

전자선 증착된 실리콘 산화막층을 이용한 직접 접합에 관한 연구

박 홍우^o, 주 병권, 이 윤희, 정 성재, 이 남양, 고 근하, M.R.Haskard^o, 박 정호^o, 오 명환
한국과학기술연구원 정보전자연구부, * (주) 오리온전기 영상표시연구소
^o Microelectronics Centre, Univ. of South Australia, ^o 고려대학교 전자공학과

A Study on the Direct Bonding Method using the E-Beam Evaporated Silicon dioxide Film

Heung-Woo Park^o, Byeong-Kwon Ju, Yun-Hi Lee, Seong-Jae Jeong^o, Nam-Yang Lee^o,
Ken-Ha Koh^o, M.R.Haskard^o, Jung-Ho Park^o, Myung-Hwan Oh

Div. of Electronics and Information Technology, KIST, * Information Display Research Institute, Orion Electronics Co., LTD
^o Microelectronics Centre, University of South Australia, ^o Dept. of Electronics Engineering, Korea University

Abstract

In this work, we have grown or evaporated thermal oxide and E-beam oxide on the (100) oriented n-type silicon wafers, respectively and they were directly bonded with another silicon wafer after hydrophilization using solutions of three types of HNO₃, H₂SO₄ and NH₄OH. Changes of average surface roughness after hydrophilizations of the single crystalline silicon wafer, thermal oxide and E-beam evaporated silicon oxide were studied using atomic force microscope. Bonding interfaces of the bonded pairs were inspected using scanning electron microscope. Void and non-contact area of the bonded pairs were also inspected using infrared transmission microscope.

1. 서 론

Micro-Electro-Mechanical System(MEMS)나 Silicon On Insulator(SOI) 응용에 있어서 실리콘-실리콘의 접합은 많은 응용 범위를 가지고 있다^(1,2). 주로 사용되는 접합 방법에는 크게 직접 접합 방법과 양극 접합 방법의 두 종류가 있다^(1,3-5).

직접 접합 방법은 시료의 표면을 수산화 처리하고 초기 접합한 후 고온 열처리하는 방법으로서 실험이 용이하고 접합 강도가 크다는 장점이 있다. 반면에, 접합 재료가 실리콘이나 산화막에 국한되며 고온 공정이 필요하다는 단점이 있다. 수산화 처리 용액으로는 주로 70~80℃의 질산이나 황산 용액을 사용한다.

양극 접합 방법은 금속(반도체)과 유리를 마주보게 겹쳐 놓고 가열한 후 전압을 인가하여 접합하는 방법이다. 양극 접합 방법은 증착된 유리 층을 이용하면 접합 온도를 낮출 수 있다는 장점이 있으나 접합 강도가 약하고 금속-금속 또는 절연체-절연체 접합에는 응용될 수 없다는 단점이 있다.

본 연구에서는 단결정 실리콘 기판 위에 열 산화막 또는 전자선 증착 산화막(E-beam oxide)을 성장시키고 표면을 수산화

처리하여 실리콘 기판과 직접 접합 방법을 사용하였다. 수산화 처리를 통한 시료의 표면 거칠기 변화를 Atomic Force Microscope(AFM)을 이용하여 측정하였고 접합된 시료의 계면을 Scanning Electron Microscope(SEM)을 사용하여 관찰하였다. 또한, 접합된 시료의 비접합영역을 적외선 투과 현미경을 이용하여 관찰하였다.

2. 직접 접합 공정

Fusion Bonding 또는 Direct Bonding 이라 불리는 직접 접합 기술은 실리콘-실리콘, 산화막-산화막, 또는 실리콘-산화막 구조에 응용이 가능하다. 접합되는 두 장의 웨이퍼 표면들은 매우 깨끗하고 평탄해야 한다. 초기 접합을 이루기 위해서는 접합된 시료들을 가열된 질산이나 황산과 과산화수소수 또는 수산화 암모늄과 과산화수소수 등의 용액에 담가서 친수화 시키는 과정이 선행되어야 한다⁽³⁻⁵⁾. 이러한 친수화(hydrophilization) 과정을 통하여 웨이퍼 표면에는 실리콘 원자들과 결합한 고밀도의 OH 기들이 남게 된다. 상온에서 두 웨이퍼 표면을 서로 마주보게 붙이면 수초 내에 수소 결합(hydrogen bond)에 의하여 약하게 접합하게 된다. 즉, 표면의 OH 기들이 서로 결합하며 이러한 단계를 초기 접합(initial contact) 이라고 하고 적외선 스펙트럼 등을 통하여 접합 파동(bonding wave)을 관찰 할 수 있다.

다음으로, 약하게 초기 접합된 시료의 접합 강도를 높이기 위해서는 열처리 공정이 요구되며 주로 1000℃ 이상의 고온에서 수행한다. 일반적으로 약 300℃ 에서는 결합된 OH 기들이 물로 변하게 되고 약 800℃ 에서는 물이 분해되어 수소 원자는 실리콘 기판 내부로 확산해 들어가고, 남은 산소 원자가 실리콘 원자 사이를 결합하게 된다. 온도가 더욱 높아지게 되면 산소 원자도 실리콘 격자 내부로 확산하여 결국에는 실리콘 원자 사이의 직접적인 결합이 이루어지게 된다.

직접 접합 방법은 그 공정이 간단하고 응용성이 크다는 장점이 있다. 반면에 고온 공정을 필요로 하기 때문에 두 접합

기판 사이에 전기적 연결이 요구될 때 주로 사용되는 알루미늄을 사용할 수가 없다는 단점이 있다. 또한 불순물이 도핑 되어 있는 기판 간의 접합시 불순물의 재분포가 일어나므로, 이의 적절한 제어 기술이 요구되는 등의 단점이 있다. 최근에는 이런 단점을 극복하고자 저 용접 유리를 접합 계면 층으로 이용하거나 플라즈마를 이용한 표면 활성화 방법 등을 이용하여 보다 낮은 온도에서 직접 집합을 수행할 수 있는 기술들이 연구되고 있다.

3. 실험 방법

본 실험에서는 (100) 결정 방위를 갖는 n형 단결정 실리콘 기판을 사용하였다. 일부의 실리콘 기판 위에 진기로를 이용하여 1 μ m 두께의 열 산화막을 성장하였고 또 다른 실리콘 기판에는 전자선 증착기를 이용하여 1 μ m 두께의 산화막을 증착하였다. 이들을 세척하고 NH₄OH 용액, HNO₃ 용액과 H₂SO₄ 용액의 수산화 처리 용액을 이용하여 각각 10분 동안 수산화 처리한 후 초기 집합한 다음, 1000 $^{\circ}$ C에서 30분 동안 열처리하였다. 수산화 처리로 인한 시료의 표면 거칠기 변화를 AFM(atomic force microscope)을 이용하여 측정하였으며 집합된 시료의 집합 경계를 SEM(scanning electron microscope)으로 관찰하였다. 또한, 집합된 시료의 비접합영역을 적외선 투과 현미경을 이용하여 관찰하였다. 본 실험에서 사용한 수산화 처리 용액의 조성과 사용 온도를 표 1에 보였다.

Table 1. Compositions of hydrophilization solutions

Solutions	Compositions	Temperature
NH ₄ OH	NH ₄ OH : H ₂ O ₂ : H ₂ O = 20 : 5 : 30	60 $^{\circ}$ C
HNO ₃	HNO ₃	70 $^{\circ}$ C
H ₂ SO ₄	H ₂ SO ₄ : H ₂ O ₂ : H ₂ O = 83.2 : 4.3 : 13.4	80 $^{\circ}$ C

4. 결과 및 고찰

단결정 실리콘 웨이퍼, 열산화막과 전자선 증착 산화막의 표면 거칠기 영상을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에 나타낸 시료들에 대하여 표 1에 나타낸 용액들로 수산화 처리를 한 후 표면 거칠기의 변화를 관찰하여 표 2에 나타내었다.

Table 2. Changes of average surface roughness after hydrophilization

	Silicon wafer	Thermal oxide	E-beam oxide
No hydrophilization	1.2 \AA	8.6 \AA	19.0 \AA
HNO ₃	8.0 \AA	8.6 \AA	14.0 \AA
H ₂ SO ₄	8.8 \AA	8.7 \AA	-
NH ₄ OH	12.0 \AA	2.2 \AA	12.0 \AA

실리콘 기판의 경우는 수산화 처리를 함으로써 표면 거칠기가 증가되었으나 열산화막의 경우에는 수산화 처리를 하여도 표면 거칠기에는 변화가 없는 알 수 있다. 오히려, NH₄OH 용액으로 수산화 처리를 한 경우에는 표면 거칠기가 현저히 감소한 것을 알 수 있었다. 또한, 전자선 증착 산화막의 경우에는 전체적

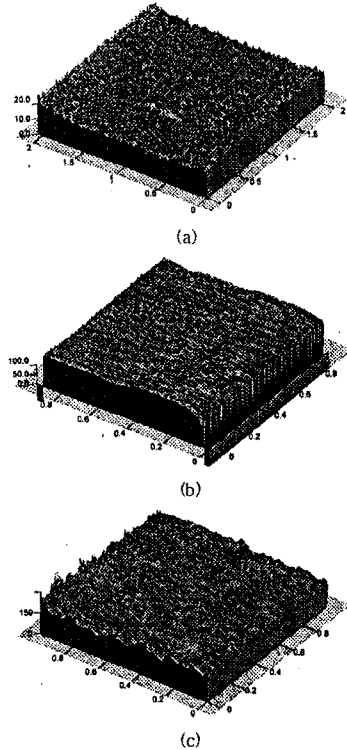


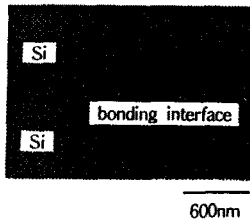
Fig. 1 AFM images of silicon wafer(a), thermal oxide(b) and E-beam oxide(c)

으로 수산화 처리를 함으로써 표면 거칠기가 감소하는 경향을 관찰할 수 있었다. 따라서, 수산화 처리를 함으로써 실리콘의 경우에는 표면 거칠기가 증가하였고 산화막의 경우에는 전반적으로 표면 거칠기가 감소하는 경향을 나타내었다.

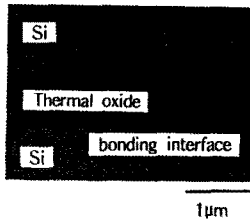
표 1에 나타낸 수산화 처리 용액을 이용하는 경우 실리콘-실리콘, 실리콘-열산화막, 열산화막-열산화막 등의 모든 구조에 대하여 초기 집합이 가능하였다. 초기 집합된 시료를 1000 $^{\circ}$ C에서 30분 동안 열처리하면 완전히 결합된 집합 쌍을 얻을 수 있으며 적외선 투과 현미경으로 집합 쌍의 비접합영역을 관찰하여 본 결과 비접합 영역은 존재하지 않는다는 사실을 확인하였다. 일부의 완전히 결합된 집합 쌍의 집합 경계를 SEM으로 관찰하여 그림 2에 나타내었다.

그림 2(a)는 H₂SO₄ 용액으로 수산화 처리한 실리콘 기판-실리콘 기판 집합 쌍의 집합 경계를 보여주는 SEM 사진이고 그림 2(b)는 HNO₃ 용액으로 수산화 처리한 실리콘 기판-열산화

막 접합 쌍의 접합 경계를 보여주는 SEM 사진이다. 그림 2로부터 접합이 완전히 이루어 졌음을 알 수 있다. 사진 가운데 부분의 적선으로 보이는 부분이 접합 경계 부분으로서 약 수십 A 정도의 폭을 갖고 있으며 접합 경계 부분에 존재하는 하얀 색 입자들은 접합 쌍의 연마 과정에서 묻은 것이라고 생각된다. 다른 접합 쌍들에 대하여도 접합 경계를 관찰하였으나 접합 경계를 찾지 못할 정도로 완전한 결합을 하고 있었다.



(a) silicon-silicon (hydrophilized with H_2SO_4)



(b) silicon-thermal oxide (hydrophilized with HNO_3)

Fig. 2 SEM photographs of bonding interface of bonded samples

전자선 증착 산화막에 대하여는 H_2SO_4 용액에 대하여만 초기 접합에 성공하였으며 초기 접합된 시료를 열처리하기 위해 고온 전기로에 넣게 되면 접합 쌍이 분리되는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 전자선 증착 산화막의 조성이 열산화막의 조성과의 차이가 있기 때문이라고 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 단결정 실리콘 기판 위에 열 산화막 또는 전자선 증착 산화막(E-beam oxide)을 성장시키고 표면을 수산화 처리하여 실리콘 기판과 직접 접합 방법으로 접합하였다. 시료의

수산화 처리를 통한 표면 거칠기의 변화를 AFM(Atomic Force Microscope)을 이용하여 측정된 결과 실리콘의 경우는 표면 거칠기가 증가하였으나 산화막의 경우는 전반적으로 표면 거칠기가 감소하였다는 사실을 알 수 있었다.

수산화 처리를 한 후 열처리를 거친 접합 쌍의 접합 경계를 SEM(Scanning Electron Microscope)으로 측정된 결과 수십 A 정도의 폭을 갖는 접합 경계를 관찰 할 수 있었으며 접합이 완전히 이루어졌다는 사실을 확인 할 수 있었다.

또한, 완전히 접합된 접합 쌍에 대하여 적외선 투과 현미경을 이용하여 비접합영역을 관찰하여 보니 비접합 영역이 존재하지 않고 접합이 완전히 이루어 졌다는 사실을 확인 할 수 있었다.

그러나, 전자선 증착 산화막의 경우에는 친수화 처리를 거쳐 초기 접합은 가능하였으나 열처리 과정에서 탈착되는 현상이 나타났다. 이는 전자선 증착 산화막의 조성이 열산화막의 조성과 다르기 때문에 연유되는 접합력의 차이 때문이라고 생각되며 이의 확인 및 개선을 위하여 두 가지 산화막의 조성비를 FTIR로 측정·비교하며 진주-전압 특성, 정전 용량-전압 특성과 식각 특성 등을 비교할 계획이다. 또한, 향후에는 완전히 접합된 접합 쌍의 접합 강도도 측정할 계획이다.

참고 문헌

- [1] H.Henmi et al., "Vacuum packaging for microsensors by glass-silicon anodic bonding", Sensors and Actuators A, 43 (1994) p.243
- [2] A.J.Auberton-Herve, B.Aspar and J.L.Pelloie, "SOI substrates for low-power LSI's", Solid State Technologies, March (1995) p. 87
- [3] Jiwei Jiao et al., "Low-temperature silicon direct bonding and interface behaviors", Sensors and Actuators A, vol. 50, (1995) p. 117
- [4] T.Kurahashi, M.Onada and T.Hatton, "Sensors utilizing Si wafer direct bonding and low temperature", Proc. 2nd Int. Symp. Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, Oct. (1991) p. 173
- [5] R.Stengl, K.Y.Ahn and U.Gosele, "Bubble-free silicon wafer bonding in a non-cleanroom environment", Japanese Journal of Applied Physics Letter, vol. 27, no. 12, (1988) p. L2364