

원통형 매크로기공을 갖는 다공질 실리콘과 다이어프램의 제작

11-8-7

Fabrication of Cylindrical Macroporous Silicon and Diaphragms

민남기*, 이치우**, 하동식***, 정우식****

(Nam-Ki Min, Chi-Woo Lee, Dong-Sik Ha, Woo-Sik Jeong)

Abstract

For chemical microsensors such as humidity and gas sensors, it is essential to obtain a single pore with a large inner surface and straight structure. In this paper, cylindrical macroporous silicon layers have been formed on p-silicon substrate by anodization in HF-ethanol-water solution with an applied current. The pores grew normal to the (100) surface and were uniformly distributed. The pore diameter was approximately 1.5~2 μm with a depth of 20~30 μm and the pores were not interconnected, which are in sharp contrast to the porous silicon reported previously for similarly doped p-Si. Porous silicon diaphragms 18 to 200 μm thick were formed by anisotropic etching in TMAH solution and then anodization. The fabrication of macroporous silicon and free-standing diaphragms is expected to offer new applications for microsensors, micromachining, and separators.

Key Words(중요용어) : Porous silicon(다공질 실리콘), Porous silicon diaphragms(다공질 실리콘 다이어프램), Macroporous silicon(매크로 다공질 실리콘)

1. 서 론

1956년 Uhlir¹⁾가 실리콘의 전기화학적 연마를 연구하는 과정에서 다공질 실리콘(porous silicon)을 발견한 이래, 다공질 실리콘에 관한 초기연구는 주로 집적회로의 분리기술(특히 SOI)개발에 집중되었다.²⁻³⁾ 그러나, 1984년 Pickering⁴⁾에 의해 다공질 실리콘이 photoluminescence(PL) 성질을 갖는다는 사실이 보고되었고, Canham⁵⁾이 PL 메커니즘을 제안하면서부터, 다공질 실리콘의 발광현상을 설명하고

광소자로 응용하기 위해 다공질 실리콘의 물리적, 화학적, 전기적 특성에 대한 광범위한 연구가 진행되고 있다. 한편 최근에는 다공질 실리콘이 갖는 다

양한 특성으로 인하여 마이크로센서나 마이크로시스템 재료로 상당한 관심을 끌고 있다.⁶⁻⁸⁾ 특히 소형화·집적화를 위해서, 기존의 다공질 세라믹을 이용한 습도, 개스센서를 다공질 실리콘으로 대체하려는 연구가 활발해지고 있다.⁹⁻¹²⁾ 다공질 실리콘을 이용한 센서에서 가장 중요한 요소는 다공질 실리콘의 미세구조이다. 다공질 실리콘은 실리콘 웨이퍼의 방위, 불순물 종류 및 농도, 양극반응조건에 따라 다양한 morphology를 갖는다. Simth와 Collins¹³⁾는 최근의 리뷰 논문에서 다공질 실리콘의 morphology를 4개의 기본그룹으로 분류하였다. p-형 실리콘에서 pore직경과 pore 간격은 일반적으로 1~5nm로 극히 작으며, 대부분은 상호연결된 pore network를 형성한다. 그리고 불순물 농도가 약간 증가하면 pore직경과 간격도 약간 증가하고 그 결과 p⁺의 경우는 수많은 측면가지를 갖는 5~10nm크기의 채널이 형성된다. n-형 실리콘의 경우는 불순물 농도의 영향이 매우 복잡하다. 그러나 일반적으로 pore직경과 평균 간격이 불순물 농도의 증가와 함께 감소한다. n-형

* : 고려대학교 제어계측공학과

(충남 연기군 조치원읍, Fax: 02-925-2296

E-mail : nkmin@tiger.korea.ac.kr)

** : 고려대학교 화학과

*** : 현대전자

**** : 고려대학교 전자공학과

1998년 4월 27일 접수, 1998년 7월 9일 심사완료

실리콘에서 pore직경은 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. 이러한 나노(nano) 구조를 갖는 다공질 실리콘은 모두 PL이나 EL현상을 나타낸다. 다공질 실리콘을 화학센서, 메커니컬 필터, 웨이퍼관통 상호접속 등에 응용하기 위해서는 수직한 pore구조를 갖을 것이 요구된다. 일반적으로 다공질 재료를 이용한 습도나 개스센서의 동작을 모델링 할 때 원통형 기공을 가정하는 경우가 많다.^{14, 15)} 그러나 논문에 발표된 다공질 실리콘 화학센서의 경우, 대부분 pore 구조에 대해 구체적인 설명이 없거나 PL 또는 EL현상을 나타내는 나노구조를 사용하고 있다.

본 연구에서는 습도나 개스등과 같은 화학센서에 응용하기 위하여, 전기화학적 에칭법을 사용해 수직형 macropore을 갖는 두꺼운 다공질 실리콘층을 형성하여 그 특성을 고찰하고, 이것과 마이크로머시닝 기술을 이용해 다공질 실리콘 다이어프램을 제작하였다.

2. 다공질 실리콘과 다이어프램 제작

다공질 실리콘을 제작하는데 사용된 실리콘 웨이퍼는 면방향 (100), 비저항 1~20Ωcm, 양면으로 폴리싱된 4인치 p-형 (붕소) 웨이퍼이다. 양극반응시 충분한 hole이 공급되고 양극전류분포를 균일하게 하기 위해서 ion shower를 사용해 웨이퍼 한쪽면에 붕소(B)를 도우핑하여 p⁺층을 형성하였다. 이때 B의 dose량은 5×10¹⁵/cm², 주입 에너지는 80keV, 접합깊이는 약 1μm 이었다. 다공질 실리콘은 48%HF:ethanol:DI water 용액내에서 실리콘 웨이퍼(양극)와 백금 전극(음극)사이에서 일정전류(또는 일정전압)를 흘릴 경우 실리콘-전해액의 계면에서 일어나는 양극반응에 의해 형성된다. 그림 1은 다공질 실리콘을 형성하기 위한 실험 장치이다. 실리콘 양극산화에 위한 셀(cell)은 두 전극으로 구성된다. 실리콘 웨이퍼는 테프론 홀더에 고정시켰고, 대향음극으로 웨이퍼 면적보다 약간 넓은 Pt plate를 사용하였다. 웨이퍼와 Pt 음극사이에는 2cm정도의 간격을 두었다. 두 전극에 전압을 인가하면, 전해액을 통해 양극에서 음극으로 흐르는 전류에 기인해서 전해액-양극사이의 계면에서 양극산화가 발생한다. 양극반

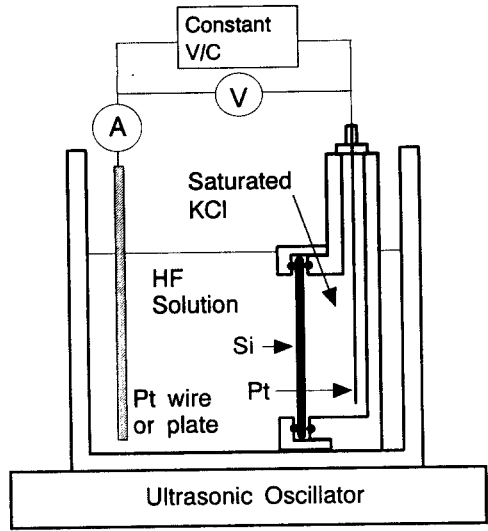


그림 1. 실리콘의 양극산화에 사용된 실험 장치
Fig. 1. Schematic of an electrochemical cell for

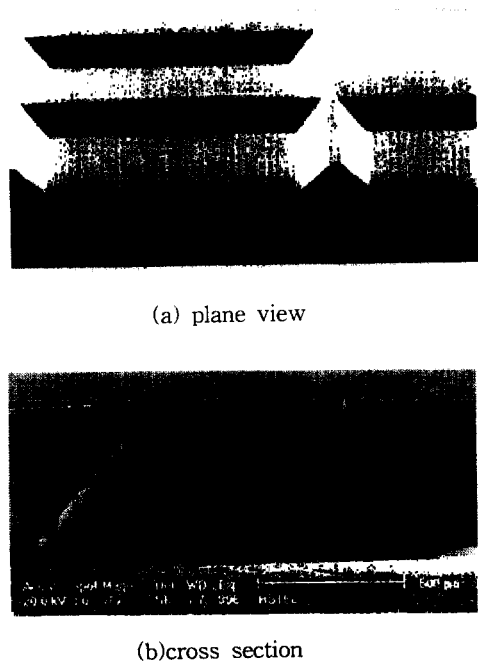


그림 2. TMAH용액에서 제작된 다이어프램의 SEM 사진
Fig. 2. SEM micrographs of silicon diaphragm fabricated in TMAH solution.

용중에 발생하는 기포를 실리콘 표면으로부터 제거하기 위해서 초음파 발진기를 사용하였다. 포화 KCl 용액을 통해 전류를 웨이퍼에 공급하기 때문에 양극산화 후 웨이퍼 뒷면을 세정하는 과정이 불필요하다. 다공질 실리콘의 구조와 특성은 전해액의 조성 과 온도, 전류밀도의 크기, 양극산화시간등의 반응조건에 따라 변한다. 본 실험에서는 전해액의 조성 과 양극반응장치에 공급하는 전류밀도 및 양극전압의 크기를 조절하였다. 형성된 다공질 실리콘의 표면과 단면구조는 SEM(Philips XL300 과 Hitachi S-4160)으로 관찰하였다. 실리콘 다이어프램은 TMAH (tetra-methyl ammonium hydroxide)용액속에서 웨이퍼 한쪽면으로부터 이방성 에칭 하여 형성하였다. 에칭용액의 조성은 25%TMAH 100g: 13.6gDI, 에칭 온도는 95℃, 평균 에칭율은 0.8~1.1 $\mu\text{m}/\text{min}$ 이었고, 에칭시간에 따라 두께 18~200 μm 의 다이어프램이 얻어졌다. 그림 2는 90분 에칭 한 다이어프램의 뒷면과 단면의 SEM 사진이며, 에칭 된 다이어프램 표면이 비교적 깨끗하고 두께가 균일함을 알 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전류밀도- 양극반응시간특성

양극반응이 진행됨에 따라 실리콘-전해액계면에서 반응조건 변화여부와 양극반응의 균일성을 확인하기 위해서, 일정전압을 인가한후 양극산화시간에 따른 전류밀도의 변화를 조사하였다.

그림 3은 48%HF : ethanol : DI water = 1 : 1 : 0.5의 전해액 조성에서 인가전압을 달리해 실리콘

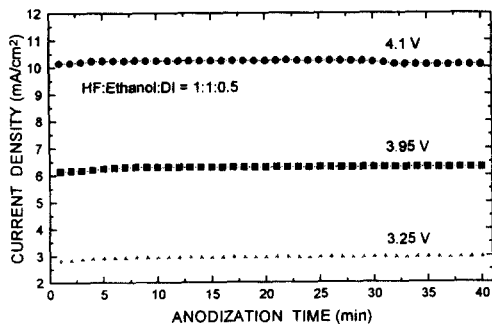


그림 3. 다른 전해액 조성에서 전류밀도와 양극산화시간과의 관계

Fig. 3. Current density vs. anodization time for different solution compositions.

기판을 양극반응시킨 경우, 전류밀도와 양극산화시간과의 관계를 나타낸 것으로, 인가전압이 증가하면 전류밀도도 증가하고, 또 일정전압하에서 전류밀도는 미세하게 증가하거나 거의 일정한 값을 나타내었다. 그러나 4.1V의 경우는 약 30분이 경과한 이후부터 약간씩 감소하여 더 낮은 전류에서 다시 일정전류로 안정되었다. 이와같은 결과로부터 양극반응이 두께 방향으로 균일하게 진행되고 다공질층의 두께가 증가해도 어느 pore깊이까지는 양극반응동안 실리콘과 전해액의 계면에서 HF농도가 일정하게 유지된다고 생각된다.

그림 4는 실리콘 기판에 4.1V를 인가하여 양극산화시킨 경우, 여러 전해액 조성에서 전류밀도와 양극산화시간과의 관계를 나타낸 것이다. 이 경우에도 전류밀도가 거의 일정한 값으로 유지되었으며, 양극반응중에 실리콘과 전해액의 계면에서 양극반응 조건의 변화가 거의 없다고 생각할 수 있다.

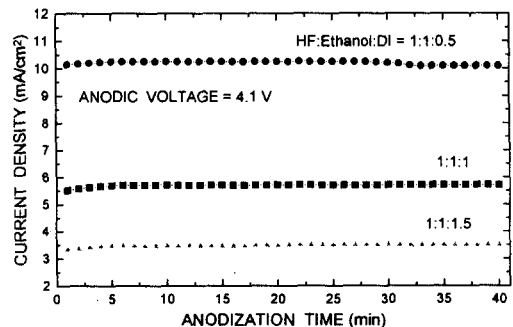


그림 4. 다른 인가전압에서 전류밀도와 양극산화시간과의 관계

Fig. 4. Current vs. anodization time for different voltages.

3.2 다공질 실리콘의 morphology와 micro-structure

다공질 실리콘의 표면형상과 단면구조는 현미경과 SEM으로 관찰하였다. 양극반응에 의해 형성된 다공질 실리콘의 초기표면을 현미경으로 관찰하면 간섭무늬가 나타나고, UV광을 비추면 미약한 PL이 관측된다. 그러나 다공질층의 두께가 두꺼워짐에 따라 간섭무늬는 없어지고 표면은 짙은 흑색으로 변한다.

그림 5는 HF:ethanol:DI water = 1:1:1 용액에서 전류밀도와 반응시간을 각각 5.5mA/cm², 50분으로하여 양극반응시킨 다공질층의 표면과 단면을 보여주는 대표적인 SEM 사진이다. pore의 직경은 1.5~2 μm

범위이고, pore의 분포와 다공질층 두께가 균일하였으며, pore의 구조는 서로 연결되지 않고 (100)면에 수직방향으로 성장하였다.



(a) plane view



(b)cross section

그림 5. p-Si 형성된 대표적인 매크로다공질 실리콘층의 SEM사진.

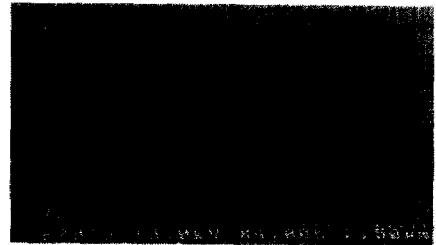
Fig. 5. SEM micrographs of macroporous silicon formed on p-silicon.

이러한 pore구조는 유사한 불순물 농도를 갖는 실리콘에서 이전에 관측되었던 구조와는 상당히 다르다. 일례로, 그림 6은 흔히 논문에서 PL현상을 나타내는 다공질 실리콘의 SEM사진이다.¹⁴⁾ 그림(a)는 본 실험과 비교를 위해 같은 배율로 촬영한 것이고, (b)는 확대한 사진이다. 그림 5와 비교하면, pore의 직경과 간격이 극히 작은 나노구조로 되어 있으며, 이웃하는 pore사이가 서로 연결되어 매우 복잡한 형상을 하고 있음을 알 수 있다.

그림 7은 HF:ethanol:DI water = 1:1:2 용액속에서 전류밀도 5.5mA/cm²로 양극반응시킨 경우, 반응시간에 따른 다공질층의 표면형상변화를 SEM으로 관측한 것으로, pore의 성장이 진행됨에 따라 pore의 직경이 증가하여 표면이 거칠어지고, 수많은 잔금과 hole이 나타나기 시작함을 볼 수 있다.



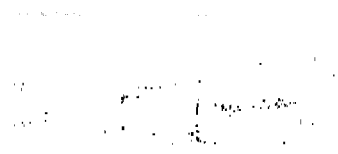
(a)



(b)higher magnification

그림 6. 나노구조를 갖는 다공질 실리콘층의 SEM 사진

Fig. 6. SEM micrographs of nanoporous silicon layer.



(a) 5 min



(b) 10 min



(c) 20 min

그림 7. 양극산화시간에 따른 실리콘 다공질층의 표면 형상 변화.

Fig. 7. Variations in surface morphology of porous silicon layer with anodization time.

그림 8은 전류 흐름이 불안정한 상태에서 형성시킨 다공질 실리콘층의 SEM사진을 나타낸 것으로, pore의 분포와 성장이 불규칙하고, pore직경과 간격 등이 매우 불균일하다. 또 안정된 전류에서 형성시킨 경우에 비해 측정된 다공질층의 두께는 더 얇고, 웨이퍼내에서 위치에 따른 다공질층의 두께차이가 매우 큰 것으로 관측되었다. 초기 전류의 흐름이 불안정한 경우에도 pore의 크기가 불규칙한 다공질층이 형성되었다.

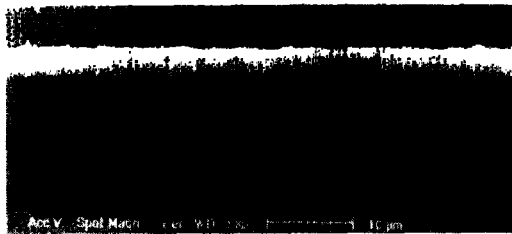


그림 8. 전류흐름이 불안정할 때 형성된 다공질 실리콘층의 SEM사진

Fig. 8. SEM micrograph of the porous silicon formed in an unstable current flow.

그림 9은 반응시간에 따른 pore성장 과정을 관측한 SEM사진이다. 일반적으로 pore의 초기위치가 어떻게 형성되는가에 대해서는 명확히 알려진 바는 없지만, 어떤 원인에 의해서 일단 초기에 pore가 형성되어 어느 정도의 두께로 성장하면, pore직경은 거의 변하지 않고 수직방향으로 성장해 감을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 일단 초기에 pore가 형성되면 pore의 선단(tip)에 전계가 집중되어 그곳에 더 많은 정공이 공급되고⁸⁾, 동시에 <100>면이 <111>면이나 <110>면에 비해 끊어져야 될 결합수(backbond)가 적기 때문에¹³⁾ pore가 <100> 방향으로 성장한다고 추정된다. 그림 (a)-(c)에서 20 μm~30 μm 깊이까지는 단일 pore로 성장해 가지만, 그 이상의 두께에서는 그림(d)에서 볼 수 있는 바와같이 새로운 pore들이 형성되고 이것들이 서로 이어져 성장이 계속된다.

전술한 그림 3과 4에서(4.1V의 경우), 30분이후부터 전류의 크기가 감소하였는데, 이것은 그림(d)와 같이 새로운 pore의 형성으로 전류통로가 달라져 전류의 흐름이 방해받고, HF의 공급도 감소하여 다공질층의 성장률이 감소한다고 생각된다.

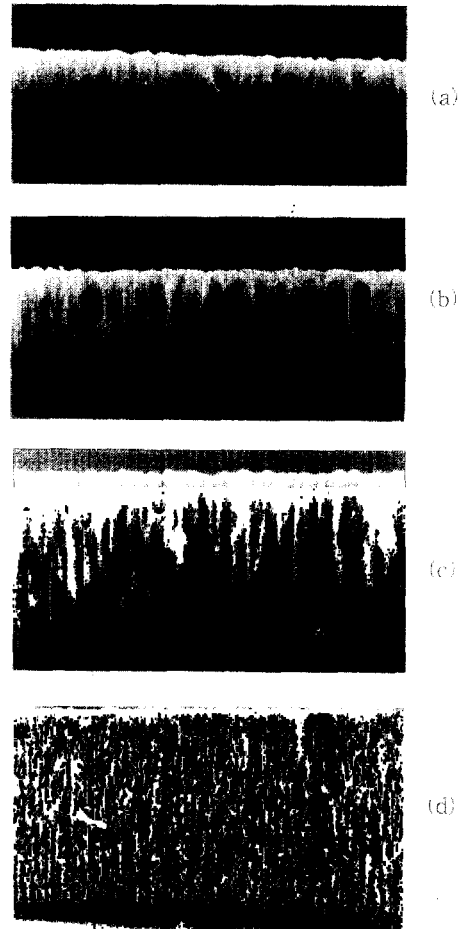


그림 9. 양극산화시간에 따른 pore의 성장을 보여주는 SEM사진

Fig. 9. SEM micrographs showing pore growth with anodization time.

3.3 다공질층 두께 - 양극산화시간 특성

양극산화시 전류밀도, 전해액농도, 양극산화시간등이 다공질 실리콘의 두께에 미치는 영향을 검토한다. 그림 10은 HF:ethanol:DI water = 1:1:0.5 용액속에서 전류밀도를 달리해서 에칭 한 경우, 반응시간에 따른 다공질층의 두께변화를 나타낸 것이다. 초기에는 다공질층의 두께가 양극산화시간에 따라 직선적으로 증가하지만, 반응시간이 길어짐에 따라 성장률(단위시간당 형성되는 두께)은 감소하는 경향을 나타내었다. 또, 전류밀도가 증가하면 두께와 성장률이 함께 증가함을 볼 수 있다. 일반적으로 성장률이 빨리 포화되는 nanopore와는 대조적으로, 본 실

험에서는 다공질층의 두께가 $20\mu\text{m}\sim 30\mu\text{m}$ 에 도달할 때까지 직선적인 변화를 나타내었다. 이것은 pore 구조가 수직이고 또 직경이 커서 전해액의 공급이 원활하고 그 농도가 일정하게 유지되는 것에 기인한다고 생각된다. $20\sim 30\mu\text{m}$ 에서 성장률이 저하되는 것은 그림 8에서 설명한 바와 같이, 새로운 pore의 형성으로 전류흐름이 방해받고, 반응이 일어나는 pore tip으로 HF의 공급이 감소하는 것에 기인하는 것으로 생각된다.

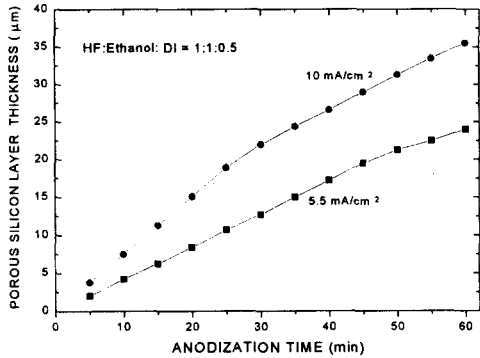


그림 10. 다른 전류밀도에서 다공질층의 두께와 양극산화시간과의 관계

Fig. 10. Porous silicon layer thickness vs. anodization time for different current density.

그림 11은 HF:ethanol:DI water=1:1:1 용액속에서 다공질층 성장률의 전류밀도 의존성을 나타낸 것으로, 성장률은 대체적으로 전류밀도에 비례해서 증가하는 경향을 보이고 있다. 다공질층의 두께는 양극반응시간에 비례하고, 일정 반응시간에 대해 전류밀도가 증가할수록 그 두께가 두꺼워진다. 이와같은 실험결과로부터, 실리콘 다공질층의 두께는 양극반응과정에서 공급된 전하량 즉, 전류밀도와 양극반응시간의 곱에 의해 결정되는 것으로 추정할수 있다.

그림 12는 양극산화 전류밀도를 $5.5\text{mA}/\text{cm}^2$ 로 하였을 경우, 농도가 다른 전해액에서 다공질 실리콘층 두께와 양극산화시간과의 관계를 나타낸다. 일정 반응시간에서, HF농도가 높을수록 성장률이 증가함을 알수 있다. 이것은 다공질층의 형성이 전해액과 실리콘의 계면에서 전기화학반응에 의해 의존하므로, HF농도가 증가할수록 계면에서의 양극반응이 용이하게 이루어지기 때문이라고 생각된다. 그러나,

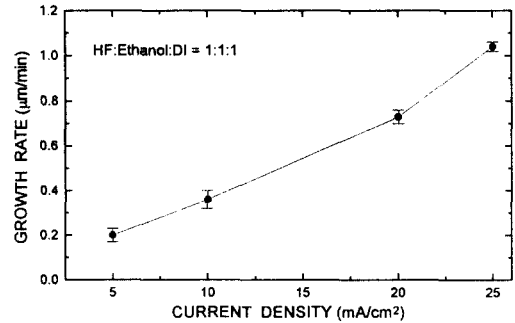


그림 11. 실리콘 다공질층의 성장률과 전류밀도의 관계

Fig. 11. Growth rate of silicon porous layer vs. current density

전류밀도가 낮아지면, 성장률의 HF농도 의존성은 훨씬 작았다.

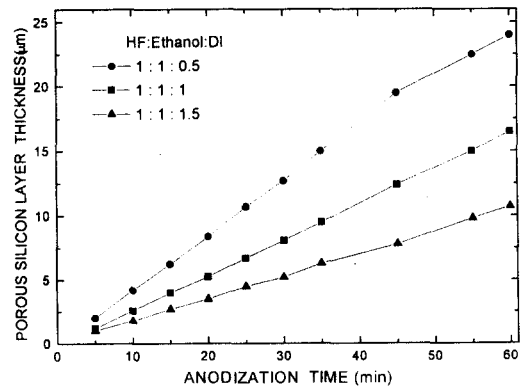


그림 12. 여러 전해액농도에서 다공질층의 두께와 양극산화시간과의 관계

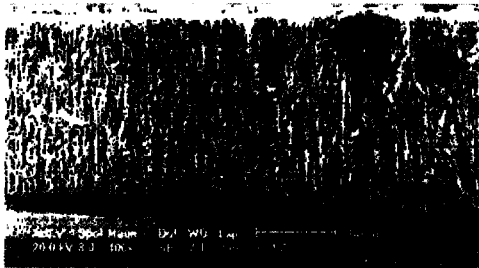
Fig. 12. Porous silicon layer thickness vs. anodization time for different current density.

3.4 실리콘 다이어프램 제작

다공질 실리콘 멤브레인은 Searson¹⁶⁾에 의해서 보고된바 있다. 그러나 Searson의 논문에서는 웨이퍼 전체를 관통하는 멤브레인을 제작하였으며, 직경이 $0.5\mu\text{m}$ 인 pore는 수많은 branch를 갖는 구조로 되어 있다. 그러나 센서소자를 만들기 위해서는 웨이퍼상의 특정위치에 다공질 실리콘 다이어프램을 제작할수 있어야 한다. 본 논문에서는 이방성 에칭에 의해



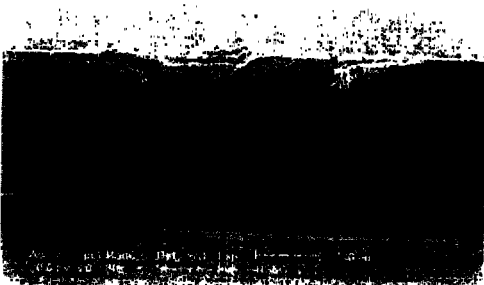
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 13. 다공질 실리콘 다이어프램의 형성과정을 보여주는 SEM사진.

Fig. 13. SEM micrographs showing pore growth in silicon diaphragm.

웨이퍼상에 다이어프램을 제작한 후, 이것을 관통하는 다공질 실리콘을 형성하였다. 그림 13은 TMAH 용액에서 이방성에칭으로 형성된 실리콘 다이어프램을 HF용액 속에서 양극산화 시킨 경우, 다공성 실리콘이 형성되어 가는 과정을 나타낸 SEM사진이다. 그림(a),(b)는 실리콘 다공질층이 성장해 가면서 다이어프램을 관통하기 직전의 단면을, (c)는 다이어프램을 완전히 관통한 것을 보여주고 있다. 그림(d)는 다공질 실리콘 다이어프램 전체를 나타낸 것으로, 이 그림에서 보듯이 두꺼운 다이어프램이 완전히 다공질 실리콘층으로 변하였으며, 다이어프램 이외의 지역에서는 상대적으로 다공질층이 매우 느리게 성장하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 다공질 실리콘 다이어프램은 습도, 개스, 광센서등에 응용이 기대되며, 또 분리막으로 사용이 가능할 것이다.

4. 결 론

다공질 실리콘은 다양한 특성을 갖기 때문에 마이크로센서와 마이크로머시닝 분야에서 새로운 재료로 주목받고 있으며, 특히 센서의 소형화·집적화 추세에 따라 습도나 개스와 같은 화학센서에서 기존의 다공질 재료를 대체할것으로 기대되고 있다. 본 논문에서는 화학센서용 재료로 사용하기 위해, p형 실리콘 웨이퍼를 HF-ethanol-water용액 속에서 양극산화 하여 수직구조의 macropore를 갖는 다공질 실리콘을 성공적으로 형성하였다. pore들은 서로 연결되지 않고 (100)면에 수직한 방향으로 성장하였으며, 균일하게 분포하였다. 양극전류가 안정된 상태에서, pore직경은 약 1.5-2 μ m, pore깊이는 약 20-30 μ m로 수직모양의 단일 macropore가 형성되었다. 또, 그 이상의 두께에서는 새로운 pore들이 형성되고 이것들이 서로 이어져 다시 성장을 계속하는 것으로 나타났다. 한편 실리콘 기판을 TMAH용액에서 이방성에칭 하여 두께 18-200 μ m의 다공질 실리콘 다이어프램을 제작하였다. 현재 저자들은 수직구조를 갖는 다공질 실리콘 다이어프램에 습도, 개스, 광센서를 제작하여 그 특성을 연구 중에 있으며, 연구결과의 일부를 보고한바 있고, 차후에 논문으로 발표할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 핵심전문연구지원에 의하여 수행되었습니다. (과제번호 : 971-0914-085-1)

참 고 문 헌

1. A. Uhlir, "Electrolytic shaping of germanium and silicon," *Bell Syst. Tech. J.*, vol.35, pp.333-347, 1956.
2. K.Imai, "A new dielectric isolation method using porous silicon," *Solid State Electronics*, vol.24, pp.159-164, 1981.
3. G.Bomchil, A.Halimaoui, and R.Herino, "Porous silicon: The material and its applications to SOI technologies," *Microelectron. Eng.*, vol.8, pp.293-310, 1988.
4. C.Pickering, M.I.J.Beale, D.J.Robbins, P.J.Fearson, and R.Greef, "Optical studies of the structure of porous silicon films formed in p-type degenerate and non-degenerate silicon," *J. Phys. C, Solid State Phys.*, vol.17, p.6535-6552, 1984
5. L.T.Canham, "Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers," *Appl. Phys. Lett.*, vol.57, pp.1046-1048, 1990.
6. W.Lang, P.Steiner, A. Richter, K. Marusczyk, G.Weimann and H.Sandmaier, "Application of porous silicon as a sacrificial layer," *The 7th International Conference on Solid-State Sensor and Actuator*, pp.26-27, 1995.
7. S. Barret, F. Gaspard, R. Herino, M. Ligeon, F. Muller and Ronga, "Porous silicon as a material in microsensor technology," *Sensor and Actuator A*, vol.33, pp.19-24, 1992.
8. W.Lang, P.Steiner, H.Sandmaier, "Porous silicon : a novel material for microsystems," *Sensors and Actuators A*, vol. 51, pp.31-36, 1995.
9. R.C. Anderson, R.S. Muller and C.W. Tobias, "Investigations of porous silicon for vapor sensing," *Sensors and Actuators*, vol. A21~A23, pp.635~639, 1990.
10. A.Richter, "Design considerations and performance of adsorptive humidity sensors with capacitive readout," *The 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, pp.310-313, 1993.
11. R.Murri, N.Pimto, and C.Ercoli, "A humidity sensor operating at very low temperature," *The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, pp.829-832, 1995.
12. G.M.O'Halloran, P.M.Sarro, J.Groeneweg, P.J.Trimp, and P.J.French, "A bulk micromachined humidity sensor based on porous silicon," *Transducer '97*, vol.1, pp.563-566, 1997.
13. R.L.Smith and S.D.Collins, "Porous silicon formation mechanisms," *J. Appl. Phys.* vol.71, R1, 1992.
14. P.Maccagnani, R.Angelucci, P.Pozzi, A.Poggi, L.Dori, G.C.Cardinali, and P.Negrini, "Thick oxidized porous silicon layer as thermo-insulating material for high temperature operating thin and thick film gas sensor," *Transducer '97*, vol.1, pp.213-216, 1997.
15. 김동일, "n-type porous silicon prepared by electrochemical etching and their applications to optoelectronics," *박사학위논문, 고려대학교*, 1997.
16. P.C.Searson, "Porous silicon membranes," *Appl. Phys. Lett.*, vol.59, no.7, pp.832-833, 1991.