

## 다공질 실리콘: 새로운 마이크로센서 및 마이크로액추에이터 재료

민남기\*† · 이치우\*\*† · 정우식\*\*\* · 김동일\*\*

\*고려대학교 제어계측공학과, \*\*고려대학교 자연과학부, \*\*\*고려대학교 전자공학과  
(1998년 10월 10일 접수: 1999년 1월 6일 채택)

## Porous silicon: a new material for microsensors and microactuators

Nam Ki Min\*†, Chi Woo Lee\*\*†, Woo Sik Jeong\*\*\* and Dong Il Kim\*\*

\*Department of Control and Instrumentation Engineering, Korea University, Jochiwon, Choongnam 339-700, Korea

\*\*Division of Natural Sciences, Korea University, Jochiwon, Choongnam 339-700, Korea

\*\*\*Department of Electronics Engineering, Korea University, Seoul, Korea

(Received October 10, 1998 : Accepted January 6, 1999)

### 초 록

다공질 실리콘을 이용한 마이크로센서와 마이크로액추에이터의 연구는 현재 초기단계에 있기 때문에, 지금까지 발광 다이오드나 화학 센서 등과 같은 몇몇 응용 소자가 발표된 수준에 머물러 있다. 본 논문에서는 화학 센서와 광소자를 중심으로 다공질 실리콘 센서 및 액추에이터 연구현황을 고찰 보고하고자 한다. 정전용량형 다공질 실리콘 습도센서의 감습 특성은 비선형이었으며, 저습보다는 40 %RH 이상의 고습영역에서 더 높은 감도를 나타내었다. 다공질 실리콘  $n^+p-n^+$  소자는 에탄올에 노출되었을 때 소자 전류가 급격히 증가하였다. 다공질 실리콘 다이어프램에 제작된  $p^+PSi-n^+$  다이오드는 광 스위칭 현상을 나타내어 광센서 또는 광스위치로서의 응용 가능성을 보여주었다. 다공질 실리콘에 365 nm를 조사해서 얻어진 광루미네선스(PL)는 넓은 스펙트럼을 보였으며, 피크 파장은 610 nm이었다. ITO/PSi/In LED의 전계발광(EL) 스펙트럼은 PL에 비해 약간 더 넓은 영역에 걸쳐 나타났으며, 피크 에너지가 단파장(535 nm)으로 이동하였다.

**Abstract** - Since the use of porous silicon for microsensors and microactuators is in the early stage of study, only several application devices, such as light-emitting diodes and chemical sensors have so far been demonstrated. In this paper we present an overview of the present status of porous silicon sensors and actuators research with special emphasis on the applications of chemical sensors and optical devices. The capacitive type porous silicon humidity sensors had a nonlinear capacitance-humidity characteristic and a good sensitivity at higher humidity above 40 %RH. The porous silicon  $n^+p-n^+$  device showed a sharp increase in current when exposed to an ethanol vapor. The  $p^+PSi-n^+$  diode fabricated on porous silicon diaphragm exhibited an optical switching characteristic, opening up its utility as an optical sensor or switch. The photoluminescence (PL) spectrum, taken from porous silicon under 365 nm excitation, had a broad emission, peaked at ~610 nm. The electroluminescence (EL) from ITO/PSi/In LED had a broader spectrum with a blue shifted peak at around 535 nm than that of the PL.

**Key words** : Porous silicon, Porous silicon sensors, Photoluminescence, Electroluminescence

### 1. 서 론

단결정 실리콘 기판상에 형성된 다공질 실리콘(porous silicon; PSi)은 1956년 Uhlir<sup>1)</sup>가 처음으로 관측하였고, Turner<sup>2)</sup>에 의해서 상세히 연구되었다. 다공질 실리콘에 관한 초기 연구는 주로 집적 회로의 분리기술(소위 SOD)개발에 집중되었다.<sup>3,5)</sup> 그러나, 다공질 실리콘이 4 K에서 가시광루미네선스(visible photoluminescence: PL) 현상을 갖는다는 사실이 1984년 Pickering 등<sup>6)</sup>에 의해 발견되었고, 1990년 Canham<sup>7)</sup>이 실온에서도 강한 가시광루미네선스가 나타난다는 사실을 보고한 후부터, 다공질 실리콘의 루미네선스 현상을 구명하고 광소자로 응용하기 위해 다공질 실리콘의

물리적, 화학적, 전기적 특성에 대한 광범위한 연구가 진행되어 왔다. 현재 실온에서 다공질 실리콘의 PL은 결정질 실리콘의 PL 보다 훨씬 더 효율적이다. 그러나, 고체전극을 사용한 PSi LED(light-emitting diode)는 발광효율이 너무 낮기 때문에 아직 실용화에 접근하지 못하고 있다.

한편 최근에는 다공질 실리콘이 갖는 다양한 특성으로 인하여 마이크로시스템 재료로 상당한 주목을 받고 있다.<sup>8-10)</sup> 특히 소형화·집적화를 위해서, 기존의 다공질 세라믹을 이용한 습도·가스센서를 다공질 실리콘으로 대체하려는 연구가 활발해지고 있다.<sup>11-17)</sup> 또 다공질 실리콘을 이용한 마이크로머시닝 기술 개발이 일부 수행되고 있다. 그러나 다공질 실리콘을 베이스로 하는 센서 또는 액추에이터 연구는 이제 시작에 불과하기 때문에 아직 큰 연구 성과는 나타나지 않고 있다.

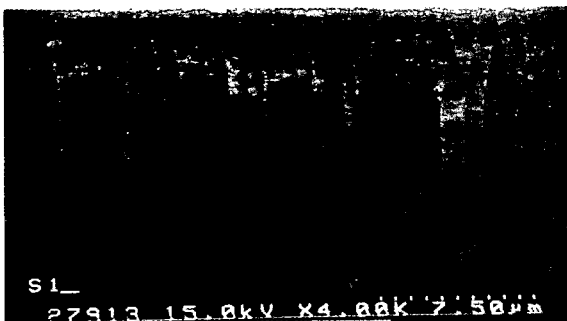
†E-mail: nkmin@tiger.korea.ac.kr, cwlee@tiger.korea.ac.kr

본 논문에서는 전기화학적 에칭에 의해 형성된 다공질 실리콘을 이용한 마이크로센서와 PSi LED 등에 대해서 최근까지의 연구결과를 보고하고자한다.

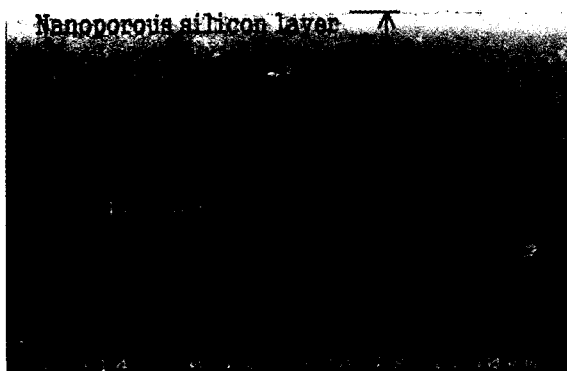
## 2. 다공질 실리콘의 구조

다공질 실리콘은 실리콘 웨이퍼의 방위, 불순물의 종류 및 농도, 양극반응조건에 따라 다양한 morphology를 갖는다. Simth와 Collins<sup>18)</sup>은 최근의 리뷰 논문에서 PL을 나타내는 다공질 실리콘의 morphology를 4개의 기본그룹으로 분류하였다. p-형 실리콘에서 기공 직경과 기공 간격은 일반적으로 1~5 nm로 극히 작으며, 대부분은 상호연결된 pore network를 형성한다. 그리고 불순물 농도가 증가하면 기공 직경과 간격도 약간 증가하고, 그 결과 p\*의 경우는 수많은 측면가지를 갖는 5~10 nm 크기의 채널이 형성된다. n-형 실리콘의 경우는 불순물 농도의 영향이 매우 복잡하다. 그러나 일반적으로 기공 직경과 평균간격이 불순물 농도의 증가와 함께 감소한다. n-형 실리콘에서 기공 직경은 p-형보다 상당히 더 크며, 불규칙한 pore network를 갖는 p-형과는 달리 저농도에서 수직채널을 형성하는 경향이 매우 강하다. p\*의 경우는 n\*와 매우 유사한 구조를 갖는다. Fig. 1은 표면에서 나노(nano) 구조를 갖는 다공질 실리콘의 SEM 사진이며, 이러한 다공질 실리콘은 모두 PL 현상을 나타낸다.

다공질 실리콘을 화학센서, 웨이퍼관통 상호접속 등에 응용하기 위해서는 수직한 기공 구조가 요구된다. 일반적으로 다공질 재료를 이용한 습도나 가스센서의 동작을 모델링할 때 원통형 기공을 가정하는 경우가 많다. 그러나 지금까지 논문에 발표된 다공질 실리콘 화학센서의 경우, 대부분 기공 구조에 대해 구체적인 설명이 없거나 PL 또는 EL 현상을 나타내는 나노구조를 사용하고 있다. 우리는 습도·가스 등과 같은 화학센서에 응용하기

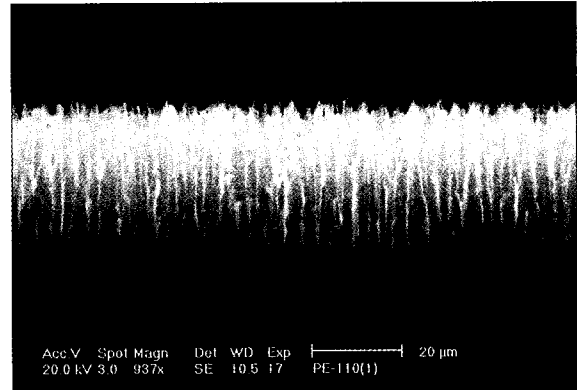


(a) cross section

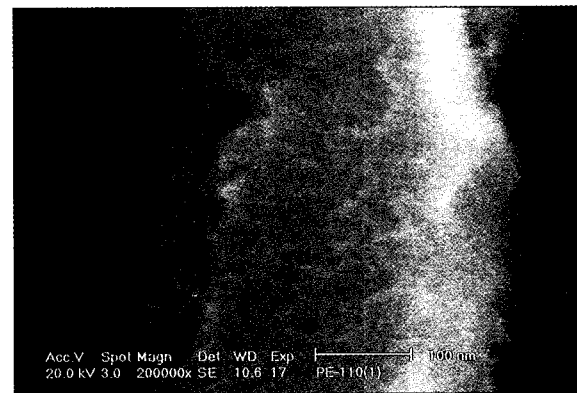


(b) higher magnification

Fig. 1. SEM micrographs of nanoporous silicon layers.



(a) cross section



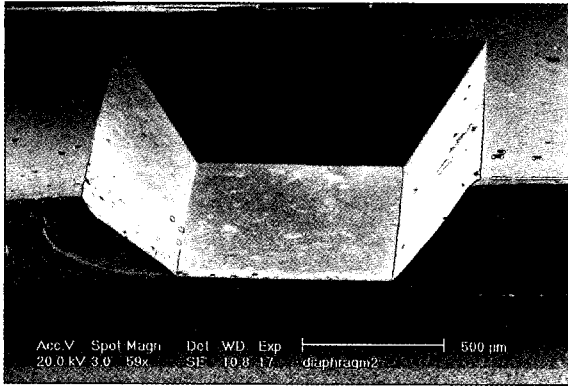
(b) higher magnification

Fig. 2. SEM micrographs of macroporous silicon layers with a straight structure.

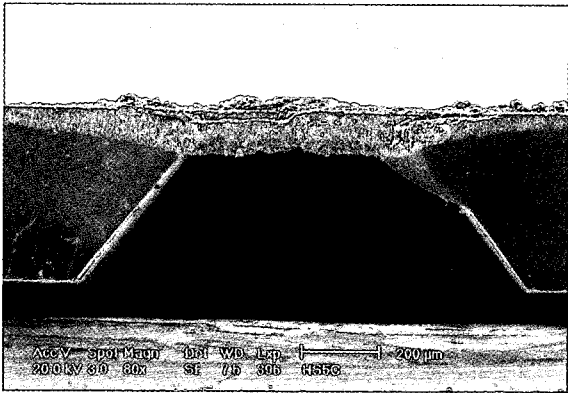
위하여, 전기화학적 에칭법을 사용해 Fig. 2와 같은 수직형 매크로 기공을 갖는 다공질 실리콘층을 형성하여 그 특성을 고찰 보고한바 있다.<sup>19)</sup> 기공은 (100)면에 수직방향으로 성장하였으며, 균일하게 분포하였다. 기공의 반지름은 약 1.5~2 μm, 깊이는 20~30 μm이었고, 기공사이가 서로 연결되지 않는 구조를 갖는다. 이와 같은 구조는 유사한 도우핑 농도를 갖는 p-형 실리콘에 대해서 이전에 보고되었던 다공질 실리콘의 구조와는 매우 대조적이다.

## 3. 다공질 실리콘 화학센서

다공질 실리콘을 베이스로하는 마이크로센서는 주로 화학 센서가 연구되고 있다. 특히 소형화·집적화를 위해서 기존의 다공질 세라믹을 이용한 습도·가스센서를 다공질 실리콘으로 대체하려는 연구가 활발해지고 있다. 최초의 PSi 화학센서는, 실리콘 기판표면을 전기화학적으로 에칭하여 얇은 다공질 실리콘층을 형성한 후 상부전극을 PSi 층에, 하부전극을 실리콘 기판 밑에 증착한 벌크형 전용량형 습도센서(bulk-type capacitive humidity sensor)이다. PSi 층이 습기에 노출되면, 기공 내부에 수증기가 응축되어 PSi 층의 등가 유전율이 증가하고 이것이 정전용량의 변화로 검출된다. 벌크형 습도센서는 매우 높은 감도를 갖지만, 그 특성이 바이어스 극성에 크게 의존한다. 특히 역바이어스의 경우 습도에 대한 감도가 거의 없는 것을 알 수 있는데, 이것은 역바이어스일 때 다공질 실리콘이 형성되지 않은 벌크에서 공핍층의 정전용량에 기인하는 것으로 생각된다. PSi-벌크 사이의 계면특성이 정전용량에 미치는 영향을 제거하기 위해서 본 논문에서



(a) back surface



(b) cross section

Fig. 3. SEM micrographs of macroporous silicon diaphragm.

서는 다공질 실리콘 다이어프램에 습도센서를 제작하여 그 문제를 해결하였다.

Fig. 3은 실리콘 기판을 TMAH 용액에서 이방성 에칭한 후 HF 용액속에서 양극산화하여 형성된 다공질 실리콘 다이어프램의 SEM 사진을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 기공이 다이어프램을 완전히 관통하였고, 다이어프램 이외의 영역에서는 상대적으로 다공질 층이 매우 느리게 성장하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 두께 20~200 μm의 다공질 실리콘 다이어프램의 제작이 가능하며, 매크로다공질 실리콘 다이어프램은 앞으로 마이크로센서, 마이크로머시닝, 분리막 등에 응용될 것으로 기대된다.

Fig. 4는 PSi 다이어프램에 제작된 습도센서의 감습특성과 히스테리시스특성을 나타낸 것이다. PSi 습도센서의 감습특성은 비선형으로 되며, 저습보다는 50%RH 이상의 고습에서 감도가 훨씬 높음을 알 수 있다. 히스테리시스 특성은 저습에서 고습으로 상대습도를 증가시키면서 정전용량을 측정하고, 다시 고습에서 저습으로 감소시키면서 동일 습도에서 정전용량을 측정하여 얻은 것이다. 히스테리시스는 저습보다 고습 영역에서 크며, 이것은 탈습과정에서 기공 속에 응축되었던 미량의 습기가 빠져나가지 못하고 남아 있기 때문인 것으로 생각된다.

한편 다공질 실리콘을 이용한 가스센서의 연구는 이제 시작 단계이다. Watanabe 등<sup>19)</sup>은 PSi가 에탄올에 감도를 가지는 것을 발견하였다. Fig. 5는 실리콘 다이어프램에 제작된 n<sup>+</sup>-p-n<sup>+</sup> 소자의 구조와 동작원리를 나타낸 것으로, 에탄올에 노출시키면 소자에 흐르는 전류가 상당히 변화하였다. 이것은 n-MOSFET에서 실리콘 산화막을 다공질 실리콘으로 대체한 것과 유사하다. 순수 N<sub>2</sub> 개스에 노출되었을 때 소자전류는 거의 변화하지 않고 미소

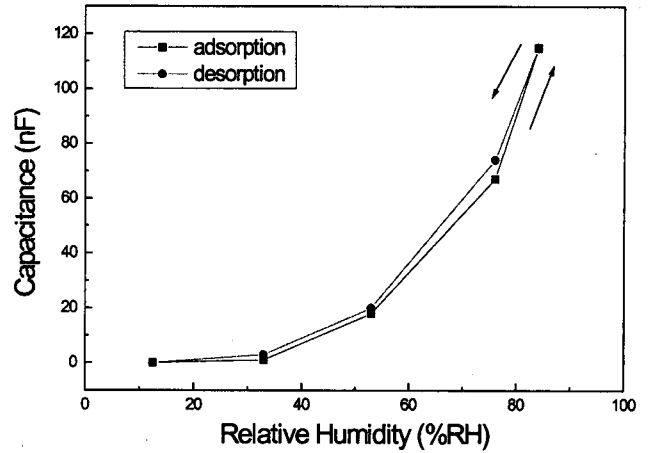


Fig. 4. Capacitance vs. relative humidity.

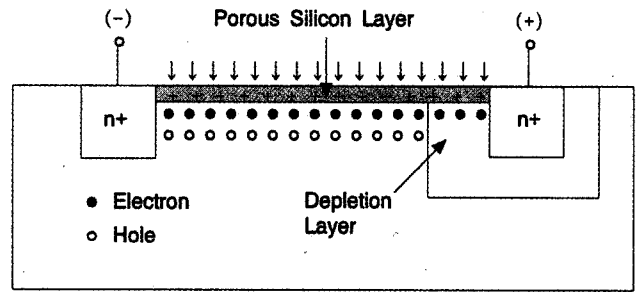


Fig. 5. Porous silicon n<sup>+</sup>-p-n<sup>+</sup> device.

한 전류만 흐른다. 그러나 에탄올이 혼합된 N<sub>2</sub> 개스를 통과시키면 소자에 흐르는 전류가 급격히 증가하였으며, 이 현상은 다음과 같이 설명할 수 있다.

역 바이어스된 pn<sup>+</sup> 접합 부근의 PSi 층 바로 밑은 공핍되어 전자와 정공이 거의 존재하지 않기 때문에 일반적인 다이오드에서와 같이 미소한 누설전류만 흐를 것이다. 그러나 표면이 PSi 층으로 되어 있으므로, 표면에는 금지대내에 수많은 국재준위(localized state)가 존재한다.<sup>20)</sup> 따라서, 다이오드에 흐르는 누설 전류는 PSi 층에 접한 실리콘 표면에서의 발생전류에 지배되며, 이것은 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>21)</sup>

$$I_s = WLq \left( \frac{D_n n_i}{\tau_0} \right)^{1/2} \left( \frac{qV}{kT} \right)^{1/2} \quad (1)$$

여기서, W는 다이오드 폭, L은 길이, q는 전자전하량, D<sub>n</sub>은 전자의 확산계수, n은 전자밀도, n<sub>i</sub>는 진성 캐리어 농도, τ<sub>0</sub>는 수명, V는 인가전압, k는 볼츠만 상수, T는 절대온도이다.

이 상태에서 PSi 층에 가스가 흡착되면 이러한 가스는 극성을 갖게 되므로 그림과 같이 PSi 층의 바로 밑에 있는 실리콘 표면에 전자가 유기되어 전자밀도 n이 증가한다. PSi 층에 흡착된 가스 농도를 N이라고 하면, 일정 전압하에서 다이오드에 흐르는 전류의 크기는 식 (1)로부터

$$I \propto N^{1/2} \quad (2)$$

되므로, 가스의 양이 증가하면 전류도 따라서 증가한다.

#### 4. 다공질 실리콘 광 센서

PSi의 광전도 특성은 여러 사람에 의해서 고찰되었지만<sup>22)</sup> PSi

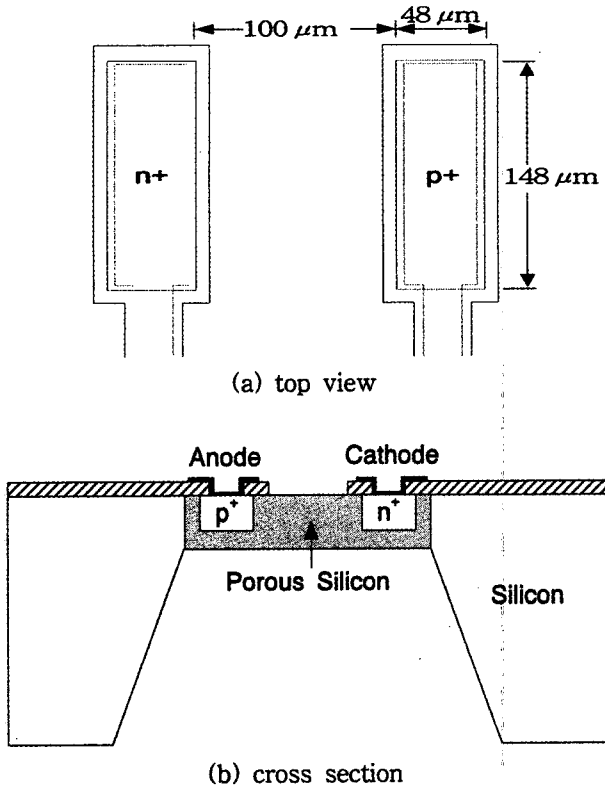


Fig. 6. p<sup>+</sup>-PSi-n<sup>+</sup> diode.

다이오드의 광전도 특성에 대해서는 연구된 바 없다. Fig. 6은 p<sup>+</sup>-PSi-n<sup>+</sup> 다이오드의 구조이다. 이러한 구조의 다이오드에 빛을 조사하면 다이오드 전류가 급증하여 광센서나 스위칭 소자로 응용 가능성을 보여주었다.

매우 흥미있는 현상으로, 어떤 소자는 Fig. 7과 같이 다이오드가 스위칭을 일으키는데, 이러한 형태의 부성저항은 깊은 트랩(deep trap)을 갖는 고저항 반도체에서 자주 나타나는 현상으로 캐리어 이중주입(double injection)에 기인하는 것으로 알려져 있다. 전술한 바와 같이, PSi 층의 저항은 매우 높고, 수많은 국재준위(localized state)가 존재한다. 특히 에너지 준위가 깊은 트랩에 전자가 포획되면 정공에 대해 매우 효과적인 재결합 센터

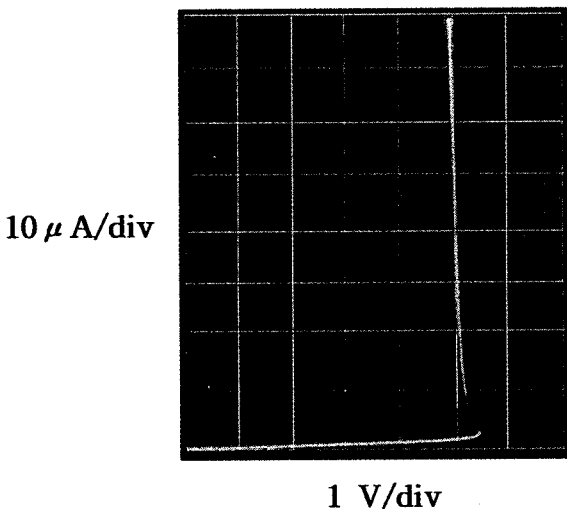


Fig. 7. Current-voltage trace of p<sup>+</sup>-PSi-n<sup>+</sup> diodes, showing an optical switching.

로 작용하기 때문에 열평형 상태에서 정공의 수명은 전자에 비해 훨씬 짧아진다. 이로 인해 다이오드에 순방향 전압을 인가하더라도 주입된 정공은 재결합 중심에 의해 포획되어 PSi 층내부로 진행해 나아가지 못한다. 즉 재결합 센터가 정공주입에 대한 장벽으로 작용한다. 이와 같이, 빛을 조사하지 않은 상태에서는 다이오드에 흐르는 전류는 매우 작다. 그러나, PSi 층에 빛이 조사되면 재결합 센터에 포획되었던 전자는 전도대로 여기되고, 이것에 기인한 전도대와 가전자대에서 전자와 정공 농도의 변화율은 각각

$$\frac{dn}{dt} = e_n N_R^- - c_n N_R^0 n + e_p N_R^0 \quad (3)$$

$$\frac{dp}{dt} = e_p N_R^0 - c_p N_R^0 p + e_n N_R^- \quad (4)$$

로 된다. 여기서, N<sub>R</sub><sup>-</sup>은 전자로 채워진 재결합 중심 밀도, N<sub>R</sub><sup>0</sup>은 빈 재결합 중심 밀도, n은 전자 농도, p는 정공 농도, e<sub>n</sub>, e<sub>p</sub>는 각각 전자와 정공의 열 방출율, c<sub>n</sub>, c<sub>p</sub>는 각각 빛에 의한 전자와 정공의 방출율, c<sub>n</sub>, c<sub>p</sub>는 각각 전자와 정공의 포획율이다. 현재 이러한 파라미터에 대한 어떠한 데이터도 문헌에 발표된 바 없다. 위와 같은 과정을 통해 정공의 주입을 방해하던 장벽(N<sub>R</sub><sup>-</sup>)이 제거되므로 정공의 수명이 증가하여 정공은 PSi 층을 통과하여 음극에 도달한다. 따라서, 전류는 급증하게 되고, 다이오드는 off 상태에서 on 상태로 스위칭한다. 스위칭 전압은 빛의 세기에 따라 감소한다.

### 5. 다공질 실리콘의 PL 및 EL 특성

다공질 실리콘의 연구를 활성화시킨 것은 단결정 실리콘이 갖지 못하는 가시광루미네센스(PL)와 전계루미네센스(EL) 현상을 다공질 실리콘이 나타내기 때문이다. PSi을 이용한 액추에이터는 PSi-LED의 연구에 집중되고 있다. PSi의 PL 특성은 제조조건에 따라 피크 에너지가 1.8~2.1 eV 영역에서 변화된다.<sup>22)</sup> Fig. 8은 다공질 실리콘의 PL 스펙트럼을 나타낸 것으로, 스펙트럼은 1.65~3.54 eV 영역에 존재하고, 피크 파장은 610 nm이다.

Fig. 9는 HNO<sub>3</sub>/HF 용액속에서 preetching한 다공성 실리콘을 이용해서 제작한 ITO/PS/In LED의 발광 특성을 보여준다. 스펙트럼은 1.65~3.54 eV 영역에 걸쳐 있고, 피크 에너지는 2.30 eV (535 nm)이다. LED의 발광 스펙트럼은 PL에 비해 약간 더 넓은 영역에 걸쳐 나타나며, 피크 에너지가 단파장으로 이동함을 알

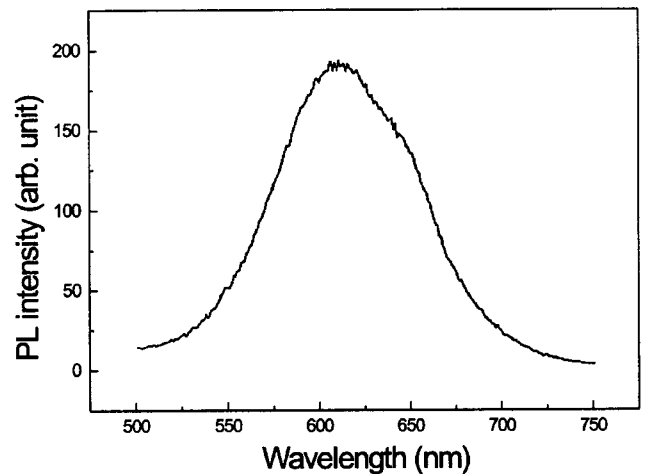


Fig. 8. Photoluminescence spectrum of porous silicon under illumination of 365 nm.

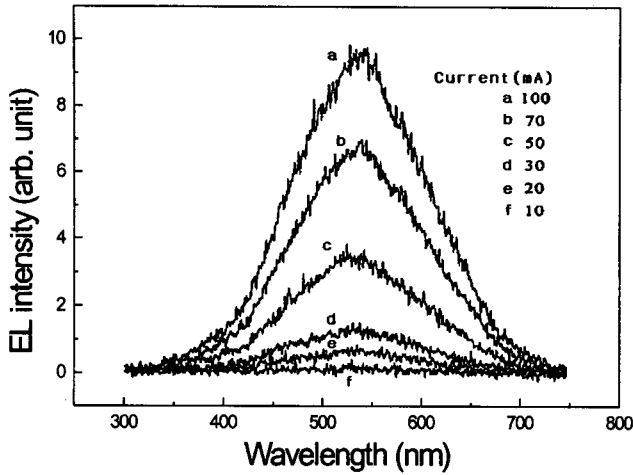


Fig. 9. Light emission spectra of PSi LEDs for different currents.

수 있다. EL과 PL의 발광 피크 에너지가 다른 것은 표면준위 (surface states)의 차이가 아니라 접촉한 다공질 실리콘의 에너지 밴드 간격에 의해서 결정된다.

Fig. 8과 9를 비교해 보면, PL의 세기가 EL의 세기보다 훨씬 더 크며, 큰 양자효율을 갖는다. 이것은 PL은 UV가 침투할 수 있는 영역에서 다공질 실리콘의 정공과 전자의 재결합에 의해서 일어나지만, EL의 경우는 벌크 쪽에서 공급되는 정공과 ITO에서 공급되는 전자의 재결합이 다공질 실리콘의 계면에서 일어나기 때문이다. 일반적으로 EL의 양자효율은 극히 낮다. pn 접합 구조로 하면 EL 효율이 향상되는 것으로 보고되고 있으나, 아직도  $10^{-2}\%$ 에 불과하다. EL의 효율을 증가시키기 위해서는 무엇보다도 PSi에 대한 완전한 이해와 발광 매카니즘의 규명이 선행되어야 할 것이다.

Fig. 10은 EL 세기의 전류 의존성을 나타낸 것으로, 일반의 LED와 같이 전류에 비례해서 발광의 세기가 증가함을 보여주고 있다. n-형 기판으로부터 다공질 실리콘 층으로 정공주입이 ITO로부터 전자주입보다 더 어렵기 때문에, EL 세기는 다공질 실리콘층으로 주입되는 정공의 양에 의해서 제한된다.

Fig. 11은 시간에 따른 EL 세기의 변화를 보여주고 있다. EL 세기는 정공의 양에 의해서 결정된다. 따라서 초기 EL 세기가 지수함수적으로 감소하는 것은 다공질 실리콘 표면의 밴드 밴딩 영역, 즉 공간전하층에 축적되어 있는 정공 양에 의해서 EL세기

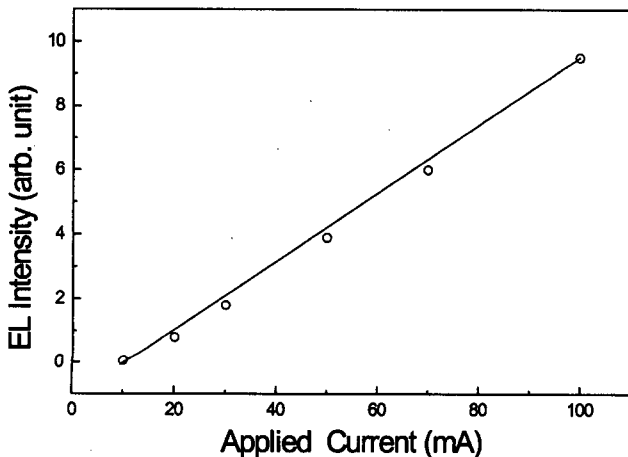


Fig. 10. EL intensity vs. forward current of PSi LEDs.

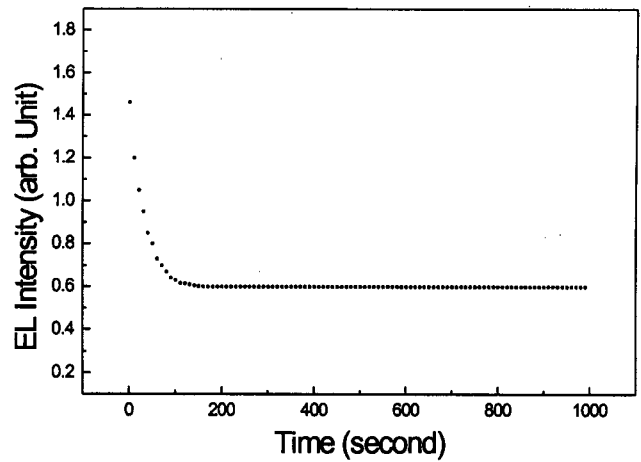


Fig. 11. EL intensity change of PSi LEDs at current of 70 mA.

가 결정되기 때문이다. 공간전하영역에 축적되었던 정공이 모두 소비되면 전류의 크기에 의해서 공급되는 정공 수가 일정해 지기 때문에 어느 시간이 경과한 후부터 EL의 세기도 일정하게 된다고 생각된다.

## 6. 결 론

다공질 실리콘은 단결정 실리콘이 갖지 못하는 여러 가지 독특한 특성을 나타내기 때문에 새로운 광전자 소자와 마이크로센서 재료로 주목받고 있으며, 특히 PSi LED나 화학 센서 개발에 연구가 집중될 것으로 사료된다. 본 연구 결과는 정전용량형 다공질 실리콘 습도센서의 감습특성이 비선형으로, 저습보다는 40%RH 이상의 고습영역에서 더 높은 감도를 보여주었다. 다공질 실리콘 n<sup>+</sup>-p-n<sup>+</sup> 소자는 에탄올에 노출되었을 때 소자 전류가 급격히 증가하였다. 다공질 실리콘 다이아프램에 제작된 p<sup>+</sup>-PSi-n<sup>+</sup> 다이오드는 광 스위칭 현상을 나타내어 광센서 또는 광스위치로써의 응용 가능성을 보여주었다. 다공질 실리콘에 365 nm를 조사해서 얻어진 광루미네센스(PL)는 넓은 스펙트럼을 보였으며, 피크파장은 610 nm 이었다. ITO/PSi/In LED의 전계발광(EL) 스펙트럼은 PL에 비해 약간 더 넓은 영역에 걸쳐 나타났으며, 피크 에너지가 단파장(535 nm)으로 이동하였다. 다공질 실리콘 센서나 액추에이터를 실용화하기 위해서는 그 특성의 완전한 이해와 함께 형성 방법과 제조 공정이 확립되어야 할 것이며, 취약한 기계적 강도를 보강하거나 표면을 보호하는 수단이 강구되어야 할 것이다. 또한 표시 소자와 같은 광전자 재료에서는 대면적화가 요구되므로 유리 기판에 다결정 실리콘을 형성하여 이를 다공질화하는 연구가 필요할 것이다.

## 감 사

본 연구는 한국학술진흥재단의 연구비 지원(대학부설연구소과제)에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. A. Uhlir, *Bell Syst. Tech. J.*, **35**, 333 (1956).
2. D. R. Turner, *J. Electrochem. Soc.*, **105**, 402 (1958).
3. K. Imai, *Solid State Electronics*, **24**, 159 (1981).
4. K. Imai and H. Unno, *IEEE Trans. Electro. Dev.* **ED-31**, 297 (1984).
5. G. Bomchil, A. Halimaoui and R. Herino, *Microelectron. Eng.*, **8**,

- 293 (1988).
6. C. Pickering, M. I. J. Beale, D. J. Robbins, P. J. Fearson and R. Greef, *J. Phys. C, Solid State Phys.*, **17**, 6535 (1984).
  7. L. T. Canham, *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 1046 (1990).
  8. W. Lang, P. Steiner, A. Richter, K. Maruszyk, G. Weimann and H. Sandmair, *Transducers'93*, 26 (1995).
  9. S. Barret, F. Gaspard, R. Herino, M. Ligeon, F. Muller and A. Ronga, *Sensors and Actuators*, **A33**, 19 (1992).
  10. W. Lang, P. Steiner and H. Sandmaier, *Sensors and Actuators*, **A51**, 31 (1995).
  11. R. C. Anderson, R. S. Muller and C. W. Tobias, *Sensors and Actuators*, **A21-A23**, 635 (1990).
  12. A. Richter, *Transducers'93*, 310(1993).
  13. R. Murri, N. Pimto and C. Ercoli, *Transducers'95 · Euroensors IX*, 829 (1995).
  14. G. M. O'Halloran, P. M. Sarro, J. Groeneweg, P. J. Trimp and P. J. French, *Transducers '97*, **1**, 563 (1997).
  15. P. Maccagnani, R. Angelucci, P. Pozzi, A. Poggi, L. Dori, G. C. Cardinaliu and P. Negrini, *Transducers '97*, **1**, 213 (1997).
  16. P. C. Searson, *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 832 (1991).
  17. K. Watanabe, T. Okada, I. Choe and Y. Satoh, *Transducers'95 · Euroensors IX*, 890 (1995).
  18. R. L. Smith and S. D. Collins, *J. Appl. Phys.*, **71**, R1 (1992).
  19. N. K. Min, C. W. Lee, W. S. Jeong, D. S. Ha, *J. Korean Inst. Electric, Election. Engr.*, **11**, 125 (1998).
  20. Z. Chen, T. Y. Lee and G. Bosman, *J. Appl. Phys.*, **76**, 2499 (1994).
  21. Z. C. Feng and R. Tsu, "Porous silicon", World scientific, Singapore, 1994.
  22. D. I. Kim, Ph. D. Dissertation, Korea Univ., Seoul, Korea (1997).