 안정성이 요구되는 분야와 오존층 변화에 의한 자외선 복사를 관측하는 기상관측분야⁽³⁾, 정수처리시설의 오존량 감시와 같은 환경분야, 치료진단용 자외선량 측정과 같은 의료분야, 광반응을 이용한

* 경북대학교 센서공학과 (Dept. of Sensor Engineering, Kyungpook National University)

** 경북대학교 전자공학과 (Dept. of Electronic Engineering, Kyungpook National University)

*** 동의대학교 물리학과 (School of Science and Technology, Dongeui University)

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

<접수일자 : 2002년 5월 18일>

DNA, RNA 등의 기작을 연구하는 생물학분야⁽⁴⁾와 같이 상온에서 감지가 이루어지는 분야로 나눌 수 있다.

광섬유를 이용한 센서는 광소자의 기본적인 장점인 고속, 고감도, 높은 기계적 신뢰성, 전기적 무유도성, 원거리측정 등의 장점⁽⁵⁾을 가지고 있어 광통신기술 뿐 아니라 기초과학 및 응용과학분야의 계측에 활발히 이용되고 있다. 그러나 자외선의 유용성과 유해성을 고려하여, 자외선량 측정에 있어서의 정밀도와 우수한 감도, 그리고 빠른 응답특성 및 원거리 감지기능 등을 가지며, 낮은 가격으로 용이하게 제작할 수 있다.

본 연구에서는 광학적인 방법 즉, 측면 연마된 광섬유와 광변색성 유기재료가 혼합된 고분자 평면도파로를 결합하여, 광섬유를 이용한 센서소자의 이점을 활용하면서, 기존의 자외선 센서들이 갖고 있는 단점을 보완할 수 있는 새로운 개념의 자외선 센서를 제안하고자 한다.

2. 동작 원리

본 연구에서 제작된 센서는 그림 1과 같다. 측면이 코어 가까이 연마된 단일모드 광섬유 위에 다중모드를 가지는 평면도파로층이 형성되면 두 광 경로 사이에 소산장 결합(Evanescent Field Coupling)이 형성되어 광에너지 교환이 발생하게 된다^(6,7).

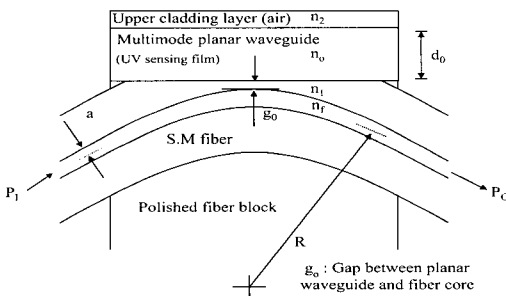


그림 1. 광섬유-평면도파로 결합기의 구조.
Fig. 1. Structure of the fiber-to-planar waveguide coupler.

평면도파로는 여러 모드를 가질 수 있으며 이 중에 광섬유 모드와 위상정합(Phase matching)조건을 만족하는 모드가 효과적인 광 결합을 일으킨다. 다중모드를 가지는 평면도파로의

m번째 모드의 유효굴절률을 찾기 위한 고유치 방정식은 다음과 같다⁽⁸⁾.

$$\frac{2\pi d_0}{\lambda} (n_o^2 - n_{eo}^2)^{1/2} = m\pi + \psi_1 + \psi_2 \quad (1)$$

여기서 m은 모드의 차수를 나타내는 정수, λ는 광의 파장, d₀는 평면도파로의 코어층 두께, n₀는 평면도파로의 코어 굴절률 그리고 n_{eo}는 m번째 고차모드의 유효 굴절률이다

광섬유-평면도파로 결합기가 광결합을 일으키기 위해서는 광섬유의 유효굴절률(n_{ef})과 평면도파로의 유효굴절률(n_{eo})이 일치해야 한다. 평면도파로의 최고차 모드가 가장 작은 유효굴절률을 가지기 때문에 광섬유의 유효굴절률과 가장 근접하게 되고 식(1)에 n_{eo} = n_{ef}을 대입하면 평면도파로 m차 모드에서 공진하는 파장(λ_m)을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_m = \frac{2d\pi(n_o^2 - n_{ef}^2)^{1/2}}{m\pi + \psi_1 + \psi_2} \quad (2)$$

한편 광섬유-평면도파로 결합기는 평면도파로의 상,하부 경계에서 TE와 TM모드의 위상차 이량이 서로 다르기 때문에 편광의존성이 유발된다. 결합기의 센서응용시 TE응답과 TM응답 중 한쪽 편광만을 관측함으로써 자외선량의 변화에 따른 파장응답을 관측할 수 있다.

광변색성(Photochromism)이라 함은 외부의 광에너지를 흡수하여 흡수파장이 다른 새로운 물질을 생성하고, 다시 광에너지나 열에 의해 처음 물질 상태로 돌아가는 현상을 말한다. 대표적인 광변색성 물질로는 Spiropyran, Spiroxazine, Chromene, Fulgide, Diarylethene 등이 알려져 있다. 이러한 광변색성 물질 중에서 Spiroxazine은 이온 계열에 의한 광변색성을 나타내는 대표적인 화합물로 알려져 있으며, 자외선 조사에 의해 중앙 Spiro환이 개환되면서 발색하는 성질을 가지고 있다. 특히 Spiroxazine은 다른 광변색성 물질에 비해 내광성이 우수할 뿐만 아니라 빠른 광 응답 특성을 나타낸다.

그림 2는 광변색성 색소의 일종인 Spiroxazine의 분자구조를 나타낸다. A상태(무색)에 광(hν)를 인가하면, 여기상태를 거쳐 열역학적으로 불안정한 B상태(유색)가 되며 B는 다른 파장의 광(hν')이나 열에너지 등에 의해 가역적으로 다시 A상태로 돌아갈 수 있다^(9,10).

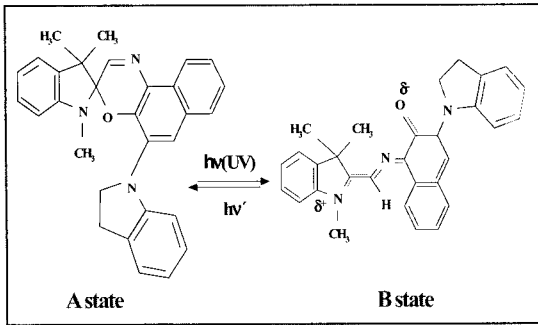


그림. 2. Spiroxazine 의 분자구조.
Fig. 2. Molecular structure of spiroxazine.

따라서 본 연구에서는 광변색성 색소가 분산된 폴리머를 평면도파로로 이용하여, 광변색성 색소의 분자구조 변화에 의해 평면도파로의 굴절률이 변하는 현상을 통해서 공명파장의 변화와 특정한 파장에서의 출력 광 강도의 변화를 측정하였다.

3. 소자 제작

광섬유의 측면을 연마하기 위해서는 공정의 용이함을 위해 광섬유 연마지지대^[11]를 필요로 한다. 측면연마 방법은 석영(Quartz)이나 실리콘등의 연마 지지대를 이용하거나 광섬유자체를 식각용액을 사용하여 화학적 반응을 통해 식각하는 방법^[12] 등이 소개되어 있지만 본 연구에서는 석영블록을 이용한 연마지지대를 사용하였다. 연마지지대의 제작은 적당한 크기의 석영블록에 일정한 곡률을 갖도록 제작된 절삭기(Mechanical slicer)를 이용하여 V홈을 형성하였으며, 이 연마지지대에 광섬유를 부착하여 연마하는 방법을 선택하였다. 광섬유의 연마는 적절한 곡률 반경과 연마깊이가 고려된 석영 V홈을 이용하여 제작한 광섬유지지대 위에 광섬유를 에폭시 수지로 접착한 후 연마가루를 이용하여 광섬유의 측면을 연마하였다. 이 때의 곡률 반경은 25cm로 유지하였다. 광섬유의 연마 방법은 연마가루와 연마패드를 동시에 이용하였다. 연마가루와 연마패드는 입도가 다른 3종류를 사용하였으며 입도가 거친 면부터 순차적으로 사용하였다. 연마과정에서 남은 클래드(잔여 광섬유)의 두께를 측정하는 방법은 연마된 광섬유 표면 위에 정합액을 떨어뜨린 후 발생하는 손실로부터 계산하는 방법이 잘 알려져 있다. 이러한 방법은 기존의 논문

을 통해 정량, 정성적^[13]으로 검증되었으며 본 연구에서도 이러한 방법을 사용하였다. 본 연구에서는 연마정도를 측정하기 위해 1.3 μ m 광원을 사용하였으며 연마된 광섬유 위에 정합액을 떨어뜨려 광의 세기변화를 측정하였다. 평면도파로는 광변색성 색소인 spiroxazine이 분산되어 있는 니트로셀룰로오즈(model : op#12, 한국케믹스(주))를 사용하였으며 연마된 광섬유 위에 스피코팅방법으로 형성하여 자외선센서의 제작을 마무리하였다.

4. 측정 및 특성

자외선센서의 특성을 측정하기 위한 장치도는 그림 3과 같다. 백색광원(ANDO社, model : AQ-4303B)과 광 스펙트럼 분석기(OSA)를 이용하여 1.2 μ m - 1.6 μ m 영역에서 온도에 의한 공진파장의 변화를 측정하였다. OSA는 5 nm 해상도를 가지고 측정하였으며 편광의존성을 배제하기 위해서 그림 3에 나타낸 바와 같이 제작된 In-line 편광기를 사용하였다. 자외선강도의 측정은 센서 위에 자외선광원을 이용하여 자외선을 조사한 후에 광 스펙트럼 분석기(Optical Spectrum Analyzer(OSA), Hewlett Packard社, mode : 86140A)를 통해 공명파장의 변화를 측정하였다. 자외선 강도조절은 자외선광원의 말단에 광 감쇠기(attenuator)를 부착하여 이 감쇠기를 조절함으로써 센서에 인가되는 자외선의 광 강도를 조절하였다.

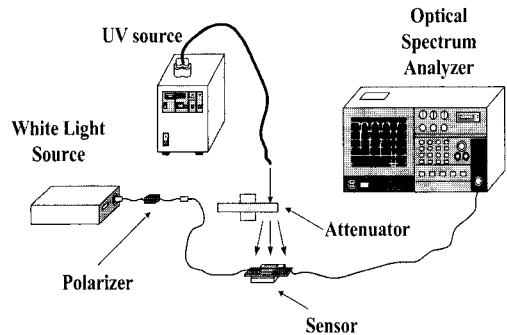


그림. 3. 측정장치도.
Fig. 3. Experimental setup.

자외선 감지막으로 사용된 스파이로사진을 측정용 셀에 스피코팅하여 박막상태로 제작한 후 자외선-가시광선 광스펙트럼 측정기 (UV-

Visible Spectrophotometer, Model : UV-1601)를 이용하여 흡광도의 변화를 측정하였다. 측정결과 스파이로사진의 activating UV 파장의 스펙트럼 범위는 450nm이하로 UV-A (320~400nm)와 UV-B(290~320nm)의 영역에 넓게 나타났다.

그림 4는 자외선의 조사강도를 1~7 mW까지 변화시키면서 흡광도의 변화를 나타내었다. 560nm파장에서 흡광도의 변화가 가장 크게 일어났으며 자외선의 조사강도가 증가할수록 흡광도가 증가함을 알 수가 있다.

광변색성 색소인 spiroxazine이 분산되어 있는 니트로셀룰로오스를 사용한 평면도파로의 굴절률은 Abbe 굴절계로 측정한 결과 1.501로 나타났다. 자외선센서의 파장응답은 자외선 조사시간을 일정하게 하고 센서에 인가되는 자외선 광세기를 변화시키면서 투과스펙트럼을 관찰하였다. 또한 자외선에 의한 감응 후, 시간경과에 따른 투과스펙트럼의 변화를 통해서, 감응 전 초기상태로의 복귀시간을 측정하였다.

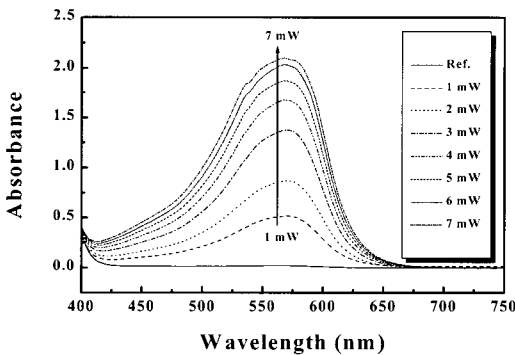


그림 4. 자외선 조사강도에 따른 자외선 감지막의 흡수스펙트럼.

Fig. 4. Absorption spectrum of UV sensing film by UV exposure power.

그림 5, 6, 7에서는 자외선 조사시간이 각각 20초, 30초, 40초 일 때의 파장응답을 나타낸다. 그림 5에서와 같이 자외선 조사시간을 20초로 고정하였을 경우에는 1.44 nm/mW의 파장응답을 보였으며 그림 6에서처럼 30초일 경우에는 1.64 nm/mW의 파장응답결과를 나타내었다. 그리고 그림 7에서와 같이 자외선 조사시간을 40초로 고정하였을 때는 1.78 nm/mW의 파장응답을 보였다. 위의 결과를 통해 조사시간

이 증가할수록 공명파장의 이동폭이 커짐을 볼 수 있었다.

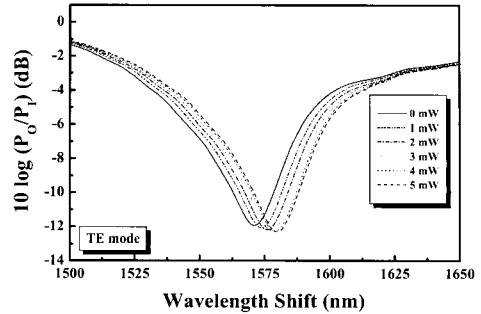


그림 5. 자외선 센서의 자외선 조사에 따른 투과스펙트럼, 자외선 조사시간 : 20초.

Fig. 5. Transmittance spectrum of UV sensor by UV exposure (UV exposure time : 20 sec).

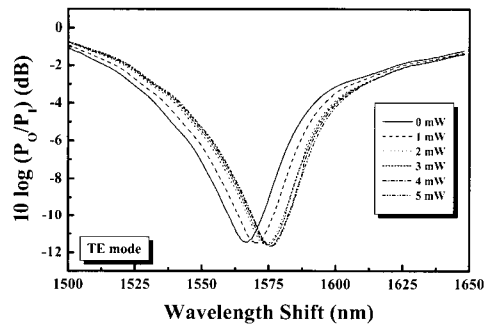


그림 6. 자외선 센서의 자외선 조사에 따른 투과스펙트럼 (자외선 조사시간 : 30초).

Fig. 6. Transmittance spectrum of UV sensor by UV exposure (UV exposure time : 30 sec).

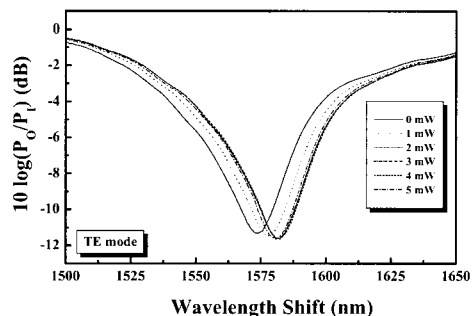


그림 7. 자외선 센서의 자외선 조사에 따른 투과스펙트럼 (자외선 조사시간 : 40초).

Fig. 7. Transmittance spectrum of UV sensor by UV exposure (UV exposure time : 40 sec).

그림 8은 제작된 센서에 자외선을 조사하였을 경우 자외선 조사강도에 따른 출력광 강도의 변화를 나타낸다. 어느 강도이상의 자외선이 조사되었을 경우에는 더 이상 출력광 강도는 변화하지 않고 포화되는 경향을 나타내었다. 그림 8에 나타난 바와 같이 자외선 조사시간이 20초 일 경우에는 자외선 조사강도가 증가함에 따라서 출력광은 순차적으로 증가하였으나, 30초 일 때는 2 mW 이상에서 출력광의 변화율이 감소하였으며, 40초 일 경우에는 거의 포화되는 결과를 나타내었다. 즉, 자외선의 조사강도가 같은 경우에는 조사시간이 길수록 출력광의 변화율도 더욱 증가함을 알 수 있다.

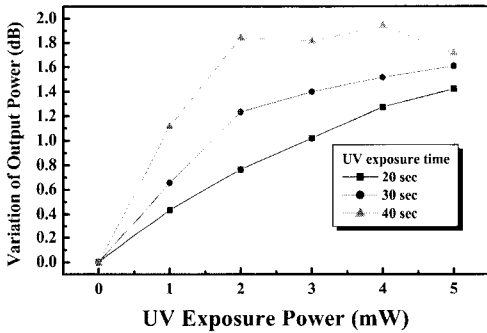


그림 8. 자외선 조사강도에 따른 출력광 강도변화 특성.

Fig. 8. Characteristic of output power variation by UV exposure time.

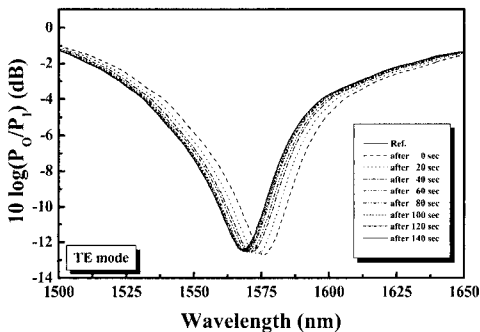


그림 9. 자외선 조사이후의 공명파장의 변화.

Fig. 9. Variation of resonance wavelength after UV exposure.

그림 9는 제작된 센서에 조사되던 자외선이 차단된 후에, 센서의 감응 초기상태로의 복귀를 나타내는 투과스펙트럼이다. 감응 후 복귀시간

의 측정을 위해 조사강도를 1 mW에서 5 mW 까지 조절하였고, 이때의 조사시간은 40초였다. 자외선의 조사강도에 따라서 공명파장의 변화폭은 차이를 보였으나, 감응 후 복귀시간은 그림 9에서와 같이 140초 이후에 초기상태로 복귀하는 결과를 보였으며, 자외선 조사강도에는 거의 의존하지 않고 같은 결과를 보였다. 그림 9는 자외선의 조사시간을 40초로 하고 조사강도를 3 mW로 했을 때의 복귀시간을 측정한 결과이다.

그림 10은 1550 nm의 광통신 파장에서의 출력 광강도변화를 통해 측정된 감응 후 복귀시간을 나타내는데 자외선 조사를 중단한 후 센서가 초기상태로 90%복귀하는데 100초의 시간이 소요되었다.

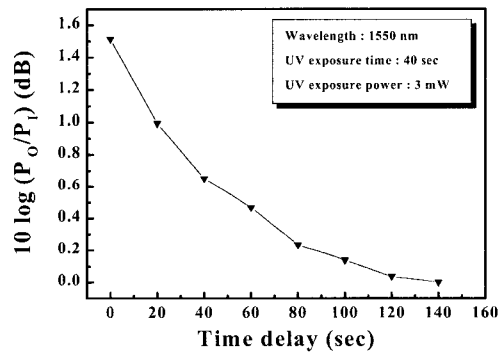


그림 10. 1550 nm 파장에서의 자외선센서의 복귀 시간.

Fig. 10. Recovery time of UV sensor at 1550 nm wavelength.

5. 결 론

본 연구에서는 측면연마된 광섬유와 광기능성 색소가 분산된 평면도파로 결합기를 이용하여 새로운 형태의 자외선 센서를 제작하고 그 특성을 측정하였다.

제작된 센서는 평면도파로 물질의 굴절률이 1.501 이었으며, 자외선의 조사시간이 20초, 30초, 40초인 경우에는 각각 1.44 nm/mW, 1.64 nm/mW, 1.78 nm/mW의 파장응답특성을 나타내었다. 자외선의 조사에 의해 반응한 후, 초기상태로 90% 복귀하는 데에는, 자외선 조사강도와는 상관없이 약 100초 정도의 시간이 소요되었다.

본 연구에서 제안한 센서는 특정시간 및 조사 강도 내에서 센서의 특성이 선형적이며 평면도 파로의 광학적 성질에 크게 의존하므로 이를 변화할 경우 센서의 감도와 측정범위를 조절할 수 있다는 이점이 있고, 광섬유를 이용함으로써 원격측정이 가능하며, 특히 광통신 파장에서의 동작이 가능하기 때문에 다른 광통신 소자 및 장비와의 접속이 가능하다는 장점을 가지므로 여러 분야에서의 다양한 응용이 기대된다.

본 연구는 정보통신부 2002 기초기술연구 지원사업에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] J. M. Topaz et al. "TAUVEX: UV space telescope", *Ultraviolet Technology IV*, Robert E. Huffman Editor, Proc. SPIE, Vol. 1764, pp. 94, 1993.
- [2] G. P. Anderson et al. "Ultraviolet O₂ transmittance : AURIC Implementation", *Ultraviolet Technology IV*, Robert E. Huffman Editor, Proc. SPIE, Vol. 1764, pp. 108, 1993.
- [3] R. Hillton Biggs et al. Editor, *Stratospheric Ozone Depletion/UV-B Radiation in the Biosphere*, NATO ASI Series I, Vol 18, pp. 3, 1994.
- [4] John Jagger, "Solar-UV actions on living cells", Praeger Publisher, 1985.
- [5] J. K. Yoon, W. G. Jung, S. W. Kim, E. S. Kim, S. H. Lee and S. W. Kang, "Pressure sensor using the side polished single mode fiber and polymer planar waveguide coupler", *J. of Korean Sensor*, Vol. 10, No.3 pp. 156~162, May 2001
- [6] D. Marcuse, "Investigation of coupling between a fiber and an infinite slab", *IEEE J. of Lightwave Tech.*, Vol. 7, No. 1, pp. 122~130, Jan. 1989.
- [7] K. P. Panajotove and Andreev Tz. Andreev, "Distributed coupling between a single-mode fiber and a planar waveguide", *J. of Opt. Soc. Am. B*, Vol. 11, No. 5, pp. 826~834, May 1994.
- [8] W. Johnstone, G. thursby, D. Modie, and K. Mccallion, "Fiber-optic refractometer that utilizes multi-mode waveguide overlay devices", *Optics Lett.* Vol 17, No. 21, pp. 1538~1540, Nov. 1992
- [9] 이상민, "광변색성 Spiroxazine 색소 박막의 광학특성", 경북대학교 대학원 석사학위논문, 1999
- [10] 김성훈, "기능성 색소", 경북대학교 출판부, 1994
- [11] A. Andreev, Bl. Pantchev, Pantchev, P. Danesh, B. Zafirova, and E. Karakoleva, "a-Si:H film on side-polished fiber as optical polarizer and narrow-band filter", *Thin Solid Films*, Vol. 330, pp. 150~156, 1998.
- [12] Tien-jung Chen and Shu-hsia Chen, "Propagation of lower-order modes in a radially anisotropic cylindrical waveguide with liquid crystal cladding", *IEEE J. of Lightwave Tech.* Vol. 13, No. 8, pp. 1698~1705, 1995.
- [13] Ssu-pin ma and Shiao-min 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, Aug. 1995.

著 者 紹 介

김 상 우

2000. 2. 동아대학교 물리학과 졸업(이학사)
 2002. 2. 경북대학교 센서공학과 졸업 (공학석사)
 2002. 3. ~ 현재 : 일본 게이오 대학교 박사과정
 주관심 분야 : 광섬유센서, 광통신소자

서 규 원

2001년 2월 경일대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 2001년 3월~현재 : 경북대학교 대학원 센서공학과 석사과정
 주관심 분야 : 광통신소자 및 광섬유센서

윤 종 국

1993. 2. 충남대학교 재료공학과 졸업 (공학사)
 1995. 2. 충남대학교 재료공학과 졸업 (공학석사)
 2002. 8. 경북대학교 센서공학과 졸업 (공학박사)
 1995. 1 ~ 1996. 12. Motorola Inc. RF Process engineer
 1997. 3. ~ 현 재 : 영천 성덕대학 정보통신계열 교수
 주관심 분야 : 광섬유형 센서, 광도파로 재료 및 설계, 광통신

장 수 원

1996년 2월 경일대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1998년 8월 경북대학교 대학원 센서공학과 졸업(공학석사)
 1998년 9월~현재 경북대학교 센서기술연구소 특례연구원
 2001년 3월~현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정
 주관심 분야 : 반도체 센서 및 집적광학센서

유 윤 식

1977년 : 부산대학교 물리교육학과(이학사)
 1979년 : 부산대학교 물리학과(이학석사)
 1992년 : 부산대학교 물리학과(이학박사)
 1982~현재 : 동의대학교 물리학과 교수
 1996년 3월~1997년 8월 : Emory대학교(미국) 교환교수
 1999년 4월~2001년 3월 : 동의대학교 기초과학 연구소 소장
 주관심 분야 : 레이저 분광학(Brillouin, Raman, PL), 강유전체 박막, 반도체 레이저, 청색형광체

이 승 하

1988 경북대학교(공학사-전자공학)
 1990 한국과학기술원(공학석사-전기 및 전자공학)
 1995 한국과학기술원(공학박사-전기 및 전자공학)
 1996~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 부교수
 주관심 분야 : 컴퓨터제어 및 피지제어

강 신 원

1978 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1980 영남대학교 전자공학과 (공학석사)
 1993 일본 게이오대학교 생체의공학과 졸업 (공학박사)
 현재, 경북대학교 전자전기공학부 부교수
 주관심 분야 : 광소자 및 반도체광학센서