

광센서의 개요와 전망

글 _ 김세기, 최병현 || 요업기술원 전자소재기술개발사업단
bhchoi@kicet.re.kr

1. 서론

광을 파장의 길이로 분류하면 X선, 자외선, 가시광선, 적외선으로 나눌 수 있으나, 일반적으로 광이라 함은 380~780nm의 파장을 가진 가시광선을 말하며, 본 고에서 다룰 광센서는 가시광센서에 국한하기로 한다.

빛이 사물에 닿으면 반사·흡수·투과·산란 등 다양한 현상이 일어난다. 사람이 사물을 본다는 것은 주로 그 물체에서 반사된 빛의 강도와 파장(색)을 검출하고 있다고 할 수 있다. 빛에는 직진성이나 고속, 전기신호를 전달하는 리드선과 같은 매체가 불필요하다는 성질이 있어서 파장이나 위상 등에 많은 정보를 실을 수가 있다. 그 때문에 빛을 이용한 계측, 통신, 정보처리 등이 매우 넓은 범위의 산업분야에서 이용되게 되었다. 빛의 신호를 전기적인 신호로 변환하는 광센서는 그 광기술을 지지하는 중요한 요소로 발전해 왔다.

광센서에는 실리콘(Si)을 필두로 하는 여러 반도체가 이용되고 있다. 미약한 광신호를 고효율로 포착하기 위해서는 반도체의 조성이나 소자구조가 정밀하게 제어되지 않으면 안 된다. 또한 눈의 시세포와 같이 빛에 의한 화상을 검출하는 광이미지 센서에서는 많은 센서소자를 집적화할 필요가 있다. 따라서 이들을 실현시킬 수 있는 반도체 공정기술의 진전과 함께 광센서가 발전해 왔다고 해도 과언이 아니다. 청각, 후각, 미각, 촉각과 시각과 같은 사람의 오감을 대신하는 많은 종류의 센서 중에서 사람의 눈이 가진 기능과 비교했을 때, 광센서는 이론적으로도 기술적으로도 현재 가장 진보된 단계에 있다고 할 수 있다.

본 고에서는 실리콘 포토다이오드와 CdS 광전도형 센

서를 중심으로 하는 광센서와 최근 카메라폰 수요의 폭발적 증가에 따른 연구개발 경쟁이 치열한 이미지센서의 개요 및 전망에 대하여 다루기로 한다.

2. 본론

광센서는 물질이 광자를 흡수한 결과 전자를 방출하는 광전효과(photoelectric effect)에 의하여 광에너지를 전기 에너지로 변환하는 일종의 트랜스듀서로서, 작동원리적으로 이러한 광전효과와 결과 반도체의 접합부(junction)에 전압이 나타나는 광기전력효과(photovoltaic effect)를 이용하는 포토다이오드, 포토트랜지스터, 태양전지, 칼라 센서와 같은 광기전력형 센서와 조사된 광에너지에 의하여 캐리어가 발생하여 전도성이 변화하는 광전도효과(photoconductive effect)를 이용하는 CdS 등과 같은 광전도형 센서로 크게 나눌 수 있다. 또한 포토다이오드는 그 물리적 구조에 따라서 PN 포토다이오드, PIN 포토다이오드, Schottky 포토다이오드, Avalanche 포토다이오드로 나눌 수 있다. 또한 포토다이오드는 응답특성, 측광가능 범위 등의 대부분에서 뛰어난 특성을 가지지만 출력전압(전류)이 매우 낮다는 결점으로 인하여 그 출력특성을 향상시키기 위하여 트랜지스터의 베이스(base)에 포토다이오드를 접속한 포토트랜지스터나 포토다이오드와 OP 앰프를 일체화한 포토IC와 같은 일종의 포토센서모듈도 있다.

2.1 광기전력형 실리콘(Si) 포토다이오드

실리콘(Si)의 상온에서의 밴드갭(bandgap) 에너지는 1.12eV로서, 실리콘 포토다이오드는 파장 200~1100nm의

Table 1. 광센서의 분류

분류	특징	주용도	
광전형	PN	- 자외선-적외선에 이르는 광범위의 파장감도 - 입사광량에 대한 직선성 우수 - 미약광에도 고감도 - 응답특성이 PIN형에 비해 열세	조도계, 카메라 노출계, 연기센서, 분광광도계 등
	PIN	- 고속응답성 - 온도특성이 PN형에 비해 열세	광통신, 레이저디스크, 광 리모컨 등
	Schottky	- 자외-가시광선의 단파장감도	자외선센서 등
	Avalanche	- 광전류 증폭작용 - 낮은 암전류 - 고속응답	광파이버 광통신, 고속광 계측, 미약광 계측
광전도형	CdS(Se, Te)	- 큰 광전류 - 느린 응답속도 - No junction	조도계, 카메라 노출계 등

자외선-적외선의 넓은 파장대역에 대응하는 반도체 소자이다. 또한 $0.1\text{pW}/\text{cm}^2$ - $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 의 광량을 감지할 수 있으며, 광신호에 대한 직선성이 양호하고 고속응답, 저잡음, 소형경량 등의 장점을 가지고 있다.

그러나 낮은 출력신호로 인하여 실리콘 포토다이오드 연구개발의 주된 방향은 이를 극복하면서 검출 정밀도의 향상, 소형화, 고기능화, 저소비 전력화 등이 일반적인 기술개발 동향이다.

2.1.1 PN 포토다이오드 vs. PIN 포토다이오드

PN 포토다이오드는 일반적으로 Fig. 1과 같은 구조를 가지며 그 등가회로는 Fig. 2에 나타난 것처럼 p-n접합을 나타내는 다이오드와 병렬로 접합용량(junction capacitance, C_j)과 단락저항(shunt resistance, R_{sh}), 직렬저항(R_s)으로 이루어진다.

특히, Fig. 3과 같이 P층과 N층에 Intrinsic의 고저항의 공핍층(depletion layer)을 구성하여 접합용량(junction

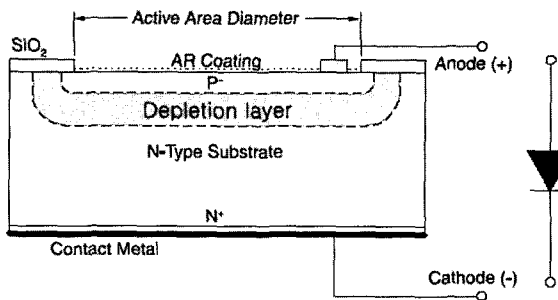


Fig. 1. PN 포토다이오드의 구조

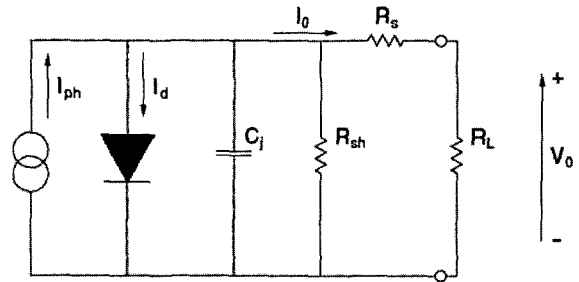


Fig. 2. Si 포토다이오드의 등가회로

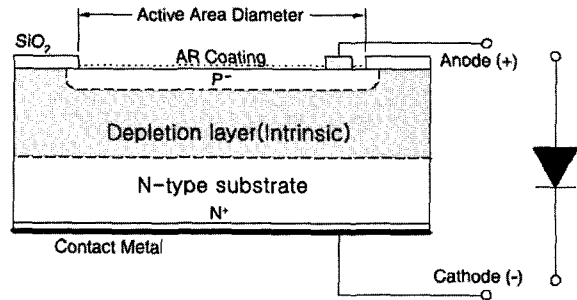


Fig. 3. PIN 포토다이오드 구조

capacitance)을 낮춰서 응답특성을 개선한 것이 PIN 포토다이오드이다. 공핍층은 하나의 평행 캐패시터로서 작용을 하며 그 용량은 공핍층의 두께에 반비례한다. 이 용량은 포토다이오드의 응답속도를 결정지으며, 역바이어스(reverse bias)와 다음과 같은 관계에 있다.

$$C_j = \frac{\epsilon_{si}\epsilon_0 A}{\sqrt{2\mu\rho(V_A + V_{bi})}} \quad (1)$$

여기서, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14}\text{F}/\text{cm}$ (permittivity of free space)

- $\epsilon_{Si} = 11.9$ (dielectric constant of Si)
- $\mu = 1400\text{cm}^2/\text{Vs}$ (mobility of the electrons at 300K)
- ρ = resistivity of Si
- V_{bi} = built-in voltage of Si
- V_A = applied bias

Shunt resistance(R_{SH})는 포토다이오드의 $V = 0$ 에서의 I-V 곡선의 기울기로서 포토다이오드의 노이즈전류를 나타내며, 실제로는 10-1,000Mohm의 값을 가지며 실험적으로는 $\pm 10\text{mV}$ 의 전압을 인가하여 전류값으로부터 저항을 구한다. 고성능의 포토다이오드를 얻기 위해서는 보다 높은 Shunt resistance(R_{SH})를 요한다.

직렬저항(R_S)는 bias가 없는 상태($V=0$)에서의 광기전력의 직선성을 나타내며, 다음과 같은 관계가 있다.

$$R_S = \frac{(W_S - W_d)\rho}{A} + R_C \quad (2)$$

- 여기서, W_S = thickness of substrate
- W_d = width of depletion layer
- A = diffused area of the junction
- ρ = resistivity of substrate
- R_C = contact resistance

이상적인 포토다이오드는 직렬저항을 가지지 않지만, 실제로는 10-1,000ohm의 값을 나타낸다.

2.1.2 Schottky 포토다이오드

Fig. 4에서와 같이 n형 반도체의 표면에 약 150 Å 두

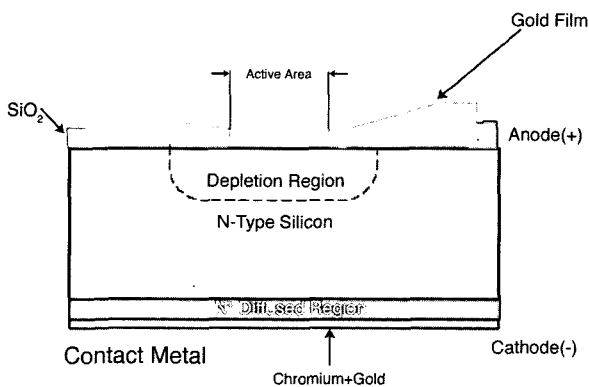


Fig. 4. Schottky 포토다이오드의 구조

께의 Au 증착막을 형성하여 Schottky효과에 의한 PN접합을 구성한 것으로, 표면으로부터 접합부까지의 거리가 짧은 관계로 자외선-가시광선의 단파장에서 감도를 가진다.

2.1.3 Avalanche 포토다이오드

p-n접합에 역바이어스(reverse bias)를 가하여공핍층 내에 고전계를 형성하여 광 캐리어가 가속되어 물질 내 원자에 차례로 충돌하여 2차 캐리어를 생성하는 사태(avalanche)현상을 이용한 것으로서 극히 미약한 광신호를 검출할 수 있으며, 접합용량도 낮아서 응답특성이 뛰어나다.

2.2 광전도형 CdS

광전도형 센서가 포토다이오드과 다른 점은 p-n 접합부가 없다는 것으로서 일종의 광에 대한 가변저항으로 볼 수 있으며, 출력신호는 Fig. 5에서 알 수 있듯이, 비교적 인가전압과 무관하게 조사된 광량에 비례한다.

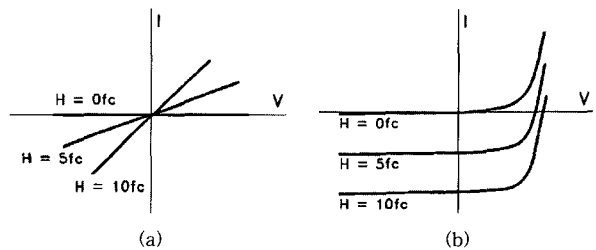


Fig. 5. 광전도형 센서(a)와 포토다이오드(b)의 I-V 특성.

특히 CdS는 Fig. 6에서 나타낸 바와 같이, 인간 눈의 시 감도와 유사한 520nm에서 피크파장을 가지며, 저가격으로 제조가 가능하고 월광이나 직사광선과 같은 극단적인 미약광이나 매우 강한 광량에서도 감응할 수 있고 광의 유무에 따른 4-5승에 이르는 광범한 저항변화(wide dynamic range), 내노이즈성, AC/DC 회로에서의 사용의 용이성, 40-500V에 이르는 작동전압의 용이성 등이 Si 포토다이오드에 비하여 우수한 점으로 들 수 있으나, 2006년 7월 1일부터 적용되는 RoHS(특정유해물질 사용 제한)에 따라서 Si 포토다이오드를 중심으로 Pb, Cd-free 대체품 개발이 이루어지고 있다.

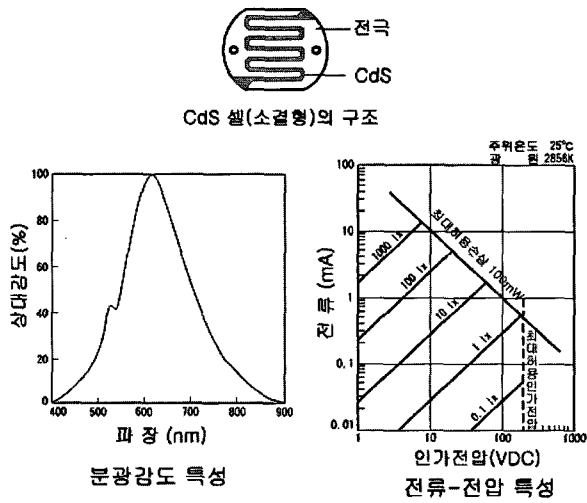


Fig. 6. CdS의 분광감도 및 전류-전압 특성.

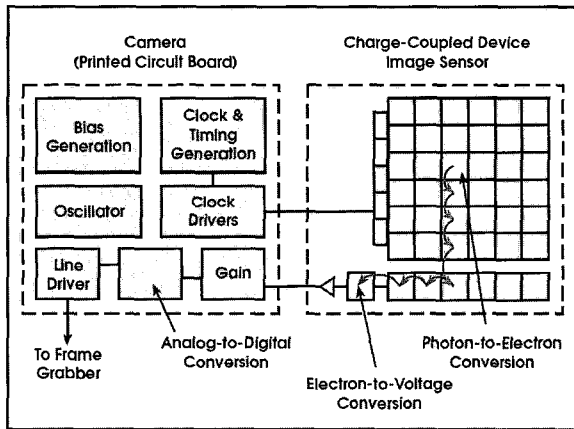


Fig. 7. CCD에서의 빛 신호 변환 메커니즘.

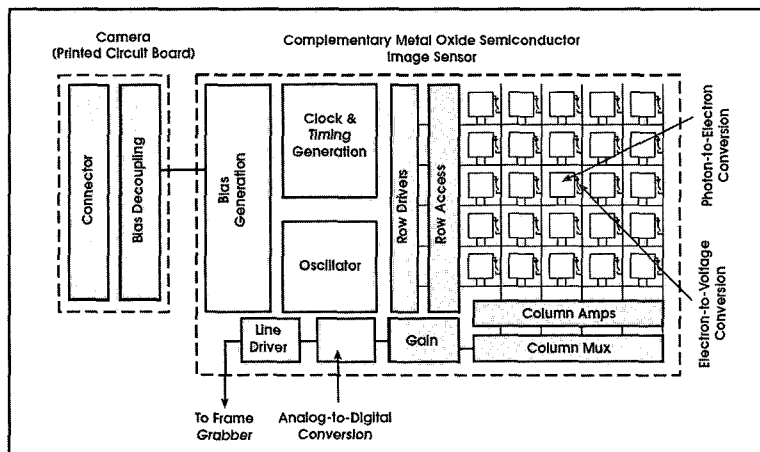


Fig. 8. CMOS에서의 빛 신호 변환 메커니즘.

2.3 이미지센서 - CCD vs. CMOS

기존센서는 기초 물리량을 전기신호로 변환하는 데 비해, 이미지 센서는 영상, 물질의 종류, 위치좌표 등을 디지털 데이터로 변환하는 일종의 시스템 센서이다. 이미지 센서는 크게 CCD(Charge Coupled Device)와 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor), CIS (Contact Image Sensor)로 나눌 수 있다. 이 중에서 CIS는 선형 이미지 센서로 저해상도 스캐너 등에 사용되고 있으며 그다지 큰 시장이 형성되어있지 않으며 카메라폰과 디지털카메라 용도로 CCD와 CMOS가 시장을 양분하고 있으며, CCD와 CMOS는 이미지를 디지털화하는 두 가지 다른 기술로 이루어진 디바이스이다.

CCD는 1969년 Bell Lab.의 Boyle과 Smith에 의해 개발된 반도체 활상소자로서, 그 화질의 우수성으로 현재까지 이른바 ‘전자의 눈’으로 이미지센서의 주류를 이루고 있다. CCD는 크게 포토다이오드로 이루어진 광전변환부, 전하전송부와 신호출력부로 구성되며, Fig. 7에 나타낸 바와 같이 입사된 photon은 모든 픽셀(pixel)에서 전하로 축적되고 출력부로 전송되어 전압으로 변환되어 아날로그신호로 출력된다. 모든 픽셀은 수광부로 활용이 될 수 있고 출력의 균일성도 높다.

CMOS에서는 Fig. 8에서와 같이 모든 픽셀에서 전하전압 변환이 이루어지고 디지털화 회로가 같이 구성되어 chip은 디지털 비트(bit)를 출력한다. 그러나 이러한 기능

Table 2. CCD와 CMOS의 특징과 성능 비교

		CCD	CMOS
특징	Signal out of pixel	전하	전압
	Signal out of chip	전압(아날로그)	비트(디지털)
	System Noise	낮다	높다
	System Complexity	높다	낮다
	Sensor Complexity	낮다	높다
성능	Responsivity	보통	양호
	Dynamic range	높다	보통
	Uniformity	높다	보통
	Speed	비교적 양호	높다
	Windowing	제한적	가능

부의 구성은 필연적인 수광부의 감소를 초래하고 각 픽셀에서 변환이 일어나므로 출력신호의 균일성도 떨어지는 단점이 있으나, 집적화(one chip)가 용이하고 낮은 소모전력을 구현할 수 있으며 시스템 소형화도 용이하다는 장점이 있다. Table 2에 CCD와 CMOS의 특징과 성능을 비교하여 요약하였다.

3. 전망

신속하고 정확한 처리를 요하는 현대사회에 있어서 공업용이나 가전용 전자기기 등의 고도화에 따른 광소자의 활약은 그 어느 때보다도 절실하게 요구되고 있다. 예를 들어, Kyocera의 리블버 스타일 휴대폰 'A5305K'에 채용되고 있는 TDK의 가시광센서는 주위의 밝기에 따라서 액정디스플레이의 휘도를 자동조정하는 목적으로 이용되고 있다. 종래의 아몰퍼스 가시광센서는 출력전류가 작으므로 소자를 크게 하거나 증폭회로를 사용할 필요가 있어서 소형화의 장애가 되어왔으나 박막트랜지스터로 회로를 일체형성함으로써 소형이면서도 고출력의 광센



Fig. 9. 휴대폰(Kyocera A5305K)에 채용된 LCD 휘도 자동조절용 가시광 센서.

서를 실현하여 적용하였다.

이미지센서 시장은 휴대 전화, 차량, 지문 인증 등에 대한 응용이 순조로운 시작을 보이며, 향후 크게 성장할 것으로 예상된다.

2003년 이후 카메라폰의 수요가 폭발적으로 증가하여 이미지 센서의 최대 수요는 디지털 카메라에서 카메라폰으로 전환되었고, 향후 카메라폰의 화소수가 증가하면서 기존 디지털 카메라의 기능을 포함할 것으로 예상된다.

CMOS 센서가 휴대전화에서 CCD를 추월하기까지는 예상보다 시간이 걸릴 것으로 보인다. CCD 이미지센서와 똑같은 사이즈와 품질을 실현하기 위해서는 고도의 기술이 필요하기 때문이다. 몇 가지 응용분야에서 어느 정도 점유를 확보하기까지는 앞으로 수년의 시간이 필요할 전망이다.

해의 제조업체는 4개 진영으로 분류된다. CCD 분야에

Table 3 이미지센서의 국내외 시장 규모 및 전망

		(단위 : 천개, 억원)								
		2000	2001	2002	2003	2004	2006	2008	2010	2012
세계	몰량	NA	83,000	124,000	185,000	250,000	375,000	485,000	602,000	829,000
	금액	NA	11,454	16,801	20,124	23,400	28,665	34,859	41,061	47,263
	점유율	NA	¹⁾ 2.6%	4%	32%	30%	35%	40%	45%	50%
국내	몰량	NA	12,000	18,000	27,000	40,000	64,100	87,800	115,000	248,900
	금액	NA	683	1,121	1,823	2,022	2,810	3,659	4,624	7,271
	점유율	NA	²⁾ 17%	25%	48%	50%	60%	70%	80%	90%

※ 출처 : Techno System Research 2003, ETNews 2004(IDC)

※ 1) 센서 전체에서 국내업체가 생산한 센서의 점유율을 추정.

※ 2) (국내생산량/수출량)/국내시장규모 로 추정.

서 선두를 달리고 있는 일본의 대형 전자제품 생산기업 (소니, 마쯔시타, 샤프)과 Agilent, TSMC, UMC, STMicroelectronics로 대표되는 대형 반도체 제조업체/회사. Omnivision 등의 팹리스 공급자. 이러한 기업들은 CMOS에 대해 강점을 지닌다. 후지필름, 코닥, 캐논 등은 다양한 틈새시장, 특수 사양의 비즈니스에 강점을 가진 기업이다. 그러나 많은 전문가들이 지적하듯이, 현재 국내외에 중소기업들을 포함한 많은 기업이 생산을 하고 있으나 3-4년 후에는 상당한 정리가 필요할 것이다.

참고문헌

1. Dereniak, E.L., and D.G. Crowe, Optical Radiation Detectors, Wiley, New York, (1984).
2. Shinobu Onoda, Toshio Hirao, Jamie Stuart Laird, Tsuyoshi Okamoto, Yoshiharu Koizumi and Tomihiro Kamiya, *Nucl. Instr. and Meth. B* **231**, 497 (2005).
3. D. Renker, *Nucl. Instr. and Meth. A* **486** 164 (2002).
4. Hiroshi Miyakawa, Yosuke Tanaka and Takashi

Kurokawa, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **86** 253 (2005).

5. M. S. Shur, S. Rumyantsev, R. Gaska, B. Q. Wei, R. Vajtai, P. M. Ajayan and J. Sinius, *Solid State Electronics*, **46** 1417 (2002).
6. A. Keffous, M. Siad, A. Cheriet, N. Benrekaa, Y. Belkacem, H. Menari, W. Chergui and A. Dahmani, *Applied Surface Science*, **236** 42 (2004).
7. H. Ohyama, K. Takakura, K. Shigaki, S. Kuboyama, S. Matsuda, E. Simoen and C. Claeys, *Microelectronic Engineering*, **66** 536 (2003).
8. Herfried Wiczorek, *Radiation Measurements*, **33** 531 (2001).
9. J. Pierre Moeglin, Bernard Gautier, Rene Joeckle and Dominique Bolmont, *Optics and Lasers in Engineering*, **28** 317 (1997).
10. R. Martins and E. Fortunato, *Optical Materials*, **5** 137 (1996).
11. Volkan Kursun, Vivek K. De, Eby G. Friedman and Siva G. Narendra, *Microelectronics Journal*, **36** 863 (2005).
12. Strategies Unlimited, Image Sensor Market Review and Forecast-2003.

●● 김 세 기



- 1987년 연세대학교 요업공학과 공학사
- 1990년 연세대학교 대학원 요업공학과 공학석사
- 1995년 동경대학교 응용화학과 공학박사
- 1996-1997년 동경대학교, 객원연구원
- 1998-2003년 동국산업 신제품개발팀, 팀장
- 2003-2004년 세종대학교 나노기술연구소, 선임연구원
- 2003년-현재 한국센서학회 편집위원
- 2004년-현재 요업기술원 전자소재기술개발 사업단, 선임연구원

●● 최 병 현



- 1981년 연세대학교 요업공학과 공학사
- 1983년 연세대학교 요업공학과 공학석사
- 1990년 아주대학교 재료공학과 공학박사
- 1981-1991년 국립공업시험원, 공업연구사
- 1992-1999년 국립공업기술원, 공업연구관
- 2000년 현재 요업기술원 전자부품소재 본부장, 사업단장
- 2001-2002년 한국세라믹학회, 운영위원
- 2000-2004년 세종대 신소재공학과, 겸임교수
- 2004-현재 한국센서학회, 편집위원
- 2005.1-현재 한국결정성장학회, 감사