

극한 환경 MEMS용 2" 3C-SiC기판의 직접접합 특성

Direct Bonding Characteristics of 2" 3C-SiC Wafers for Harsh Environment MEMS Applications

정귀상

(Gwi-y-Sang Chung)

Abstract

This paper describes on characteristics of 2" 3C-SiC wafer bonding using PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition) oxide and HF (hydrofluoride acid) for SiCOI (SiC-on-insulator) structures and MEMS (micro-electro-mechanical system) applications. In this work, insulator layers were formed on a heteroepitaxial 3C-SiC film grown on a Si (001) wafer by thermal wet oxidation and PECVD process, successively. The pre-bonding of two polished PECVD oxide layers made the surface activation in HF and bonded under applied pressure. The bonding characteristics were evaluated by the effect of HF concentration used in the surface treatment on the roughness of the oxide and pre-bonding strength. Hydrophilic character of the oxidized 3C-SiC film surface was investigated by ATR-FTIR (attenuated total reflection Fourier transformed infrared spectroscopy). The root-mean-square surface roughness of the oxidized SiC layers was measured by AFM (atomic force microscope). The strength of the bond was measured by tensile strength meter. The bonded interface was also analyzed by IR camera and SEM (scanning electron microscope), and there are no bubbles or cavities in the bonding interface. The bonding strength initially increases with increasing HF concentration and reaches the maximum value at 2.0 % and then decreases. These results indicate that the 3C-SiC wafer direct bonding technique will offers significant advantages in the harsh MEMS applications.

Key Words : SiC-MEMS, Pre-bonding, 3C-SiC, CVD, HF, SiCOI

1. 서 론

최근 미국, 일본, 유럽 등의 기술선진국에서는 기계적 특성이 우수하며 고온에서도 매우 안정적이고 Si 및 GaAs보다도 밴드갭이 2~3배 크고 화학적으로 안정성이 훨씬 우수한 특성을 갖는 SiC 반도체가 극한 환경에서도 사용 가능한 최고의 소재

로 주목받고 있다[1].

수많은 결정구조를 갖는 SiC중에서도 입방형 결정구조(β - 혹은 3C-SiC)는 전자이동도가 $1000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 로서 다른 결정구조의 SiC (4H-SiC : $950 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 6H-SiC : $450 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)에 비하여 우수하며, n-형 및 p-형의 불순물 주입이 Si 소자 가공기술을 적용할 수 있어 고온, 고전력, 고주파용 전자소자 및 M/NEMS (micro/nano electro mechanical system) 등에 관한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 그러나, 3C-SiC는 벌크(bulk) 재료로 성장이 불가능하기 때문에 Si속에서 고온 multiple C 이온을 주입한 후, 열처리를 통한 SiC 층을 형성시키는 방

동서대학교 정보시스템공학부 메카트로닉스공학전공
(부산시 사상구 주례동 산69-1번지,
Fax: 051-328-1569,

Corresponding Author : gschung@dongseo.ac.kr)
2003년 2월 4일 접수, 2003년 4월 4일 1차 심사완료,
2003년 4월 16일 최종 심사완료

법과 Si와 SOI (Si-on-insulator)기판위에 CVD (chemical vapor deposition)를 이용한 이중박막을 성장시키고 있다[2-5]. 3C-SiC는 고온 이중결정 성장시 Si와 SiC 경계면의 열팽창계수 (8 %)차와 격자부정합 (20 %)으로 인해 박막의 질과 제조된 전자소자의 성능이 떨어지며[6], 이러한 단점을 극복하기 위해서 낮은 온도에서 분해가 되고 취급이 용이한 methyltrichlorosilane (CH_3SiCl_3 , MTS), methylsilane (CH_3SiH_3 , MS), hexamethyldisilane ($(\text{CH}_3)_6\text{Si}_2$, HMDS), dimethyldichlorosilane ($(\text{CH}_3)_2\text{SiCl}_2$, DMDS) 등의 실란을 사용한 저온 CVD 성장에 관한 연구와 Si 마이크로머시닝기술에 응용하기 위해 절연층 상부에 단결정 3C-SiC 박막층이 존재하는 SiCOI (SiC-on-insulator) 구조 제조에 관한 관심이 증가되고 있다[7,8].

본 연구는 절연막위에 단결정 3C-SiC 박막층이 존재하는 극한 환경용 대면적의 SiCOI 구조를 제조하기 위한 선행연구로써 HF 전처리와 열산화방식에 비해 증착후, 표면 거칠기가 거칠지만 증착온도가 낮아 thermal stress가 작고 짧은 시간에 두꺼운 절연막의 증착이 가능하며 직접접합시 접합강도가 우수한 장점[9]을 가지고 있는 PE (plasma enhanced)CVD 절연막을 접합 매개층으로 사용한 2" 3C-SiC 기판의 초기직접접합에 관한 것이다. 열산화막과 3C-SiC 박막의 depth profile은 AES (auger electron spectroscopy), 증착된 PECVD 절연막의 친수성 특성은 ATR-FTIR (attenuated total reflection-fourier transform infrared spectroscopy), 박막의 표면 거칠기는 AFM (atomic force microscopy), 초기접합 조건에 따른 접합력은 인장시험기 그리고 IR 이미지와 SEM (scanning electron microscope)으로 접합계면 특성을 각각 분석·평가했다.

2. 실험

본 연구에서는 2" Si(100)기판위에 성장된 단결정 3C-SiC 박막을 갖는 handle기판과 2" Si(100)기판을 active기판으로 각각 사용하였다. SiCOI 구조용 3C-SiC기판의 직접접합 공정은 다음과 같다. 먼저, 단일 선구체로 HMDS (hexamethyldisilane; $(\text{CH}_3)_6\text{Si}_2$), purging 및 운반가스로 Ar과 N_2 를 각각 사용하여 AP (atmospheric pressure)CVD법으로 1350°C에서 3C-SiC 박막을 2" handle기판위에 이중결정 성장시켰다[10]. 기본 RCA세정 후, 성장된 3C-SiC 박막과 절연막의 화학적 결합력을 높이기 위해 1100°C에서 4 시간동안 2000Å의 습식 열

산화막을 성장했으며, 300°C에서 45분간 1 μm의 PECVD 절연막을 각각 증착하였다. 한편, active기판은 1 μm의 PECVD 절연막을 증착하였다. 초기접합을 위해 각각의 기판을 1000°C 열처리와 표면 거칠기를 개선하기 위하여 CMP (chemical mechanical polishing)공정을 수행하였다[11].

초기접합을 위한 기판의 세척공정 순서는 CMP 공정후, 표면에 존재하는 slurry를 제거하기 위해 초음파 세척후, HCl과 H_2O_2 를 혼합한 용액과 H_2SO_4 와 H_2O_2 를 혼합한 용액에 10분간 순차적으로 세정한 후에 질소 가스로 건조하였다. 그리고 초기접합을 위해 HF와 H_2O 를 각각의 농도 (1.0, 1.5, 2.0, 2.5 %)로 희석한 용액에서 1분간 전처리했으며, 전처리된 시편을 DI water에 세정하였다. 충분한 초기접합 강도를 얻기 위해서 기판접합에 영향을 미치는 이온들이 기판 표면에 다량으로 존재할 수 있도록 건조되지 않은 상태에서 초기접합을 하였다. 초기접합시 인가하중은 각각 0.1, 0.5, 1.0 kg/cm²로 HF의 농도와 초기접합시의 인가하중에 따른 초기접합력의 변화를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 각 공정별 박막표면 거칠기를 AFM으로 분석한 것이다. 그림 1(a)는 APCVD법으로 성장된 3C-SiC 박막의 표면 거칠기 (R_{MS})는 65.8Å이다. 한편, 그림 1(b)와 (c)는 3C-SiC 박막위에 순차적으로 열산화막과 PECVD 절연막을 각각 형성했을 경우, 표면 거칠기가 89.08Å과 86.7Å으로 산화후 더욱 거친 박막 표면이 나타났다. 외부 인가하중이 없는 자발적인 초기접합을 위해서는 박막 표면 거칠기가 5Å이하가 되어야한다[9]. 그림 1(d)는 CMP후의 AFM 이미지로 평균 표면 거칠기가 4Å으로 자발적인 접합이 가능한 매우 평탄한 박막표면을 얻었다.

습식 열산화후 AES(VG Scientifics, MICRO-LAB 350)로 depth profile을 분석했다. 분석조건은 초기진공 8×10^{-10} Torr, 분석시 챔버진공은 5×10^{-8} Torr, 가속전압은 3 kV, 전류는 1 μA였다. 그림 2는 산화후에 나타나는 산화막과 SiC 사이의 depth profile을 나타낸 것이다. 산화막 영역에서는 C 피크는 나타나지 않았으며, O 피크와 Si (76, 92 eV) 피크가 각각 나타났다. Si의 76 eV 피크는 SiO_2 에 의해 나타나는 피크이고, Si의 92eV 피크는 전자방사에 의해 손상된 SiO_2 로부터 나타난다. 산화막과 3C-SiC의 전이영역으로 갈수록 박막내

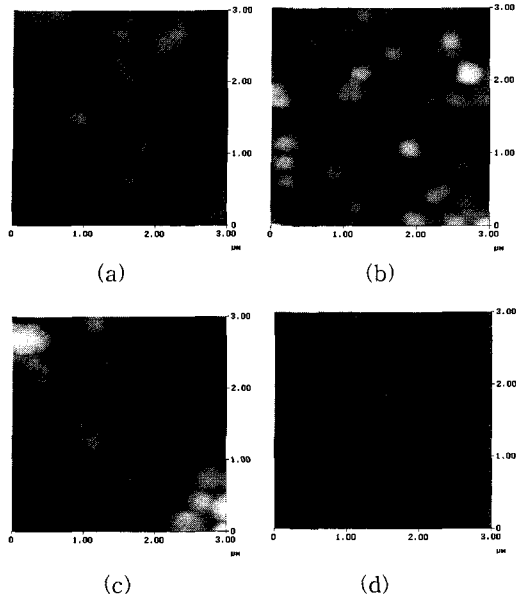


그림 1. 각 공정별 박막표면의 AFM 이미지; (a) Si (100)기판위에 성장된, (b) 습식 열산화된, (c) PECVD 산화막이 증착된 그리고 (d) CMP후 3C-SiC 박막.

Fig. 1. Surface AFM images of 3C-SiC wafer according to process sequences; 3C-SiC thin-films (a) grown on Si(100) wafers, (b) wet thermal oxidized, (c) deposited PECVD oxide, and (d) flatted by CMP. successively.

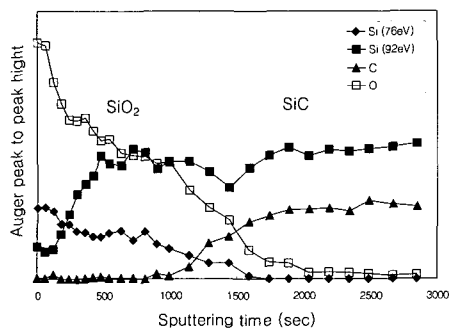
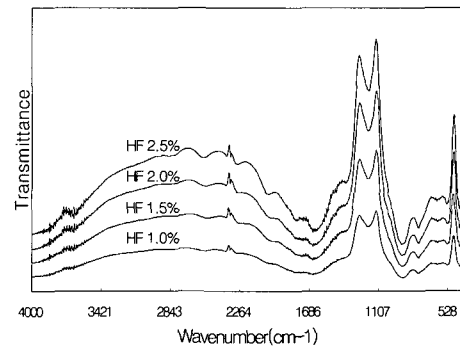


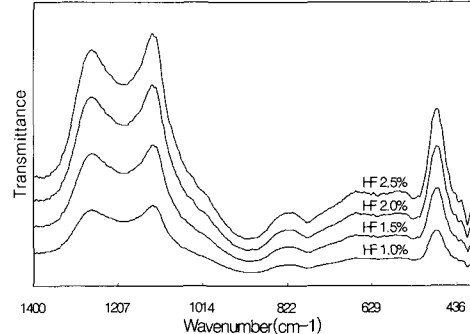
그림 2. 2" 3C-SiC 박막위에 성장된 습식 열산화막의 AES depth profiles.

Fig. 2. AES depth profiles of wet thermal oxidation films grown on 2" 3C-SiC thin-films.

화학적 조성이 서서히 변화하여 O 피크는 작아지며 C 피크가 나타나기 시작한다. 3C-SiC 영역에서는 O 피크는 사라지고, SiC에 의한 Si 피크와 C 피크만이 나타났다. 전이영역은 열산화시 형성되는 고정전하가 원인이며, 건식산화에 비해 다소 넓은 전이영역이 나타났다[12,13].



(a)



(b)

그림 3. (a) HF 농도와 (b) Si-O 결합 범위에 따른 PECVD 산화막의 ATR-FTIR transmittance spectra.

Fig. 3. ATR-FTIR transmittance spectra of PECVD oxide with variation of (a) HF concentrations and (b) Si-O bonding ranges.

그림 3(a)는 HF 전처리 용액의 농도(1.0, 1.5, 2.0, 2.5 %)에 따른 PECVD 절연막의 ATR-FTIR spectra를 나타낸 것이다. 1600~1800 cm^{-1} 의 영역은 공기중의 수증기에 의한 투과를 나타낸다. 3550 cm^{-1} 에서의 피크는 서로 수소결합 (hydrogen-

bonded)된 두 개의 인접한 OH-group쌍 때문이며 3650 cm^{-1} 에서의 피크는 복합적으로 수소 결합된 여러개의 인접한 OH-group쌍때문이다. 그리고 3750 cm^{-1} 에서는 단일 OH-group때문에 나타나는 결과이다[14]. 그림 3(b)에서 1200 cm^{-1} 주변에서 투과되는 파장영역은 siloxane (Si-O-Si) 결합구조의 stretching[15]이며, HF 전처리 농도의 증가에 따라 siloxane 결합피크가 증가하였다. 이상과 같이 나타난 결과에서 HF 농도가 증가할수록 초기접합력에 크게 영향을 미치는 OH-group이나 OH-group사이의 수소결합이 증가함을 확인할 수 있다.

그림 4는 고정된 인가하중 (0.1 kg/cm^2)하에서 HF 농도 (1.0, 1.5, 2.0, 2.5 %)에 따른 초기접합된 2" 접합기판들의 접합강도를 나타낸 것이다. HF 농도에 따른 초기접합강도는 HF 농도가 증가할수록 최소 5.3 kgf/cm^2 에서 최대 약 15.5 kgf/cm^2 까지 증가했다. 특히, HF 농도가 2.0 %에서 최대의 초기접합강도를 갖는 것으로 나타났고, 그 이상의 농도에서는 접합강도가 다소 감소하는 결과가 나타났다[16]. 이는 HF 농도증가에 따른 박막표면의 거칠기가 많이 증가되었기 때문으로 사료된다. 초기접합강도가 가장 크게 나타난 희석된 HF (2.0 %)용액에서 인가하중 ($0.1, 0.5, 1.0\text{ kg/cm}^2$)의 변화에 따른 초기접합 강도의 변화를 분석하였다. 초기접합강도는 인가하중의 증가에 따라 조금씩 증가하지만, HF 농도 변화에 따른 접합강도의 변화와 비교해 볼 때, 접합강도는 초기접합시의 인가하중보다는 HF 농도 변화에 크게 의존함을 알 수 있다.

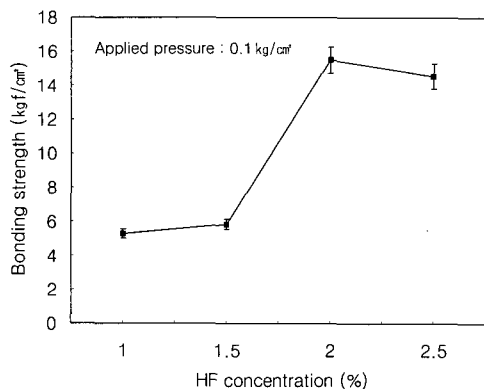
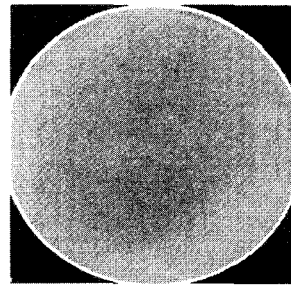
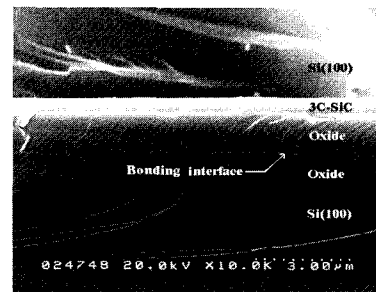


그림 4. HF 전처리 농도에 따른 초기접합력.
Fig. 4. Pre-bonding strength due to HF concentrations.

그림 5(a)는 초기접합된 2" 3C-SiC기판의 접합계면 상태를 평가한 IR 카메라 이미지 사진이다. 접합면 사이에 미접합 부분이 없는 전면이 완벽하게 접합된 상태를 보여준다. 그림 5(b)는 초기접합 강도가 가장 크게 나타난 HF 전처리 용액의 농도 2.0 %와 초기접합시 인가하중 0.1 kg/cm^2 에서 초기접합 후, 1100°C 에서 60분간 N_2 분위기에서 열처리를 수행한 기판의 접합계면 부분을 나타낸 SEM 사진으로 PECVD 절연막 경계면이 열처리를 행하므로 화학적 반응에 의해 접합경계가 존재하지 않는 단일 절연막이 형성됨을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 5. 직접접합된 2" 3C-SiC기판의 (a) IR과 (b) 단면 SEM 이미지.

Fig. 5. (a) IR and (b) cross-sectional SEM images of direct bonded 2" 3C-SiC wafers, respectively.

4. 결론

본 연구에서는 열산화막에 비해 많은 장점을 가지고 있는 PECVD 절연막을 접합 매개층으로 사용하여 2" 3C-SiC기판의 직접접합을 수행하였다.

① HF 농도 (1.0, 1.5, 2.0, 2.5 %)에 따른 초기접합강도 (최소 5.3 kgf/cm²에서 최고 15.5 kgf/cm²)는 HF농도가 높을수록 크게 나타났으며, 인가하중 (0.1, 0.5, 1.0 kg/cm²)에 따른 접합강도의 변화는 작은 하중사이에서는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

② HF 전처리와 DI water에 세정을 병행한 상태에서 건조하지 않고 초기접합을 수행한 결과 상온에서도 충분한 접합력을 나타냈으며 이는 상온에서의 초기접합시 발생하는 다수의 물 분자에 의한 Si-O-Si (siloxane)결합때문이라 사료된다.

③ 초기접합 후, N₂ 분위기에서 열처리 (1100°C, 60 min)를 수행한 결과 접합면의 접합강도가 벌크와 거의 동등하며, void-free하게 나타났다.

이상의 결론으로부터 단결정 3C-SiC 박막 성장 기술과 Si 마이크로머시닝기술을 응용한 2" 3C-SiC기판 접합기술은 극한 환경 M/NEMS 분야에 유용하게 적용될 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] Y. T. Yang, K. L. Ekinici, X. M. H. Huang, L. M. Schiavone, and M. L. Roukes, "Monocryst-alline silicon carbide nanoelectro mechanical systems", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 78, No. 2, p. 165, 2001.
- [2] K. Yasui, K. Asada, and T. Akakane, "Epitaxial growth of 3C-SiC films on Si substrate by triode plasma CVD using dimethylsilane", *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 159, p. 556, 2000.
- [3] J. H. Ko and S. I. Woo, "A study on chemical vapor deposition process for the preparation of the thin SiC films", *J. of KIEEME(in Korean)*, Vol. 4, No. 4, p. 344, 1991.
- [4] M. G. Park, Y. T. Kim, W. S. Choi, D. H. Yoo, and B. Y. Hong, "Investigation of annealing effect for a SiC : H thin films deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition", *J. of KIEEME(in Korean)*, Vol. 13, No. 10, p. 817, 2000.
- [5] C. Serre, A. Romano-Rodriguez, A. Perez-Rodriguez, J. R. Morate, L. Fonseca, M. C. Acero, R. Kogler, and W. Skorupa, " β -SiC on SiO₂ formed by ion implantation and bonding for micromechanics applications", *Sensors & Actuators*, Vol. 74, p. 169, 1999.
- [6] G. Muller and G. Krotz, "SiC as a new sensor material", *The 7th Int. Conf. Solid-State Sensors & Actuators*, p. 948, 1993.
- [7] E. Hugonnard-Bruyere, J. L. Cantin, H. J. Von Bardeleben, F. Letertre, L. Diciocco, and T. Ouisse, "Defect studies in epitaxial SiC-6H layers on insulator(SiCOI)", *Micro-electronic Eng.*, Vol. 48, p. 277, 1999.
- [8] L. Di Ciccio, F. Letertre, Y. Le Tiec, A. M. Papon, C. Jaussaud, and Bruel, "Silicon carbide on insulator formation by the smart-cut process", *Mater. Sci. & Eng.*, Vol. B46, p. 349, 1997.
- [9] M. Wiegand, M. Reiche, U. Gosele, K. Gutjahr, D. Stolze, R. Longwitz, and E. Hiller, "Wafer bonding of silicon wafer covered with various surface layers", *Sensors & Actuators*, Vol. 86, p. 91, 2000.
- [10] G. S. Chung, Y. S. Chung, and S. Nishino, "Physical characteristics of 3C-SiC thin-films grown on Si(100) wafer" *J. of KIEEME(in Korean)*, Vol. 15, No. 11, p. 953, 2002.
- [11] H. S. Lee, S. H. Lim, M. K. Kim, and B. S. Han, "Surface characteristic of silicon-oxide film by CMP polishing", *J. of KIEEME(in Korean)*, Vol. 12, No. 7, p. 481, 1999.
- [12] K. Shibahara, S. Nishino, and H. Matsunami, "Metal-oxide-semiconductor characteristics of chemical vapor deposition cubic-SiC", *Jpn. J. of Appl. Phys.*, Vol. 23, No. 11, p. L862, 1984.
- [13] A. Suzuki, H. Ashida, N. Furui, K. Mameno, and H. Matsunami, "Thermal oxidation of SiC and electrical properties of Al-SiO₂-SiC MOS structure", *Jpn. J. of Appl. Phys.*, Vol. 21, No. 4, p. 579, 1982.
- [14] M. K. Weldon, V. E. Marsico, Y. J. Chabal, D. R. Hamann, and S. B. Christman, "Infrared spectroscopy as a probe or fundamental processes in microelectronics : Silicon wafer cleansing and bonding", *Suf. Sci.*, Vol. 368, p. 163, 1996.
- [15] M. T. Kim, "Deposition kinetics of silicon dioxide from tetraethylorthosilicatie by PE CVD", *Thin Solid Films*, p. 60, 2000.
- [16] A. Berthold, B. Jackoby, and M. J. Vellekoop, "Wafer-to-wafer fusion bonding of oxidized silicon to silicon at low temperatures", *Sensors & Actuators*, Vol. A68, p. 410, 1998.