

논문 95-4-1-01

n-ITO/p-PSL 이종접합형 광검출 소자의 제조 및 그 특성

김항규, 신장규, 이종현, 송재원

Fabrication of n-ITO/p-PSL heterojunction type photodetectors and their characteristics

Hang-Kyoo Kim, Jang-Kyoo Shin, Jong-Hyun Lee, and Jae-Won Song

요 약

ITO(indium tin oxide)와 PSL(porous silicon layer)을 이용하여 n-ITO/p-PSL 이종접합형 광검출 소자를 실리콘 기판상에 제조하였다. 실리콘 질화막과 Ni-Cr/Au를 이용하여 선택적으로 양극반응을 시켰으며, 각 소자를 메사구조로 정의하여 소자간을 격리하였고 ITO를 이용하여 소자의 열화문제를 억제시켰다. 제조된 소자에 백색광을 0~3000Lux까지 변화시키면서 얻은 I-V 특성으로부터 광전류가 입사된 광량에 선형적으로 비례함을 알았다. 제조된 소자는 약 -40V의 역방향 바이어스까지 안정되게 동작하였으며 암전류 밀도가 약 40nA/mm²으로 나타났다. Xe램프를 이용하여 400nm~1100nm까지 파장을 변화시키면서 측정된 결과 600nm~700nm사이에서 약 0.6A/W의 광응답을 나타내었다. 또한 제조된 소자는 5주 경과 후에도 거의 특성의 변화가 관찰되지 않았다.

Abstract

n-ITO/p-PSL heterojunction photodetector have been fabricated on the Si wafer by using ITO(indium tin oxide) and PSL(porous silicon layer). They were anodized selectively by using silicon nitride and Ni-Cr/Au and were passivated by using ITO as well as being isolated by using mesa structure. With white light from 0 to 3000 Lux, the photocurrent varied linearly with incident light intensity. The reverse characteristics of fabricated devices were very stable up to a bias voltage of -40V and dark current density was about 40nA/mm². When the device was exposed by Xe lamp whose wavelength range from 400nm to 1100nm, the maximum photo responsivity was about 0.6A/W between 600 and 700nm. Variation of the characteristics of fabricated devices after 5 weeks was negligible.

I. 서론

최근에 양극반응 또는 화학적 식각(etching) 공정에 의해 형성된 다공질 실리콘이 상온에서 가시광을 방출한다는 사실이 발표된 이래로 이를 이용한 광전소자의

제작에 많은 연구가 활발히 진행되고 있다^[1-3]. 이러한 다공질 실리콘은 양자효과(quantum effect)를 나타내며 실효에너지갭이 증가하고 가시광 방출특성을 나타낸다. 또한 표면적의 증가로 말미암아 표면에서의 광흡수율이 높기 때문에 빛에 대한 높은 감도를 가지는 우수한 광검출 소자의 제조가 가능하다^[4-5]. 그러나 양극반응에 의해 형성된 다공질 실리콘은 화학적 세척이나 사진식각공정 등에 의하여 손상을 받기 쉬우며 공기중에서 화학적으로 불안정하여 시간이 지남에 따라 제조된 소자의 특성에 열화(degradation)가 발생하게 된다^[6-7].

경북대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics, Kyungpook Nat'l Univ.)
<접수일자 : 1995년 1월 7일>

*본 연구는 경북대학교 센서기술연구소의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

따라서 기존의 다공질 실리콘을 이용한 소자의 제작은 이러한 화학적 세척이나 사진식각 등의 공정을 피하기 위해 양극반응을 마지막 공정으로 하였다.

1992년에 L. Z. Yu^[6-7]은 금속/반도체/금속 (metal/porous silicon/metal : MSM)구조를 이용하여 수평 구조의 광도전형(photoconductive) 광검출 소자를 제조하였다. 제조된 소자의 경우, 0.5A/W이상의 응답도를 나타냈으나 -10V의 역방향 바이어스에서 약 1 μ A의 높은 암전류를 나타냈으며 특성에 열화가 발생하였다. 또한 C. Tsai^[5]은 다공질 실리콘을 형성한 후 급속 열처리 산화(rapid thermal oxidation : RTO)공정을 행하여 RTOPS 구조의 광검출 소자를 제작하였다. 이 소자는 형성된 다공질 실리콘의 표면에 얇은 산화막이 형성되어 제조된 소자의 특성에 열화가 발생하는 것을 억제하였으나, 다공질 실리콘을 실리콘 전면에 걸쳐 형성하여 소자 격리(isolation)에 대한 문제가 대두되었다. 또한 N. M. Kalkhoran^[8]은 1993년에 n-ITO/p-PSL 이종접합형 광검출 소자를 제조하였으나 역시 다공질 실리콘을 실리콘 전면에 걸쳐 형성하여 소자 격리에 대한 문제가 발생하였다. 또한 형성된 다공질 실리콘의 일부만 n-ITO(indium tin oxide)로 보호하므로써 공기 중에 노출된 다공질 실리콘에 의해 제조된 소자의 특성에 열화가 발생하였다.

이와 같이, 기존의 다공질 실리콘을 이용한 광전소자가 가지는 공정상의 제한 요소와 특성에 열화가 발생하는 문제점을 해결하고자 본 실험에서는 p형 실리콘 기판에 실리콘 질화막과 Ni-Cr/Au를 증착하여 선택적으로 다공질 실리콘층을 형성하였으며, 표면에 n-ITO를 증착시켜 n-ITO/p-PSL 이종접합형 광검출 소자를 제조하고 전기적 특성을 살펴보았다.

II. 실험 및 측정

1. 실험

그림 1은 광검출 소자의 제조공정 순서도를 나타낸다. 먼저 저항률이 15~25 $\Omega \cdot \text{cm}$ 인 4 inch p-type (100) Si 웨이퍼를 가지고 초기세척공정을 거친 후 LPCVD를 이용하여 전면에 실리콘 질화막을 약 1400 Å 정도 증착시키고 800 $^{\circ}\text{C}$ 에서 어닐링 하였다. 그 후 시료를 2 \times 2 cm^2 의 크기로 자른 후 앞면을 photoresist로 보호하고 뒷면의 실리콘 질화막을 제거하였으며, 뒷면에 저항성 접촉을 형성하기 위해 붕소를 도핑 하였다.

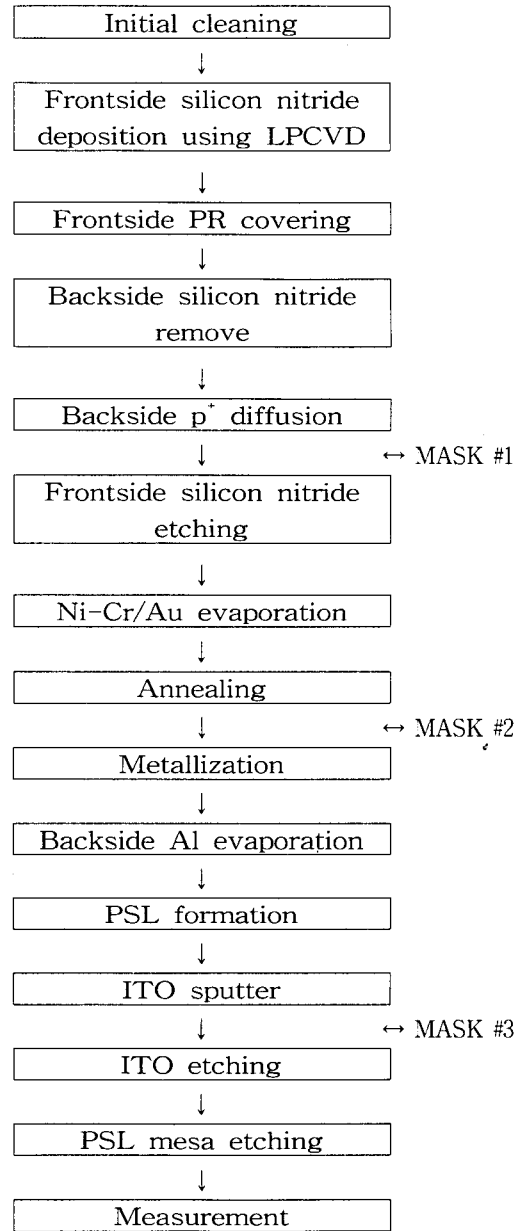


그림 1. n-ITO/p-PSL 이종접합형 광검출 소자의 제조 공정

Fig. 1. Fabrication process for n-ITO/p-PSL heterojunction photodetector

이 후 1번 mask를 이용하여 PSL영역을 형성하고자 실리콘 질화막을 식각하였으며, 앞면에 Ni-Cr(80:20) 및 Au를 in-situ 공정으로 진공증착하고, 330 $^{\circ}\text{C}$ 에서 45분간 어닐링 하였다. 그 후 2번 mask로 금속화 공

정을 하였으며, 양극반응시 균일한 전장을 얻기 위해 뒷면에 Al을 증착하였다. 그 후 48% HF내에서 약 30~100mA/cm²의 전류하에서 양극반응을 하였다. 이렇게 형성된 다공질 실리콘이 공기중에 노출되는 것을 방지하기 위해 r.f. magnetron sputter를 이용하여 ITO를 증착하였다. 그 후 3번 mask를 이용하여 ITO를 식각하였으며 150℃에서 10여분간 어닐링 하였다. 이렇게 제조된 소자의 단면도를 그림 2에 나타내었으며 칩 배치도를 그림 3에, ITO의 증착조건과 그 특성을 표 1에 나타내었다.

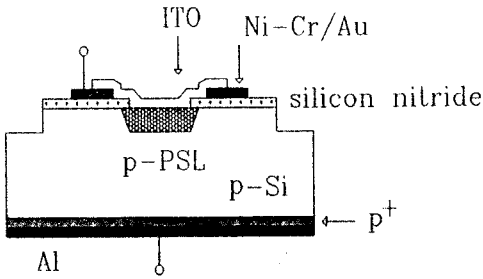


그림 2. n-ITO/p-PSL 이종접합형 광검출 소자의 단면도
Fig. 2. Cross sectional view of n-ITO/p-PSL heterojunction photodetector

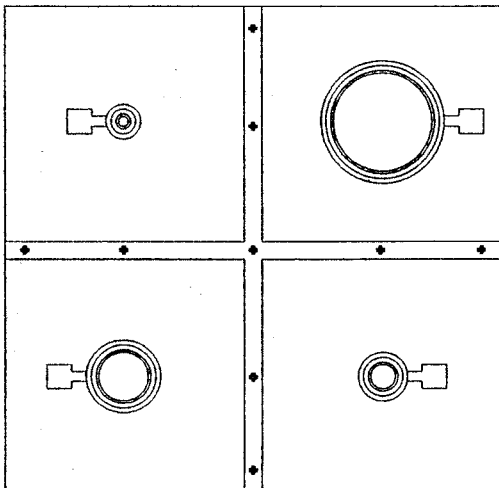


그림 3. 칩 레이아웃
Fig. 3. Chip layout

2. 측정

제조된 소자의 I-V 특성은 HP4145B parameter analyzer를 이용하여 측정하였다. 광특성을 측정하기

표 1. ITO 증착조건 및 그 특성
Table 1. ITO deposition condition and its characteristics

target comp.	In ₂ O ₃ : SnO ₂ = 90% : 10%
reaction gas	Ar (99.3%) + O ₂ (0.7%) = 49.65[sccm] + 0.35[sccm]
pressure	2.9 × 10 ⁻³ [torr]
sub. temp.	200℃
r.f. power	240 [W]
resistivity	6.6 × 10 ⁻³ (Ω-cm)
sheet resistance	330 (Ω/□)
thickness	2000 Å
transmittance	≈ 90 %

위해 백색광을 dark~3000Lux까지 1000Lux step으로 변화시켜 가며 측정하였으며, Xe램프를 이용하여 400nm~1100nm까지 파장을 변화시켜 가며 측정하였다. 증착된 ITO의 특성은 α-step과 four point probe 및 자외선 분광 광도계를 이용하여 각각 두께와 저항률, 투과율을 측정하였다. 그림 4에 측정장치의 개략도를 나타내었다.

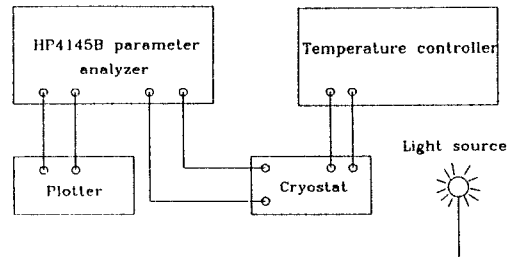


그림 4. 측정 장치 개략도
Fig. 4. Schematic of measurement system

III. 결과 및 검토

그림 5는 양극반응을 하지않고 제조된 n-ITO/p-Si 이종접합 다이오드의 I-V 특성이다. 순방향 특성은 우수한 정류성 특성을 나타내었으나 역방향 특성은 누설 전류가 상당히 크게 나타났다. 3000Lux의 빛을 인가하

였을 때에도 빛에 대한 감도가 거의 나타나지 않음을 볼 수 있었다. 그림 6은 약 $55\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 전류밀도 하에서 형성시킨 다공질 실리콘층 위에 ITO를 증착시킨 n-ITO/p-PSL 이중접합형 다이오드의 I-V 특성이다. 그림에서 볼 수 있듯이 역방향 암전류 밀도가 약 $40\text{nA}/\text{mm}^2$ 로 대단히 작게 나타났다. 또한 시료에 백색 광을 입사시키고 역방향 바이어스를 인가하였을 때 광전류(photocurrent)가 발생하기 시작하였다. 이는 빛에 의해 생성된 전자-정공쌍이 역방향 바이어스 인가시 전자는 n-ITO로 확산되어 가며 정공은 항상 벌크 실리콘으로 드리프트 되면서 발생한 것이다^[9]. 또한 역방향 전압이 약 1V까지 증가함에 따라 광전류의 크기가 급속히 커졌으며 바이어스가 1.2V를 초과하였을 때 포화되기 시작하였다. 제조된 소자에 dark~3000Lux까지

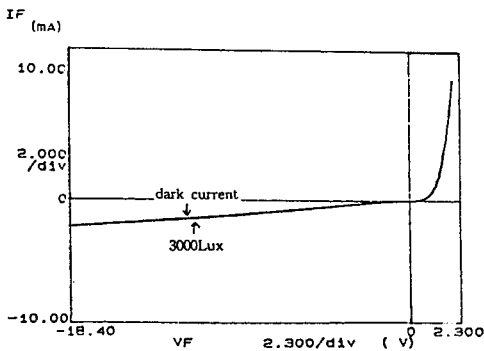


그림 5. n-ITO/p-Si 이중접합 다이오드의 I-V 특성
Fig. 5. I-V characteristics of n-ITO/p-Si heterojunction diode

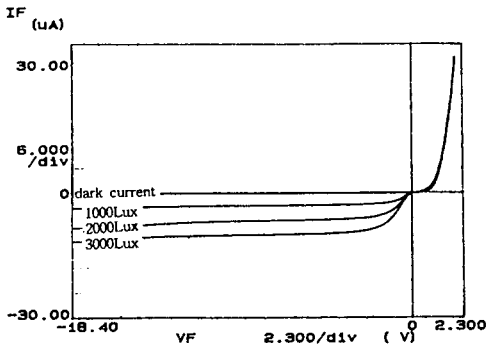


그림 6. n-ITO/p-PSL 이중접합형 광검출 소자의 I-V 특성 (d=1mm)
Fig. 6. I-V characteristics of n-ITO/p-PSL heterojunction photodetector (d=1mm)

1000Lux의 step으로 광량을 변화시키면서 얻은 결과 광전류가 입사되는 빛의 세기에 거의 선형적으로 비례함을 볼 수 있었다.

그림 7에 소자직경에 따른 광전류의 변화를 나타내었다. 일반적으로 광전류는 빛을 입사했을 때 흐르는 전류와 암전류의 차이로 주어지므로 3000Lux의 빛을 입사시켰을 때 흐르는 전류와 암전류의 차이로 부터 얻었다. 반응면적이 클수록 입사되는 빛에 의해 생성된 전자-정공쌍이 많아 빛에 대한 광전류가 더 크게 나타남을 볼 수 있었다.

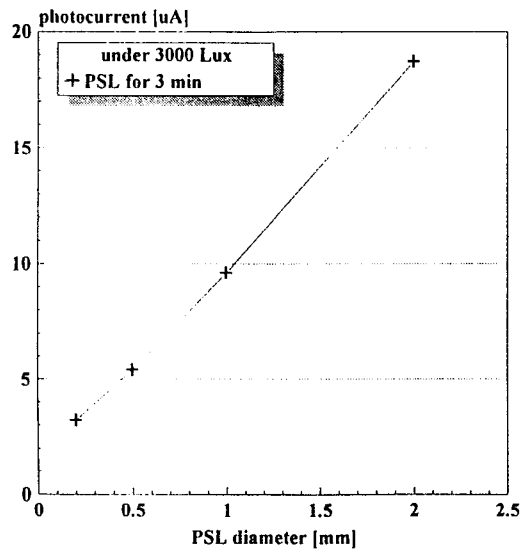


그림 7. 소자직경에 따른 광전류의 변화
Fig. 7. Variation of photocurrent with device diameter

그림 8은 온도에 따른 광전류의 변화를 면적에 따라 나타내었다. 여기서 반응면적이 클수록 증가된 표면적으로 말미암아 광전류가 많이 흐름을 알 수 있었다. 또한 온도가 증가함에 따라 광전류 역시 증가함을 볼 수 있었는데, 이것은 다공질 실리콘 내에서 캐리어의 전도(transport) 현상이 thermal activation에 의한 hopping mechanism에 의해 지배되기 때문인 것으로 생각된다.^[10]

그림 9는 제조된 소자에 -5V의 역방향 바이어스를 인가한 후 Xe 램프를 이용하여 파장을 400nm~1100nm까지 변화시키면서 얻은 그래프이다. 파장의 변화는 20nm짜리 Oriel bandpass 필터를 이용하였으며 볼록렌즈에 광을 집속시킨 후 소자에 입사시켰다. 각 파장에 대한 전력을 power meter를 이용하여 측정하

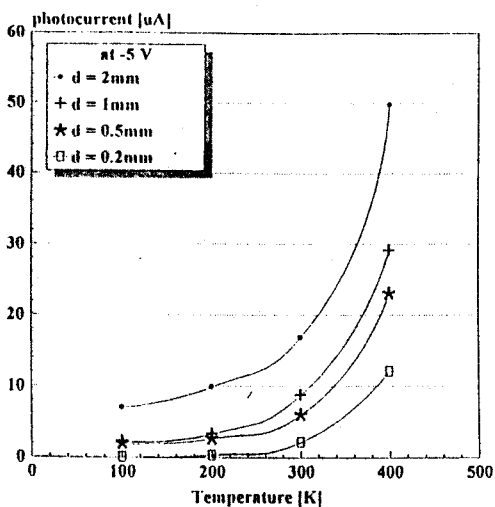


그림 8. 온도에 대한 광전류의 변화
Fig. 8. Variation of photocurrent with temperature

였으며 이를 정규화시켜 얻었다. 그림에서 볼 수 있듯이 가시광 영역인 약 400nm~760nm의 파장에 대해선 응답도가 높게 나타나고 있었으나 파장이 짧을수록 또는 길어질수록 광응답 특성이 현저히 감소하고 있었다. 일반적으로 입사되는 광원의 파장이 길어질수록 다공질 실리콘층에서 빛의 투과깊이가 깊어지게 되므로, 파장이 짧으면 금속(ITO)과 PSL 계면부에 입사광이 집중되어 계면 근처에서 발생되는 표면재결합에 의해 광특성이 감소하게 되며, 파장이 길어지게 되면 입사된 빛에 의해 생성된 캐리어들이 Si 내부에서 재결합되어 광전류에 기여하는 양이 작아지기 때문이라고 생각된다^[11]. 그리고 그림 9로부터 형성된 다공질 실리콘층의 광학적 에너지 갭은 약 1.6eV임을 알 수 있었다. 또한 약 1.35eV 근처에서도 작은 피크를 볼 수 있었는데 이로부터 다공질 실리콘 내에 서로 다른 2개의 에너지 갭이 존재함을 볼 수 있었으며 이는 L. Z. Yu^[6] 등이 제시한 값과 거의 일치함을 알 수 있었다.

그림 10은 소자 제조 후 시간에 따른 광전류와 암전류를 나타낸 것이다. 5주 경과후의 암전류는 제조된 직후의 결과와 비교해 볼 때 약간 증가하였으나, 입사광량이 3000Lux일때 광전류는 거의 변화하지 않았음을 알 수 있었다. 이로 보아 ITO가 다공질 실리콘 표면의 화학적 변화 및 그로 인한 I-V 특성의 열화를 억제함을 알 수 있었다.

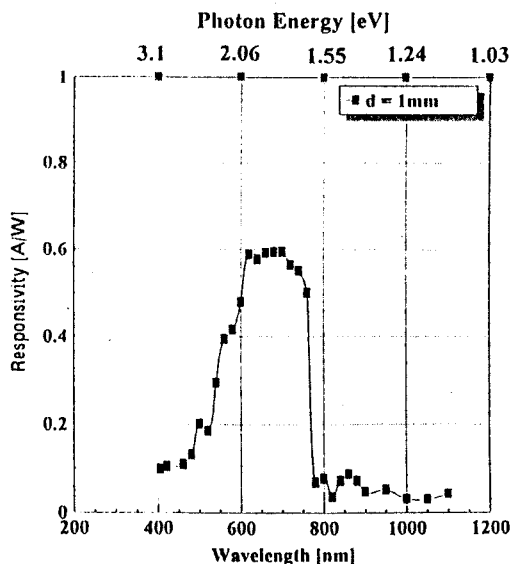


그림 9. 입사광의 파장에 따른 응답도의 변화
Fig. 9. Variation of responsivity with wavelength of incident light

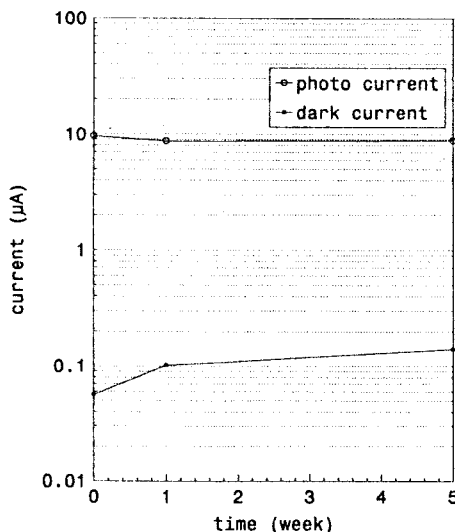


그림 10. 광검출 소자 전류의 시간적 변화 (d=1mm, -5V bias, 3000Lux).
Fig. 10. Variation of photodetector current with time (d=1mm, -5V bias, 3000Lux).

IV. 결론

p형 실리콘 기판을 이용하여 n-ITO/p-PSL 이중

접합형 광검출 소자를 제조하였다. 동일한 실리콘 기판 상에 선택적으로 양극반응을 시켜 면적이 서로 다른 광검출 소자를 제조하였다. 이전의 방법들은 다공질 실리콘의 기계적, 열적 취약성 때문에 공정의 최종 단계에서 다공질 실리콘을 형성하였으나 본 연구에서는 먼저 다공질 실리콘을 선택적으로 형성한 후 투명한 ITO를 증착시켜 보호하고 이후의 화학적 공정 및 사진식각공정을 행하였다. 또한 제조된 다공질 실리콘이 공기중에서 산화가 되는 것을 억제하여 소자의 열화문제를 개선하였으며, 각 소자를 메시구조로 정의하여 소자간의 격리를 실현하였다.

제조된 소자의 광전류는 입사되는 빛의 세기에 선형적으로 비례함을 볼 수 있었다. 또한 역방향 특성이 -40V까지 매우 안정되게 나타났으며 암전류 밀도가 약 40nA/mm^2 로 나타났다. 그리고 Xe lamp를 이용하여 $400\text{nm}\sim 1100\text{nm}$ 까지 파장을 변화시키며 광을 입사시켰을 때 가시광 영역인 $600\sim 700\text{nm}$ 에서 약 0.6A/W 의 높은 응답도를 나타내었다. 또한 제조된 소자는 5주 경과후에도 거의 광특성의 변화가 관찰되지 않았다. 이로 보아 ITO가 다공질 실리콘 표면의 화학적 변화 및 그로 인한 특성의 열화를 억제함을 알 수 있었다.

V. 참고 문헌

- [1] L. T. Canham, "Silicon quantum wire array fabrication by electro chemical and chemical dissolution of wafers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, no. 10, pp. 1046-1048, 1990.
- [2] V. Lehmann, U. Gösele, "porous silicon formation : A quantum wire effect," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 58, no. 8, pp. 856-858, 1990.
- [3] K. H. Jung, S. Shie, T. Y. Hsieh, and D. L. Kwong, "Intense photoluminescence from laterally anodized porous silicon," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, no. 25, pp. 3264-3266, 1991.
- [4] J. P. Zheng, K. L. Jiao, and H. S. Kwok, "Highly sensitive photodetector using porous silicon," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, no. 4, pp. 459-461, 1992.
- [5] C. Tsai, K. -H. Li, and J. C. Campbell, "Rapid-thermal-oxidised porous silicon photodetectors," *Electron. Lett.*, vol. 29, no 1, pp. 134-136, 1993.
- [6] L. Z. Yu, and C. R. Wie, "Study of MSM photodetector fabricated on porous silicon," *Sensors and Actuators A*, 39, pp. 253-257, 1993.
- [7] L. Z. Yu, and C. R. Wie, "Fabrication of MSM photoconductor on porous Si using micromachined silicon mask," *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 10, pp. 911-913, 1992.
- [8] N. M. Kalkhoran, "porous silicon-based optoelectronic devices : processing and characterization," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 283, pp. 365-370, 1993.
- [9] H. Paul Maruska, F. Namavar, and N. M. Kalkhoran, "Theory of porous silicon injection electroluminescence," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 283, pp. 383-388, 1993.
- [10] N. Koshida and H. Koyama, "Optoelectronic characterization of porous silicon," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 283, pp. 337-342, 1993.
- [11] T. Ozaki, M. Araki, S. Yoshimura, H. Koyama, and N. Koshida, "Photoelectronic properties of porous silicon," *J. Appl. Phys.*, vol. 76, no. 3, pp. 1986-1988, 1994.

著 者 紹 介

김 항 규

『센서학회지 제3권 제1호』 논문 94-3-1-04, p. 31 참조.
현재 경북대학교 대학원 전자공학과 석사과정.

신 장 규

『센서학회지 제3권 제1호』 논문 94-3-1-04, p. 31 참조.
현재 경북대학교 전자공학과 부교수.

이 종 현

『센서학회지 제1권 제1호』 논문 92-21, p. 194 참조.
현재 경북대학교 전자공학과 교수.

송 재 원

『센서학회지 제4권 제1호』 논문 95-4-1-04, 참조.
현재 경북대학교 전자공학과 부교수.