

## 수소 플라즈마에 의해 표면 활성화된 실리콘 기판을 이용한 SOI 기판 제작에 관한 연구

최우범<sup>1</sup>, 주철민, 이종석, 성만영  
고려대학교 전기공학과

### A study on the fabrication of SOI wafer using silicon surfaces activated by hydro

W. B. Choi, C. M. Joo, J. S. Lee, M. Y. Sung  
Dept. of Electrical Eng., Korea Univ.

**Abstract** - This paper describes a method of direct wafer bonding using surfaces activated by a radio-frequency hydrogen plasma. The hydrogen plasma cleaning of silicon in the RIE mode was investigated as a pretreatment for silicon direct bonding. The cleaned silicon surface was successfully terminated by hydrogen. The hydrogen-terminated surfaces were rendered hydrophilic, which could be wetted by DI water rinse. Two wafers of silicon and silicon dioxide were contacted to each other at room temperature and postannealed at 300~1100°C in an N<sub>2</sub> atmosphere for 2 h. From the AFM results, it was revealed that the surface became rougher with the increased plasma exposure time and power. The effect of the plasma treatment on the surface chemistry was investigated by the AES analysis. It was shown that the carbon contamination at the surface could be reduced below 5 at. %. The interfacial energy measured by the crack propagation method was 122 mJ/m<sup>2</sup> and 384 mJ/m<sup>2</sup> for RCA cleaning and hydrogen plasm, respectively.

마에 의한 실리콘 기판 표면의 활성화를 통하여 표면의 오염 방지와 접합 강도를 증대시킬 수 있는 방법을 제안 하였다. 아울러 수소 플라즈마 공정 조건에 따른 표면의 거칠기 및 화학적 조성 분석 등을 통하여 접합에 대한 동작 기구를 해석하여 보았다.

### 2. 실험 방법

본 연구에서는 SOI 기판의 제작을 위해 두 가지 형태의 실리콘 기판이 사용되었다. SOI 기판의 활성 실리콘 층이 되는 산화막이 성장된 본드웨이퍼와 활성층을 지지하는 열산화막이 없는 베이스웨이퍼가 접합에 이용되었다. 본드웨이퍼와 베이스웨이퍼 모두 두께가 500 $\mu$ m, 직경이 4인치, 저항률이 5~20 $\Omega$ cm, 방향성이 (100)으로 붕소(boron)가 도핑된 p형 실리콘 기판이 사용되었다. 활성 실리콘층이 형성될 본드웨이퍼는 1100°C의 습식 산소 분위기에서 5시간동안 열산화하여 1.2 $\mu$ m 두께의 산화막이 성장되었다.

두 실리콘 기판은 다음과 같은 수소 플라즈마 공정을 통해 표면 활성화를 얻을 수 있었다. 실리콘 기판은 음극인 RF power 소스 위에 위치시켜 양극으로 대전된 수소 입자에 의해 충돌(bombardment)이 일어나도록 하였다. RF power는 50~200W 사이의 범위에서 변화시켰으며 플라즈마 노출시간은 10~600초 사이로 하였다. 진공 챔버의 초기 진공도는 2 $\times$ 10<sup>-5</sup> Torr까지 배기하였으며, 수소 플라즈마 공정중의 진공도는 200 mTorr를 유지하였다. 200 mTorr의 진공도를 유지하기 위해 수소가스는 100 sccm으로 일정하게 흘려주었다. 수소 입자와 산화막과의 충돌 과정으로 수소 원자가 실리콘 기판 표면에서 산소 원자와 결합함으로써 인해 실리콘 기판 표면에 silanol (Si-OH) group들이 존재하는 친수성 층이 형성되었다. 친수화된 실리콘 기판을 탈이온수(deionized water)에 약 5분간 담가둔 후에 회전 건조기에 의해 건조시킨 후 접합될 기판들의 (110) 기준면들을 서로 정렬함으로써 두 장의 기판을 한 쌍으로 하여 상온에서 초기 접합이 일어나도록 하였다. 상온에서 접합된 기판 상들은 접합강도를 높이기 위해 300~1100°C 온도 범위에서 2시간 동안 열처리하였다.

AES 분석을 이용하여 RCA 세척과 수소 플라즈마 처리에 의한 실리콘 기판 표면 조성을 조사 비교하였다. 수소 플라즈마의 RF power와 노출시간에 따른 기판 표면의 거칠기 변화는 AFM 분석을 통해 조사되었고, 적외선(IR) 광원을 이용하여 접합된 시편에 적외선을 투과시켜 접합 계면에 형성된 비접합 영역을 검출하였으며, crack propagation 방법으로 계면 에너지를 평가하였다.

### 3. 실험 결과 및 토의

#### 3.1. 기판 표면의 화학적 조성 비교

수소 플라즈마는 실리콘 표면에 존재하는 탄화 수소(hydrocarbon)나 탄화 플루오르(fluorocarbon)와 같은 유기물을 제거하는데 매우 효과적인 것으로 보고되고 있

### 1. 서 론

1980년도 중반에 보고된 실리콘 기판의 직접 접합 (silicon-wafer direct bonding : SDB) 기술은 실리콘 접합에 관련된 연구의 역사에 있어서 큰 획을 긋는 새롭고 진보적인 접합 기술이라 할 수 있다. 즉, SDB 방법은 실리콘 기판의 표면에 RCA 세척과 같은 화학적 전처리를 하여 다량의 Si-OH 기들로 이루어진 친수성(hydrophilic) 층을 형성시키고 두 장의 기판을 접촉시켜 OH 이온들간의 수소 결합(hydrogen bonding)을 이룬 뒤, 고온의 열처리 공정을 거쳐 재료 및 전기적인 연속성을 지닌 완전한 실리콘-실리콘 접합이 일어나도록 하는 보다 체계적인 접합 공정이다.[1]

1985년에 J. B. Lasky 등은 산화막이 성장된 두 장의 실리콘 기판을 아무런 매개체도 삽입하지 않은 상태에서 압착한 다음 단지 700~1050°C의 산소 분위기내에서 열처리만을 통하여 Si-SiO<sub>2</sub>-Si 접합 구조를 이루었다. 그들은 접합된 한 쪽 기판을 박판화(thinning)하여 SOI(Silicon-on-Insulator) 구조를 형성한 뒤, 캐패시터 구조와 p- 및 n-채널 FET를 구성하여 전기적인 특성을 평가한 결과 상부의 실리콘 막과 매몰 산화층의 질이 원래의 벌크 특성에 비해 저하되지 않았음을 확인한 바 있다. 이와 같이 전기적으로 절연성이 있는 산화막 위에 활성화된 실리콘층이 형성되어 있는 SOI 기판은 소자간 분리를 매우 쉽게 이룰 수 있기 때문에 SOI 기판의 실현에 따라 고집적화, 저소비 전력화, 고속화를 비롯해 고내압화, 고지능 소자화, 내방사선, 고부가가치 등을 기대할 수 있다.

본 논문은 SOI 기판 형성에 있어 RCA 세척보다 우수한 새로운 SDB 공정 개발에 관한 것으로 수소 플라즈

다.[6] 이와 같은 탄소를 함유한 오염물들이 접합될 실리콘 기판 표면에 존재하게 되면, 접합 계면에 비접합 영역을 형성하게 되어 접합강도가 낮아지고 접합된 구조의 전기적 특성을 저하하는 요인이 된다. 따라서 실리콘 표면에 존재하는 유기 오염물의 제거는 SDB 공정에 있어서 매우 중요시되고 있다. 수소 플라즈마 처리 후에 실리콘 기판 표면의 화학적 조성이 AES 분석을 통해 조사되었다. 또한 기존의 RCA 세척법으로 준비된 시편에 대해서도 AES 분석을 실시하였다. 본 실험에서 비교를 위해 사용된 RCA 세척법은 SDB 공정에서 가장 일반적으로 사용되는  $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  용액을 1:1:5로 혼합하여 80°C 온도에서 시편을 5분간 세척하는 방법이다. 그림 1은 AES 분석을 통해 조사된 표면 조성을 나타내고 있다. AES 분석으로부터 RCA 세척 후에도 실리콘 기판 표면에는 탄소 원소가 10 at. % 이상으로 검출되고 있으나, 수소 플라즈마 처리를 통해 준비된 기판 표면에서는 탄소 원소가 5 at. % 이하로 줄어들었음을 확인할 수 있었다. 이는 수소 플라즈마를 이용한 표면 처리 방법이 SDB 방법에 보다 적합한 공정임을 보여주고 있다.

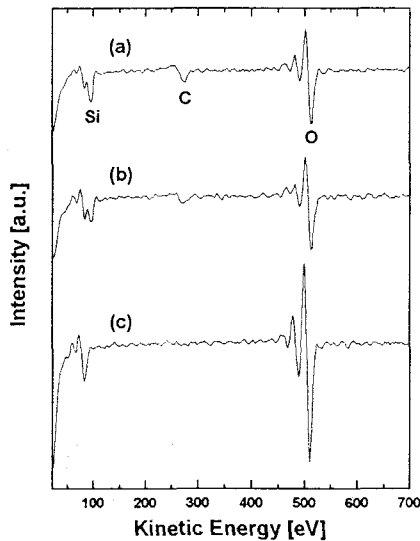


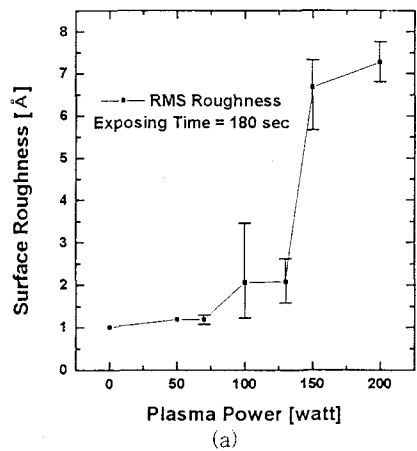
그림 1. 실리콘 기판 표면에 대한 AES 분석 결과. (a) bare 실리콘 기판, (b) RCA 세척 후 실리콘 기판, (c) 수소 플라즈마 처리 후 실리콘 기판.

### 3.2. 기판 표면의 거칠기 변화 조사

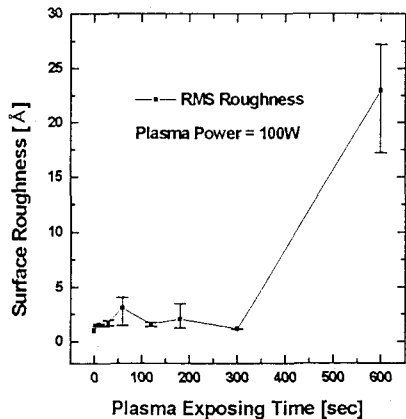
수소 플라즈마 공정은 가벼운 수소 입자의 물리적인 충돌로 실리콘 기판 표면을 활성화함으로 실리콘 표면의 거칠기에는 전혀 영향을 주지 않게 된다. 일반적인 RCA 세척과 같은 화학 처리로 준비된 실리콘기판의 표면은 화학 산화막의 성장과 식각 과정이 동시에 일어나면서 표면 거칠기가 증가하는 경향을 보이게 된다. SDB 공정에 있어 가장 중요한 공정 파라미터 중의 하나인 표면 거칠기의 증가는 다음과 같은 문제점을 야기하게 된다. 접합이 부분적으로 이루어지거나 심한 경우 접합이 일어나지 않게 되며, 부분적인 접합이 일어난 경우에 있어서도 초기 접합 강도가 낮아지는 원인으로 작용한다.

AFM 분석을 통하여 RF power 및 플라즈마 노출시간에 따른 실리콘기판의 표면 거칠기에 대한 변화 양상을 조사하였다. 이때 분석에 대한 정확도를 높이기 위해 각각의 조건 당 3개의 시편에 대해 분석이 이루어졌다. RF power 변화에 따른 표면 거칠기의 변화는 수소 플라즈마 노출시간을 3분으로 일정하게 고정시켜 조사하였다. 그림 2(a)는 RF power의 변화에 따른 표면 거칠기를 나타내고 있다. 50~130W 범위의 RF power에서 실리콘 표면의 거칠기는 RF power가 증가함에 따라 조금씩 증가하는 양상을 보이긴 했으나, 그 변화는 측정오차

범위 안에 있을 정도로 매우 작은 값을 나타내었다. 이는 수소 입자의 충돌에너지가 실리콘기판의 표면을 식각할 정도의 큰 운동에너지를 갖지 않음으로 인해 거칠기의 변화가 나타나지 않는 것으로 사료된다. 그러나 150W 이상의 RF power에서 실리콘 표면의 거칠기는 급격히 증가하는 경향을 보여주었다. 이는 수소 원자의 큰 운동에너지가 실리콘 기판과의 충돌과정에서 표면에 전달되게 되고, 이로 인해 기판 표면의 온도는 국부적으로 상승하게 된다. 기판 온도의 상승으로 수소 원자는 자연 산화막 및 실리콘과 반응을 통해 휘발성 있는 수소 화합물들( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{SiOH}_x$ )을 형성하게 되며, 이 과정에서 인해 기판의 표면에서 물리적 식각 이외에 화학적 식각이 발생하게 된다. 수소 원자에 의한 화학적 식각은 실리콘기판에 대해 방향성을 나타내게 되는데, 일반적으로 (100) 방향의 실리콘에 있어서 (111) 결정 방향으로의 식각이 다른 결정방향에 비해 지배적으로 일어나는 것으로 보고되고 있다.[2] 그림 3은 200W의 수소 플라즈마에 의해 실리콘 표면이 (111) 결정 방향으로 식각된 AFM 결과를 보여주고 있다. 따라서 수소 플라즈마를 이용한 실리콘기판 표면의 활성화 공정은 화학적 식각이 발생하지 않도록 130W 이하의 RF power에서 수행되어야 한다.



(a)



(b)

그림 2. 수소 플라즈마 처리 조건에 따른 표면 거칠기 변화에 대한 AFM 분석 결과. (a) RF power, (b) 노출시간.

수소 플라즈마 노출시간 변화에 따른 표면 거칠기의 변화는 모든 시편을 100W의 RF power에서 플라즈마 처리를 한 후에 조사하였다. 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 10~300초 사이의 시간동안 플라즈마 처리한 시편의 표면 거칠기는 노출시간에 따른 변화가 거의 없는 것으로 관찰되었다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 100W의

RF power에 의한 수소 입자의 충돌에너지가 실리콘기판 표면을 식각할 정도의 큰 운동에너지를 갖지 않음으로 인해 거칠기의 변화가 나타나지 않는 것으로 사료된다. 그러나 10분간 수소 플라즈마에 노출된 실리콘기판의 표면 거칠기는 급격히 증가된 것이 관찰되었다. 이는 수소 원자의 연속적인 실리콘기판과의 충돌과정에서 기판 표면의 온도는 지속적으로 상승하게 되어 화학적 식각이 일어난 것으로 사료된다. 따라서 실리콘기판 표면은 화학적 식각이 발생하지 않도록 5분 이내의 짧은 시간동안 플라즈마에 노출되어야 한다.

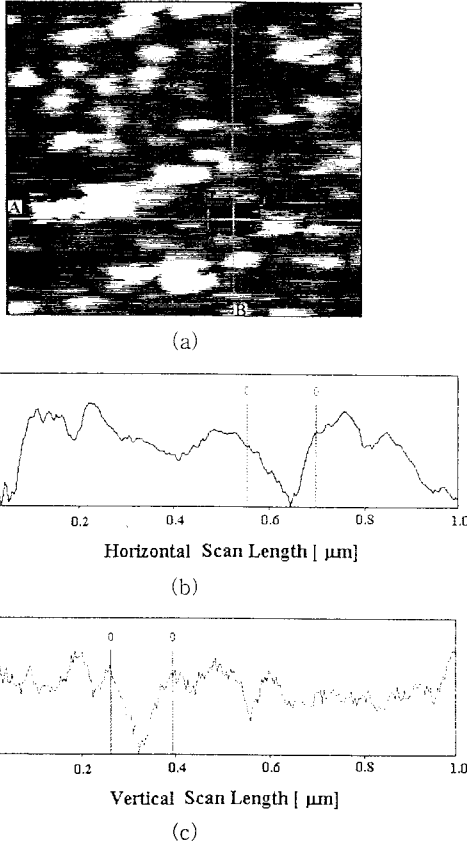


그림 3. 수소 플라즈마에 의해 (111)면 방향으로 실리콘이 식각된 기판 표면의 AFM 결과 분석. (a) 실리콘 표면의 AFM 사진, (b) 가로 방향으로 조사된 표면 거칠기 (Line A), (c) 세로 방향으로 조사된 표면 거칠기 (Line B)

### 3.3. 접합 영역의 관찰 및 접합 에너지 조사

적외선(IR) 광원을 이용해 접합된 시편에 적외선을 투과시켜 접합 계면에 형성된 비접합 영역을 관찰하였다. 그림 4는 수소 플라즈마를 이용해 초기 접합된 기판 상의 IR 이미지를 나타내고 있다. 그림에서 몇 개의 비접합 영역이 관찰되고 있는데 이는 실험 중 면지 입자에 의해 생성된 것으로 본 실험이 고정정실(class=100)에서 수행됨으로 해결될 수 있는 문제라 사료된다. 또한 후-열처리 공정에 의해 비접합 영역의 변화가 관찰되었다. 열처리 온도가 증가함에 따라 비접합 영역이 감소하는 것이 그림 5에 보여지고 있다. Crack propagation 방법으로 평가된 접합 에너지를 조사한 결과는 다음과 같았다. 수소 플라즈마를 통해 표면이 활성화된 실리콘기판의 초기 접합 에너지는 약 384 mJ/m<sup>2</sup>로 기존의 화학적 처리 방법에 의해 얻어지는 122 mJ/m<sup>2</sup>과 비교해 약 3배 이상의 높은 접합 에너지를 보여주었다. 이는 위에서 언급한 기판 표면의 유기물에 의한 영향과 함께 플

라즈마 처리에 의해 실리콘기판 표면상에 silanol(Si-OH) group 이외에 활성화된 불완전 결합(activated dangling bond)에 의한 결과라 사료된다.

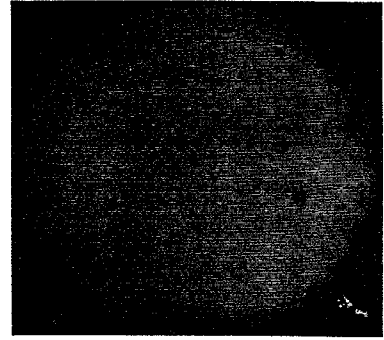


그림 4. 수소 플라즈마를 이용해 접합된 실리콘기판의 IR 사진.

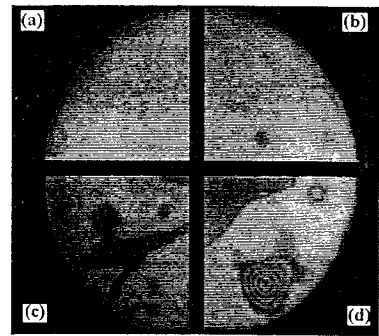


그림 5. 열처리 조건에 따른 비접합 영역의 변화 관찰. (a) 900°C, (b) 700°C, (c) 500°C, (d) 300°C.

## 3. 결 론

본 실험에서는 수소 플라즈마에 의해 활성화된 실리콘기판을 이용한 SDB 공정을 수행하여 SOI 기판을 제작하였다. 실리콘 기판 표면의 유기물이 수소 플라즈마 처리에 의해 5 at. % 이하로 제거가 됨을 확인할 수 있었으며, 150W, 5분 이하의 수소 플라즈마 처리에 대해서는 표면 거칠기의 변화가 거의 일어나지 않았으나, 플라즈마 RF power와 노출시간을 그 이상으로 증가시킴으로 실리콘 식각에 의한 거칠기의 급격한 증가가 관찰되었다. 수소 플라즈마를 통해 표면이 활성화된 실리콘기판의 초기 접합 에너지가 약 384 mJ/m<sup>2</sup>로 기존의 화학적 처리 방법에 의해 얻어지는 122 mJ/m<sup>2</sup>과 비교해 약 3배 이상의 높은 접합 에너지를 보여주었다. 이는 수소 플라즈마를 이용한 표면 처리 방법이 SDB 방법에 보다 적합한 공정임을 보여주고 있다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초 전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.

### [참 고 문 헌]

- [1] Q.-Y. Tong and U. Gosele, "A model of low-temperature wafer bonding and its applications", J. Electrochem. Soc., Vol. 143, No. 5, pp1773, 1996.
- [2] K. H. Hwang and E. Yoon, "Mechanism of surface roughness in hydrogen plasma-cleaned (100) silicon at low temperature", J. Electrochem. Soc., Vol. 144, No. 1, pp335, 1997.