

광 루미네스스 다공질 실리콘을 이용한 새로운 자외선 센서

論 文

50C-9-4

A Novel Ultraviolet Sensor using Photoluminescent Porous Silicon

閔 南 基* · 高 主 烈** · 姜 喆 求***
(Nam-Ki Min · Joo-Yul Ko · Chul-Goo Kang)

Abstract - In this paper, a novel ultraviolet sensor is presented based on a photoluminescent porous silicon. Porous silicon layer was formed by chemical etching of surface of pn junction in a HF(48%)-HNO₃(60%)-H₂O solution. Incident ultraviolet(UV) light is converted to visible light by photoluminescent porous silicon layer, and then this visible light generates electron-hole pairs in the pn junction, which produces a photocurrent flow through the device. In order to maximize detection efficiency, the peak sensitivity wavelength of the pn junction diode was matched with the peak wavelength of photoluminescence from porous silicon layer. The porous silicon ultraviolet sensor showed a large output current as UV intensity increases and but very low sensitivity to visible light. The detection sensitivity of porous silicon sensor was calculated as 2.91mA/mW. These results are expected to open up a possibility that the present porous silicon sensor can be used for detecting UV light in a visible background, compared to silicon UV detectors which have an undesirable response to visible light.

Key Words : ultraviolet(UV) sensor, photoluminescence, porous silicon

1. 서 론

자외선 센서는 대기관측, 해 반응로, 페인트 도장, 반도체 공정 등에서 자외선의 세기를 측정하는 시스템과 화학 및 환경분야에서 사용되는 각종 분석장비 등에 광범위하게 채용되고 있다[1,2]. 현재 여러 형태의 자외선 검출기가 상용화되어 있을 뿐만 아니라, 새로운 재료를 이용한 자외선 센서의 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

현재 가장 널리 사용되고 있는 반도체 자외선 센서 재료는 실리콘이다. 실리콘 자외선 센서는 기존의 CMOS나 BJT 공정 기술을 이용하므로 제작비용이 저렴하고, 주변회로의 집적화에 유리한 특징을 가지고 있지만, 에이징 효과(aging effect)와 가시광에 대한 높은 감도를 갖는 단점이 있다. 실리콘은 자외선 파장에 대한 흡수계수가 매우 크기 때문에 광학적 거리(optical length)가 수십 Å에 지나지 않아서 기존의 실리콘 자외선 센서로는 가시광에 대한 감도를 제거하고 자외선만 측정하는 것이 곤란하다[3]. 가시광에 대한 응답성을 제거하고 더 높은 온도에서 사용하기 위해서 SiC, III-V 화합물 반도체(GaN, AlN), 다이아몬드 등을 이용한 자외선 센서가 연구되고 있으나, 이들 반도체 자외선 검출기

는 실리콘에 비하여 제조 공정이 복잡하고 주변회로의 집적화가 곤란하며, 고가로 된다.

본 논문에서는 다공성 실리콘(porous silicon)의 광 루미네스스(photoluminescence ; PL) 현상을 이용한 새로운 개념의 자외선 센서를 제시하고자 한다. 본 다공질 실리콘 자외선 센서는 기존의 반도체 기술로 제작된 pn 접합 표면에 화학적 에칭 방법으로 다공질 실리콘 층을 형성시킨 구조이다. 자외선이 입사되면, 다공질 실리콘 층에서 발생하는 PL 현상에 의해 자외선은 가시광으로 변환되고[4], 이것을 다공질 실리콘 하부에 존재하는 pn 접합 다이오드에 흡수시켜 광전류를 발생시킨다. 다공질 실리콘 자외선 센서는 기존의 실리콘 자외선 센서와는 달리 가시광에 대한 감도가 거의 없으며, 화합물 반도체에 비해서 공정이 간단하고, 센서와 동일 칩 상에 신호처리회로의 집적화가 가능해 진다. 또한 다공질 실리콘의 반사율은 실리콘에 비해서 훨씬 작기 때문에 실리콘 광 센서에서 요구되는 반사 방지막(Anti-Reflective Coating ; ARC) 등이 불필요하다[5-7].

2. 실 험

2.1 센서 소자 설계

그림 1은 본 논문에서 제안하는 다공성 실리콘 자외선 센서의 기본 구조로써, 다공질 실리콘 층과 기존의 실리콘 pn 접합 다이오드로 구성된다. 입사된 자외선은 다공질 실리콘 층의 PL 현상에 의해서 가시광선으로 변환되고, 이 가시광선이 하부에 있는 pn접합 다이오드에 입사되어 전자-정공 쌍을 발생시켜 외부 회로에는 광전류가 흐른다. 기존의 실

* 正 會 員 : 高麗大 制御計測工學科 正教授 · 工博

** 準 會 員 : 三星電機 宗合研究所 研究員 · 工碩

*** 準 會 員 : 高麗大 바이오마이크로시스템기술學科 博士課程

接受日字 : 2001年 7月 12日

最終完了 : 2001年 8月 23日

리콘 광 센서의 경우, 별도의 반사 방지막이 필요하지만 다공질 실리콘의 경우 여러 파장대역에서 기존 실리콘에 비해 낮은 반사율을 가지기 때문에 ARC이 불필요하다.

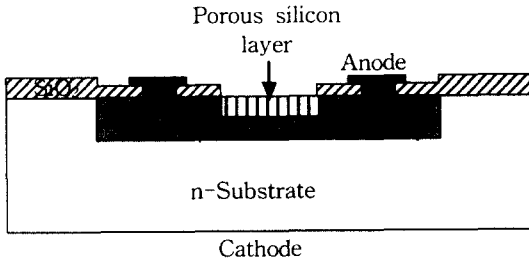


그림 1 다공질 실리콘 자외선 센서의 단면구조

Fig. 1 Cross-section of a porous silicon ultraviolet sensor

다공질 실리콘이 방출한 가시광선은 그 광학적 거리 내에서 흡수되어야 하므로, 흡수효율을 최대로 하기 위해서 pn 접합은 접합깊이와 공간전하영역의 폭을 동시에 고려해서 설계해야 한다. 본 논문에서 제작된 다공질 실리콘의 PL 피크 파장은 610nm이다. 이 파장에 대한 실리콘의 흡수계수 α 가 $6.81 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ 이며[3], 다공질 실리콘으로부터 pn 접합에 입사되는 빛의 86%($\approx 1/e^2$)가 흡수되는데 필요한 광학적 거리(optical length)는 다음 식에 의해 구해진다.

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (1)$$

여기서, I_0 는 입사광 세기, x 는 다공질 실리콘-pn접합 경계면으로부터 거리이다. 위 식으로부터 계산된 광학적 거리는 $2.29 \mu\text{m}$ 이다. 또한, 빛이 최대한 흡수되도록 하기 위해서는 바이어스 전압을 크게 하여 공간전하영역을 넓게 하는 것이 유리하지만 전압이 커짐에 따라 전력소모가 많아지고 이에 따른 열이 잡음의 원인이 되므로, 본 논문에서는 통상적인 포토다이오드의 동작 전압인 -5V 를 기준으로 설계하였다. 이러한 조건에서 SUPREM 시뮬레이션에 의해 얻어진 접합 깊이는 $1.107 \mu\text{m}$ 이고, 공간전하영역의 크기는 $0.988 \mu\text{m}$ 이며, -0.1V 보다 큰 바이어스 전압에서 광학적 거리는 $2.29 \mu\text{m}$ 이상으로 된다.

한편, 센서 출력을 증가시키기 위해서 소자면적을 $4600 \mu\text{m} \times 3600 \mu\text{m}$ 으로 크게 설계하였다. 센서의 응답시간이 면적에 비례해서 증가하는 경향이 있지만 제작된 센서의 용도는 통신에 사용되는 것이 아니므로 응답시간을 크게 중요시하지 않았다. 선과 선 사이의 간격을 $50 \mu\text{m}$, 본딩 패드는 $900 \mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$ 로 설계하였다.

2.2 소자 제작 및 특성 측정

소자 제작에 사용된 실리콘 웨이퍼는 비저항 $16 \sim 23 \Omega \cdot \text{cm}$, 면방향 (100)인 n형이다. 그림 2는 다공질 실리콘 자외선 센서의 제작 공정을 나타내며, 온도 1000°C , O_2 , H_2 분위기에서 5000 A 의 초기 산화막을 형성하였다. pn 접합을 형성하기 위해 붕소(B)를 에너지 50 keV , dose량 $2 \times 10^{14} \text{ \#}$

cm^2 로 하여 이온 주입을 행한 후 RTP 공정으로 Ar 분위기에서 1000°C 의 온도로 1분간 어닐링 하였다. 양극은 Al을 4000 A 두께로 증착한 다음 RTP로 400°C 에서 1분간 어닐링 한 후 패터닝하여 형성하였고, 음극으로는 기판 뒷면 전체에 Al을 증착하였다.

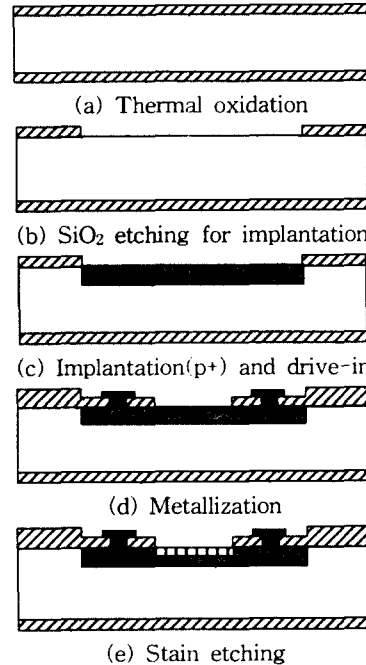


그림 2 다공질 실리콘 자외선 센서 제작 공정

Fig. 2 Fabrication sequence of porous silicon UV sensor

다공질 실리콘은 표1과 같은 조건 하에서 화학적 에칭 방법으로 형성하였다. 에칭 용액의 조성은 $\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 3 : 5$ 이고, 에칭동안 포토레지스트(AZ1512)가 마스크로 사용되었다. 질산을 사용하는 이유는, 전기화학적 에칭 방법에서는 외부에서 공급해 주는 정공과 전자에 의해서 실리콘이 산화되지만, 화학적 에칭에 의한 다공질 실리콘 형성 반응에서는 HNO_3 가 NO 로 환원되는 과정에서 생성되는 정공을 이용하여 실리콘을 산화시키기 때문이다.

표 1 실리콘 에칭 조건

Table 1 Silicon etching conditions

에칭용액 조성	$\text{HF}(48\text{wt}\%) : \text{HNO}_3(62\%) : \text{H}_2\text{O} = 1 : 3 : 5$ (volume %)
에칭 온도	상온
에칭 시간	5 ~ 60 min
에칭동안 빛 조사	형광등
마스크	PR 혹은 Si_3N_4
반응 면적	0.165 cm^2

그림 3은 제작된 자외선 센서의 특성 측정 시스템을 나타낸 것이다. 자외선 광원으로는 파장대역 $300 \sim 400 \text{ nm}$, 피크파

장 352nm, 출력 0.5W인 BLB(Blacklight Blue Lamp)를 사용하였으며, 램프와 센서의 거리를 조정하여 센서에 입사되는 자외선의 세기를 변화시켰다. 이때 광 전력은 GaAs 포토다이오드(G5842)로 측정하였다. 센서의 출력 특성은 Agilent-VEE을 이용하여 디지털 전원장치(HPE3631A)로 전압을 공급하면서 소자전압(HP34401A)과 전류(HP34401A)를 측정하였다. 또한, 잡음 제거를 위해 저역통과 필터를 사용하였다.

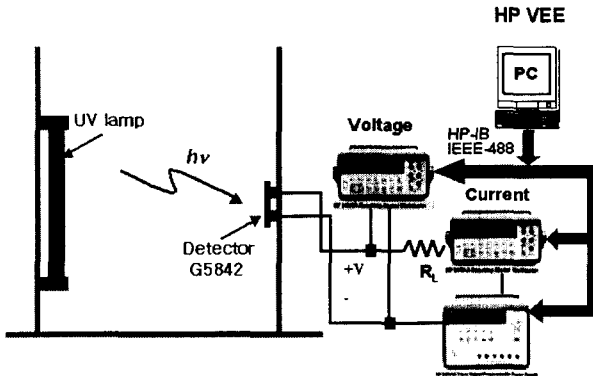
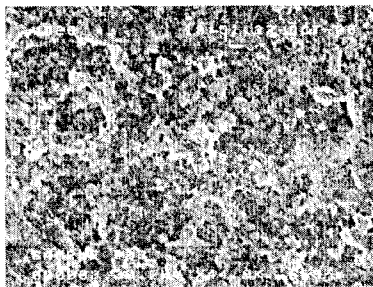


그림 3 광센서 특성 측정 시스템
Fig. 3 Sensor testing system

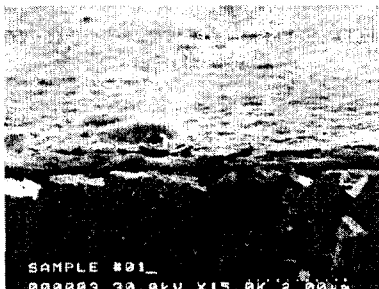
3. 실험결과 및 고찰

3.1 다공질 실리콘의 특성

그림 4는 화학적 에칭법에 의해서 형성된 다공질 실리콘의 SEM 사진으로, 전기화학적으로 에칭된 다공질 실리콘의 구조에 비해 기공 크기와 깊이 분포가 불규칙함을 알 수 있다. 다공질 실리콘 표면에는 광 루미네스스 특성에 관여하는 수많은 힐락(hillock)이 존재함을 볼 수 있다.



(a) 표면



(b)단면

그림 4 화학적 에칭에 의해 형성된 다공질 실리콘 층의 SEM 사진

Fig. 4 SEM micrographs of chemical-etched porous silicon layers

그림 5는 화학적인 에칭으로 제작한 다공질 실리콘 층의 광 루미네스스 스펙트럼을 나타낸 것으로, 전기화학적으로 형성한 다공질 실리콘에서 관측되는 PL 스펙트럼과 유사한 파장범위와 피크파장을 갖는다. 그림에서 피크 PL 파장은 610nm로 측정되었다.

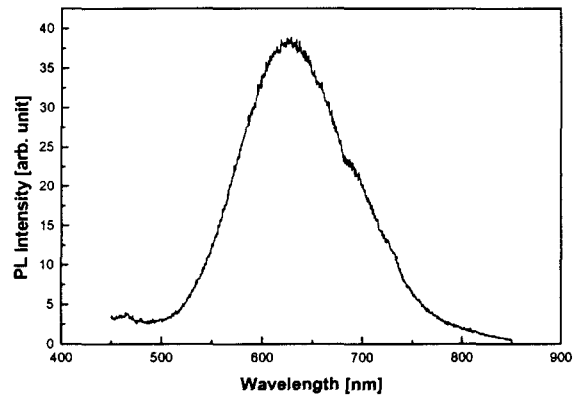


그림 5 다공질 실리콘의 PL 스펙트럼(단파장:365nm)

Fig. 5 Photoluminescence spectrum of porous silicon under illumination of 365nm

다공질 실리콘은 단결정 실리콘과는 다른 반사계수를 갖는다. 반사계수(r)는 실측한 굴절률을 가지고 다음 식에 따라 계산하였다.

$$r = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \quad (2)$$

여기서, n_1 , n_2 는 각 매질의 굴절률이다. 다공질 실리콘의 굴절률은 Rudolph 사의 S2000를 이용해 300~800nm사이의 파장에서 입사각을 70°로 하여 측정하였다.

그림 6은 측정된 굴절률로부터 계산된 다공질 실리콘과 단결정 실리콘의 반사계수를 나타낸 것으로, 다공질 실리콘의 반사계수는 단결정 실리콘에 비해서 훨씬 낮은 값을 갖는다. 특히 400nm 이하 자외선 영역에서는 큰 차이를 보이고 있는데, 이것은 제작한 자외선 센서에서 반사 방지막이 불필요함을 의미한다. 실제로 다공질 실리콘을 이용하면 자외선이나 PL에 의해서 발광하는 가시광선 영역의 빛의 반사가 현저히 감소하여 반사 방지막이 불필요하다. 다공도를 조절하면 특정 파장의 빛에 대한 반사를 최소로 시키는 것이 가능하다. 또, 다공질 실리콘의 이러한 성질은 태양전지에도 응용되고 있으며 이에 따른 성능개선이 보고되고 있다 [6].

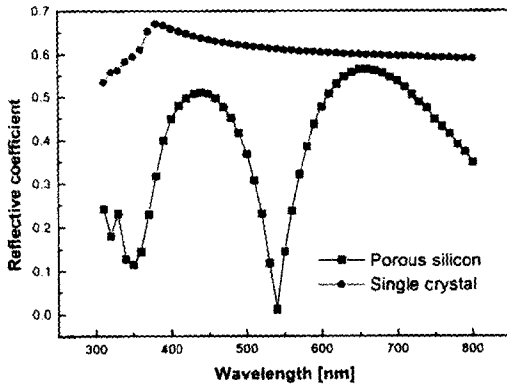


그림 6 다공질 실리콘과 단결정 실리콘의 반사계수
Fig. 6 Reflective coefficients of porous silicon and single crystal silicon

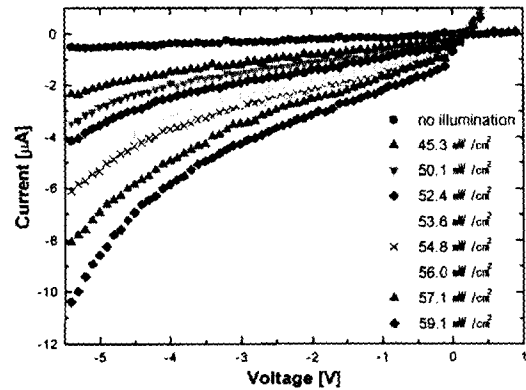


그림 8 자외선에 대한 다공질 실리콘 센서의 전류-전압 특성
Fig. 8 Current-voltage characteristics of porous silicon sensor for different UV illumination levels

3.2 다공질 실리콘 자외선 센서의 특성

그림 7은 암실에서 측정된 다공질 실리콘 자외선 센서의 전류-전압 특성 곡선을 나타낸 것으로, 일반적인 다이오드 특성을 보이고 있다. 그러나, 순방향 턴 온 전압이 매우 큰 것으로 보아 다결정 실리콘-단결정 실리콘 계면에 존재하는 재결합 중심이나 트랩이 전류 전도에 크게 관여하는 것으로 생각된다. 센서의 감도에 영향을 주는 역방향 암전류(dark current)는 약 6 μ A로 측정되었다.

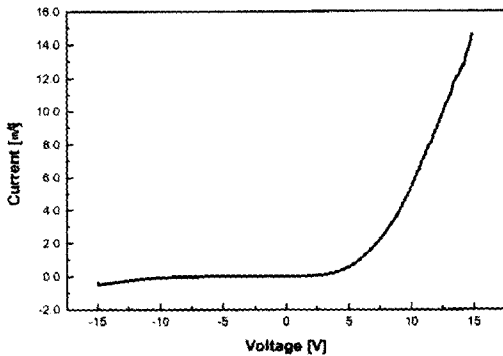


그림 7 다공질 실리콘 자외선 센서의 암전류-전압 곡선
Fig. 7 Dark current-voltage curve of porous silicon UV sensor

그림 8은 자외선(피크파장 352nm)을 조사했을 때 센서의 역방향 전류-전압 특성을 입사광 에너지(photon flux)를 파라미터로 하여 나타낸 것이다. 입사광 에너지 범위는 45.3mW/cm²부터 59.5mW/cm²이다. 그림에서, 동작전압이 증가함에 따라 소자에 흐르는 전류의 크기도 점차적으로 증가하고, 또 입사하는 자외선의 세기가 증가할수록 곡선의 기울기가 더욱 급격해 짐을 볼 수 있는데, 이것은 입사광의 세기에 관계없이 곡선의 기울기가 거의 일정하게 유지되는 일반적인 포토다이오드의 역방향 특성과는 매우 다르다.

그림 9는 자외선에 대한 다공질 실리콘 센서의 출력특성을 기준 다이오드와 비교해서 나타낸 것이다. 다공질 실리콘 자외선 센서의 경우 광전류는 광전력에 따라 비직선적으로 증가한다. 이것은 다공질 실리콘의 자외선-가시광 변환 특성이 비선형인 것에 기인하는 것으로 생각된다. 그림 9의 곡선으로부터 계산된 센서의 감도는 약 2.91nA/mW이다. 한편, 동일한 조건에서 제작한 기준 다이오드의 경우는 광전력이 증가하더라도 출력전류의 변화가 없어 자외선에 대한 감도가 없음을 알 수 있다. 이는 자외선 파장에 대한 실리콘의 흡수계수가 매우 커서 광학적 거리가 수십 Å에 지나지 않기 때문인 것으로 추측된다. 이와 같은 결과로부터, 다공질 실리콘 센서에서 입사된 자외선이 모두 다공질 실리콘에 의해서 가시광선으로 변환되고, 이 가시광이 pn접합 다이오드에 입사되어 전류를 발생시키는 것으로 생각된다.

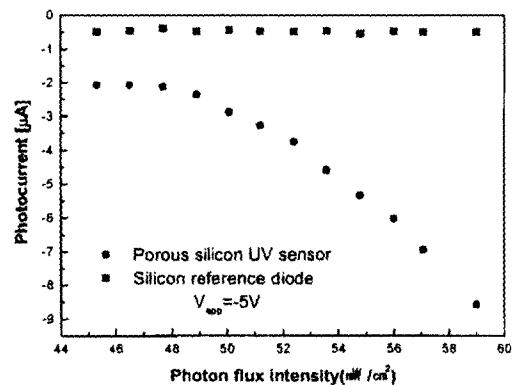
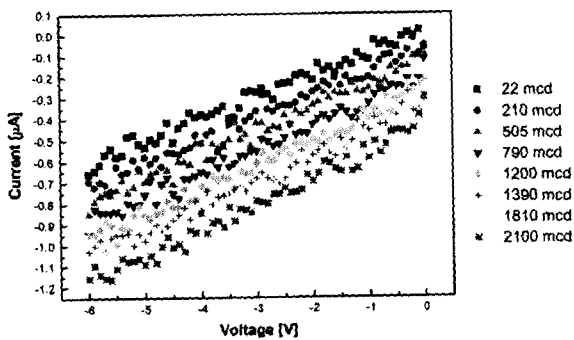


그림 9 다공질 실리콘 자외선 센서의 출력 광전류-광전력 특성
Fig. 9 Output photocurrent vs. optical power for porous silicon UV sensor

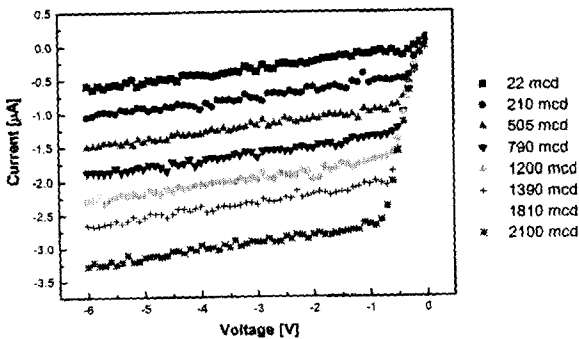
자외선 이외의 파장 영역에 대한 센서의 응답 특성을

아보기 위해서 적색광 조사 실험을 하였다. 광원으로 피크 파장이 $\lambda_p = 660\text{nm}$ 인 적색 LED를 사용하여 다공질 실리콘 자외선 센서와 기준 다이오드의 출력전류를 측정하였다. 그림 10(a)은 적색광에 대한 다공질 실리콘 센서의 전류-전압 곡선이다. 그림 8과 비교해 보면, 모든 적색광의 세기에서 적색의 기울기가 동일하고, 그리고 감도가 훨씬 감소했음을 알 수 있다. 이것은 다공질 실리콘이 광변환에는 기여하지 않고, 단지 입사된 적색광을 흡수하는 것을 의미한다.

한편, 그림 10(b)는 자외선 센서와 동일 조건에서 제작된 기준 다이오드의 전류-전압 곡선이다. 적색광의 세기가 증가함에 따라 출력전류도 비례해서 증가하고, 그 값도 다공질 실리콘 센서에 비해서 훨씬 크다. 또한 통상의 포토 다이오드에서처럼 곡선의 기울기가 모두 동일함을 알 수 있다.



(a) 다공질 실리콘 UV 센서



(b) 기준 다이오드

그림 10 적색광 조사시 다공질 실리콘 센서와 기준 다이오드의 전류-전압 곡선

Fig. 10 Current-voltage characteristics of porous silicon UV sensor and reference diode for different red light illumination levels

그림 11은 최대 파장이 600nm인 적색광을 조사했을 경우 다공질 실리콘 자외선 센서와 기준 다이오드의 출력 특성을 나타낸 것으로, 적색광에 대해서는 두 센서 모두 직선적인 출력특성을 보이고 있다. 그러나, 그림 8의 자외선 감도와는 반대로, 적색광에 대해서는 기준 다이오드가 다공질 실리콘 센서보다 훨씬 더 높은 감도를 갖고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 그림 8-10의 고찰에서 제시한 우리의 가정이 타당함을 뒷받침 한다. 즉, 가시광 영역에서는 입사광이 기준다이오드의 접합 부근까지 도달하여 전자-정공쌍을 발

생시키는 반면, 다공질 실리콘 자외선 센서의 경우는 pn접합에서 흡수되지 않고 대부분 다공질 실리콘 층에서 흡수되지만 어떠한 PL도 발생하지 않으며, 또 발생된 정공-전자쌍이 다공질 실리콘에 존재하는 수많은 재결합 센터나 트랩에 의해서 제거되기 때문에 적색광에 대해서 낮은 감도를 나타낸다.

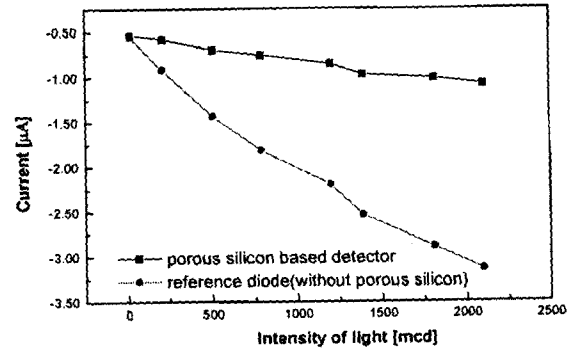


그림 11 다공질 실리콘 자외선 센서와 기준 다이오드의 출력 광전류-적색광 세기 특성

Fig. 11 Output photocurrent vs. red light intensity for porous silicon UV sensor and reference diode

4. 결 론

본 논문에서는 처음으로 다공질 실리콘을 이용한 새로운 개념의 자외선 센서를 설계, 제작하고, 그 특성을 고찰하였다. 본 다공질 실리콘 자외선 센서는 다공질 실리콘의 광 루미네스스 현상에 의해 입사 자외선을 가시광으로 변환한 후 이 가시광을 pn접합 다이오드로 측정하는 광 센서이다. 다공질 실리콘에서 발광하는 가시광의 피크 파장과 pn접합 다이오드가 측정할 수 있는 최대 측정 파장을 일치시켜 센서 효율을 극대화시켰다. 다공질 실리콘 센서는 입사 자외선의 세기가 증가함에 따라 출력전류가 크게 증가했지만 적색광에는 거의 감도를 나타내지 않았다. 반면, 다공질 실리콘이 없는 기준 다이오드는 자외선 조사시에는 변화가 없었으나, 적색광에는 다공질 실리콘보다 훨씬 더 큰 감도를 나타내었다. 제작된 다공질 실리콘 자외선 센서의 감도는 2.91mA/mW 로 측정되었다.

본 논문에서 제시한 다공질 실리콘 자외선 센서는 다공질 실리콘의 광 루미네스스 효율과 안정도를 향상시키면 가시광에 큰 감도를 갖는 기존의 실리콘 자외선 센서의 문제점을 극복할 수 있는 가능성을 보이고 있다. 현재 다공질 실리콘을 이용한 광 바이오 센서(optical biosensor) 연구가 진행되고 있다.

감사의 글

본 연구는 고려대학교 특별연구비에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] A. R. Jones, "Flame failure detection and modern boilers", *Journal of Physics E: Science Instrumentation*, Vol. 21, pp. 921-928, 1988.
- [2] B. L. Diffey, *Ultraviolet Radiation in Medicine*, Adam Hilger, Bris-tol, 1982.
- [3] P. Bhattacharya, *Semiconductor Optoelectronics Devices*, Prentice Hall, New Jersey, pp. 133, 1997.
- [4] L. T. Canham, "Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers", *Applied Physics Letters*, Vol. 57, pp. 1046-1048, 1990.
- [5] M. G. Berger, C. Dieker, M. Thonissen, L. Vescan, H. Luth, H. Munder, W. Thei β , M. Wernke, and P. Grosse, "Porosity superlattices: a new class of Si heterostructures", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 27, no. 6, pp. 1333-1336, 1994.
- [6] R. J. Martin-Palma, P. Herrero, R. Guerrero-Lemus, J. D. Moreno, and J. M. Martinez-Duart, "Cross-section TEM and optical characterization of porous silicon multilayer stacks", *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 17, no. 10, pp. 854-847, 1998.
- [7] D. Dimova-Malinovska, "Application of strain-etched porous silicon in light emitting diodes and solar cells", *Journal of Luminescence*, Vol. 80, pp. 207-211, 1999.

저 자 소 개



민 남 기 (閔 南 基)

1950년 7월 12일 생. 1974년 고려대 전기 공학과 졸업. 1976년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1979년~1984년 동국대 전기공학과 조교수. 1989년 Cincinnati대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1990년~현재

고려대 제어계측공학과 교수
 Tel : 02-925-2296, Fax : 02-927-8223
 E-mail : nkmin@tiger.korea.ac.kr



강 철 구 (姜 喆 求)

1970년 9월 28일 생. 1995년 고려대 제어 계측공학과 졸업. 1995년~1999년 LG전자 생산기술연구소 근무. 2001년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2001년~현재 고려대 바이오마이크로시스템기술학과 박사과정

Tel : 02-925-2296, Fax : 02-927-8223
 E-mail : cgkang@cie.korea.ac.kr



고 주 열 (高 主 烈)

1976년 3월 27일 생. 1999년 고려대 전자 공학과 졸업. 2001년 동 대학원 마이크로 머시닝학과 졸업(석사). 2001년~현재 삼성전기 종합연구소 주임 연구원

Tel : 031-210-6242, Fax : 031-210-3320
 E-mail : nicejyko@samsung.co.kr